Universidad de la República
Facultad de Ingeniería

Medida en Campo de Eficiencia de Motores de Inducción

Memoria de proyecto presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República por

Juan Gibert Mangarelli, Fernando González Genta,
Rodrigo Schuster Capnikas

en cumplimiento parcial de los requerimientos
para la obtención del título de
Ingeniero Electricista.

Tutor

Pablo Toscano ..... Universidad de la República
Ernesto Elenter ..... Universidad de la República

Tribunal

Diego Fernández ..... Universidad de la República
Andrés Cardozo ..... Universidad de la República

Montevideo
martes 18 diciembre, 2018

Medida en Campo de Eficiencia de Motores de Inducción, Juan Gibert Mangarelli, Fernando González Genta, Rodrigo Schuster Capnikas.

Esta tesis fue preparada en LaTeX usando la clase iietesis (v1.1).
Contiene un total de 156 páginas.
Compilada el martes 18 diciembre, 2018.
http://iie.fing.edu.uy/

Gurevich, ¿qué hago con esto?

Rodrigo Schuster

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Agradecimientos

Utilizamos este espacio para agradecer a todas las personas que nos acompañaron en este camino. En particular agradecemos a

- Mauricio González por haber invertido muchas horas en MCEMI y todas las recomendaciones brindadas.
- Nicolás Gammarano por haber permitido la invasión y colonización de su oficina durante meses.
- Alex Gurevich por haber contestado preguntas de vital importancia.
- Nicolás Perez y Julián Oreggioni por asesoramiento en implementación de herramientas de sensado y procesamiento de señales.
- Gonzalo Centrangolo del Departamento de Estructuras por facilitar la obtención de galgas extensiométricas en diversas configuraciones.
- Ilan Cohn por todos los materiales prestados que no volverá a ver.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Nano: A mis padres Alvaro y Selene, a mi hermano Mauricio y a mis amigos que siempre empujan para el mismo lado.

Rodri: A mis padres Gerardo y Elika, a mi hermana Romina y a mi abuelo "Meshke".

Juan: a mis padres Jorge y Gabriela, a mis hermanos Santiago y Eloisa, a mi novia Florencia, a mis abuelos, a mis compañeros de proyecto, a mis amigos de siempre, y al club ELF.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Resumen Ejecutivo

Uno de los principales desafíos en las campañas de eficiencia energética es lograr ensayar los motores de inducción en forma rápida y a la vez precisa, minimizando el tiempo de parada de operación. Los parámetros de importancia para medir la eficiencia de un motor son la potencia consumida, la velocidad de giro y el par (torque) ejercido en el eje. De los cuatro, el par es el que plantea mayores dificultades a ser medido, siendo el resto de los parámetros fácilmente medibles con instrumentos convencionales. La forma tradicional de ensayo consiste en llevar los motores a laboratorio para ser ensayados, lo cual implica desacoplar el motor de su carga y transportarlo, proceso que, además de significar tiempo en el que el motor no opera, introduce un factor de riesgo al manipular el motor. El alto costo de este procedimiento lo torna inviable en la práctica, por lo que generalmente las auditorías energéticas no abarcan la eficiencia de motores de inducción.

El trabajo desarrollado ataca esta problemática, buscando alguna alternativa que permita ensayar el motor sin tener que retirarlo de sus condiciones de operación, lo que se conoce como medida en campo. Se realiza un relevamiento de los alternativas existentes en plaza, de las cuales se sopesa sus ventajas y desventajas llegando a la conclusión que existe potencial para desarrollar un método de mejores características, tanto desde la precisión en las medidas como desde lo económico.

El proyecto se centra en estudiar la viabilidad de implementación de un método de medida de par, basado en las deformaciones que experimenta el eje de un motor cuando es sometido a una fuerza de torsión. Se diseña e implementa un dispositivo basado en el uso de galgas extensiométricas, capaz de realizar tales medidas. El prototipo desarrollado se monta sobre el eje del motor y gira solidario al mismo, mientras transmite las lecturas de par mediante Bluetooth al usuario en tiempo real. Se ensaya un motor de 4 HP para evaluar la precisión del sistema y, a la par, se evalúan otros aspectos del método desarrollado tales como la facilidad de implementación y la variables externas que influencian las medidas.

Los resultados obtenidos muestran su potencial de aplicación. En el rango de interés se obtienen errores en las medidas de par inferiores a 10 %, en base a los cuales se identifican los factores de mayor influencia en las medidas y los aspectos con potencial de mejora, cuyo desarrollo significaría sustanciales mejoras en la precisión del método.

Por último se sugiere una modificación del método utilizado, que implica cali-

bración del dispositivo sobre cada motor ensayado. Esta alternativa mejora significativamente los resultados, llevando al error en la medida de par a valores menores a 2 %.

Lograr un dispositivo que permita rápidamente medir en campo la eficiencia energética de motores de inducción, y con un error menor al 2 % (idealmente menor al 1 %), permitiría que las auditorías energéticas abarquen la detección de motores ineficientes. Por tanto este dispositivo tendría el potencial de transformarse en un elemento indispensable en toda auditoría energética, incrementando los ahorros de energía a obtener a partir de esta técnica.

Tabla de contenidos

Agradecimientos III

Resumen VII

1. Introducción 1

2. Motivación del proyecto 5
2.1. El camino hacia la electrificación en la industria y el transporte . . 5
2.2. Eficiencia - Ahorro energético y beneficio ambiental 6
2.3. El parque motor uruguayo 8
2.4. Caso ejemplo 11
2.5. Mecanismo tradicional de auditoría energética en motores 12

3. Máquina de inducción 15
3.1. Principio de funcionamiento 15
3.2. Modelo del motor de inducción 16
3.2.1. Balance de pérdidas y definición de rendimiento 19

4. La norma IEEE Std. 112 21
4.1. Descripción 21
4.1.1. Temperatura 21
4.1.2. Variables a medir 22
4.1.3. Pérdidas 22
4.1.4. Eficiencia 23
4.2. Métodos para medir la eficiencia 23

5. Métodos para obtención de eficiencia in-situ 25
5.1. Algoritmo genético 25
5.1.1. Aplicación del algoritmo genético 26
5.1.2. Caso de aplicación 29
5.2. Equipamiento en plaza 29
5.3. La necesidad de una alternativa 30

6. Teoría de deformaciones de un eje y método Strain Gauge 33
6.1. Deformación de un eje sometido a un par 33
6.2. Teoría de la galga extensiométrica y puente de Wheatstone 38

6.2.1. Principio de funcionamiento de la galga extensiométrica . . 38
6.2.2. Puente de Wheatstone 39
6.2.3. Sensibilidad del puente 40
6.2.4. Constante característica del puente 41
6.2.5. Constante de calibración 42
6.3. Método de la Galga Extensiométrica 42
6.3.1. Medida de par mediante puente de galgas 43
6.3.2. Compensación de errores por fuerzas extrañas aplicadas al eje 43

7. Diseño de sistema de medida 45
7.1. Requerimientos 45
7.2. Esquema general de solución desarrollada 47
7.3. Elección de componentes 48
7.4. Esquema de conexionado 51
7.5. Verificaciones al diseño 52
7.6. Proceso de medida 54
7.6.1. Medida del par 54
7.6.2. Estudio de incertidumbre 56

8. Implementación 59
8.1. Requerimientos de implementación 59
8.2. Evolución del proceso de implementación 60
8.2.1. Etapa inicial - Caracterización de principales componentes . 60
8.2.2. Segunda etapa - Trabajos sobre Protoboard 60
8.2.3. Etapa final - Implementación en PCB y montaje sobre motor 62
8.3. Diseño PCB 62
8.4. Programación de amplificador AD8556 65
8.5. Programación de Arduino MKR1000 67
8.6. Adquisición de datos 69
8.7. Confeccionamiento del puente de Wheatstone sobre eje 69
8.7.1. Acondicionamiento del eje y pegado de galgas 69
8.7.2. Armado de puente de Wheatstone 71

9. Ensayos estáticos 73
9.1. Banco de pruebas estático 74
9.1.1. Diseño 74
9.2. Preparación de los ensayos 77
9.3. Ensayo 1 - Respuesta de las galgas 78
9.4. Ensayo 2 - Ensayo a 5kg y caracterización de galgas Phidgets . . . 80
9.5. Ensayo 3 - Calibración de ganancia de amplificador 81
9.6. Ensayo 4 - Ensayo de sistema montado en Protoboard 83
9.7. Ensayo 5 - Ensayo de PCB bajo 10Nm (5kg) 85

10.Ensayos sobre motor de inducción de 4HP **87**
10.1. Circuito de ensayo 88
10.2. Ensayo de eficiencia según norma 91
10.2.1. Manual de aplicación de la norma IEEE Std. 112 91
10.2.2. Estudio de incertidumbre 94
10.2.3. Resultados 99
10.2.4. Análisis de resultados 102
10.3. Ensayo de linealidad de la respuesta 104

11.Evaluación de método desarrollado **109**
11.1. Principales reflexiones 109
11.2. Falencias y debilidades identificadas 110
11.3. Potencial de mejora 111
11.4. Método con calibración previa - ventajas y consideraciones 112

12.Conclusiones **115**

13.Anexos **117**
13.1. Capítulo 2 - Antigüedad de motores en estudio 117
13.2. Ensayo de ganancia del AD8556 118
13.3. Ensayo de eficiencia 119
13.3.1. Eficiencia según norma 120
13.3.2. Medida directa de eficiencia 130

Referencias **135**

Índice de tablas **137**

Índice de figuras **139**

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 1

Introducción

El presente trabajo fue desarrollado en cumplimiento de los requerimientos para la obtención de la aprobación del Proyecto de Final de Carrera, asignatura enmarcada en la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República.

El tiempo de ejecución del proyecto fue de un año calendario, comenzando el 30 de setiembre de 2017 y finalizando en la misma fecha del año 2018. Fue llevado a cabo por tres estudiantes, Juan Gibert, Fernando González y Rodrigo Schuster y tutoreado por los docentes Ernesto Elenter y Pablo Toscano, miembros del cuerpo docente del departamento de Potencia del Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Facultad.

El trabajo llevado a cabo atacó la problemática de la medida en campo de eficiencia de motores de inducción, buscando diseñar, implementar y ensayar un sistema de medida destinado para tal fin. El proyecto se estructuró en base a ciertos lineamientos generales u objetivos, los cuales se presentan a continuación.

Objetivos del proyecto

- Comprender los factores que afectan a la eficiencia de los Motores de Inducción desde el punto de vista teórico y ponderar su importancia a nivel energético del país.

- Estudiar la normalización existente en lo referente a medidas de eficiencia en Motores de Inducción, conociendo los métodos de laboratorio y cálculos necesarios para implementarla.

- Estudiar los métodos de medida de par que no se basen en utilizar una máquina auxiliar, pasibles de ser aplicados en medida en campo del par. Analizar las tecnologías desde un punto de vista integral: complejidad de implementación, precisión, costo.

- En base a los puntos anteriores, desarrollar una propuesta de un sistema completo para medir la eficiencia en forma *online*.
- Construir un prototipo o adquirir sensores u otro equipamiento especificado, evaluando su desempeño en condiciones de laboratorio en el IIE (comparando los resultados sobre un motor montado en una dinamométrica).

En el curso del trabajo desarrollado, el último objetivo se convirtió en el punto central y de mayor importancia, consecuentemente siendo el que abarcó significativamente mayor tiempo de desarrollo.

Atendiendo a los objetivos planteados fue que se elaboró el presente documento. A modo de introducción se resumen a continuación los contenidos de los capítulos que lo componen.

Resumen por capítulo

Capítulo 1 Introducción: Introducción del proyecto.

Capítulo 2 Motivación del proyecto: Introducción a la problemática abordada, presentando datos de experiencias en distintas partes del mundo y casos ejemplificantes.

Capítulo 3 Máquina de inducción: Presentación del modelado eléctrico del motor de inducción, máquina objeto de estudio del proyecto. Se introduce también la definición de eficiencia en motores y los factores que la afectan.

Capítulo 4 La norma IEEE Std. 112: Este capítulo detalla la norma de referencia para las medidas de eficiencia en motores de inducción. Se describe su principio de aplicación y los factores de correción empleados.

Capítulo 5 Métodos para obtención de eficiencia in-situ: En este capítulo se presentan los métodos encontrados en plaza fruto de la investigación llevada a cabo. Se pone en consideración sus aspectos más relevantes, evaluando ventajas y desventajas de su aplicación.

Capítulo 6 Teoría de deformaciones de un eje y método Strain Gauge: Explicación de la teoría de deformaciones sobre la cual se basa el sistema desarrollado en el proyecto. Se introduce el principio de funcionamiento de un método que permita medir estas alteraciones en el material.

Capítulo 7 Diseño de sistema de medida: En este capítulo se presentan los aspectos de diseño básicos para la construcción del dispositivo y se presentan los componentes seleccionados para integrarlo. Además, se explica el mecanismo de medida, las lecturas que se toman y su correlación con la medidas de par.

Capítulo 8 Implementación: Proceso de construcción y validación del dispositivo diseñado, desde la elección de los componentes hasta sus ensayos finales previo a ser montado sobre el motor a ensayar.

Capítulo 9 Ensayos estáticos: Capítulo que complementa el anterior, presentando los resultados de los ensayos estáticos realizados al dispositivo para su caracterización y aprobación.

Capítulo 10 Ensayos sobre motor de inducción de 4HP: En este capítulo se presentan los resultados de los ensayos llevados a cabo sobre el motor. Un primer ensayo de acuerdo a la norma, contrastando los resultados con los obtenidos mediante un método tradicional de medida y un segundo ensayo de caracterización general de la medida, evaluando la capacidad de calibración del instrumento.

Capítulo 11 Evaluación del método desarrollado: Capítulo que resume las principales reflexiones respecto al trabajo desarrollado y al desempeño del dispositivo confeccionado.

Capítulo 12 Conclusiones: Capítulo de cierre del documento donde se evalúa el resultado final del proyecto en relación a los objetivos iniciales planteados.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 2

Motivación del proyecto

2.1. El camino hacia la electrificación en la industria y el transporte

La actualidad está marcada por la inexorable existencia de un fenómeno de transición energética. El cambio no atañe mayormente a la forma en que la energía es utilizada, sino que reside en las fuentes energéticas que el hombre emplea para sus distintas actividades. Los combustibles fósiles, pilares del modelo de sociedad que se impuso desde la revolución industrial, comienzan a dejar paso a formas más limpias de utilización de energía. A la cabeza de esta transición se encuentran las llamadas energías renovables, muchas de ellas formas de aprovechamiento de los recursos ya conocidas desde hace siglos como la energía eólica, la hidráulica o la biomasa pero nunca con la proyección de uso masivo que se les atribuye hoy en día. Dentro del mismo fenómeno, acompaña la proliferación de estrategias de mejoramientos de los sistemas actuales de almacenamiento de energía, como el desarrollo tecnológico de las baterías o de nuevos sistemas basados en hidrógeno.

El rumbo es claro, la tendencia apunta a sociedades donde la energía eléctrica será la forma de energía predominante. El concepto de forma de energía hace referencia a la manera en que la energía llega y es aprovechada por el consumidor final. En 2017 el sector eléctrico representó el 26,5 % del consumo final de energía en la Unión Europea [1]. Se espera que este porcentaje aumente considerablemente en los próximos 30 años, ubicándose al término de dicho plazo en el entorno de 60-70 %.

Dentro de este contexto dos sectores de importancia comienzan a presentar los primeros indicios del cambio radical que se avecina. La industria y el transporte, ambos históricamente basados en la energía obtenida de los combustibles fósiles, sufrirán transformaciones de base en las próximas décadas. El cambio en el transporte está siendo impulsado por China y sus políticas que apuntan a eliminar de sus calles automóviles impulsados por combustibles tradicionales. En China los buses eléctricos ya representaban en 2017 el 17 % de la totalidad de la flota y más de

la mitad de los vehículos a dos ruedas eran eléctricos, totalizando 223 millones de unidades [1]. Esta revolución china ya resulta perceptible en otras partes del mundo donde comienzan a aparecer la opción del vehículo eléctrico, cuyo precio global de utilización ya compite con el del vehículo a motor de combustión. Numerosos Estados se suman a la corriente y comienzan a imponer sus propias reglamentaciones. Ya sea limitando la producción e importación de vehículos a combustión, como potenciando las adquisiciones de vehículos eléctricos mediante exoneraciones impositivas de distinta índole, el objetivo apunta a acelerar la transición en curso.

Menos perceptible al ciudadano común pero de similar importancia es el cambio que sufrirá la industria en los tiempos venideros. La energía eléctrica ha sido tradicionalmente utilizada por la industria para diversos procesos, pero no es la única ni tampoco la dominante. No obstante, las mejoras en la infraestructura de redes, que hace posible el transporte de mayores cantidades de potencia así como la mejora de la calidad del servicio de los consumidores, vuelven cada vez más atractiva para los usuarios la transición hacia una matriz energética más electrificada. A modo de ejemplo, de acuerdo con un estudio llevado a cabo por EMSA (Electric Motor System Annex) [1], se proyecta que en el grupo de países denominado EU-28 el consumo anual energético en el sector industrial pasará de 650 TWh en 2016 a 1200TWh en 2040. Esto significa casi la duplicación del consumo en 25 años.

2.2. Eficiencia - Ahorro energético y beneficio ambiental

Ahorro energético

Esta expansión del sector eléctrico introduce la necesidad de asegurar el equilibrio entre la energía producida y la energía consumida. Actualmente, se pone el foco en el desarrollo de una infraestructura de generación eléctrica de carácter renovable, atendiendo a la obligación de abastecer la creciente demanda del sector y al mismo tiempo generar la transición energética ya mencionada. En cierta forma, los avances tecnológicos actuales se centran entorno a mejorar los sistemas de generación energética, y se le otorga menor importancia a la forma en que la energía es consumida.

No obstante, el consumo energético debe ser tratado con la misma atención. El descuido de la forma de consumir energía puede llevar a un sobre dimensionamiento desmedido de los centros de generación y, consecuentemente, a malgastar los recursos disponibles. De hecho actualmente, en aquellos países donde la infraestructura de redes no es lo suficientemente robusta, cierta cantidad de los problemas (cortes programados de energía, salidas de servicio de líneas o transformadores) podrían evitarse de tomarse los recaudos correspondientes para lograr un consumo energético más racional.

Desde esa perspectiva es de donde surge el concepto de la utilización eficiente de la energía. La eficiencia supone la ejecución de un proceso o tarea empleando la mínima cantidad de recursos necesarios. Aplicado a la utilización de la energía, puede definirse como la relación entre la cantidad de energía consumida a la entrada de una máquina y la energía realmente utilizada por la misma para la acción que debe desarrollar. Dicho concepto puede extenderse a un sistema, ya sea tanto una industria en particular como un sistema eléctrico de un país entero, como la relación entre la energía generada y la energía realmente utilizada para los distintos fines dentro del sistema.

Resultaría contradictorio acumular esfuerzos en aumentar la capacidad generadora de un sistema, y descuidar la forma en que dicha energía es procesada por sus usuarios. En un contexto donde la energía consumida por el sector industrial se irá tornando cada vez más hacia la energía eléctrica, avanzar hacia la utilización de motores más eficientes es tan importante como mejorar los sistemas de generación de energía.

La norma IEC 60034-30-1 (2014) clasifica los motores eléctricos en seis categorías, IE1 (Eficiencia Estándar) - IE5 (Eficiencia Ultra Premium) más una sexta por debajo de IE1, según sus curvas de eficiencia en función de la potencia desarrollada. Con base en esta categorización es que los Estados definen regulaciones sobre los niveles de eficiencia mínimos aceptables a ser comercializados. A modo de ejemplo, la Unión Europea a través de regulaciones MEPS (Estándar de Mínima Eficiencia Energética por sus siglas en ingles) impone niveles mínimos de eficiencia a los nuevos motores vendidos a partir de la entrada en vigencia de la ley. La regulación 640/2009 establece desde Junio 2011 como mínima la categoría IE2 a todos los motores trifásicos de inducción de jaula de ardilla que funcionan en tensión igual o menor a 1000V. En caso de aquellos motores de potencia entre 7,5kW y 375kW la categoría mínima es IE3 (este rango fue extendido a 0,75kW-375kW en 2017). Se estima que esto conduzca a un ahorro de 65,7TWh por año para el período 2010-2020 [1]. Esto equivale al funcionamiento durante este período de 18750MW de generación eólica (a factor de servicio 40 %) o 6250 aerogeneradores de 3MW.

Las medidas no se detienen en este punto, sino que se proyectan requerimientos más estrictos a futuro. Por ejemplo, de acuerdo con [1] a motores de pequeño tamaño (P<750 W) monofásicos y trifásicos podría pasar a requerirse el mínimo de IE2 así como para motores de gran porte (375-1000kW) de baja y media tensión podría requerirse el mínimo de IE3. Se estima que estas medidas contribuirían con un ahorro adicional de 22,3TWh por año hasta 2030.

Beneficio ambiental

Pocos son aquellos que hoy en día reniegan del impacto que la sociedad actual, y en particular las formas tradicionales de generación energética, tienen sobre el medio ambiente. Acuerdos como el Protocolo de Kioto en 1997 o el Acuerdo de París de 2016 son consecuencia de la concientización de los Estados sobre la necesidad de migrar hacia una forma sustentable de modelo socio-económico para frenar dicho impacto.

La apuesta a las energías renovables, a los bio-combustibles, a la electrificación del transporte y otras medidas relacionadas con el desarrollo sustentable apuntan en la misma dirección. Las mejoras en eficiencia energética tienen también su lugar en la búsqueda de este objetivo. En aquellos países donde la matriz energética continua siendo fuertemente dependiente de los combustibles fósiles, lograr una reducción del consumo energético mediante políticas de eficiencia energética puede llegar a tener un impacto muy significativo en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Aún en aquellos países que ya han encaminado la transición energética las políticas de eficiencia energética juegan un papel muy importante. Volviendo al ejemplo de la Unión Europea citado previamente, se espera que las medidas surgidas de la regulación 640/2009 permitan evitar que 29,37 millones de toneladas anuales de CO_2 sean emitidas a la atmósfera, tomando como referencia la intensidad de inyecciones de carbono en la generación eléctrica de la Unión Europea en 2013, unos 447 gCO_{2eq}/kWh [1]. Tomando los datos actuales de emisiones promedio por vehículo ($160gCO_2/km$) [2], este ahorro equivale a retirar de circulación unos 12,24 millones de vehículos. Para dimensionar el impacto que esto supone, basta con notar que la cantidad equivale a la totalidad de vehículos que había en Argentina en el año 2016 [3].

2.3. El parque motor uruguayo

Luego de haber brindado un panorama resumido de la situación energética global y de la importancia de las políticas de eficiencia energética (aplicadas al rubro eléctrico), resta analizar la actualidad del Uruguay en este contexto.

Para ello se recurre al trabajo de alcance nacional “Estudios de base para el diseño de estrategias y políticas energéticas: relevamiento de consumos de energía sectoriales en términos de energía útil a nivel nacional” llevado a cabo por la Dirección Nacional de Energía (MIEM-DNE) en el año 2006. Dado que el actual Proyecto se centra en eficiencia en motores de inducción orientado específicamente a la industria, se pone el foco en el capítulo “Informe del sector industrial” [4]. Resumidamente, dicho trabajo consistió en una campaña de relevamiento a nivel nacional orientada a los consumos de energía y sus diversos usos, con el objetivo de obtener un panorama general de la distribución del consumo energético del país

por fuente energética, sector y actividad, y los rendimientos obtenidos en cada categoría.

Desafortunadamente no se cuenta con datos más actualizados con esta magnitud de alcance. Un nuevo estudio está siendo llevado a cabo a la fecha en que se emite el presente documento, pero aún no han sido cerrados los resultados. No obstante, a pesar de la antigüedad del estudio resulta útil para caracterizar cualitativamente la situación del país en la actualidad.

En 2006 el consumo de energía eléctrica en el sector industrial uruguayo representaba el 26,5 % del consumo total de energía neta, siendo la segunda fuente de mayor importancia sólo superada por el consumo de leña (27 % del consumo). Casi la totalidad del consumo de energía eléctrica en el país se debe a motores eléctricos (en su mayoría de inducción) y se concentra en dos áreas: Fuerza Motriz y Frío de Proceso. La primera comprende motores eléctricos de inducción, motores de combustión interna o turbinas de gas o vapor incorporados en equipos como molinos, envasadoras, correas transportadoras, bombas, compresores de aire o motores de uso genérico. La segunda abarca principalmente compresores de refrigeración destinados a la conservación de alimentos. Ambas áreas comprenden el 85,4 % del consumo global de energía eléctrica a nivel industrial, llegando a un nivel de penetración del 99,7 % dentro de la Fuerza Motriz (el restante 0,3 % corresponde a leña y residuos de biomasa usados en turbinas de vapor a contrapresión de cogeneración). En términos de consumo energético global la Fuerza Motriz representa el 18 % del consumo energético del sector industrial y el Frío de Proceso el 5 %.

Un aspecto significativo del análisis llevado a cabo es el rendimiento de las diversas fuentes de energía. Respecto a este parámetro, la Fuerza Motriz tiene los mejores indicadores de rendimiento, potenciada por la considerable superioridad del motor eléctrico frente a los motores de combustión y demás procesos en términos de eficiencia. El rendimiento promedio en Fuerza Motriz es de 87,3 %, con un pico de 92,4 % en el sector de la producción de cemento y metálicas básicas y un piso de 84,5 % en el sector catalogado como Otras Industrias Alimenticias. No sucede lo mismo en los procesos asociados a Frío de Proceso donde el rendimiento promedio se ubica en tan solo 57,3 %, consecuencia del bajo rendimiento de los compresores asociados a los motores eléctricos que los arrastran. Globalmente, el consumo de energía eléctrica en el sector industrial presenta un rendimiento general de 75,9 %.

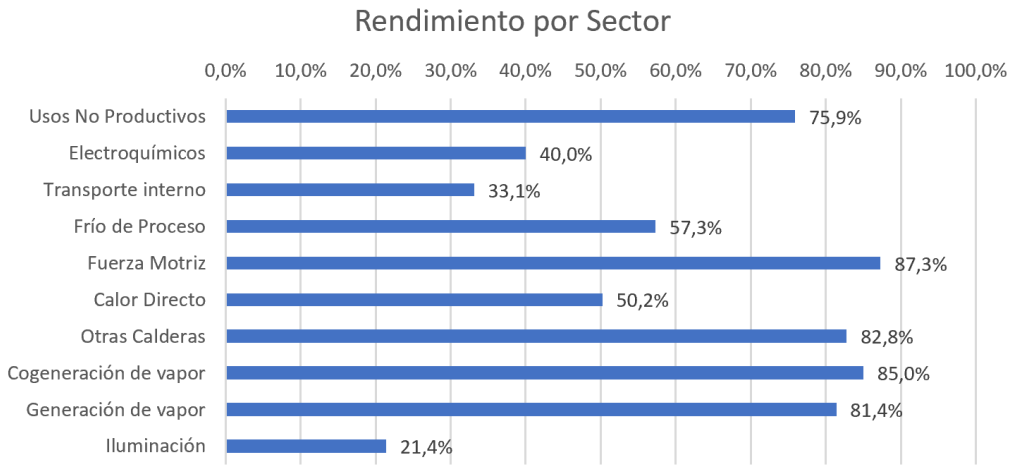


Figura 2.1: Rendimientos energéticos por sector

Ahondando en el sector mayoritario de consumo de energía eléctrica que es la Fuerza Motriz, el estudio relevó la antigüedad de los motores en actividad dentro del sector industrial. En particular, se comprobó que el 38 % de los motores de la muestra tenía entre 6 y 15 años de antigüedad. Por otro lado, para un porcentaje similar de motores no se pudo comprobar la antigüedad. Es razonable afirmar que cuanto más se prolonga el período de uso de un motor más decae su rendimiento, sea por el desgaste que sufren sus componentes como por procesos de rebobinado que hayan tenido que ser realizados en el correr de su funcionamiento. Siendo que más del 18 % presentaban más de 16 años de uso y que a un 35 % no se le pudo comprobar la antigüedad, es de orden considerar la posibilidad de que un proceso de reemplazo de dichos motores por otros de mayor eficiencia pudiera traer mejoras significativas al rendimiento energético del sector. Los datos recabados se presentan en formato tabla en el Anexo.

Siguiendo esta línea, el estudio llevó a cabo una estimación del potencial ahorro que supondría un recambio de los motores de la industria por motores con rendimiento óptimo según la aplicación. El concepto de rendimiento óptimo en motores eléctricos fue tomado de la norma IEC para motores EFF1 (equivalente a la clase IE2 mencionada anteriormente) y depende de la potencia P de cada motor.

$$\eta_k^{optimo} = 2,49 \times \ln P + 90,65 \tag{2.1}$$

En el caso del Frío de Proceso se tuvo también en consideración el compresor que es arrastrado por el motor eléctrico, y su rendimiento óptimo se definió en función del rendimiento óptimo del motor eléctrico correspondiente siguiendo los lineamientos descritos en [5].

$$\eta_k^{optimo} = \eta_k^{EFF1} \times k \tag{2.2}$$

Con k variando según el tipo de compresor:

- Compresores alternativos, tornillo y scroll: $k = 0,75$
- Compresores rotatorios : $k = 0,80$
- Compresores centrífugos: $k = 0,83$

Siguiendo estas hipótesis, se estimó un potencial ahorro en el sector industrial de 593 MWh (5,1 kTep) para el sector de Fuerza Motriz y 663 MWh (5,7 kTep) para el sector Frío de Proceso. Ambos montos representan respectivamente el 5,0 % y 20,7 % del consumo total de energía de cada uso energético.

Se observa por tanto que existe potencial de mejora del rendimiento del parque motor en el país. Es altamente probable que en la actualidad el potencial sea aún mayor que diez años atrás, si se apunta a una sustitución masiva de los motores actuales por motores de alto rendimiento (en aquellos casos donde dicha sustitución sea justificable). Sin embargo, dicha sustitución solo puede suceder si a los propietarios de los motores les es económicamente atractivo realizar el cambio por otro de mayor rendimiento. En la sección siguiente se verá un ejemplo de este caso, donde se mostrará la relación entre inversión y ahorro energético, así como el período de repago de dicha inversión.

2.4. Caso ejemplo

Con el objetivo de evaluar la rentabilidad de una inversión en eficiencia energética, en particular orientada al reemplazo de motores operativos por nuevos de mayor eficiencia, fueron evaluados tres casos. Se consideraron motores de distintos tamaños a fin de evaluar los resultados en un rango de inversiones. Se hizo uso de la herramienta de cálculo de público acceso disponible en la página web de la empresa WEG ([6]). Fueron calculadas varias magnitudes, tales como ahorro energético, reducción de emisiones de CO_2 y el retorno de la inversión.

Se buscó asignar a cada motor valores realistas de tiempo promedio de operación. Es así que al motor de mayor tamaño (300 kW) se le consideró una operación diaria de dos turnos (16 horas) durante los 365 días del año. Al motor de mediano tamaño se le consideraron menos horas de operación (12) y funcionamiento 6 de 7 días a la semana. Por último, al motor de menor tamaño se supuso una operación de 8 horas díarias y funcionamiento 5 de 7 días a la semana.

En todos los casos se analizó el reemplazo del motor bajo operación por motores de alta eficiencia (IE2), en baja tensión, con dos pares de polos. El costo del nuevo motor se tomó de datos verídicos de frabricantes, por lo que se especifica la marca de cada uno. En cuanto a la eficiencia del motor en operación se estimaron valores asumiendo un cierto nivel de degradación respecto a un motor recién fabricado. Los datos de eficiencia del motor de reemplazo son tomados de valores referenciales de la página web de WEG, correspondiente a modelos reales de la

empresa. El análisis se destaca en la tabla 2.1.

El costo promedio del kWh (0.127 U$S) en el sector industrial uruguayo se estimó de acuerdo a los datos recabados por la consultora SEG.

Potencia motor	**300kW**	**75kW**	**5.5kW**
Horas diarias de operación	16	12	8
Días anuales de operación	365	313	261
Motor nuevo	Alren	Alren	SIEMENS
Costo (U$S)	8550	2435	480
Eficiencia (%)	95.6	94.3	88
Eficiencia (%) motor existente	93.5	91	83
Ahorro energético (kWh/año)	43.218,85	10.832,97	786,14
Ahorro económico ($/año)	5.488,79	1.375,79	99,84
Tiempo retorno inversión (años)	**1,56**	**1,78**	**4,81**
Reducción de CO_2 (kg/año)	21.782,30	5.459,82	396,22

Tabla 2.1: Análisis de la inversión al comprar un nuevo motor

Si bien son valores estimativos, la tabla 2.1 permite observar que a medida que aumenta la potencia más importante es el ahorro que se alcanza. En todos los casos, el tiempo de retorno de la inversión tiene valores interesantes a nivel empresarial (2 a 3 años).

El concepto anterior no parece aplicable para el motor de menor tamaño, aunque su retorno de la inversión continua siendo interesante (menor a 5 años). Además, es probable que en una industria promedio existan motores de pequeño porte en forma masiva, y encarar un reemplazo global de lo mismos posibilitaría abaratar los costos unitarios de adquisición por concepto de cantidad comprada. Esto mejoraría el tiempo de retorno de la inversión, haciéndola aún más interesante.

En el caso del motor de mayor porte, es interesante ver que al variar solamente un 2 % de la eficiencia el retorno de la inversión se da en un año y medio, lo cual en una industria es muy poco tiempo, y el gasto anual se reduce de manera considerable. Para estos casos, un estudio de la eficiencia puede conllevar un gran ahorro económico. Algo similar sucede en el caso de 75 kW, donde la potencia es bastante menor, pero con una diferencia pequeña de eficiencia, el retorno de inversión es rápido y el ahorro importante.

2.5. Mecanismo tradicional de auditoría energética en motores

Tal como se pudo apreciar en la sección anterior, dada la significativa diferencia entre los costos de adquisición y los costos energéticos a lo largo de la vida útil de

los motores, es que en muchos casos la opción de reemplazar un motor operativo por uno de mayor eficiencia presenta períodos de repago muy atractivos para el sector industrial. Para poder evaluar el resultado económico de dicha operación se deben conocer diversos parámetros como: eficiencia del motor anterior, eficiencia del motor nuevo, tiempo promedio de operación diario, condiciones de operación (carga) y ambiente en el cual opera. Las condiciones de operación son conocidas por quien posee el motor, en tanto que la eficiencia del nuevo motor será justamente uno de los parámetros de elección. Sin embargo, la eficiencia del motor anterior puede presentar serias dificultades para ser evaluada.

Si el motor en cuestión es uno de gran porte (mayor a 300 kW) conocer la eficiencia de uso del motor no presenta generalmente grandes dificultades ya que habitualmente estos cuentan con sensores ya incorporados de fábrica para monitorear su rendimiento. Por el contrario, en motores de pequeño (menores a 50kW) y mediano porte obtener un valor de eficiencia puede llegar a representar un problema complejo dado que usualmente estos no cuentan con sensores dedicados a su monitoreo. En muchos casos la placa de datos es la mejor estimación pero la misma presenta valores de rendimiento definidos en condiciones específicas, condiciones ambientales y/o de carga en las cuales generalmente el motor no estará operando. La adaptación de estos datos a las condiciones de uso de cada motor no es un asunto trivial y no representa un método riguroso de estimación. En otros casos, puede que ni siquiera se tenga acceso a los datos garantizados por el fabricante, como generalmente sucede con motores muy antiguos que aún están en operación o como posiblemente sucedió con los motores relevados en [4] cuya antigüedad no pudo conocerse. Cabe destacar que motores antiguos o con varios años de uso pueden tener una eficiencia distinta a la original por el desgaste sufrido o por haber sido rebobinados.

Es por esta razón que en los procesos de auditorías energéticas en una industria sería necesario ensayar los motores en plaza para medir la eficiencia de los mismos y poder así evaluar si existe un beneficio en su reemplazo. En ausencia de un método práctico para realizar estas medidas en sitio, normalmente los motores deben ser desmontados y llevados a laboratorio para su ensayo con sistemas como por ejemplo una generatriz dinamométrica acoplada a sus ejes. Ese proceso, si bien estandarizado y de global aceptación, presenta los siguientes inconvenientes:

- Implica el desacople de los motores de sus cargas. Esto supone estar manipulando la instalación del cliente de la auditoría energética, con el riesgo que recae sobre el auditor.
- Implica costos de transporte de los motores y costos de contratación de laboratorio para los ensayos a efectuar.
- Las condiciones en las que se ejecuta el ensayo en laboratorio, si bien normalizadas, no necesariamente se corresponden con las condiciones en las cuales trabaja cada motor (termperatura, humedad, polvo, etc.)

- Deja al cliente sin la posibilidad de emplear el motor durante el tiempo que este es desmontado, trasladado y ensayado.

Dada la complejidad de la operativa y los altos costos involucrados, las auditorías energéticas omiten evaluar la eficiencia de los motores de inducción, o en el mejor de los casos lo hacen en base a datos de catálogo y no a mediciones de desempeño real. Como fue especificado anteriormente, en motores de cierta antigüedad este método puede dar lugar a diferencias significativas en relación a la operación real del motor.

Llevando esto a un proceso más masivo como lo es una campaña de eficiencia energética, es claro que un gran beneficio podría lograrse de contar con un método para medir en campo la eficiencia de los motores de inducción.

En las secciones anteriores se presentó la transición energética que ya ha comenzado y el impacto que esta tendrá sobre las fuentes de energía que se emplean en la industria. En particular, esta transición traerá aparejada un incremento significativo de lo motores eléctricos, desplazando a los motores de combustión. En este contexto, cobrará una importancia significativamente mayor las campañas de eficiencia energética dedicadas a auditar los motores eléctricos empleados en la industria. La motivación del presente proyecto reside en investigar, diseñar y construir un sistema que facilite la realización de ensayos en motores de inducción en campo (in-situ) sin necesidad de desacoplarlos de su carga y con una precisión de medida adecuada.

Capítulo 3

Máquina de inducción

En este capítulo se presenta el modelado eléctrico de la máquina de inducción, objeto de estudio del trabajo desarrollado. Los conceptos de este capítulo fueron desarrollados en base a los lineamientos presentados en [7].

Ya sea por su simpleza constructiva o por su robustez, las máquinas de inducción o asíncronas son las más utilizadas a nivel industrial. Creada por Galileo Ferraris en Italia y Nikola Tesla (considerado el inventor, ya que sus máquinas eran más prácticas) en Estados Unidos, ambos en el año 1888, aún en la actualidad continúan siendo una opción muy eficiente y de poco mantenimiento.

La maquina de inducción cuenta con dos devanados, siendo su característica distintiva que en uno de ellos (rotor) la corriente se produce por el fenómeno de inducción (debido a la fuerza electromotriz que induce el flujo del otro devanado, (denominado estator) y no con una alimentación directa. Por este motivo es que se la conoce como *máquina de inducción*. El nombre de *máquina asíncrona*, se debe a que la velocidad de giro del rotor no es igual a la que impone la frecuencia de la red.

A continuación, se describe una noción básica del funcionamiento de la máquina de inducción y se explica el origen de los componentes que conforman su modelo estrella equivalente. Se realiza un estudio detallado del balance de las pérdidas y se define el concepto de eficiencia.

3.1. Principio de funcionamiento

La máquina de inducción se compone, a grandes rasgos, por un estator y un rotor (ambos devanados). El devanado del estator se constituye de tres arrollamientos desfasados constructivamente 120^o y de $2p$ polos (es decir p pares de polos) alimentados con corrientes sinusoidales también desfasadas 120^o en el tiempo. El hecho de tener una máquina de p pares de polos supone que una variación de 360^o de ángulo eléctrico en el tiempo corresponde a una variación de ángulo mecánico de $360^o/p$, por lo tanto, para una máquina de $2p$ polos, la velocidad de giro del fasor espacial de fuerza magneto motriz será:

$$w_m = \frac{w}{p} \tag{3.1}$$

Donde, la velocidad de giro de la f.m.m. en rpm es $w_m = 2\pi\frac{n}{60}$. Si la velocidad de giro del campo generado por los devanados se define como $w = 2\pi f$, siendo f la frecuencia de la red eléctrica se tiene entonces:

$$n = \frac{60f}{p} \tag{3.2}$$

Dicha expresión de velocidad es llamada *velocidad de sincronismo* del campo giratorio.

Hasta el momento se tiene un estator con tres arrollamientos al cual se le inyectan corrientes sinusoidales defasadas 120^o que generan un campo giratorio en el rotor. De acuerdo a la ley de Faraday, la f.e.m. inducida en un conductor de longitud L que se mueve a velocidad v dentro de un campo B tiene un valor:

$$e = \left(\vec{v} \times \vec{B}\right).L \tag{3.3}$$

Dicha f.e.m. genera una circulación de corriente en los conductores del rotor, que a su vez genera un segundo campo magnético giratorio. La atracción entre ambos campos magnéticos es lo que produce el par de giro en el rotor, el cual en el arranque acelera hasta una velocidad tal que la velocidad de giro de campo estatórico se iguala a la velocidad de giro relativa del campo rotórico respecto al estator.

A medida que la velocidad de giro del motor se acerca a la de sincronismo, menor será la atracción entre los campos, produciendo una disminución de par entregado.

Se define el deslizamiento como:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \tag{3.4}$$

El deslizamiento es una magnitud que brinda una noción de qué tan cerca de la velocidad de sincronismo opera la máquina. Es lo que determina el punto de operación de la máquina una vez conocido el modelo. Sus valores típicos a plena carga se encuentran cercanos a 5 %.

3.2. Modelo del motor de inducción

Para explicar el comportamiento de la máquina se puede analizar el modelo de régimen permanente de la figura 3.1. En él se muestran los parámetros que fundamentan la mayor parte de las pérdidas de la máquina.

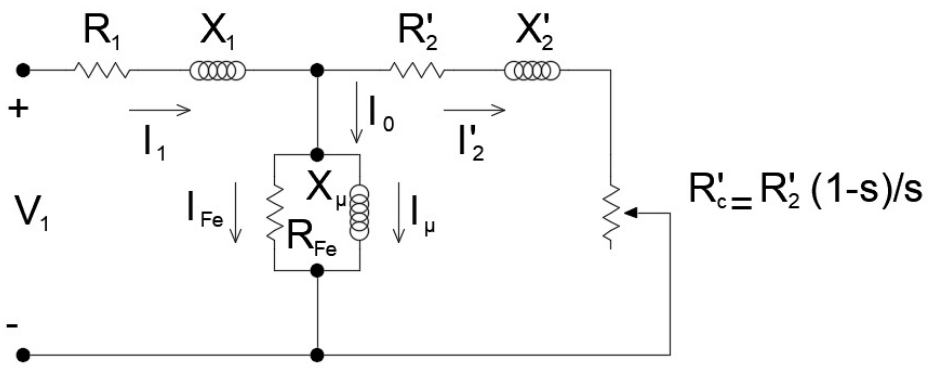


Figura 3.1: Circuito monofásico equivalente del motor de inducción .

Cada elemento representa lo siguiente:

- R_1: Resistencia del bobinado estatórico
- X_1: Fugas magnéticas en el estator (reactancia de fugas)
- R_{Fe}: Pérdidas en el hierro por histéresis y Foucault, o pérdidas de vacío
- X_μ: Reactancia magnetizante
- R'_2: Resistencia del bobinado rotórico vista desde el estator
- X'_2: Fugas magnéticas en el rotor vistas desde el estator (reactancia de fugas)
- R'_C: Resistencia cuya potencia representa la potencia mecánica en el eje
- s: Deslizamiento

Para determinar los parámetros que constituyen el modelo se realizan comúnmente tres ensayos: ensayo de vacío, ensayos de continua y ensayo de rotor bloqueado.

Ensayo de vacío o rotor libre

Consiste en medir niveles de consumo eléctrico del motor al hacer girar al rotor libremente sin la presencia de una carga que le imponga par. En este caso el deslizamiento es casi nulo, lo que significa que el eje gira a velocidades muy cercanas a las de sincronismo, por lo que R'_C tiene un valor muy elevado. En consecuencia, la corriente I'_2 es pequeña, lo que deriva en que las pérdidas a considerar en este ensayo sean P_{Cu1} (pérdidas en el cobre del estator debidas a la corriente que circula por el mismo), P_{Fe} (pérdidas en el hierro) y P_m (pérdidas mecánicas).

El balance de potencias:

$$P_0 = P_{Cu1} + P_{Fe} + P_m \Rightarrow P_{Fe} + P_m = P_0 - P_{Cu1}$$

$$\Rightarrow P_{Fe} + P_m = P_0 - 3R_1 I_0^2$$

De esta manera se puede representar $P_{Fe} + P_m$ como una función que depende cuadráticamente del voltaje, con P_m constante. Para realizar el ensayo se alimenta al motor con una tensión variable desde un valor nominal hasta un 30 % o 50 % de dicho valor registrando en diversos puntos tensión (V_1), potencia (P_0) y corriente (I_0). Considerando las pérdidas mecánicas constantes se puede extrapolar la curva para obtener las mismas, cuando la tensión es nula, situación teórica en la que no habrían pérdidas en el hierro, ver figura 3.2. No se toman valores inferiores de tensión ya que a baja tensión la velocidad cae en forma significativa afectando las pérdidas mecánicas.

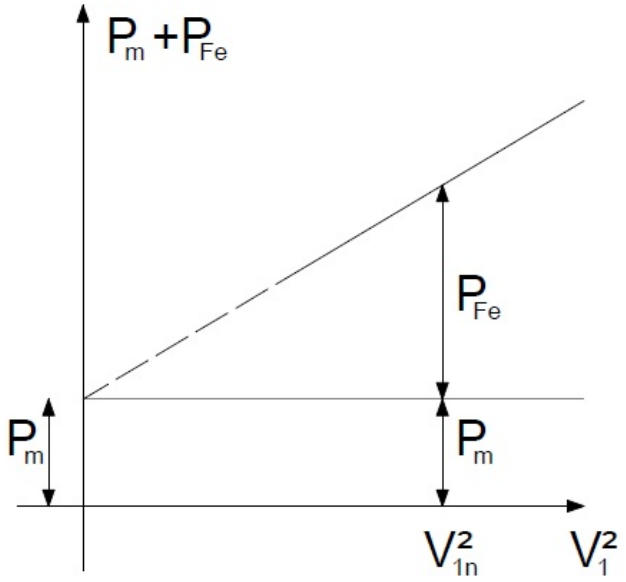


Figura 3.2: Pérdidas en vacío en función de la tensión.

Para determinar la resistencia R_1, se realiza un ensayo adicional que consiste en alimentar con tensión continua dos fases del estator. Registrando tensión y corriente, y utilizando la ley de Ohm, se obtiene R_1. Siendo V_{dc} el voltaje medido e I_{dc} la corriente medida se deduce R_1 mediante la siguiente expresión:

$$R_1 = \frac{1}{2} \times \frac{V_{dc}}{I_{dc}} \tag{3.5}$$

Para modelar la rama de vacío del motor (modelo paralelo):

$$cos\varphi_o = \frac{P_{Fe}}{3V_{1n}I_0}$$

$$R_{Fe} = \frac{V_{1n}}{I_{R_{Fe}}} = \frac{V_{1n}}{I_0\ cos\varphi_o} \tag{3.6}$$

$$X_u = \frac{V_{1n}}{I_u} = \frac{V_{1n}}{I_0\ sin\varphi_o} \tag{3.7}$$

Ensayo de cortocircuito o de rotor bloqueado

En este caso se le impide mecánicamente girar al rotor, por lo que la velocidad es nula y el deslizamiento igual a 1, de esta manera $R'_C = 0$. El ensayo consiste en ir aumentando la tensión hasta llegar a la corriente nominal del motor, y registrar tensión, corriente y potencia activa consumida por el motor.

La tensión necesaria en este ensayo para lograr que circule la corriente nominal es bastante menor que la tensión nominal, por lo que las pérdidas de vacío se consideran despreciables. De esta manera las pérdidas en cortocircuito quedan determinadas por:

$$P_{cc} = 3(R_1 + R_2)I_{cc}^2 \tag{3.8}$$

3.2.1. Balance de pérdidas y definición de rendimiento

El funcionamiento del motor se basa en una transformación de potencia eléctrica en mecánica, transmitida desde el rotor hasta el estator, pero con cierto nivel de pérdidas que debe ser considerado.

Siendo V_1 la tensión aplicada por fase, I_1 la corriente y φ_1 el desfasaje entre las mismas, la potencia eléctrica absorbida de la red viene dada por:

$$P_1 = 3V_1 I_1 cos\varphi_1 \tag{3.9}$$

En el estator se pierde energía P_{p1}, debido al efecto Joule en los devanados (P_{Cu1}) y a la histéresis y efecto Foucault en el hierro (P_{Fe}), obteniendo así la potencia electromecánica en el entrehierro P_a.

$$P_{Cu1} = 3R_1 I_1^2 \tag{3.10}$$

$$P_{Fe} = 3V_1 I_{Fe} \tag{3.11}$$

$$\Rightarrow P_a = P_1 - P_{p1} = P_1 - P_{Fe} - P_{Cu1}$$

Para obtener la potencia mecánica entregada por la máquina P_{mi}, que en el modelo de la figura 3.1 corresponde a la potencia disipada por la resistencia R'_C, falta restar las pérdidas Joule disipadas por la resistencia R'_2:

$$P_{mi} = P_a - P_{Cu2} = P_a - 3R'_2 I'_2 \tag{3.12}$$

Finalmente la potencia útil es la que toma en cuenta la potencia de salida del motor y las pérdidas por ventilación y rozamiento (pérdidas mecánicas) (P_m):

$$P_u = P_{mi} - P_m \tag{3.13}$$

De esta forma se define el **rendimiento** (η) como el cociente entre la potencia útil y la potencia realmente consumida por el motor:

$$\eta = \frac{P_u}{P_1} = \frac{P_u}{P_u + P_m + P_{Cu2} + P_{Fe} + P_{Cu1}} \tag{3.14}$$

En la figura 3.3 se muestra qué componente es el que genera cada una de las pérdidas detalladas anteriormente y se detalla el balance de potencia en el motor de inducción.

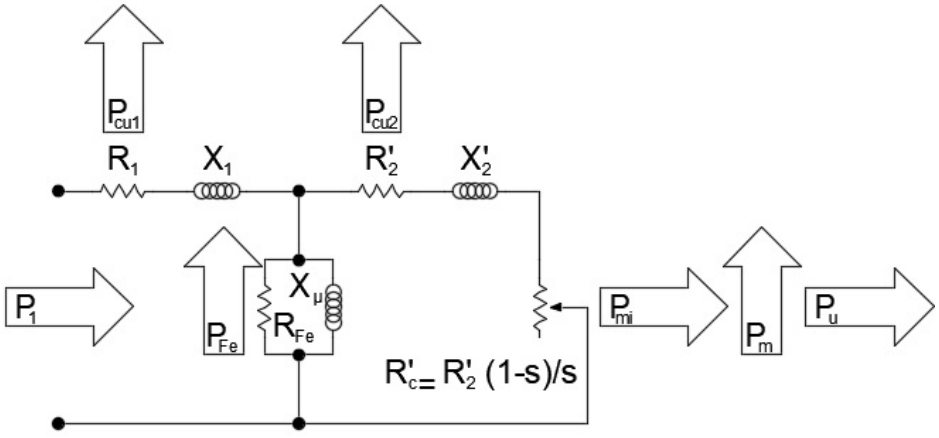


Figura 3.3: Balance de potencia

Capítulo 4

La norma IEEE Std. 112

La norma IEEE Std. 112, "Procedimientos estándar para el ensayo de motores y generadores polifásicos de inducción" [8], describe ciertos métodos para relevar la eficiencia de las máquinas de inducción a través de ensayos y cálculos realizados, con sus correspondientes correcciones.

Como se verá, la importancia de la norma radica en que la medida de eficiencia obtenida a través de la misma tiene en cuenta factores que llevan a todos los motores bajo ensayo a las mismas condiciones de funcionamiento. Esto permite comparar diferentes máquinas de inducción por su eficiencia.

4.1. Descripción

En primer lugar se especifican condiciones de distorsión armónica, desbalance de voltaje y frecuencia sobre las cuales se pueden realizar las medidas.

4.1.1. Temperatura

La temperatura es un factor fundamental en cuanto a la medida de eficiencia, ya que variaciones de temperatura generan variaciones en las resistencias de los bobinados y con ello se ven alteradas las pérdidas en el estator y rotor. La norma indica que la temperatura ambiente de referencia para determinar las pérdidas es $25°C$. En otras condiciones se deben realizar ajustes correspondientes.

A su vez, define la temperatura específica, magnitud que será utilizada en la ecuación de ajuste de las resistencias de cables de estator. La misma se define como la temperatura de funcionamiento a la cual estaría la máquina, operando en condición de carga nominal, una vez alcanzado el régimen térmico y a una temperatura ambiente de $25°C$. Se plantean tres métodos para calcular la temperatura específica:

1. Se mide como la suma del salto térmico ocurrido en la máquina una vez alcanzado el régimen en bajo carga nominal (t_{rise}) más $25°C$. Para calcular el salto térmico se mide la temperatura de la máquina una vez alcanzado el régimen y se le resta la temperatura ambiente.

2. Igual al método anterior, pero medida en una máquina duplicada, definida como una máquina construida de la misma manera y con el mismo diseño eléctrico.

3. En caso de no medir el aumento de temperatura mencionado, la norma brinda una tabla que indica valores de temperatura específica según la clase de aislación de la máquina bajo ensayo.

4.1.2. Variables a medir

La norma define una lista de medidas a realizar, especificando los errores admisibles en los instrumentos de medida (clase). Para ello el usuario debe ser capaz de medir los siguientes parámetros:

- Voltaje
- Frecuencia
- Corriente
- Potencia eléctrica
- Resistencia (según normas IEEE Std 118-1978 y 119-1974)
- Deslizamiento o velocidad
- Par
- Temperatura (según norma IEEE Std 119-1974)

Más adelante define los cálculos a realizar para modificar la resistencia y el deslizamiento según la temperatura. Además agrega ciertas modificaciones a realizar al par. Continúa con la presentación de los ensayos para determinar la temperatura, los elementos del circuito equivalente y las otras pérdidas.

4.1.3. Pérdidas

Para realizar los cálculos de eficiencia, la norma define en primera instancia las pérdidas disipadas en un motor de inducción. A lo mencionado en la sección 3.2.1 se les suman las pérdidas Stray Load. Las *Stray Load losses* se deben al flujo magnético que recorre la estructura del motor y genera corrientes parásitas que ocasionan pérdidas en forma de calor (distinto de las pérdidas magnéticas en el entre hierro).

4.1.4. Eficiencia

Son tres las variables a partir de las cuales se puede determinar la eficiencia de un motor de inducción: potencia de entrada, potencia de salida y pérdidas del motor. Derivan en tres posibilidades de cálculo:

- $\eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}}$
- $\eta = \frac{P_{entrada} - perdidas}{P_{entrada}}$
- $\eta = \frac{P_{salida}}{P_{salida} + perdidas}$ (para los generadores)

4.2. Métodos para medir la eficiencia

Finalmente se describen los métodos para la medida de la eficiencia y se presenta una guía para la elección de los mismos en función de la potencia nominal de cada máquina.

- Máquinas con potencia menor a 1kW- Método A
- Máquinas horizontales entre 1-300kW- Método B
- Máquinas verticales entre 1-300kW- Métodos B (si la forma de los rodamientos lo permite), E, E1, F Y F1.
- Máquinas de potencia mayor a 300kW- Métodos B, B1, C, E, E1, F o F1

Método A

Consiste en medir la potencia a la entrada (método voltamperimétrico) y a la salida ($P_{salida} = C\omega$), con los ajustes correspondientes.

Método B

Se mide potencia de entrada y de salida, pero con separación de las pérdidas, calculando de manera indirecta las *Stray load losses*, siendo ésta la diferencia entre las pérdidas totales y las convencionales.

Método B1

Igual al método B, con la salvedad de que la temperatura se asume, obteniendo dicho valor de la tabla propuesta.

Método C

Es el método de las máquinas duplicadas. Las dos máquinas se acoplan y y se conectan eléctricamente a dos fuentes, una que permita ajustar la frecuencia. Las pérdidas adicionales se calculan por método indirecto.

Métodos E y E1

En este caso se mide la potencia a la entrada y la potencia a la salida se calcula como la entrada menos las pérdidas, ajustadas a la temperatura. En el caso E1 se asumen las *Stray load losses*.

Métodos F y F1

En el método F se utiliza el circuito equivalente, y en F1 se asumen las *Stray load losses*.

En el capítulo 10 se presenta un manual de aplicación de la norma, en el cual se detallan los pasos a seguir para implementar los ensayos sobre un motor.

Capítulo 5

Métodos para obtención de eficiencia in-situ

Uno de los principales objetivos del proyecto consistió en relevar e identificar los métodos existentes dedicados a la medida de eficiencia in-situ en motores de inducción. A la vez, este relevamiento tuvo por finalidad contrastar los distintos métodos encontrados evaluando sus principales ventajas y desventajas. Se realizó también un análisis de viabilidad de los métodos tomando en cuenta practicidad y costos implicados.

5.1. Algoritmo genético

La determinación de la eficiencia de motores de inducción de forma directa puede ser realizada utilizando el algoritmo genético, sin necesidad de hacer ensayos que impliquen desacoplar el motor de la carga implicada. [9]

El algoritmo genético se basa en la resolución de ecuaciones no lineales cuya implementación parte de asignar un código binario de forma aleatoria a cada variable desconocida, esta asignación de códigos binarios se repite produciendo diferentes cadenas llamadas población. Los operadores con los que trata el algoritmo genético son: *Reproducción*, *Cruce* y *Mutación*.

La *Reproducción* es el proceso en el cual las cadenas son seleccionadas dependiendo de qué tanto se ajustan a una función objetivo. Las cadenas que se ajustan mejor a la función objetivo son las que tienen mayor probabilidad de descendencia. Los esquemas a utilizar en el proceso de reproducción pueden ser muestreo estocástico o muestreo determinístico.

El muestreo estocástico supone cargar una ruleta con las probabilidades de las cadenas (las probabilidades se determinan según qué tanto se ajustan las cadenas a la función objetivo) y haciéndola girar para elegir una. Una vez elegida una cadena, se deposita en una *piscina de apareamiento* esperando al siguiente operador.

El muestreo determinístico (sistema mas eficiente) calcula la probabilidad de las cadenas según que tan bien se ajustan a la función objetivo y se les asigna un número basado en la probabilidad de selección para luego depositarlas en una piscina esperando al siguiente operador. Este proceso de selección asegura que las cadenas que ajusten mejor a la función objetivo se encuentren en la piscina.

El *Cruce* supone elegir aleatoriamente dos cadenas de la piscina y aparearlas. En el apareamiento se elige una posición a lo largo de las cadenas de forma aleatoria, a partir de la cual dichas cadenas intercambian todos sus elementos. Como resultado se obtienen dos cadenas diferentes que esperan por el siguiente operador.

En la *Mutación* se elige aleatoriamente una cadena y se cambia el valor de uno de sus bits de "0" a "1" o viceversa. Este proceso protege contra la pérdida de información.

5.1.1. Aplicación del algoritmo genético

En primer lugar se mide la resistencia de fase del estator R_1 una vez apagado el motor bajo ensayo.

Luego, conectado el motor, se procede a medir tensiones de línea, corrientes de línea, potencia de entrada y velocidad de giro del eje en varios puntos de funcionamiento. Se determina el factor de potencia como sigue:

$$PF = \frac{P_{in}}{3V_l I_l}$$

Se trabaja con el siguiente modelo equivalente del motor de inducción.

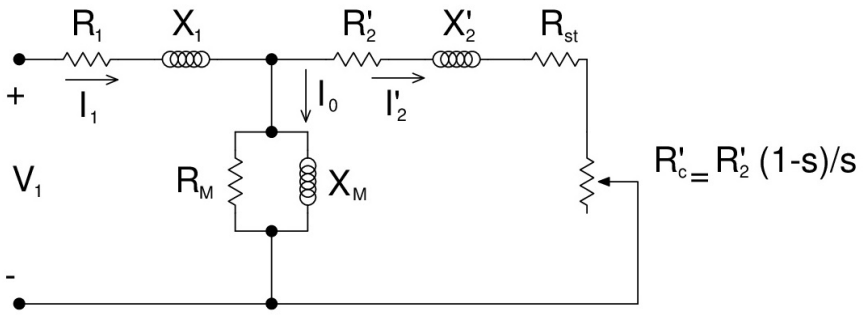


Figura 5.1: Modelo estrella equivalente de MI - Algoritmo genético

El principal cambio respecto al modelo usual radica en la representación de las pérdidas Stray-Load mediante la resistencia R_{st} (se representa sobre la rama del rotor debido a que las pérdidas stray-load dependen del cuadrado de las corrientes rotóricas).

En motores de hasta $125HP$, las pérdidas stray-load a plena carga ($P_{st_{FL}}$) se pueden aproximar como 1,8 % de la potencia de salida. Para calcular dichas pérdidas en cualquier punto de carga:

$$P_{st} = P_{st_{FL}} \frac{I_2^2}{I_{2_{FL}}^2}$$

Luego, la resistencia R_{st} es entonces:

$$R_{st} = (1{,}8\,\%)\, R_2' \left(\frac{1 - s_{FL}}{s_{FL}} \right)$$

En la norma IEEE Std. 112 se listan valores de ${}^{X_1}/_{X_2'}$ según diferentes diseños de motor.

Por lo tanto, se tienen cuatro variables a ser determinadas por el algoritmo genético: X_1, R_2', X_M y R_M. A dichas variables se le asignan aleatoriamente números binarios de n bits, las cuales juntas forman una cadena de $4n$ bits. Esta codificación se realiza gran cantidad de veces.

Las resistencias de estator y rotor deben corregirse adecuadamente según la temperatura. Las temperaturas del rotor y estator se asumen iguales y se calculan como:

$$T_t = \frac{I_1 - I_0}{I_N - I_0} (T_r - T_s) + T_s$$

Donde T_r es la temperatura de referencia igual a 75^oC y T_s es la temperatura ambiente.

La corrección por temperatura de la resistencia:

$$R_{1c} = R_1 \frac{T_t + K}{T_s + K} \qquad R_{2c}' = R_2' \frac{T_t + K}{T_s + K}$$

Con K igual a 234,5 si el bobinado es de cobre o 225 si es de aluminio.

Luego las admitancias de cada rama del circuito de la figura 5.1 son:

$$\overline{Y_2} = \frac{1}{\frac{R_{2c}'}{s} + R_{st} + jX_2'}$$

$$\overline{Y_M} = -\frac{j}{X_M} + \frac{1}{R_M}$$

$$\overline{Y_1} = \frac{1}{R_{1c} + jX_1}$$

Entonces, la corriente por el estator:

$$I_{1est} = \left| \frac{\overline{V_1 Y_1} \left(\overline{Y_2} + \overline{Y_M} \right)}{\overline{Y_1} + \overline{Y_2} + \overline{Y_M}} \right|$$

El factor de potencia:

$$PF_{est} = \frac{\mathrm{Re}(\overline{I_1})}{I_{1est}}$$

La corriente por el rotor:

$$I_2 = \left| \frac{\overline{V_1 Y_1 Y_2}}{\overline{Y_1} + \overline{Y_2} + \overline{Y_M}} \right|$$

Luego la corriente por R_M:

$$I_{R_M} = \left| \frac{\overline{V_1 Y_1}}{R_M \left(\overline{Y_1} + \overline{Y_2} + \overline{Y_M} \right)} \right|$$

Por lo tanto, la potencia de entrada:

$$P_{in_est} = 3 \left(I_1^2 R_{1c} + I_2^2 \left(\frac{R_{2c}}{s} + R_{st} \right) + I_{R_M}^2 R'_M \right) \tag{5.1}$$

La potencia de salida:

$$P_{out_est} = 3 I_2^2 R'_{2c} \frac{1-s}{s} \tag{5.2}$$

Por lo tanto, la eficiencia se calcula como:

$$\eta = \frac{P_{out_est}}{P_{in_est}} 100\,\% \tag{5.3}$$

El algoritmo genético busca minimizar el error entre los parámetros medidos y los calculados. Los parámetros medidos son potencia de entrada, corriente de línea y factor de potencia, los que derivan en tres funciones de error:

$$f_1 = \frac{(I_{1est} - I_1)\,100}{I_1}$$

$$f_2 = \frac{(P_{in_est} - P_{in})\,100}{P_{in}}$$

$$f_3 = \frac{(PF_{est} - PF)\,100}{PF}$$

Llevando a una función objetivo dada por:

$$ff = \frac{1}{f_1^2 + f_2^2 + f_3^2} \tag{5.4}$$

Este proceso es repetido para todas las cadenas de parámetros.

Luego de iteraciones los errores dados por las funciones f_1, f_2 y f_3 se vuelven muy pequeños, del orden del 0,1 %, lo que implica convergencia.

Observación: dado que se utilizan únicamente dos parámetros de entrada independientes para obtener cuatro parámetros desconocidos, la solución obtenida no es única.

5.1.2. Caso de aplicación

En [10] fue llevado a cabo el ensayo de un motor de 3,5 kW (muy similar al que fue ensayado en el presente trabajo) mediante un proceso con base en la aplicación del algoritmo genético. Los resultados obtenidos por este trabajo se presentan debajo.

Carga (%)	η(%)	η^{est}(%)	**Error (%)**
15,319	69,05162	78,62283	9,57121
28,547	74,58518	81,74271	7,15753
36,734	76,82762	82,58647	5,75885
43,254	78,39442	82,91161	4,51718
54,484	80,76860	83,01213	2,24353
60,575	81,76554	82,89804	1,13251
67,734	82,48728	82,65478	0,16749
74,326	82,58576	82,35059	0,23517
80,746	82,10242	82,00274	0,09968
86,648	81,21083	81,65875	0,44792
93,430	79,90925	81,26385	1,3546
99,687	78,91260	80,93049	2,0179

Tabla 5.1: Resultados de medida de eficiencia empleando algortimo genético

Se aprecian resultados muy precisos en el entorno del 75 % de carga, en tanto que a potencia nominal el error se torna mayor. A estados de carga menores o iguales que el 50 % de la carga nominal el error se torna intolerable.

Si bien, el trabajo citado realizó otros estudios con mejores resultados, se los descarta dado que estos suponen agregar la medida del par como entrada al algoritmo. Siendo este el desafío que el presente trabajo busca resolver no se consideran relevantes dichos estudios.

5.2. Equipamiento en plaza

El método de algoritmo genético es considerado como un método de medida indirecta dado que el par se estima en función de otros parámetros, recurriendo al modelado eléctrico teórico del motor de inducción. Dentro de esta clase de sistemas fueron encontrados dos equipos que realizan medidas de par en forma indirecta y que cumplen con los requerimientos del presente proyecto. Se presentan a continuación:

- Fluke 438-II - Analizador de calidad eléctrica y eficiencia de motores
- Yokogawa YOK-WT3000 - Precision Power Analyzer

Estos dos medidores son analizadores de redes de potencia, con mayor cantidad de funcionalidades, medidores a partir de los cuales es posible obtener tanto el par, como la eficiencia del motor (medida directa de la eficiencia). El instrumento Fluke realiza los cálculos para obtener las magnitudes descritas al ingresarle los datos de chapa del motor bajo ensayo y sensando la entrada eléctrica trifásica al mismo. Si bien no se cuenta con la información de su funcionamiento interno se estima como muy probable que emplee técnicas muy similares a la estimación mediante algorítmo genético.

Por otro lado, existen aquellos medidores de tipo directo, es decir, aquellos que sensan el valor del par midiendo los efectos que se producen sobre parámetros medibles. Dentro de esta categoría se encontró un medidor que cumplía con las características.

- A3-P - Professional Active Torque Sensor Kit - (TAM SENSORS)

Este consiste en un medidor moderno de par (medida indirecta de la eficiencia), que no requiere estar en contacto con el eje para relevar medidas. El equipamiento cuenta con sensores que analizan comportamientos de flujo magnético mediante software para la obtención de la medida de par. Su principio de aplicación consiste en acercar el sensor al eje bajo ensayo. El sensor emite una señal débil y alterna de campo magnético que penetrará el eje. La respuesta magnética del eje es recibida por el medidor y procesada. Luego, al estar sujeto a fuerzas externas la respuesta magnética del eje se verá distorsionada y modificarán las características del campo inicial. Estas distorsiones son recibidas por el sensor y convertidas a un voltaje entre 0 y 5V. La variación de voltaje luego es correlacionada con la fuerza aplicada al eje.

5.3. La necesidad de una alternativa

Una vez realizado el relevamiento de los métodos en plaza se procedió a evaluar sus características determinantes a la hora de definir su potencial de aplicación.

En primer lugar, respecto al método mediante algoritmo genético, su gran ventaja reside en la sencillez del procedimiento de medida. Basta con contar con sensores de tensión, corriente y velocidad para poder estimar la medida del par. Por otra parte, los resultados obtenidos empleando este método son ambiguos y pueden llegar a ser muy variables con el estado de carga del motor bajo ensayo. Es así que no resulta sencillo definir una precisión a la medida mediante este método. Los resultados pueden mejorar significativamente si se le agrega como punto de partida inicial de la iteración los valores nominales de chapa del motor. Sin embargo, esto restringe la aplicación del método a una menor cantidad de casos y, en particular, sucede que cuando no se conoce los datos del motor bajo ensayo (principalmente en motores de significativa antigüedad) son uno de los objetivos principales del presente trabajo.

Por otro lado, si bien los medidores presentados resultarían sumamente útiles bajo los requerimientos solicitados en el presente trabajo, todos ellos acarrean un costo significativo. El analizador Fluke tiene un precio de U$S 10.000 en tiendas de Estados Unidos, mientras que el sensor TAM, viene en dos versiones, una de € 8.750 (Active-3 Multifunction) y una de € 6.950 (Active-3 Professional). En tanto, el analizador de energía Yokogawa, herramienta de mucho mayor complejidad tiene un costo de U$S 19.500 en Estados Unidos.

En base a las desventajas de los mecanismos previamente descritos es que se optó por investigar otro método de medida que pudiera cumplir con las características solicitadas, manteniendo un costo accesible. Su implementación y ensayo constituyeron la parte central del presente trabajo. En el próximo capítulo se presenta la teoría detrás del método desarrollado, que como se verá, está basado en medidas de la deformación del eje cuando se lo somete a una carga.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 6

Teoría de deformaciones de un eje y método Strain Gauge

En el presente capítulo se abordan los fundamentos del método de medida desarrollado en el Proyecto. Se verá que mediante la utilización de un transductor se puede sensar la deformación que se produce en el eje cuando es cargado y, mediante una correlación par-deformación obtener el par que está siendo generado por el motor.

6.1. Deformación de un eje sometido a un par

Se presenta en esta sección la teoría mecánica de la deformación de un eje cilíndrico sometido a un par externo. Lo presentado en esta sección reúne conceptos tomados de distintos capítulos de [11].

Introducción

A los efectos de mantener la nomenclatura técnica del estudio mecánico desarrollado en [11], a lo largo de este capítulo lo que hasta ahora se denotó como eje pasará a llamarse miembro circular o barra y el concepto de eje corresponderá a la línea que une los centros de ambos extremos de un miembro circular. Existen, a grandes rasgos, dos situaciones distintas en las que puede encontrarse una barra circular. Por un lado, están aquellas que tienen un extremo fijo y por lo tanto al aplicarse un par en su otro extremo no rotan libremente sino que se torsionan del lado libre. Por otro lado, están las barras rotantes, cuyos extremos no cuentan con un agarre rígido, en las cuales el equivalente al extremo rígido es una carga que le impone un par resistivo estando en rotación. El presente trabajo se centra en esta última familia.

En un motor en carga la barra es sometida a dos pares iguales en valor pero opuestos en sentido en forma simultánea. El par generado por el motor impulsa a la barra en el sentido de rotación y el par resistivo impuesto por la carga la

frena con sentido opuesto. La coexistencia de estas dos fuerzas opuestas en puntos distintos de la barra es lo que provoca que esta se deforme. En la figura 6.1 se muestra este fenómeno.

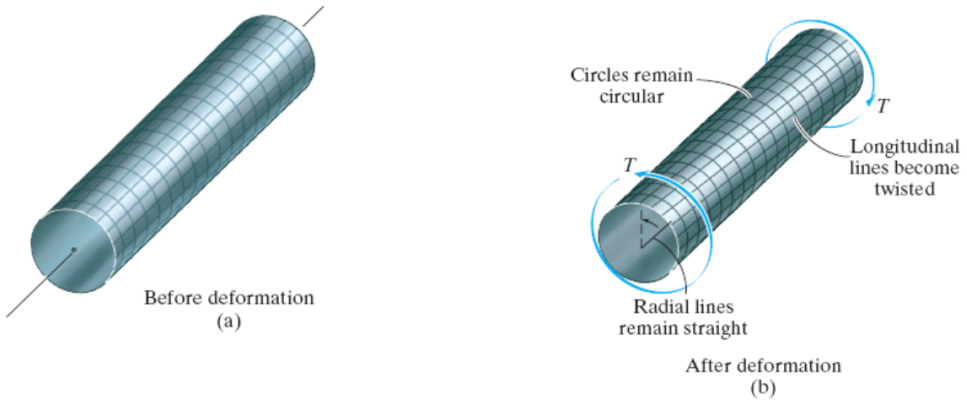


Figura 6.1: Deformación del eje

En ausencia de fuerzas pueden trazarse sobre la superficie de la barra líneas colineales al eje de la misma. Se aprecia como, al aplicarse los dos pares opuestos en ambos extremos estas líneas se tuercen y rotan un cierto ángulo. La teoría indica que bajo esfuerzos producidos exclusivamente por la aplicación de par los planos perpendiculares al eje no se deforman sino que rotan un cierto ángulo. Este fenómeno se observa en la representación de la figura 6.1. A continuación se presenta el estudio de esta deformación y cómo se realiza su medida.

Esfuerzo y deformación unitaria - Ley de Hooke

Existen dos conceptos fundamentales para entender la teoría detrás de las deformaciones que se producen: esfuerzos (σ) y deformaciones unitarias (ε). El esfuerzo sobre un material corresponde al conjunto de tensiones que se aplican sobre una sección del mismo. Las deformaciones unitarias corresponden por su parte, a las deformaciones por unidad de longitud que sufre un material debido a los esfuerzos a los que es sometido. Dentro del rango de elasticidad de un material, ambas magnitudes son proporcionales y responden a la ley de Hooke presentada a continuación.

$$\sigma = E \times \varepsilon \tag{6.1}$$

La constante de proporcionalidad E es denominada *módulo de Young* o *módulo elástico* y tiene dimensiones de esfuerzo.

Se distingue generalmente entre esfuerzos normales (σ) y esfuerzos cortantes (τ). Los primeros son esfuerzos perpendiculares a la sección considerada y los

segundos son esfuerzos tangenciales a la misma. A modo de ejemplo, tomando una sección cilíndrica en una barra, la compresión de la misma aplicando fuerzas perpendiculares a sus dos extremos produce esfuerzos normales, en tanto que al aplicarle un par de rotación se generan esfuerzos cortantes. Se define también la deformación unitaria cortante γ que describe un cambio de ángulo entre dos planos de un material. Las magnitudes τ y γ se vinculan mediante la ley de Hooke aplicada a esfuerzos y deformaciones unitarias cortantes especificada a continuación.

$$\tau = \gamma \times G \tag{6.2}$$

Donde G es denominado *módulo cortante de elasticidad* o *módulo de rigidez* y es una constante característica de cada material.

La siguiente imagen tomada de [11] ilustra los conceptos de esfuerzo cortante y deformación unitaria cortante.

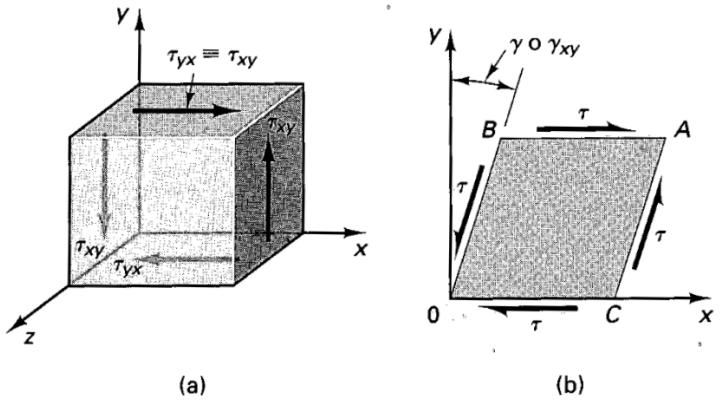


Figura 6.2: Esfuerzos y deformaciones unitarias cortantes (Fuente [7])

En lo que sigue se aplicarán estos conceptos al estudio de la deformación de una barra circular.

Esfuerzos internos debidos a aplicación de un par externo

Como ya fue mencionado, la aplicación de un par externo genera esfuerzos cortantes sobre la barra. Al tomar una sección circular de la barra, una de las hipótesis que se impone es que la deformación unitaria cortante varía linealmente desde el centro. Al combinar este hecho con la dependencia líneal entre esfuerzo y deformación unitaria que surge de la ley de Hooke (ecuaciones 6.1 y 6.2) se infiere que estos esfuerzos dependen linealmente de la distancia al eje de giro y, por lo tanto, responden a la siguiente ecuación:

$$\tau_\rho = \frac{\rho}{c}\tau_{max} \tag{6.3}$$

Siendo ρ la distancia al eje de giro, c el radio de la barra y τ_{max} el esfuerzo cortante máximo que se produce en la circunferencia del disco. La siguiente imagen tomada de [11] ilustra este concepto.

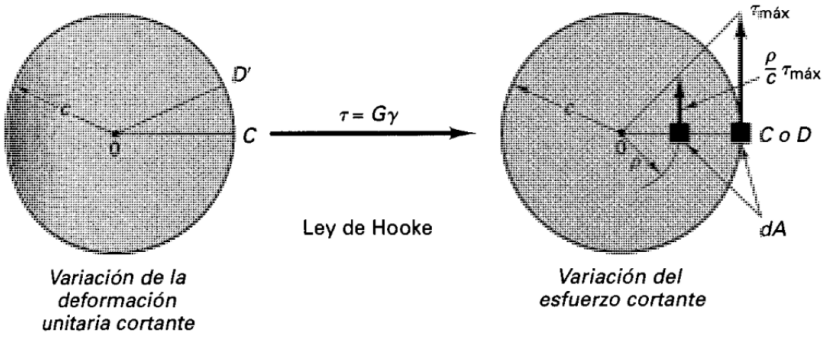


Figura 6.3: Distribución esfuerzo en barra circular (Fuente [7])

En equilibrio el par de torsión resistente es igual al par de torsión aplicado externamente. Citando textualmente a [11] el par de torsión resistente puede ser calculado como "la suma de todos los pares de torsión desarrollados sobre el corte por las fuerzas infinitesimales actuando a una distancia ρ del eje del miembro". La ecuación 6.4 describe esta relación.

$$\int_A \frac{\rho}{c}\tau_{max}\ dA \times \rho = T \tag{6.4}$$

Dado que tanto c como τ_{max} son magnitudes constantes la ecuación 6.4 puede ser escrita como sigue (ecuación 6.5).

$$\frac{\tau_{max}}{c}\int_A \rho^2\ dA = T \tag{6.5}$$

El término $\int_A \rho^2\ dA$ es conocido como *momento polar de inercia* del área de una sección transversal y se lo designa como I_p. Para una sección circular se cumple la siguiente relación:

$$I_p = \frac{\pi c^4}{2} = \frac{\pi d^4}{32} \tag{6.6}$$

Siendo d el diámetro de la barra maciza circular.

I_p también puede ser calculado para barras circulares huecas restando la I_p que correspondería a la barra del mismo tamaño que el hueco.

Por consiguiente se desprende la ecuación que vincula al par impuesto con el esfuerzo máximo cortante (producido en la superficie de la barra).

$$\tau = \frac{Tc}{I_p} \tag{6.7}$$

Rango de aplicación de las fórmulas: es importante destacar que las relaciones previamente señaladas tienen validez a partir de una cierta distancia de los puntos donde se aplican los pares en la barra. De acuerdo con [11] "[...]Estos conceptos básicos se usan para determinar esfuerzos y ángulos de torsión de flechas circulares. Sin embargo, similar al caso de barras cargadas axialmente, grandes esfuerzos *locales* aparecen en los puntos de aplicación de pares de torsión concentrados o de cambios de sección transversal. De acuerdo con el principio de *Saint-Venant*, los esfuerzos y deformaciones unitarias son exactamente descritos por la teoría desarrollada sólo más allá de una distancia aproximadamente igual al diámetro de una flecha medida desde esas posiciones. Típicamente, los esfuerzos locales se determinan usando factores de concentración de esfuerzos.

Deformación en la superficie de una barra circular

En primer lugar, cualquier deformación de la superficie puede ser descompuesta en tres tipos. Suponiendo que se define dos ejes perpendiculares sobre la superficie de la barra siendo uno de ellos paralelo al eje de giro (al que se llamará horizontal) y el otro un eje que sigue la dirección del perímetro de la sección circular de la barra en el punto (al que se llamará vertical). Una deformación puede ser descompuesta en deformaciones unitarias según ambos ejes y mediante una deformación unitaria cortante en el plano definido por los ejes.

Suponiendo ahora que se tiene un elemento sensible a deformaciones según una dirección preferencial y que se lo adhiere al eje con la dirección preferencial a un ángulo θ respecto al eje horizontal. Llamando ε_θ a la deformación unitaria extensional según la dirección de sensibilidad, ε_x y ε_y a las deformaciones unitarias según los ejes horizontal y vertical respectivamente y γ_{xy} a la deformación unitaria cortante, la siguiente ecuación vincula las 4 magnitudes.

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon_x cos^2(\theta) + \varepsilon_y sin^2(\theta) + \gamma_{xy} sin(\theta) cos(\theta) \tag{6.8}$$

En el caso de un eje sometido únicamente a un torque externo la única deformación que se produce es rotación, como pudo verse en el esquema de la figura 6.1. En dicho caso los valores ε_x y ε_y son nulos y la ecuación 6.8 pasa a ser:

$$\varepsilon_\theta = \gamma_{xy} sin(\theta) cos(\theta) \tag{6.9}$$

Luego, dentro de los límites de elasticidad las ecuaciones 6.2 y 6.7 permiten vincular la deformación unitaria con el par externo aplicado mediante la ecuación 6.10

$$T = \frac{I_p G}{c\ sin(\theta) cos(\theta)} \varepsilon_\theta \tag{6.10}$$

De la ecuación 6.9 se deduce que dado un par impuesto las direcciones de máxima deformación se producen para ángulos θ iguales a $\pm 45°$ y $\pm 135°$ en donde el término $sin(\theta)cos(\theta)$ alcanza sus extremos $\frac{1}{2}$ y $-\frac{1}{2}$. En particular, a 45° y a

$-135°$ el término $sin(\theta)cos(\theta)$ vale $\frac{1}{2}$ y la deformación estira la superficie, se habla en este caso de tensión. Por otro lado a $-45°$ y a $135°$ el término $sin(\theta)cos(\theta)$ vale $-\frac{1}{2}$ y la deformación contrae la superficie, se habla entonces de compresión. Este fenómeno se ilustra en la figura 6.4.

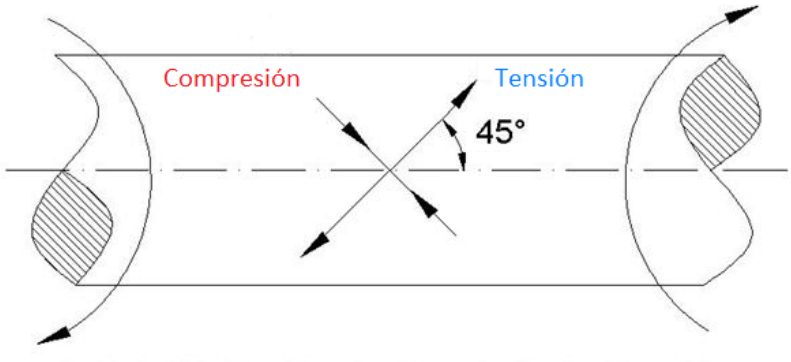


Figura 6.4: Efectos de tensión y compresión en un eje sometido a par

Luego, asumiendo que se mide la deformación según un ángulo θ de $45°$, en módulo, la ecuación 6.10 pasa a ser:

$$T = \frac{2I_pG}{c}\varepsilon \tag{6.11}$$

La validez de esta ecuación reside en asumir que la barra está sometida exclusivamente a un par, sin la incidencia de fuerzas de otro tipo. Sin embargo, en la mayor parte de los casos esta hipótesis carece de validez dado que la barra estará también sometida a fuerzas de otra índole en forma simultánea. Más adelante en la sección 6.3.1 se mostrará como se puede compensar para eliminar sus efectos.

6.2. Teoría de la galga extensiométrica y puente de Wheatstone

Se desprende del desarrollo precedente que la capacidad de medir la deformación de un eje habilita la posibilidad de medir el par al que está siendo sometido. El elemento por excelencia para medir deformaciones es la galga extensiométrica (*strain gauge* en inglés) y, por tanto, a continuación se presenta su principio de funcionamiento.

Los conceptos presentados en esta sección son tomados de [12].

6.2.1. Principio de funcionamiento de la galga extensiométrica

La galga extensiométrica está compuesta por un hilo conductor enrollado numerosas veces en una dirección. Esta constituye la dirección de sensibilidad del

transductor, sobre la cual la galga será capaz de medir la componente de deformación. Siendo un conductor, la resistencia de las galgas responde a la ecuación:

$$R = \rho \frac{l}{A} \tag{6.12}$$

Donde ρ corresponde a la resistividad del material conductor, l es la longitud del conductor y A el área de su sección.

La variación unitaria de la resistencia producto de una deformación puede descomponerse como la variación unitaria de los restantes parámetros. Esto surge de tomar la forma logarítmica de la ecuación precedente ($log(R) = log(\rho) + log(l/A)$) y aplicar diferencial.

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{d(l/A)}{(l/A)} \tag{6.13}$$

El primer término depende de la variación en la resistividad del material, mientras que el segundo depende de cambios geométricos en la forma. De acuerdo con [12] en el caso de deformaciones lineales ambos términos son funciones lineales de la deformación ε. Por tanto, la ecuación precedente puede escribirse como una relación lineal entre la variación de la resistencia y la deformación.

$$\frac{\delta R}{R} = S_S \varepsilon \tag{6.14}$$

ε representa la deformación, mientras que S_S es denominada constante de galga. Dicha constante constituye el parámetro principal de caracterización de cada galga siendo el coeficiente multiplicativo que permite correlacionar la variación de resistencia con la deformación a la cual está siendo sometido el elemento. Esta constante depende, en particular, del *módulo de Poisson* del material de la galga, módulo carácterísitco de cada material que vincula el estrechamiento que sufre una sección transversal de un elemento cuando está siendo estirado en una dirección perpendicular a dicha sección.

6.2.2. Puente de Wheatstone

Un posible mecanismo para sensar la variación de resistencia de las galgas es colocarlas dentro de un Puente de Wheatstone (representado en la figura 6.5). El mismo se construye conectando cuatro resistencias entre sí (una o más variables), de forma tal que cada una se conecta a otra dos. En dos puntos opuestos del puente se conecta el voltaje de alimentación y la tensión que aparece en los otros dos puntos constituye la tensión de salida del puente. El principio de funcionamiento de esta configuración reside en que variaciones en el valor de una o más resistencias del puente provocan variaciones de la tensión de salida del mismo, la cual constituye el parámetro medible. De esta forma, colocando las galgas cuya deformación interesa medir en un puente, es posible sensar su deformación.

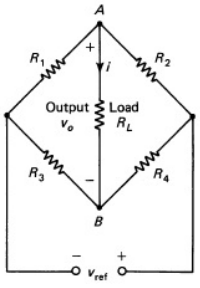


Figura 6.5: Puente de Wheatstone.

La salida del puente se calcula como la resta entre v_A y v_B mediante la cual se infiere que la salida del puente responde a la siguiente ecuación:

$$v_o = \left[\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4}\right] v_{ref} \tag{6.15}$$

Una condición relevante en la cual puede encontrarse el puente es su punto balanceado, el cual se logra cuando la salida del puente es nula. Para ello debe cumplirse la siguiente relación entre las resistencias.

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \tag{6.16}$$

6.2.3. Sensibilidad del puente

Existen dos métodos para medir las variaciones de la tensión de salida del puente, el de balance y el de desbalance.

El primer método consiste en que una de las resistencias del puente sea ajustable. Antes de comenzar el proceso de medida se calibra el puente ajustando el valor de dicha resistencia hasta llevar la salida a cero. A partir de este punto se comienza con la medición y el valor de la tensión de salida representa el apartamiento respecto al punto inicial.

El método de salida desbalanceado consiste en comparar la salida del puente en estado estacionario con la salida del puente estando la galga deformada. En estado estacionario existirá siempre una tensión de salida no nula (Offset) debido al desapareo que existe entre los valores reales de las resistencias que constituyen el puente. Al variar el valor de alguna de las resistencias el voltaje a la salida se verá modificado. La desviación respecto al punto estacionario es en este caso el parámetro a ser tenido en cuenta para deducir la variación de la resistencia.

Habiendo introducido el principio de funcionamiento del puente de Wheatstone se presenta a continuación el estudio de sensibilidad de la tensión de salida del mismo.
Dado que los cambios en la salida se producen por cambios en el valor de las

resistencias, la sensibilidad del sistema está determinada por la forma en que cada resistencia impacta sobre el valor de salida. El desarrollo de Taylor de primer orden del sistema arroja la siguiente fórmula de sensibilidad:

$$\delta v_0 = \sum_{i=1}^{4} \frac{\delta v_0}{\delta R_i} \delta R_i \tag{6.17}$$

Las derivadas parciales se obtienen de la ecuación 6.15:

$$\frac{\delta v_0}{\delta R_1} = \frac{R_2}{(R_1 + R_2)^2} v_{ref} \tag{6.18}$$

$$\frac{\delta v_0}{\delta R_2} = -\frac{R_1}{(R_1 + R_2)^2} v_{ref} \tag{6.19}$$

$$\frac{\delta v_0}{\delta R_3} = -\frac{R_4}{(R_3 + R_4)^2} v_{ref} \tag{6.20}$$

$$\frac{\delta v_0}{\delta R_4} = \frac{R_3}{(R_3 + R_4)^2} v_{ref} \tag{6.21}$$

Al sustituir estas cuatro ecuaciones en 6.17, se obtiene:

$$\frac{\delta v_0}{v_{ref}} = \frac{(R_2 \delta R_1 - R_1 \delta R_2)}{(R_1 + R_2)^2} - \frac{(R_4 \delta R_3 - R_3 \delta R_4)}{(R_3 + R_4)^2} \tag{6.22}$$

Una virtud particular de este sistema es su inmunidad a las desviaciones por temperatura. Si los elementos resistivos utilizados son iguales, sufrirán las mismas variaciones debidas a cambios de temperatura. Remitiéndose a la ecuación 6.22 se observa que la salida del puente no se ve afectada por el fenómeno en cuestión (se cancelan efectos por temperatura).

6.2.4. Constante característica del puente

El grado de sensibilidad del puente depende de cuantas galgas activas se colocan en el mismo. De la ecuación 6.22 se desprende que resistencias opuestas tienen el mismo efecto sobre la tensión de salida. Incrementos en el valor de R_1 y R_4 provocan aumentos de la tensión de salida, mismo efecto que ocurre al decrecer el valor de R_2 y R_4. Trabajando bajo el supuesto de que las cuatro resistencias tienen el mismo valor, se pueden plantear 3 configuraciones estándar para constituir el puente.

- Puente simple : una sola galga activa. El resto de las resistencias tienen mismo valor que la galga.
- Medio puente: dos galgas activas colocadas en puntos opuestos del puente y experimentando misma deformación pero en sentido contrario (una en expansión y otra en compresión) . El resto de las resistencias tienen mismo valor que las galgas.

- Puente completo: compuesto por dos medio puentes, en cuyo caso las cuatro galgas están activas y son iguales en resistencia.

Aplicando la ecuación 6.22 a estos casos se puede simplificar la ecuación precedente en la siguiente expresión.

$$\frac{\delta v_0}{v_{ref}} = k\frac{\delta R}{4R} \tag{6.23}$$

donde:

$$k = \frac{Salida\ del\ puente\ en\ el\ caso\ general}{Salida\ del\ puente\ con\ una\ sola\ galga\ activa} \tag{6.24}$$

Esta expresión es válida dentro de las siguientes hipótesis:

- Las cuatro resistencias del puente, activas o no, tienen mismo valor de resistencia.
- Galgas opuestas experimentan deformaciones contrarias.
- Galgas que comparten nodo de voltaje de salida experimentan deformaciones contrarias.

La constante k se conoce como "constante del puente", y cuanto más grande sea, mayor es la sensibilidad del puente.

6.2.5. Constante de calibración

La constante de calibración (C) de un puente, relaciona la deformación que busca medirse con la salida del puente de la forma:

$$\frac{\delta v_0}{v_{ref}} = C\varepsilon \tag{6.25}$$

Utilizando las ecuaciones 6.14 y 6.23 se obtiene:

$$C = \frac{k}{4}S_s \tag{6.26}$$

Idealmente esta constante no debería variar durante el período de medida (es independiente del tiempo y el estiramiento, y es estable frente a variaciones ambientales).

6.3. Método de la Galga Extensiométrica

Habiendo estudiado los vínculos mecánicos entre par y deformación en la sección 6.1 y teniendo las relaciones descritas para galgas y puentes en las secciones 6.2.1 y 6.2.2, se desarrolla a continuación el método de medida de par mediante el empleo de galgas extensiométricas.

6.3.1. Medida de par mediante puente de galgas

El método de medida desarrollado supone la utilización de galgas extensiométricas aplicadas al eje según las direcciones de compresión y tensión (45° respecto al eje horizontal) que, como se demostró en la sección 6.1 maximizan la sensibilidad. Las galgas se colocan en un puente de Wheatstone para medir la deformación que las mismas sufren cuando el eje es sometido a torsión, a través de la medida del voltaje de salida del puente. En particular, se utilizan cuatro galgas activas (puente completo) para maximizar la sensibilidad del sistema.

De acuerdo con la ecuación 6.9 la colocación de galgas a 90° entre ellas implica que las deformaciones según el eje θ son opuestas. El empleo de 2 o 4 galgas aplicadas al eje de esta manera supone encontrarse en las condiciones donde vale la ecuación 6.23. Combinando las ecuaciones 6.11, 6.25 y 6.26 y asumiendo que las galgas se colocan a 45° respecto al eje horizontal se obtiene la ecuación que vincula el par ejercido sobre el eje y la salida del puente de medida bajo la forma de la ecuación 6.27.

$$T = \frac{8GI_p}{kS_s c}\frac{\delta v_0}{v_{ref}} \tag{6.27}$$

Esta última ecuación constituye el vínculo fundamental para llevar a cabo la medida del par. Mediante la medida de la tensión de salida del puente, y aplicando la ecuación anterior se obtiene el par ejercido sobre el eje.

6.3.2. Compensación de errores por fuerzas extrañas aplicadas al eje

Como fue mencionado en 6.1 el eje bajo rotación se encuentra sometido a otras solicitudes además del par impuesto externamente. Existen fuerzas axiales y de flexión sobre el mismo que podrían suponer una complicación para efectuar la medida de par. Es de interés evitar la medida de las deformaciones generadas por estas fuerzas dado que no se corresponden con el par que se desea medir.

Aquí incide una virtud de la medida con puentes medios (dos galgas activas) y puentes completos (cuatro galgas activas). De la ecuación 6.22 se observa que si todas las galgas tienen la misma resistencia inicial entonces deformaciones iguales en galgas adyacentes se anulan. Luego, volviendo a la ecuación 6.8 se observa que, de estar las galgas a 45° respecto al eje horizontal, la componente de deformación según los ejes x (horizontal) e y (vertical) son idénticas independientemente del sentido de la galga. Las disposición espacial de las galgas, en conjunto con su ubicación en el puente ayudan por lo tanto a neutralizar toda deformación que no sea cortante (y por lo tanto consecuencia del par impuesto al eje).

A continuación se muestra un esquema de cómo se deben disponer las galgas extensiométricas para obtener las medidas correspondientes.

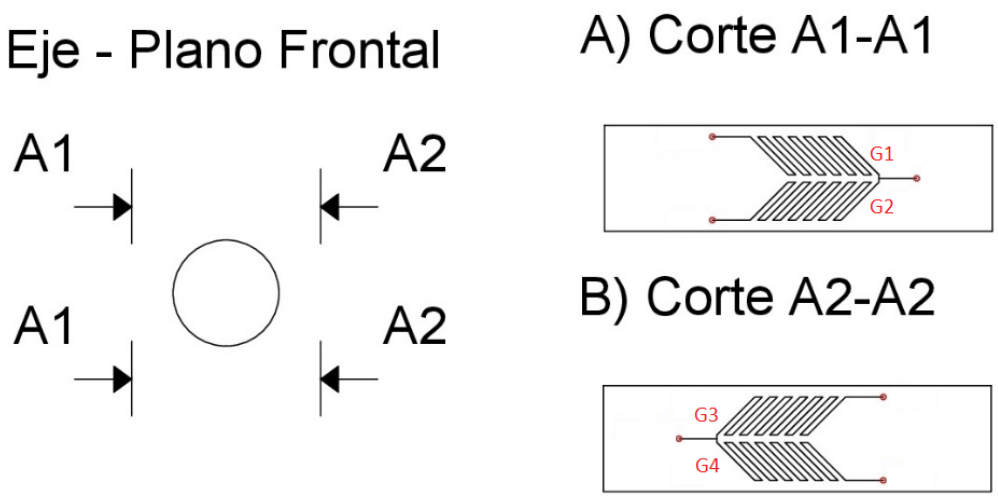


Figura 6.6: Disposición de las galgas en el eje

Capítulo 7

Diseño de sistema de medida

En el capítulo anterior se presentó la teoría detrás de la medida de par mediante la técnica de sensado de deformación del eje del motor bajo ensayo. En el capítulo actual se presenta el diseño del sistema de medida desarrollado, con base en dicha teoría. Se describe en este capítulo los siguientes puntos:

- **Requerimientos del sistema de medida:** son aquellas prestaciones con las que debe contar el sistema a efectos de cumplir con su propósito.
- **Diseño del sistema:** bloques elementales que componen al sistema
- **Componentes del sistema y conexión:** aquellos componentes que fueron seleccionados para integrar el equipo implementado y su conexión.
- **Incertidumbre del método:** desarrollo del cálculo de la incertidumbre con la cual el equipo desarrollado es capaz que sensar el par.

7.1. Requerimientos

Se definen como requerimientos del sistema de medida aquellas características con las que el diseño debe contar a efectos de cumplir con su propósito, que puede ser resumido con el siguiente enunciado:

El sistema de medida debe ser capaz de medir deformaciones mediante un puente de galgas montado en el eje bajo ensayo con suficiente precisión y suministrar al usuario los resultados en forma continua durante la operación del motor.

A continuación se listan en forma detallada los requerimientos que se definieron para el sistema de medida.

Un aspecto sumamente importante para el diseño son los niveles de voltaje a medir. Siendo la resolución de la medida un parámetro fundamental del diseño, se debe adecuar el equipo a la magnitud de la señal a medir. La deformación máxima que sufre el eje de un motor es a su vez un parámetro de diseño de los mismos,

en particular en lo que refiere al diámetro del eje. Es así que cuanto más grande es el motor, típicamente mayor es el diámetro de su eje. La búsqueda arrojó que los valores típicos de deformación en condiciones nominales rondan los $30\mu m/m$. Luego, si se tiene un puente conformado por cuatro galgas activas alimentado en $5V$ (valor estándar de alimentación de componentes electrónicos) y se asume un factor de galga estándar de 2,11 , de acuerdo con las ecuaciones 6.14 y 6.23, esta deformación produciría una variación en la tensión del puente de $317\mu V$.

$$\delta v_0 = v_{ref} \times \frac{k}{4} \times S_S \times \varepsilon = 5V \times 2{,}11 \times 30\ {}^{\mu m}/_{m} = 317\mu V \tag{7.1}$$

Se observa pues que la variación de tensión de salida es muy pequeña para ser medida en forma directa. Esta última afirmación se realiza considerando que el instrumento de lectura de dicho voltaje debe ser lo suficientemente pequeño para poder ser montado sobre un eje de motor y a la vez económicamente viable su adquisición. Es así que para lograr la lectura se impone la inclusión de una etapa de amplificación de tensión que lleve la señal de salida a un rango fácilmente medible.

Sumado a lo último, se agrega como requerimiento que el elemento de lectura de la señal amplificada tenga a su vez una resolución significativa a los efectos de minimizar todo lo posible el error por lectura de tensión. Siendo que el equipo diseñado será utilizado para relevar diversos estados de carga de un motor se define como aceptable que la medida de la tensión de salida tenga una incertidumbre inferior a 1 % con el motor a la mitad de su carga nominal. Esto corresponde a un voltaje de salida del entorno de $150\mu V$.

Por otra parte, como se verá más adelante el equipo de medida de tensión utilizado trabaja con tensiones de hasta $3,3V$, por lo que, adelantándose a dicha limitante, es que se definió que el módulo de amplificación del dispositivo debe contar con ***ganancia programable***. De esta manera se puede controlar la magnitud de la tensión de salida para ajustarla al rango de funcionamiento del equipo de sensado.

Otro requerimiento sobre el sistema es la neutralización del desapareo natural de las galgas. Naturalmente, las galgas que conforman los puentes no tienen todas el mismo valor de resistencia, aún en reposo. Estas diferencias producen la aparición de una tensión de salida en el estado de reposo (ver ecuación 6.15). Luego, dado que dicha tensión debe ser amplificada, un aspecto a verificar es que no se supere la máxima tensión de lectura.

A la alimentación del circuito se le definen dos requerimientos, ambos de suma importancia. En primer lugar, la batería con la cual se alimenta el sistema debía ser capaz de proveer energía en forma ininterrumpida durante el tiempo de ensayo y ser capaz de ser reutilizada en reiteradas ocasiones. Es así que se solicita que la batería tenga una capacidad de funcionamiento mayor o igual a 5 horas. En segundo lugar, dado que la alimentación también se utilizará para energizar el puente

de galgas no es deseable que la misma fluctúe en el tiempo. Para ello se toma como necesario contar con una etapa intermedia entre la alimentación y el circuito que regule la tensión a un valor fijo independientemente de las fluctuaciones de la tensión de alimentación.

Por último, el dispositivo debe realizar las medidas y reportarlas al usuario con el motor en funcionamiento. Esto supone que el dispositivo debe contar con algún mecanismo de comunicación a los efectos de enviar los datos de medida mientras giraba acoplado al eje del motor. Para ello se define como requerimiento que el equipo diseñado debe contar con un módulo de comunicación inalámbrica. Otros mecanismos tales como un sistema de escobillas fueron contemplados pero la dificultad de implementación los descartó rápidamente.

7.2. Esquema general de solución desarrollada

En base a los requerimientos previamente especificados se elaboró un diagrama de bloques con las etapas que componen el dispositivo a diseñar.

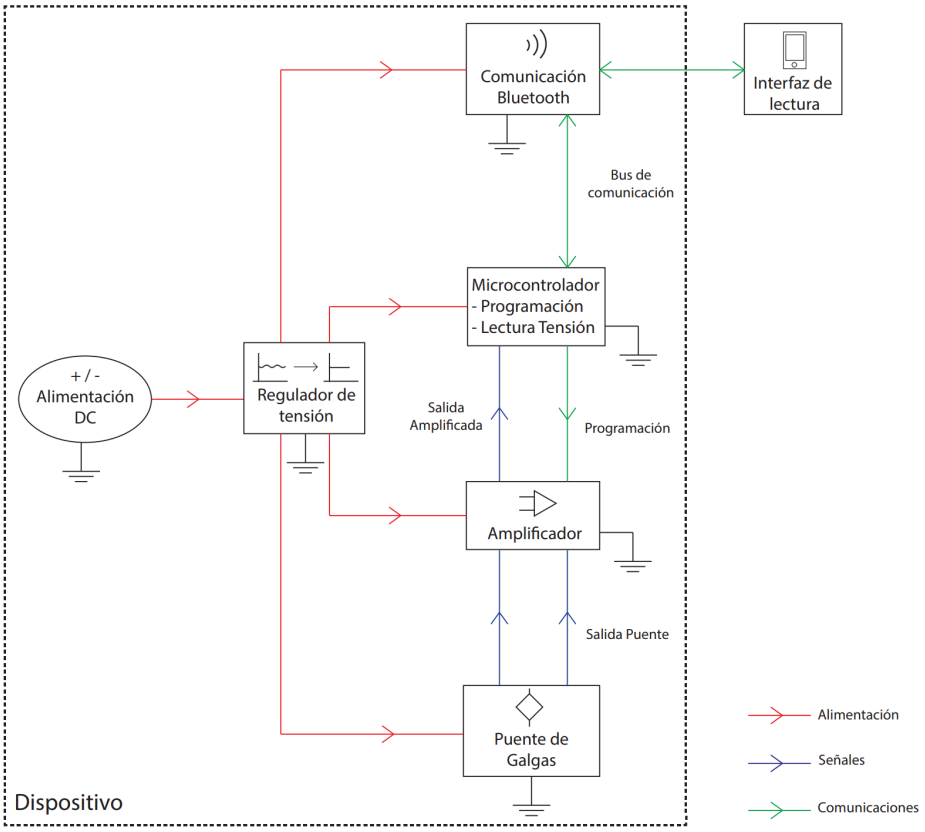


Figura 7.1: Diagrama de bloques de sistema de medida

Etapa Alimentación

La solución desarrollada cuenta con una fuente de alimentación DC conectada a un regulador de tensión para fijar la tensión en un valor específico. Desde el regulador de tensión se alimenta el resto de los componentes del circuito, siendo estos: el puente de galgas a ser montado sobre el eje del motor, un amplificador, un microcontrolador y un módulo de comunicación vía Bluetooth.

Etapa Procesamiento de señales

El puente de galgas se conecta a una etapa de amplificación para elevar la tensión de salida. A su vez la salida del amplificador se conecta a un microcontrolador que efectúa la lectura de la misma. Desde el microcontrolador se realiza también la programación de la ganancia del amplificador.

Etapa Comunicación con usuario

Por último, al microcontrolador se le conecta un módulo de comunicación Bluetooth para intercambio de datos. La conexión se realiza mediante un bus de comunicación a través del cual se extrae la señal medida por el microcontrolador y, a su vez, se envían órdenes al mismo.

7.3. Elección de componentes

En base al diseño desarrollado se procedió a seleccionar los componentes que integrarían el circuito. Se atendió a cumplir con los requerimientos establecidos y a verificar la compatibilidad entre los mismos. A continuación se listan los componentes seleccionados y la razón de la elección de cada uno de ellos.

Microcontrolador: Arduino MKR 1000

El primer elemento que se seleccionó fue el microcontrolador que oficiaría de centralizador de las funciones de comando y medida en el circuito. La intención fue seleccionar un dispositivo de fácil uso, que a la vez reuniese dos requisitos fundamentales: dimensiones pequeñas y alta sensibilidad de medida. Se eligió trabajar con la línea Arduino, dada la simpleza para programarlos y la universalidad de su uso, lo cual permite encontrar rápidas soluciones a los problemas que pudieran surgir.

La lectura de tensiones continuas en los Arduinos se realiza digitalizando la entrada de tensión mediante un conversor ADC. El conversor emplea una cierta cantidad de bits para construir la señal digital, en una escala entre 0 y la tensión

de funcionamiento del Arduino. La cantidad de bits con la que trabaja el conversor repercute directamente en la sensibilidad con la cual el dispositivo es capaz de medir una señal. La mayoría de los modelos de Arduino cuentan con conversores que trabajan con 10 bits, sin embargo existen unos pocos modelos que cuentan con conversores de 12 bits. Esto naturalmente mejora cuatro veces la sensibilidad de la lectura. Entre los últimos se seleccionó el modelo MKR 1000 que, además, es pequeño comparativamente con los demás cumpliendo así con el restante requerimiento de tamaño.

Amplificador: AD8556

La etapa de amplificación de la señal de salida del puente se realizó con el amplificador AD8556 de Analog Devices [13]. A continuación, se listan las prestaciones del dispositivo significativas para la aplicación:

- Ganancia programable de 70 a 1280.
- Filtros EMI (Filtro de interferencia electromagnética) a la entrada e internos.
- Alto CMRR: valor típico 112dB (mínimo en 94dB)
- Filtro pasabajos implementable mediante conexión a capacitor.
- Tensión de alimentación: 5V (mínimo 4,5V y máximo 5,5V)

Se agregó, además, un capacitor cerámico de $10nF$ conectado entre el pin de filtrado del AD8556 y tierra, valor recomendado en [13] para implementar el filtro pasabajos (880Hz).

Fuente de Alimentación: Batería Alcalina 9V

Para alimentar la totalidad del dispositivo se eligió emplear un pila 9V. Su elección se fundamentó en asegurar la continuidad del funcionamiento, aún luego de varias operaciones del dispositivo. En la siguiente sección se presenta el cálculo de consumo y rendimiento del sistema.

Regulador de tensión

El criterio para la selección del regulador de tensión fue que fuera compatible con el tipo de pila a utilizar y que no fuese ajustable. Esto último orientado a evitar desajustes por movimiento, una vez montado el dispositivo sobre el eje del motor y girando a la par del mismo, aumentando así la confiabilidad en la tensión de alimentación. El dispositivo elegido fue el conversor DC/DC up/down 5V modelo S7V7F5.

Puente de galgas extensiométricas

Para conformar el puente de galgas se adquirieron modelos de galgas de tres orígenes distintos: HBM fabricante internacionalmente reconocido, Phidget empresa canadiense dedicada a instrumentación y control y unas terceras de procedencia desconocida.

- Galgas HBM tipo half bridge de 120Ω y 2,07 de factor de galga
- Galgas Phidgets tipo half bridge de $1k\Omega$ y factor de galga desconocido
- Galgas Phidgets tipo full bridge de $1k\Omega$ y factor de galga desconocido
- Galgas de 350Ω y factor de galga igual a 2,11

Observación: Es importante destacar que las Galgas HBM son de una calidad considerablemente superior al resto, lo que las volvió más confiables a la hora de realizar los ensayos de caracterización del método desarrollado.

Comunicación Bluetooth

- Módulo Bluetooth HM-10 de comunicación serial a través de los pines RX y TX. Utiliza Bluetooth 4.0.

Interfaz de lectura/escritura

- Se utiliza un celular como medio de comunicación entre el prototipo y el usuario, a través de la aplicación *LightBlue Explorer*.

Level Shifter

Fue necesario incorporar un Level Shifter al diseño a efectos de acondicionar las señales de comunicación entre el Arduino y el amplificador AD8556. El Arduino MKR1000, si bien alimentado a 5V, trabaja con tensión interna de 3,3V en tanto que el AD8556 trabaja a 5V y, de acuerdo con [13], la mínima tensión identificable como un 1 por el amplificador es 4V.

El Level Shifter fue implementado con un transistor 2N222 y dos resistencias de $10k\Omega$.

Divisor de tensión para lectura de alimentación

Con el objetivo de tener un control sobre el valor de la tensión de alimentación proveniente del regulador de tensión, se implementó un divisor de tensión conformado por dos galgas $10k\Omega$ a los efectos de bajar la tensión por debajo 3,3V, límite máximo de lectura del Arduino.

7.4. Esquema de conexionado

Con los componentes descritos anteriormente se desarrolló el siguiente esquema de conexionado.

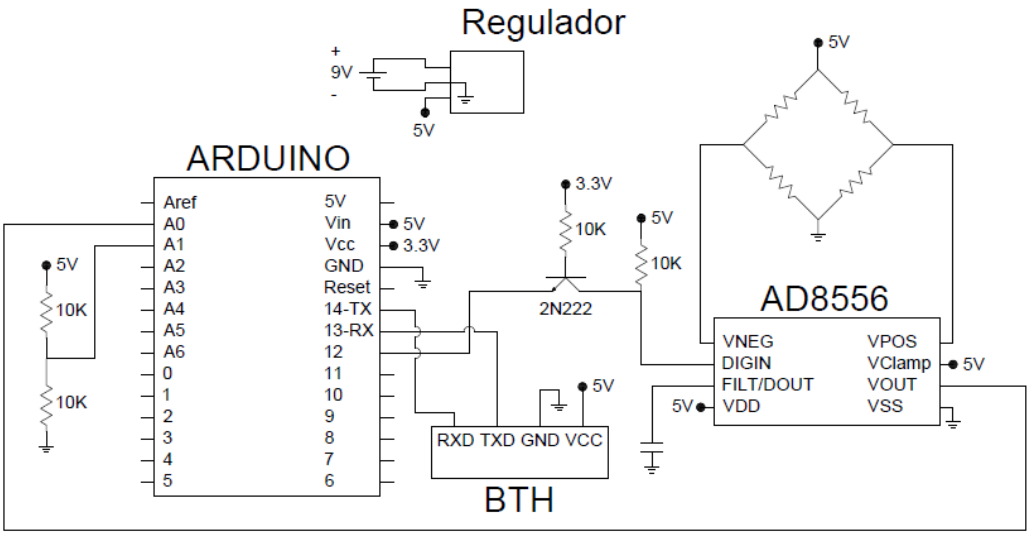


Figura 7.2: Esquema de conexionado de componentes

A continuación se detallan los pines utilizados de cada componente,

Arduino

- A0: conectado a V_{out} del amplificador, pin destinado a sensar la salida del puente amplificada.
- A1: pin de lectura de tensión de alimentación.
- V_{in}: Pin de alimentación 5V.
- V_{cc}: Salida de tensión 3,3V.
- V_{gnd}: Pin de tierra, conectado a la tierra del circuito
- TX y RX: Pines de comunicación serial, conectados a RXD y TXD del módulo Bluetooth.
- 12: Pin de salida digital conectado mediante Level Shifter al pin DigIn del amplificador AD8556. Utilizado para programación del amplificador.

Amplificador AD8556

- V_{neg}: Entrada borne negativo de salida del puente de galgas.
- DigIn: Pin de programación del amplificador. Conectado a pin 12 del Arduino mediante Level Shifter.
- FILT/DigOut: Pin para implementación de filtro. Conectado a condensador de $10nF$.
- VDD: Pin de alimentación positiva en 5V.
- V_{pos}: Entrada borne positivo de salida del puente de galgas.
- V_{clamp}: Pin de recorte de tensión, conectado a 5V.
- V_{out}: Pin de salida de señal amplificada. Conectado a pin de lectura A0 del Arduino.
- VSS: Pin de tierra del amplificador, conectado a la tierra del circuito.

Módulo Bluetooth

- RXD: Pin receptor de comunicación serial. Conectado a TX del Arduino.
- TXD: Pin transmisor de comunicación serial. Conectado a RX del Arduino,
- GND: Pin de tierra del módulo, conectado a tierra del circuito.
- VCC: Pin de alimentación positiva en 5V.

7.5. Verificaciones al diseño

Nivel de resolución en medida del voltaje

Un parámetro determinante en la elección del amplificador AD8556 fue realizada en virtud de la resolución en la medida de tensión que se podía lograr mediante su uso.

Tal como fue comentado en la sección 7.1, se estimó una variación de la tensión de salida del puente en condiciones nominales del entorno de $300\mu V$ y a mitad de carga de $150\mu V$. Luego, suponiendo que se le configura al AD8556 una ganancia de 1280, la diferencia de tensión a la entrada del pin A0 del Arduino será de 384mV y 192mV.

Por otro lado, al tener el Arduino un conversor a 12 bits y funcionar a 3,3V, implica que la resolución de su medida es de:

$$Res_{Ard} = \frac{3,3V}{2^{12}-1} = \frac{3,3V}{4095} = 80,57\mu V \tag{7.2}$$

Esto supone una resolución de 0,21 % y 0,42 % a plena y media carga respectivamente. Aún a media carga, la resolución es suficiente como para no representar un inconveniente a la precisión de la medida.

Capacidad de fuente de alimentación

Otra verificación que debió realizarse fue evaluar cuanto tiempo la batería elegida podía alimentar el circuito en forma ininterrumpida.

Para ello se tuvo en cuenta el consumo energético de cada uno de los componentes involucrados en el circuito, cuyos valores se detallan a continuación y se resumen en la figura 7.3. Entre las galgas disponibles se eligen las HBM para el estudio ya que representan el caso más exigente por ser las galgas de menor resistencia (y por lo tanto mayor consumo).

- Consumo Arduino : 20mA (100mW)
- Consumo módulo Bluetooth: 8,5mA (42,5mW)
- Consumo Ad8556: 2,78mA (13,9mW)
- Consumo puente de galgas: $\frac{5V^2}{120\Omega} = 208mW$
- Consumo divisor resistivo: $\frac{5V^2}{20k\Omega} = 1,25mW$
- Consumo Level Shifter: $\frac{3,3V^2+5V^2}{10k\Omega} = 3,59mW$

Luego, el consumo total al regulador de tensión es de 369 mW y su eficiencia declarada de 90 %. Al tomar un factor de cobertura y asumirla como 85 % el consumo total a la pila es de 434 mW que a 9V representa 86,9 mA.

La capacidad típica de una pila 9V estándar es de alrededor de 500mAh. Por lo tanto, la pila seleccionada permite una operación continua de más de 5 horas y media, cumpliendo así con el requerimiento solicitado.

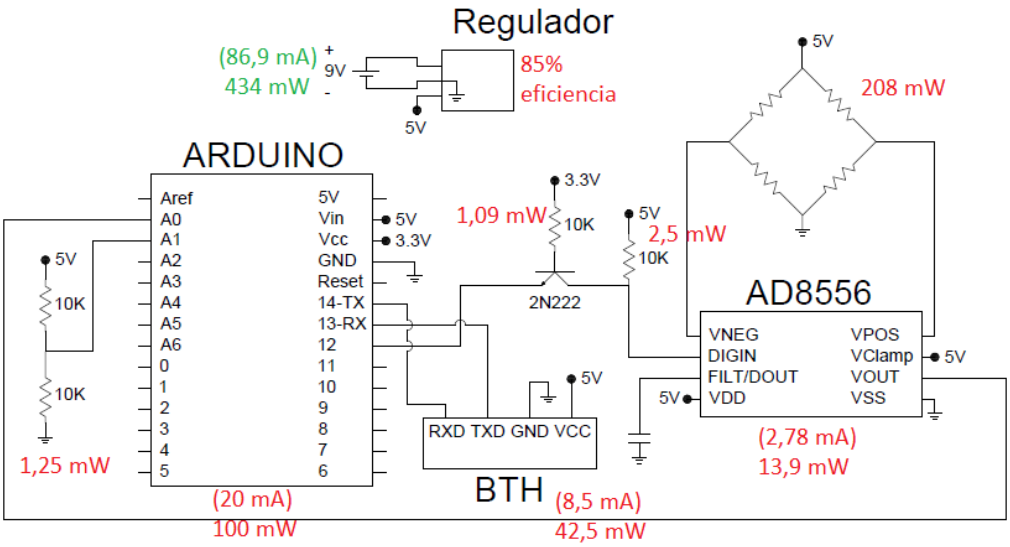


Figura 7.3: Diagrama de consumos en el circuito

7.6. Proceso de medida

A continuación se presentan las ecuaciones y los cálculos correspondientes al sistema de medida planteado anteriormente, así como el estudio de incertidumbre.

7.6.1. Medida del par

La ecuación de partida para el estudio del sistema es aquella que vincula la deformación del eje con el par (7.3), la cual se obtiene del desarrollo del capítulo 6. La deformación se vincula directamente con la variación de tensión en la salida del puente, sensada con el Arduino. Mientras tanto, el resto de los parámetros corresponden a constantes o a características del eje del motor bajo estudio.

$$T = \frac{I_P G}{c \sin\theta \cos\theta} \varepsilon_\theta \tag{7.3}$$

Las variables medibles de este caso son: c (radio del eje, que se mide con un calibre), θ (se asume 45^o, y depende del pegado de las galgas) y el valor de G (depende del material del eje del motor, declarado en la hoja de datos). El resto de las variables se analizan en las siguientes ecuaciones:

Momento polar de inercia (I_P)

$$I_P = \frac{\pi c^4}{2} \tag{7.4}$$

Esta expresión es válida para tramos de eje de sección circular. Sin embargo, típicamente los ejes de motor tienen una pequeña muesca para insertar una chaveta

con la cual se bloquea el acople al que se conecta la carga. Por otro lado, dada su funcionalidad, la muesca está ubicada en el tramo accesible del eje, imposibilitando la medida sobre una sección perfectamente circular. Las consecuencias de esta asimetría exceden el área de alcance del Proyecto.

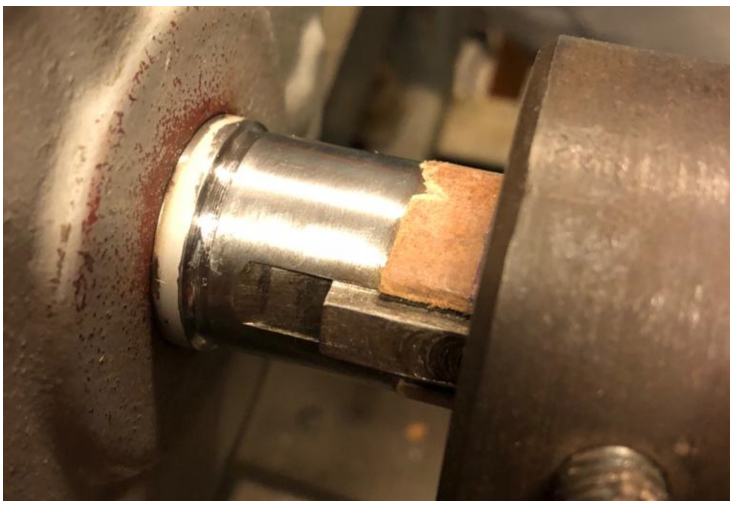


Figura 7.4: Chaveta insertada en muesca

Deformación unitaria (ε_θ)

$$\varepsilon_\theta = \frac{\delta R}{R}.\frac{1}{S_\varepsilon} \qquad \delta R = \frac{\delta v_0}{v_{ref}}.\frac{4R}{k} \Rightarrow \varepsilon_\theta = \frac{4}{v_{ref} k S_\varepsilon}\delta v_0 \tag{7.5}$$

La ecuación anterior sólo es válida si se considera que en valor absoluto de δR es igual para las cuatro galgas. En la práctica, todas las resistencias tienen valor distinto, a lo que se le llama desapareo inicial. Como se verá más adelante, al comprobarse que el valor de la tensión de salida del puente en reposo es sólo del orden de 0,02 % de la tensión de alimentación lo que significa un desapareo inicial promedio menor a 0,1 %. Por esta razón es que se considera despreciable las diferencias entre el valor de las resistencias a la hora de considerar el δR de cada una de ellas.

La variación de voltaje de salida del puente se compone de la resta entre el voltaje en reposo (V_{rep}) y el voltaje en carga (V_{carga}). Luego, estos valores de voltaje, que son registrados por el Arduino, están afectados por la ganancia del amplificador, respecto a los verdaderos valores de tensión a la salida del puente de galgas (δv_0).

Se registra, además, la tensión de alimentación del puente (v_{ref}). La señal relevada por el Arduino (V_{meas}) es la tensión de alimentación afectada por el divisor resistivo (relación 2:1) que se colocó para entrar en el rango de medida del equipo.

En todos los casos las medidas del Arduino (V_{meas}, V_{rep}, V_{carga}) se componen de la digitalización de la señal a 12 bits (4095 pasos) referenciada a la tensión de trabajo del Arduino ($V_{ard} = 3,3V$).

A continuación, se resumen mediante ecuaciones las relaciones arriba descritas.

$$v_{ref} = V_{meas}\frac{R_{10k1} + R_{10k2}}{R_{10k1}} \tag{7.6}$$

$$V_{meas} = \frac{Bits_{ard}V_{ard}}{4095} \tag{7.7}$$

$$\delta v_0 = \frac{V_{carga} - V_{rep}}{G_{AD8556}} \tag{7.8}$$

Voltaje salida del puente con carga:

$$V_{carga} = \frac{Bits_{ard}V_{ard}}{4095} \tag{7.9}$$

Voltaje salida del puente en reposo:

$$V_{rep} = \frac{Bits_{ard}V_{ard}}{4095} \tag{7.10}$$

7.6.2. Estudio de incertidumbre

Por último, se estudia la precisión del sistema propuesto, es decir, su sensibilidad a las medidas que se desean obtener.

Para ello fue llevado a cabo un estudio de la incertidumbre, en función de las incertidumbres de los factores involucrados en las ecuaciones y de la resolución y exactitud de los instrumentos utilizados.

Incertidumbre de los factores

De las ecuaciones anteriores se deducen todos los factores que tienen una incertidumbre estrictamente relacionada con la medida:

Factor	**Incertidumbre**	**Definición**
c	Res. calibre	Radio del eje
S_ε	1 %	Factor de galga (hoja de datos)
θ	$\pm$ 2 ^{o}	Ángulo de posición de la galga
R_{10k1}	Resol. y exáct.	Res para medir alimentación del puente
R_{10k2}	Resol. y exáct.	Res para medir alimentación del puente
$Bits_{ard}$	Res. arduino (1 bit)	Bits del arduino para medida de voltaje
V_{ard}	Resol. y exáct.	Voltaje de fondo de escala del Arduino
G_{AD8556}	Ensayo de ganancia	Ganancia AD8556

Tabla 7.1: Incertidumbre de factores a medir

Incertidumbre expandida

De acuerdo a las ecuaciones anteriormente planteadas se pudo obtener la incertidumbre de la medida del par. A continuación, se presenta una lista con la incertidumbre de cada una de las ecuaciones.

En la ecuación 7.3 existe incertidumbre en las medidas del radio c y del ángulo θ (considerada por el error incurrido al momento de pegar las galgas en el eje). La incertidumbre de G se consideró nula, asumiendo que el eje es exactamente del material que indica la hoja de datos y que no hay error asociado a la constante del material.

- 7.3: $\sigma_T = \sqrt{(\frac{\partial T}{\partial I_P})^2 \sigma I_P^2 + (\frac{\partial T}{\partial \varepsilon_\theta})^2 \sigma \varepsilon_\theta^2 + (\frac{\partial T}{\partial c})^2 \sigma c^2 + (\frac{\partial T}{\partial \theta})^2 \sigma \theta^2}$
  - $\frac{\partial T}{\partial I_P} = \frac{G}{c.sin\theta cos\theta} \varepsilon_\theta$
  - $\frac{\partial T}{\partial \varepsilon_\theta} = \frac{I_P G}{c.sin\theta cos\theta}$
  - $\frac{\partial T}{\partial c} = -\frac{I_P G}{c^2 sin\theta cos\theta} \varepsilon_\theta$
  - $\frac{\partial T}{\partial \theta} = -\frac{(cos\theta^2 - sin\theta^2) I_P G}{c.sin\theta^2 cos\theta^2} \varepsilon_\theta$; cabe destacar que la primer derivada evaluada en 45^o es nula, por lo que, en un desarrollo de orden 1, se desprecia su aporte.

  De acuerdo con la ecuación 7.4 la incertidumbre en I_p depende exclusivamente del radio c. Como fue mencionado, en la práctica aparecen otros factores debidos a que los motores generalmente presentan una muesca para el acople con la carga. Lo deseable es colocar las galgas a una altura del eje que no coincida con la muesca. Si esto no se logra sucede que la sección transversal del punto donde está montada la galga no es exactamente un círculo (no obstante se le aproxima en forma significativa). Este factor no se consideró en el estudio de incertidumbre pero se tuvo cuidado de identificarlo como una potencial fuente de error.

- 7.4: $\sigma I_P = (\frac{\partial I_P}{\partial c}) \sigma c$
  - $\frac{\partial I_P}{\partial c} = \frac{4\pi c^3}{2}$
- 7.5: $\sigma \varepsilon_\theta = \sqrt{(\frac{\partial \varepsilon_\theta}{\partial v_{ref}})^2 \sigma v_{ref}^2 + (\frac{\partial \varepsilon_\theta}{\partial S_\varepsilon})^2 \sigma S_\varepsilon^2 + (\frac{\partial \varepsilon_\theta}{\partial \delta v_0})^2 \sigma \delta v_0^2}$
  - $\frac{\partial \varepsilon_\theta}{\partial v_{ref}} = -\frac{4}{v_{ref}^2 K.S_\varepsilon} \delta v_0$
  - $\frac{\partial \varepsilon_\theta}{\partial S_\varepsilon} = -\frac{4}{v_{ref}.K.S_\varepsilon^2} \delta v_0$

- $\frac{\partial \varepsilon_\theta}{\partial \delta v_0} = \frac{4}{v_{ref}.K.S_\varepsilon}$

- 7.6:$\sigma v_{ref} = \sqrt{(\frac{\partial v_{ref}}{\partial V_{meas}})^2 \sigma V_{meas}^2 + (\frac{\partial v_{ref}}{\partial R_{10K1}})^2 \sigma R_{10K1}^2 + (\frac{\partial v_{ref}}{\partial R_{10K2}})^2 \sigma R_{10K2}^2}$
  - $\frac{\partial v_{ref}}{\partial V_{meas}} = \frac{R_{10K1} + R_{10K2}}{R_{10K2}}$
  - $\frac{\partial v_{ref}}{\partial R_{10K1}} = \frac{V_{meas}}{R_{10K2}}$
  - $\frac{\partial v_{ref}}{\partial R_{10K2}} = \frac{V_{meas}}{R_{10K2}^2}(-R_{10K1})$

- 7.8: $\sigma \delta v_0 = \sqrt{(\frac{\partial v_0}{\partial V_{carga}})^2 \sigma V_{carga}^2 + (\frac{\partial v_0}{\partial V_{rep}})^2 \sigma V_{rep}^2 + (\frac{\partial v_0}{\partial G_{AD8556}})^2 \sigma G_{AD8556}^2}$
  - $\frac{\partial v_0}{\partial V_{carga}} = \frac{1}{G_{AD8556}}$
  - $\frac{\partial v_0}{\partial V_{rep}} = -\frac{1}{G_{AD8556}}$
  - $\frac{\partial v_0}{\partial G_{AD8556}} = \frac{V_{carga} - V_{rep}}{G_{AD8556}^2}$

- 7.7, 7.9 y 7.10: $\sigma v_{med} = \sqrt{(\frac{\partial v_{med}}{\partial Bits_{ard}})^2 \sigma Bits_{ard}^2 + (\frac{\partial v_{med}}{\partial v_{ard}})^2 \sigma v_{ard}^2}$ (v_{med} refiere a la variable medida)
  - $\frac{\partial v_{med}}{\partial Bits_{ard}} = \frac{v_{ard}}{4095}$.
  - $\frac{\partial v_{med}}{\partial v_{ard}} = \frac{Bits_{ard}}{4095}$

No se consideró la incertidumbre de tipo A en cada medida realizada por el Arduino debido a que la medida obtenida corresponde al promedio de 1000 medidas tomadas cada 1 ms. Para despreciar este factor se tuvo en consideración que las fluctuaciones de tensión tienen un período significativamente menor a 1 segundo.

Capítulo 8

Implementación

La implementación física del dispositivo fue llevada a cabo en distintas etapas. Se comenzó construyendo el dispositivo en Protoboard a fin de ir ensayando cada componente por separado y luego el sistema en su globalidad, para después pasar a implementar el dispositivo en su versión final en circuito impreso. La mayor parte de los procesos descritos en este capítulo fueron realizados en forma intercalada con los ensayos descritos en el Capítulo 9.

8.1. Requerimientos de implementación

Para la implementación del sistema de medida y elección de componentes a utilizar se tienen en cuenta aspectos mecánicos y eléctricos.

El **tamaño** es un requisito de suma importancia, ya que cuanto más pequeño sea el dispositivo, mayor será la facilidad de poder implantarlo en motores. A su vez, cuanto menor sea su tamaño, menor será la fricción con el aire y cuanto menor sea su peso, menor desbalance se le impondrá al eje sobre el cuál irá montado.

El proceso de instalación debe ser lo más sencillo posible. Cuanto más solidario a la forma de un eje sea el dispositivo, más fácil será llevar a cabo este proceso.

Entre los principales atributos con los que debe contar el prototipo están aquellos que deben protegerlo del giro del eje sobre el cual será montado. Por lo tanto, el diseño debe en primer lugar ser ***robusto*** y un contar con un ***sistema de agarre*** que no permita el movimiento relativo entre prototipo y eje. La robustez debe considerar desde eventuales golpes que el prototipo pueda sufrir hasta alteraciones en el sistema de comunicación debidas al campo magnético, velocidad de giro del motor, etc. Los componentes deben estar bien adheridos para evitar daños ante cualquier movimiento por impacto, así como mantenerse firmes mientras el eje esté en movimiento.

Con respecto a las galgas, serán instaladas de forma externa al circuito o siste-

ma de medida propiamente dicho, las mismas deben estar correctamente adheridas al eje del motor, para evitar cualquier tipo de movimiento cuando el mismo esté girando. El fijado de las mismas debe influenciar de menor manera posible el resultado de las medidas.

A nivel **eléctrico**, se busca reducir el impacto de cualquier tipo de ruido eléctrico o magnético, así como disminuir el error debido a las soldaduras o caminos eléctricos (cables, por ejemplo).

Para cumplir con todas estas exigencias se decide realizar un PCB (Printed Circuit Board) con la finalidad de implementar el sistema de medida.

8.2. Evolución del proceso de implementación

El proceso de implementación desde la elección y compra de los componentes del dispositivo final fue llevado a cabo en etapas. A continuación, se detalla la cronología de los ensayos, pruebas y confecciones que fueron llevados a cabo.

8.2.1. Etapa inicial - Caracterización de principales componentes

Previo a comenzar con los desarrollos y ensayos fue confeccionado un banco de pruebas estático para usarlo como herramienta para llevar a cabo los consecutivos ensayos. Más adelante profundiza en las características del banco.

1. **Ensayo de las galgas**: El primer paso en el camino hacia el dispositivo final fue ensayar las galgas disponibles, con el objetivo de evaluar su comportamiento frente a las deformaciones. Se hizo uso del banco de pruebas estático para tal fin. La importancia de este primer paso residió en que se pudo corroborar que el elemento central del sistema de medida efectivamente respondía de la forma deseada.

2. **Pruebas de programación en Arduino**: Ante la inexperiencia con el sistema se dedicó un espacio a interiorizarse en la programación en Arduino.

3. **Desarrollo de código de programación del AD8556**: Se desarrolló el código con el cual el Arduino programaría luego al amplificador AD8556.

8.2.2. Segunda etapa - Trabajos sobre Protoboard

Luego de haber ensayado las galgas se procedió realizar las pruebas de los distintos componentes empleando una protoboard para facilitar su conexionado.

4. **Ensayo de ganancia del amplificador AD8556**: Montando el Arduino y el amplificador en la Protoboard, y alimentando con una batería, se midió la ganancia del amplificador configurado a 1280. Además, se evaluó el

correcto funcionamiento de la programación del amplificador desde el Arduino. El modelo de Arduino utilizado en esta instancia en las siguientes hasta su reemplazo fue un Arduino UNO por ser más directa su conexión al amplificador.

5. **Ensayo de lectura con Arduino**: Con la señal proveniente del amplificador conectada al Arduino se ensayó la lectura del microcontrolador contrastándola con la lectura obtenida con el multímetro Fluke 45. La lectura del Arduino se visualizó en una PC a través de la conexión serial con el microcontrolador.

6. **Incorporación del módulo Bluetooth al circuito**: Se agregó el módulo Bluetooth al circuito y se probó la capacidad de acceder a él mediante la interfaz del celular.

7. **Desarrollo de código de programación total**: Habiendo incorporado el módulo Bluetooth al circuito se desarrolló el código de programación del Arduino incorporando las comunicaciones con el módulo. Esta versión preliminar del código final estuvo orientada a trabajar con Arduino UNO.

8. **Ensayos de funcionamiento de comunicaciones**: Se ensayó la capacidad de enviar órdenes de programación al amplificador y recibir las lecturas del Arduino a través de la vía inalámbrica.

9. **Ensayos de lectura con el sistema completo**: En simultáneo con el punto anterior se realizó un simulacro del funcionamiento final del sistema. Consistió en relevar las medidas obtenidas por el equipo estando conectado al puente de galgas sobre el banco estático y aplicando par al eje del mismo.

10. **Reemplazo Arduino UNO por Arduino MKR 1000**: Una vez validado el funcionamiento global del sistema se reemplazó el Arduino UNO por el Arduino MKR 1000. Se agregó al circuito el Level Shifter necesario para poder comunicar el microcontrolador con el amplificador.

11. **Desarrollo del código de programación final**: Con el Hardware definitivo se procedió a desarrollar el código final adaptando el anterior al Arduino MKR 1000. En particular, debió modificarse la sección de comunicaciones ya que este no soporta una librería de comunicación serial que había sido empleada al usar el Arduino UNO.

12. **Prueba final del circuito en Protoboard**: Se realizó una última prueba de funcionalidad del dispositivo. La misma consistió en medir variaciones de tensión en el puente de galgas producto de los esfuerzos sobre el banco de pruebas y comparar los resultados con los obtenidos con el multímetro Fluke 45.

8.2.3. Etapa final - Implementación en PCB y montaje sobre motor

Una vez validado el circuito en Protoboard se continuó con su implementación en PCB. Este circuito impreso sería el que fuera posteriormente instalado sobre el motor.

13. **Confección del circuito en PCB**: Se diseñó mediante el software Eagle y fue impreso en una prototipadora. Luego se soldaron los componentes en sus respectivas ubicaciones.

14. **Ensayo circuito impreso sobre banco de pruebas**: Se hizo uso del banco de pruebas para ensayar la funcionalidad del circuito impreso, contrastando los resultados con los obtenidos previamente con el circuito en Protoboard. Luego de este ensayo se validó el hardware implementado y se pasó a realizar los ensayos sobre el motor.

15. **Montaje de puente de Wheatstone sobre eje del motor**: Se montó un puente de Wheatstone sobre el eje del motor siguiendo el procedimiento de acondicionamiento del mismo, previo al pegado de las galgas. Las galgas destinadas a ser colocadas sobre el motor fueron las HBM por ser de una calidad superior y consecuentemente más fiables al momento de hacer los ensayos definitivos.

16. **Sujeción del equipo sobre el eje del motor**: Se montó el equipo sobre el punto de acople entre el motor y su carga, y se lo conectó al puente ya montado. Al dispositivo se le colocó una envolvente a fin de otorgarle protección mecánica y se lo sujeto fuertemente al eje para evitar desprendimientos.

Con este último punto se completó el proceso de implementación del equipo. Lo siguiente correspondió a los ensayos sobre el motor.

En lo que sigue del presente capítulo se detallan aquellos diseños e instancias de la lista anterior, que merecen un desarrollo más completo, por su importancia y extensión.

8.3. Diseño PCB

Una vez obtenidos resultados satisfactorios en el banco de prueba se procedió a la implementación de un dispositivo que permita relevar la medida de par, procesarla y transmitirla. Se utilizó el software EAGLE (AutoDesk) para el diseño de un PCB que cumpliera con lo necesario.

El diseño de la placa tuvo varias etapas y revisiones, a través de las cuales se buscó optimizar el espacio, siendo este un parámetro de diseño crítico, y minimizar el recorrido de las pistas para disminuir el ruido.

Se utiliza plano de tierra para minimizar ruido.
Se adjunta el esquemático realizado en EAGLE.

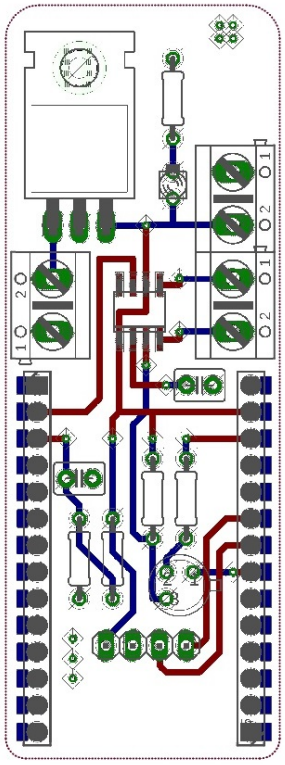


Figura 8.1: Diseño de PCB

Una vez finalizado el diseño del PCB se realizó el impreso del mismo sobre una placa de cobre virgen utilizando como herramienta la prototipadora del Instituto de Ingeniería Eléctrica (*PKF Protomat S63*). El software que maneja la misma es el Circuit Pro, dicho software se utiliza para extraer los Gerbers del archivo creado en Eagle, siendo éstos un formato de archivo que tiene la información necesaria para realizar el impreso de un PCB.

Se adjunta a continuación una imagen del circuito impreso obtenido.

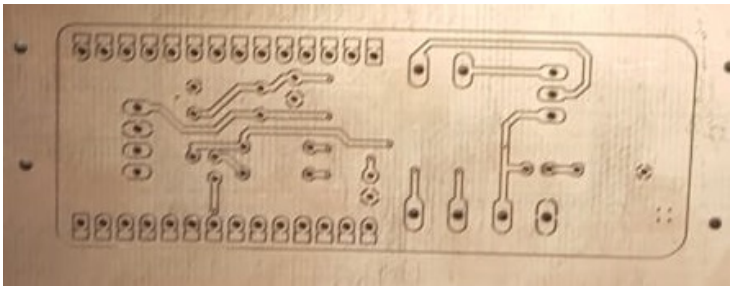


Figura 8.2: Circuito impreso sobre placa de cobre virgen

Dado que el resultado es una placa de cobre virgen, y dicho material presenta oxidación permeable, se decidió hacer un barrido de estaño sobre la misma. El barrido se llevó a cabo calentando suficientemente la placa y utilizando Flux para eliminar óxidos que puedan formarse y conseguir que el estaño pueda fluir y distribuirse mas fácilmente. Con esta acción se evita que el óxido que eventualmente pueda formarse ocasione problemas como cortocircuitos.

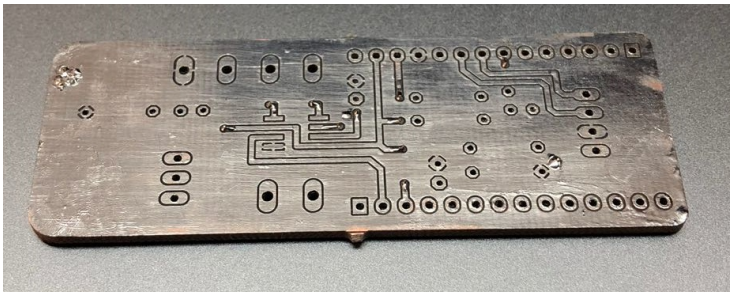


Figura 8.3: Circuito impreso estañado

Una vez terminado el proceso de acondicionamiento de la placa, se procedió a instalar los componentes para conformar el circuito objetivo. Para facilitar las conexiones entre la placa y la alimentación y el puente de galgas se utilizaron borneras.

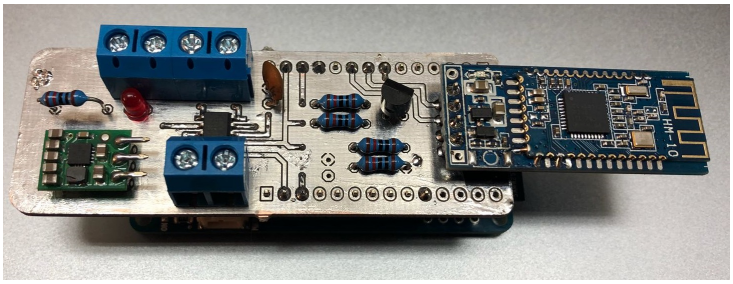


Figura 8.4: Circuito impreso implementado con componentes

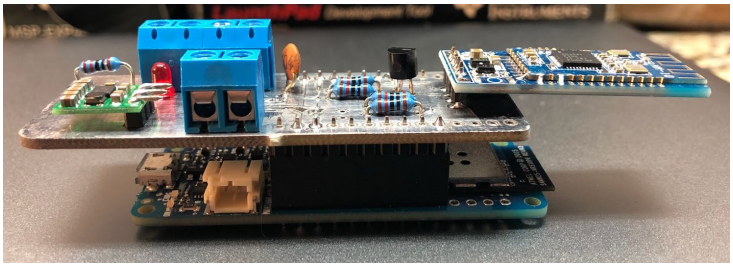


Figura 8.5: Circuito impreso implementado con componentes

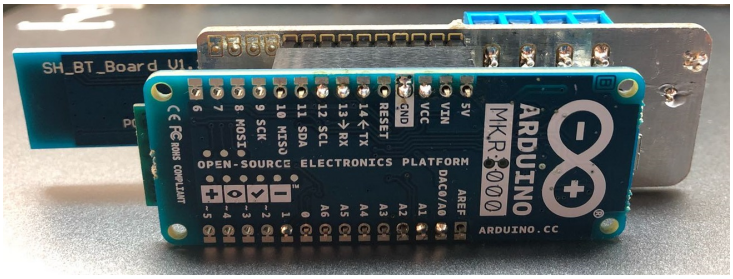


Figura 8.6: Circuito impreso implementado con componentes

8.4. Programación de amplificador AD8556

La programación del amplificador AD8556 se orientó a lograr programar su ganancia. La ganancia del componente está compuesta por dos etapas de amplificación. La primera programable entre 4 y 6,4 en 128 pasos (no constantes en todo el barrido). La segunda programable entre 17,5 y 200 en 8 pasos (no constantes en todo el barrido). Además es posible configurarle una tensión de Offset, es decir una señal constante que se agregue a la salida del puente (prestación no utilizada).

El modo de programación del amplificador es mediante cadenas de 38 pulsos de largo, recibidas por su pin DigIN. Referenciando su hoja de datos [13], el envío de pulsos debe respetar los siguientes tiempos:

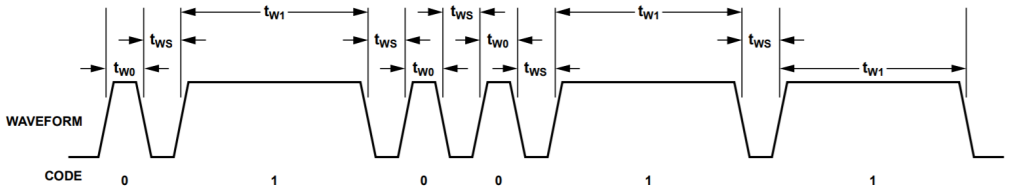


Figura 8.7: Diagrama de tiempos para el código 010011 (Amplificador AD8556)

Parámetro	Descripción	Solicitud de tiempo
t_{w0}	Ancho de pulso para cargar un 0	Entre 50ns y $10\mu s$
t_{w1}	Ancho de pulso para cargar un 1	$\leq 50\mu s$
t_{ws}	Tiempo entre pulsos consecutivos	$\leq 10\mu s$

Tabla 8.1: Solicitudes de tiempo para reconocimiento de pulsos de programación (AD8556)

La distribución del significado de los pulsos se resume en la tabla siguiente:

Etapa	Bits	Significado
0	0 a 11	12 Bits de inicio de paquete 1000 0000 0001
1	12 a 13	2 bits de elección de tipo de programación Relevantes: 01 modo simulación 10 modo programación permanente
2	14 a 15	2 bits de elección de parámetro a setear 00: Código de Ganancia de Segunda Etapa 01: Código de Ganancia de Primera Etapa 10: Código de Offset de Salida 11: Otras funciones
3	16 a 17	2 bits Dummy 10
4	18 a 27	8 bits con el código de lo que se programa Si etapa 2 00: se usan los 3 LSB Si etapa 2 01: se usan los 7 LSB Si etapa 2 10: se usan los 8 bits Si etapa 2 11: otras funciones de consulta de estados
5	26 a 37	12 Bits de final de paquete 0111 1111 1110

Tabla 8.2: Formato de envía de información al amplificador AD8556

El amplificador AD8556 se programó mediante el Arduino. Para ello se empleó una librería Arduino dedicada para tal fin y se agregó al código de programación del microcontrolador las funciones de programación de la librería con los siguientes parámetros.

- Etapa 1: Bits 01. Se optó por trabajar siempre en modo simulación a pesar de que esto implica reprogramar el amplificador cada vez que se enciende el equipo. Si bien no se trabajó con otra ganancia que no fuera 1280, se decidió mantener la capacidad de modificar la programación del chip.
- Etapa 2: Todas las posibilidades salvo 11. En el código se llama a la programación tres veces para configurar cada uno de los tres parámetros.
- Etapa 4
  - Ganancia de la Segunda Etapa: 0000 0111 código para setear 200.
  - Ganancia de la Primera Etapa: 0111 1111 código para setear 6,4.
  - Offset: 0000 0000 código para setear 0.

8.5. Programación de Arduino MKR1000

La programación del Arduino se llevó a cabo mediante el programa para PC Arduino IDE. Previo a elaborar el código de programación del Arduino se definieron ciertas operaciones elementales que debían poder realizarse con el equipo.

- Programar el amplificador AD8556.
- Leer la tensión de entrada en el pin A0.
- Leer la tensión de entrada en el pin A1.
- Tener control sobre cuando se efectúan las medidas. Esto es, dar al usuario la capacidad de indicar al dispositivo cuando quiere recibir una lectura.
- Optimizar la lectura. Esto es, no leer un único valor de voltaje sino efectuar un promedio de muchas lecturas independientes en un período corto de tiempo y luego promediar.
- Transmitir los datos al módulo Bluetooth para ser envíados al usuario en forma inalámbrica.

Siguiendo esos criterios se elaboró un sencillo programa para efectuar las medidas y la programación del amplificador. No se profundizó en demasía en el desarrollo del código, sino que se buscó que el mismo fuese funcional a las necesidades del proceso de medida. Debajo se presenta el esquema de estados del programa (Figura 8.8.

El programa comienza al encender el dispositivo y su primera acción es inicializar los pines y las comunicaciones. Luego se programa el AD8556 con los parámetros ya prefijados de antemano en el código y llega a un estado de espera.

En este punto comienza la interacción con el usuario quien mediante dos comandos puede elegir qué acción tomar. Si le envía un 1 al Arduino mediante el Bluetooth el programa realiza una medida de las tensiones en sus pines A0 y A1 tomando 1000 muestras cada 1ms y promediando los resultados. A continuación envía al usuario a través del Bluetooth el valor de la medida en A0 (valor proporcional entre 0 y 4095 con la referencia 3,3V igual a 4095). El usuario al enviar un nuevo 1 solicita al Arduino que envíe el valor de la medida en A1 (ídem medida A0). Luego de ese paso se regresa automáticamente al estado de espera.

Si, por el contrario, el usuario estando en el estado de espera ingresa un 2 entonces se realiza la programación del amplificador nuevamente. Se agregó esta funcionalidad ya que el amplificador, ante una eventual falla en el circuito que lo afecte, pasa a un estado de falla hasta que se lo apague o vuelva a configurar. Si la falla fuese de carácter transitorio, esta funcionalidad de reprogramar el amplificador estando en operación permitiría solucionar el problema sin necesidad de frenar el motor y reiniciar el dispositivo entero.

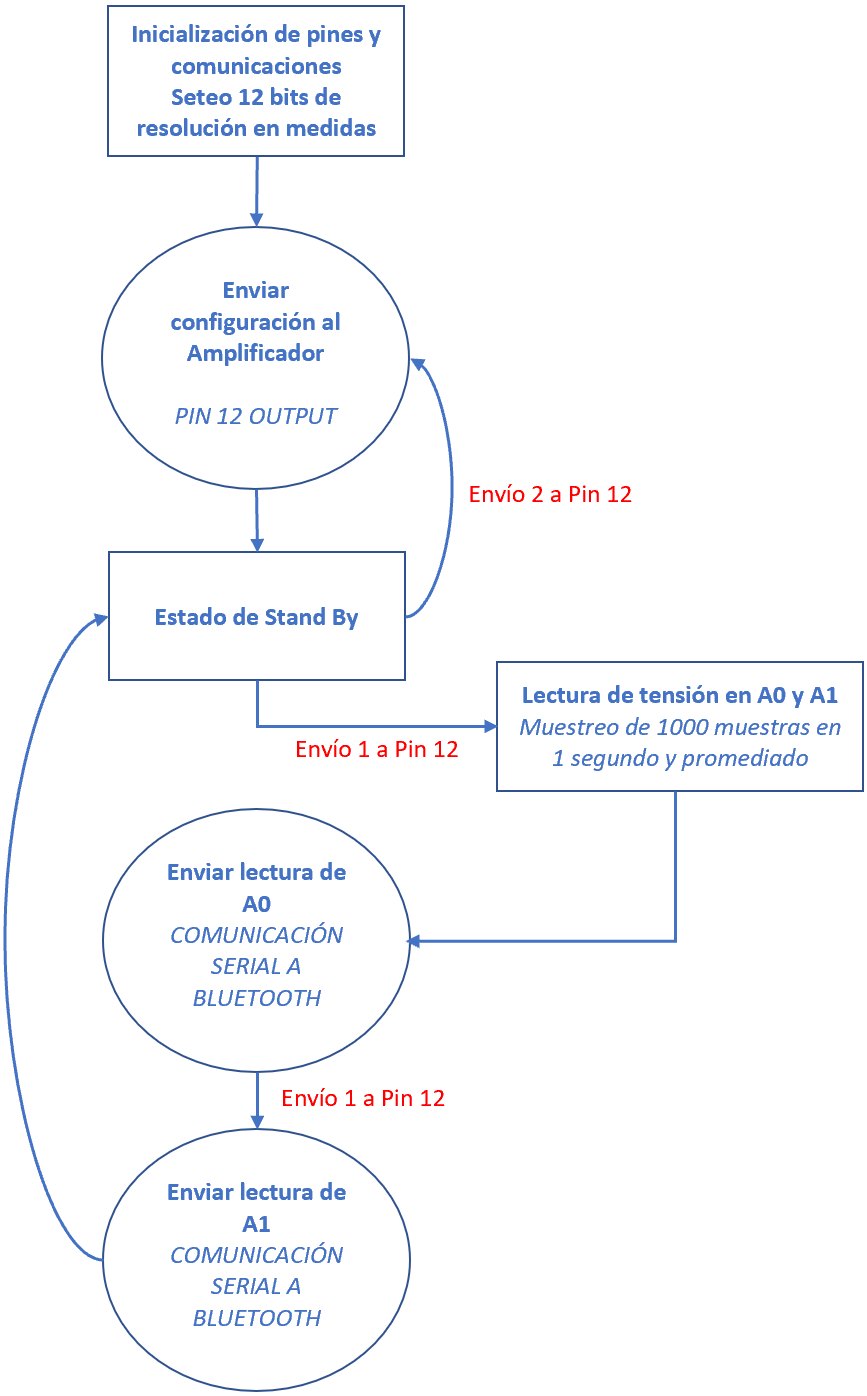


Figura 8.8: Diagrama de estados de la programación del dispositivo

8.6. Adquisición de datos

La interfaz de intercambio de datos con el dispositivo se implementó mediante la aplicación de celular LightBlue Explorer disponible para sistemas operativos Android y iOS. Esta es compatible con el módulo Bluetooth seleccionado y permite intercambiar información con el mismo. Tiene una capacidad de almacenar 5 lecturas consecutivas antes de sobreescribir la última de ellas. Si bien no es una gran prestación, fue suficiente para el uso que se le dió ya que sólo se realizaron 2 lecturas en simultáneo (tensión de salida del amplificador y tensión de alimentación del puente).

A través de esta interfaz fue que se comunicó con el dispositivo enviando las órdenes ya mencionadas en la sección anterior y recibiendo los valores de voltaje medidos.

8.7. Confeccionamiento del puente de Wheatstone sobre eje

8.7.1. Acondicionamiento del eje y pegado de galgas

Antes de realizar el pegado de galgas al eje sobre el cual se medirán deformaciones se debe asegurar que la superficie del mismo cumpla ciertos requerimientos para asegurar la correcta adherencia. La superficie debe estar libre de óxido, pintura, debe ser lisa y pulida. Los pasos a seguir para el correcto acondicionamiento del eje son los siguientes:

1. Eliminar restos de pintura suelta y óxido con una espátula

2. Ubicar el punto donde se pegarán las galgas

3. Lijar la zona en cuestión, utilizando primero lijas gruesas (número 400 aproximadamente) llegando a lijas mas finas (número 600 aproximadamente). Verificar que la superficie quede bien pulida y sin poros.

4. Frotar la zona implicada con una gasa impregnada en acetona. Repetir el proceso hasta que no se observen restos en la gasa.

5. Pegar una cinta sobre el eje que servirá de guía para realizar el pegado. Limpiar nuevamente con gasas e hisopos con acetona.

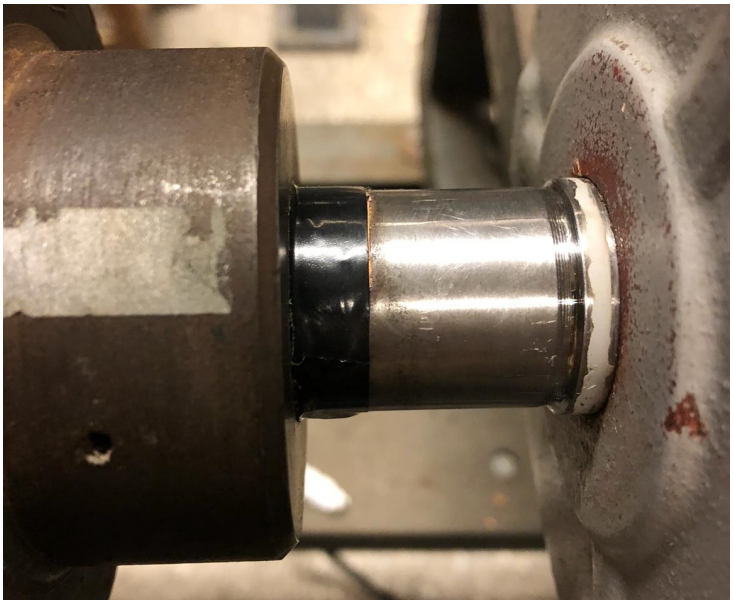


Figura 8.9: Pegado de cinta a utilizar como guía.

6. Ayudándose con cinta adhesiva, presentar la galga en el punto donde se instalará. Despegar levemente la cinta y limpiar nuevamente la zona en cuestión.

7. Colocar una gota del pegamento (adecuado para galgas) correspondiente debajo de donde se ubicará la galga y, con la cinta anteriormente descrita, ayudarse para ubicarla.

Figura 8.10: Pegado de galga extensiométrica en eje de motor.

8. Ejercer presión sobre la galga (que se ubica debajo de la cinta adhesiva) durante dos minutos.

9. Retirar la cinta adhesiva cuidadosamente.

8.7.2. Armado de puente de Wheatstone

Se dispone de diferentes tipos de galgas:

- Galgas Phidgets - Half Bridge
- Galgas Phidgets - Full Bridge
- Galgas chinas - Half Bridge
- Galgas HBM - Half Bridge
- Galgas HBM - Roseta

Para el armado del puente con galgas Half Bridge se ubicará una diametralmente opuesta a la otra en el eje. Este tipo de galga es el que más tendremos en cuenta, ya que, al tener la posibilidad de poner una diametralmente opuesta a la otra, tenemos un relevamiento más preciso de la deformación que sufre el eje.

El conexionado de las mismas se realiza de forma tal que las dos galgas que sufren tensión tengan el mismo signo en la ecuación 6.22, análogamente, las galgas que sufren compresión deben tener el mismo signo.

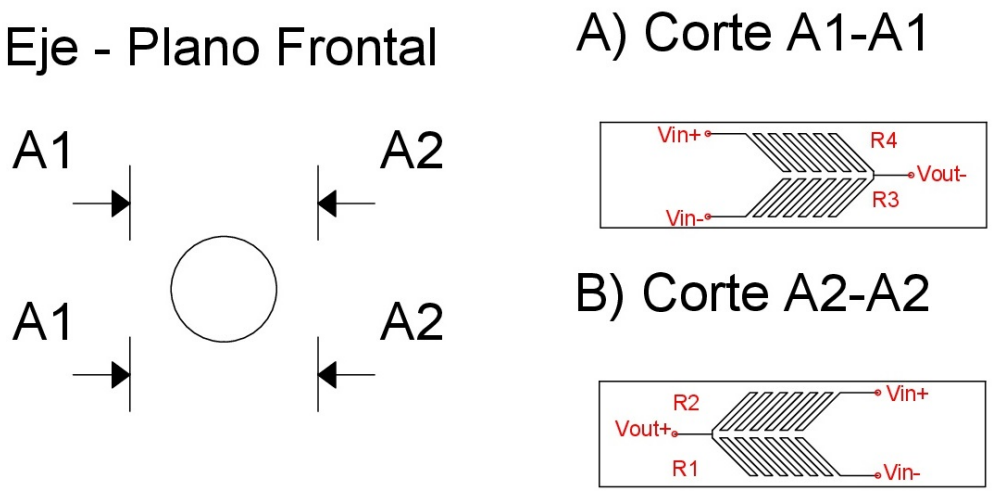


Figura 8.11: Conexionado de galgas en eje

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 9

Ensayos estáticos

En este capítulo se presentan los distintos ensayos que se llevaron a cabo antes de montar el dispositivo sobre el motor. Todos estos ensayos se realizaron en paralelo al desarrollo descripto en el capítulo anterior, por lo que se recomienda su lectura previa.

El procedimiento iterativo llevado a cabo durante la confección y ajuste del equipo construido se realizó sobre un eje estático. Se optó por esta opción por dos razones. Por un lado, hasta no tener implementado el prototipo definitivo no existía la necesidad de trabajar directamente sobre el motor, siendo considerablemente más sencillo encontrar errores de diseño, en la electrónica o de programación con el dispositivo inmóvil. En segundo lugar, el equipo fue construido po etapas, siempre anteponiendo un ensayo de lo implementado en cada instancia previo a proseguir con la construcción. Por lo tanto, poder evitar posibles problemas ligados al movimiento del dispositivo como desprendimiento de componentes, errores en las comunicaciones, pérdida de alimentación (y no a asuntos constructivos) trabajando en un ambiente controlado, resultaba lógico durante la fase de ensayos.

Con este objetivo es que se diseñó un banco de pruebas estático que permitió emular el funcionamiento de un motor cargado pero sin rotación. La descripción del mismo será abordada más adelante en el capítulo. Sobre este banco de pruebas se llevaron a cabo las siguientes pruebas/ensayos, en orden cronológico:

- **Pruebas de pegado de galgas:** práctica de pegado de galgas sobre un eje cilíndrico.
  Nota importante, a la tercera galga ya se dominaba el método de forma satisfactoria, siendo este de fácil implementación.

- **Ensayo de respuesta de galgas a deformación:** prueba del buen funcionamiento de las galgas adquiridas.

- **Respuesta de las galgas en punto de operación específico:** contraste entre los distintos tipos de galgas adquiridas.

- **Medida de la ganancia del amplificador:** ensayos al amplificador utilizado en distintos puntos de operación a los efectos de medir la ganancia que impone.
- **Ensayo de sistema completo implementado en Protoboard:** evaluación de medidas obtenidas con la versión preliminar del dispositivo construido.
- **Ensayo de circuito en PCB:** evaluación de medidas obtenidas con la versión definitiva del dispositivo construido.

9.1. Banco de pruebas estático

El objetivo del banco de pruebas estático supone poder contar con una herramienta en la cual se produzcan efectos similares que los que sufre el eje del motor en funcionamiento. Por tanto, el banco debe emular un eje sobre el cual se aplicarán dos pares iguales y en sentido opuesto en ambos extremos. Además, se debe poder llegar a ejercer un par similar al par nominal del motor a ensayar posteriormente a los efectos de replicar medidas similares a las que luego se obtendrían sobre el motor.

9.1.1. Diseño

El banco de prueba diseñado consiste de un cilindro macizo de acero 1045 de $2,5cm$ de diámetro (el diámetro del motor a ensayar es de $2,8cm$). Uno de sus dos extremos se fijó, en tanto que al otro se le adosó, mediante prisioneros allen, un brazo de forma tal de poder ejercer torsión colocando peso en el extremo del mismo. Al brazo se le crea una muesca para sujetar diferentes masas. Dicha muesca se ubica a $20cm$ del centro del eje para poder lograr un par de alrededor de $20N.m$ (par nominal del motor) utilizando una pesa de $10kg$ (asumido como el máximo peso a emplear sin perder comodidad de manipulación).

El banco de pruebas fue confeccionado en una tornería en la cual se le entregaron los siguientes esquemas de diseño. Las dimensiones indicadas están en centímetros.

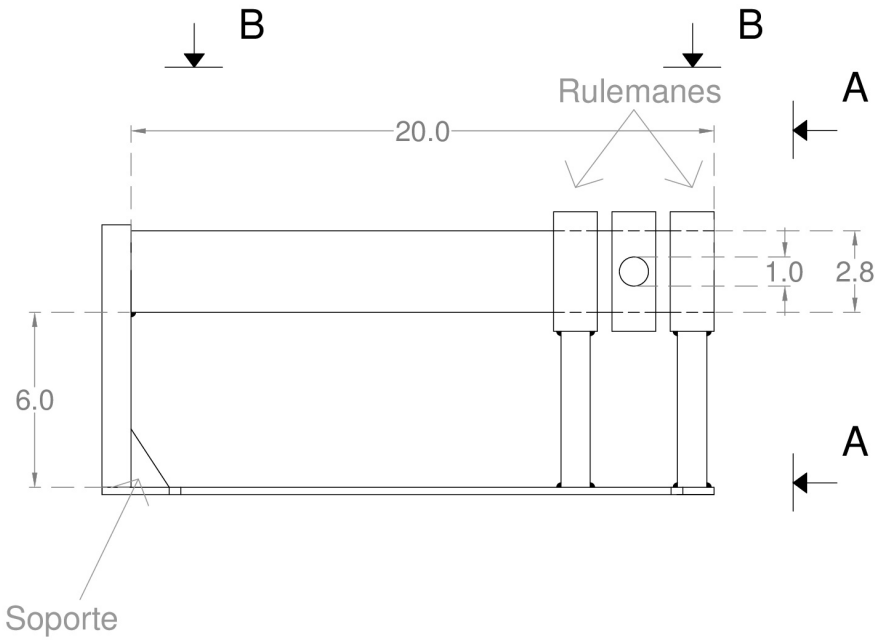


Figura 9.1: Banco de prueba - Plano general

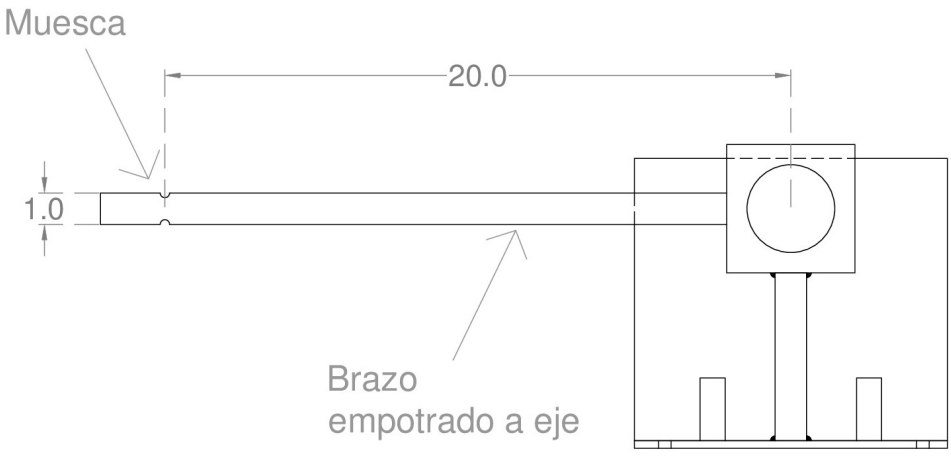


Figura 9.2: Banco de prueba - Corte A-A

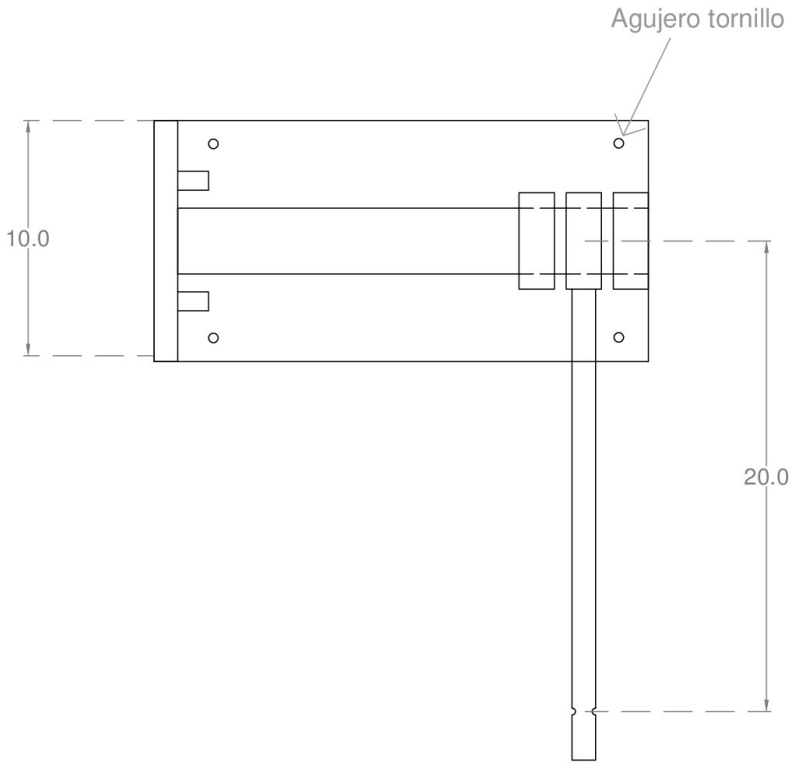


Figura 9.3: Banco de prueba - Corte B-B

A continuación se muestra una foto representativa del banco de pruebas confeccionado.

Figura 9.4: Banco de pruebas estáticas

Observaciones

El trabajo recibido fue considerado satisfactorio dado que para el uso que se le dió, no era necesario un elemento de gran precisión, sino algo funcional que permitiera probar el dispositivo. No obstante, debe precisarse que el banco de pruebas confeccionado no es una herramienta de calibración debido a diversas irregularidades en su diseño constructivo. A continuación, se destacan las críticas realizadas al mismo.

- La altura de las varas que sujetan los rulemanes sobre los que se apoya el eje son de distinto largo, lo que hace que ni el eje ni el brazo mediante el cual se le aplica par estén perfectamente horizontales. Esto repercute en el ángulo con el cual se ejerce el peso de la masa colocado sobre el brazo, que se aparta ligeramente de 90° y, en consecuencia, resulta algo menor que lo que se produciría si estuviese horizontal (afectado por el coseno del ángulo de apartamiento).
- El brazo mediante el cual se le aplica par no es perfectamente perpendicular al eje. Esto afecta la forma en que la fuerza se transmite del brazo al eje.
- El eje está fijado en uno de sus extremos mediante la presión que ejercen los prisioneros allen, lo que puede generar que al aplicarle par, el mismo no se traduzca en su totalidad a torsión.
- Todo el sistema está montado sobre una base metálica atornillada a una base mayor hecha de madera. Se observó que al ejercer niveles elevados de fuerza sobre el brazo, la primera base se separaba levemente de la base de madera. Esto condujo a considerar la posibilidad que parte de la fuerza realizada en el brazo no se estuviera transmitiendo al eje en forma de torsión.

Si bien no se llevó a cabo un estudio exhaustivo acerca de cómo afectan los anteriores puntos en la torsión experimentada por el eje, se estimó que dichas observaciones solo resultarían relevantes en caso de emplear el banco para un estudio de precisión. Como se verá a continuación, el banco de pruebas se utilizó para pruebas de caracterización mientras que los ensayos de precisión se llevaron a cabo sobre el motor ensayado.

9.2. Preparación de los ensayos

Para llevar a cabo los ensayos utilizando el banco estático fueron montados sobre este diversos puentes de Wheatstone empleando los distintos tipos de galgas. Las configuraciones que se colocaron fueron las siguientes.

- Puente 1: Dos galgas 350Ω tipo Half Bridge montadas diametralmente opuestas
- Puente 2: Dos galgas Phidgets tipo Half Bridge montadas diametralmente opuestas

- Puente 3: Una galga Phidgets tipo Full Bridge

En todos los ensayos el instrumento de medida utilizado para medir la tensión de entrada y salida del puente fue un multímetro Fluke 45 que consta de apreciación del orden de micro voltios (Manual [14]). Previo a comenzar con la medida a través de la lectura del Arduino este instrumento fue el empleado para llevar a cabo todas las medidas de voltaje involucradas. Además, una vez que se comenzó a leer con el Arduino, se lo siguió utilizando como una referencia para contrastar las lecturas obtenidas con el dispositivo bajo ensayo.

9.3. Ensayo 1 - Respuesta de las galgas

Una vez confeccionado el puente de Wheatstone sobre el eje del banco de pruebas estático se procedió a realizar un primer conjunto de ensayos. El objetivo principal de los mismos fue tener un primer contacto con el comportamiento de las galgas para comprobar su correcto funcionamiento y, además, encontrar (si lo hubiese) algún efecto no considerado previamente.

La primera parte del ensayo consistió en alimentar cada uno de los puentes con un generador de señales HY3002D-2 a 5V DC y medir a la tensión de salida en reposo. Se atacó este asunto en primer lugar ya que el resultado del mismo era determinante para evaluar la necesidad de algún mecanismo de compensación de este efecto. Como ya se explicó en el capítulo anterior, dicha tensión aparece por el desapareo natural de las resistencias de las cuatro galgas que conforman el puente. Tensiones por sobre 2mV resultarían problemáticas para el nivel de amplificación a aplicarse en el circuito definitivo.

Los resultados fueron los siguientes:

Puente ensayado	**Tensión de Offset** (mV)
Puente 1	0,28
Puente 2	0,90
Puente 3	0,90

Se observa que el desapareo de las galgas es lo suficientemente pequeño como para no sobrepasar el umbral máximo establecido.

La segunda parte del ensayo consistió en ejercer manualmente esfuerzos sobre el brazo y observar la respuesta de las galgas, una suerte de prueba piloto de su funcionamiento. El análisis llevado a cabo fue de carácter puramente cualitativo, con el objetivo de determinar, en primer lugar si algún efecto se producía, y en segundo lugar si el mismo se correspondía con lo teóricamente esperado.

Las pruebas realizadas fueron satisfactorias. A continuación se listan las observaciones realizadas que confirman lo esperado.

- Si para una misma tensión de alimentación se aplican dos fuerzas $\vec{F}1 > 0$ y $\vec{F}2 > 0$ al brazo del banco de pruebas tales que $\vec{F}1 > \vec{F}2$, las variaciones en la tensión de salida correspondientes $\Delta V_{\vec{F}1}$ y $\Delta V_{\vec{F}2}$ cumplen que $\Delta V_{\vec{F}1} > \Delta V_{\vec{F}2}$.

- Si se aplican dos fuerzas $\vec{F}1 > 0$ y $\vec{F}2 < 0$ al brazo del banco de pruebas, se observa que las variaciones en la tensión de salida $\Delta V_{\vec{F}1}$ y $\Delta V_{\vec{F}2}$ cumplen que $\Delta V_{\vec{F}1} > 0$ $\Delta V_{\vec{F}2} < 0$. En otras palabras, esfuerzos en sentido contrario generan respuestas contrarias.

- Si el puente de Wheatstone se monta de forma que los pares de galgas que se deforman en el mismo sentido no maximicen la ecuación 6.22 sino que anulen δv_0, cualquiera sea la fuerza que se aplique al brazo del eje del banco de pruebas, no se produce variación en la tensión de salida. Esto corrobora lo esperado, ya que las deformaciones de las galgas se compensan en el puente.

Por último, se llevó a cabo un estudio de la linealidad de la respuesta del sistema. Para ello, se ensayó el Puente 1 colocando en el brazo distintas pesas. El parámetro medido fue la variación de la tensión de salida, obteniéndose los resultados tabulados a continuación.

Peso (kg)	**Salida (mV)**	**Variación Salida (mV)**
0,000	0,28	0,00
0,165	0,29	0,01
0,236	0,30	0,02
0,500	0,30	0,02
2,000	0,36	0,08
5,000	0,49	0,21
10,000	0,68	0,40

Graficando los puntos relevados puede observarse una evolución de tipo lineal, como se esperaba. Es importante precisar que son pocos los puntos relevados ya que se trata de una primera caracterización, en el próximo capítulo se realiza un estudio similar con el sistema montado en el motor donde se prueba que la respuesta sigue un andamiento lineal.

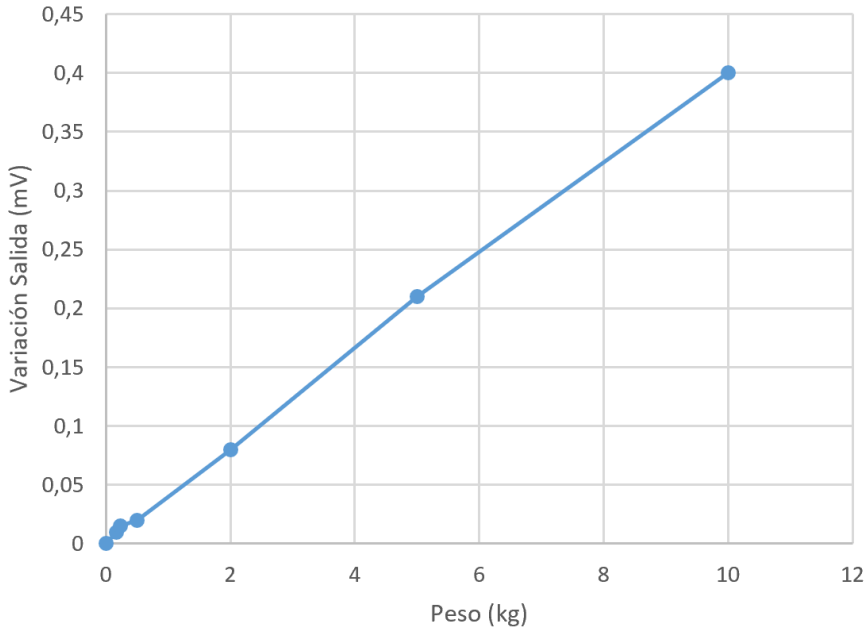


Figura 9.5: Respuesta de Puente 1 frente a diferentes cargas

9.4. Ensayo 2 - Ensayo a 5kg y caracterización de galgas Phidgets

Esta sección se enfoca en comparar el comportamiento de las diferentes galgas que se disponen, instaladas en el banco estático de pruebas al imponerle una carga de $5kg$. El par que se esperaba medir con esta carga era de $9,81N.m$.

Se llevó a cabo un primer ensayo utilizando el Puente 1. Se eligió este puente dado que su factor de galga es conocido e igual a 2,11, y en consecuencia es posible derivar el par que se está censando.

Tipo de galga	**Marca**	$V_{in}(V)$	$\delta V_0(mV)$	$\epsilon(m/m)$	$C(N.m)$
Half-Bridge 350Ω	-	5,407	0,21	$1,841 \times 10^{-5}$	9,04

Se observa que el error de la medida realizada, contrastada con la medida de par esperada, es de aproximadamente un 8 %. Aquí es donde influyen las irregularidades del banco de prueba previamente descritas, que conducen a pensar que un fracción de la fuerza impuesta por el brazo no está siendo trasladada al eje.

Se optó por utilizar las galgas Phidgets en los siguientes ensayos dada su superioridad en robustez y facilidad de manipulación en comparación con las galgas de 350Ω. Para ello se debió realizar una calibración de las mismas ya que su factor

de galga no era conocido.

Se colocó una masa de 5 kg en el brazo del banco y se midió la salida de los Puentes 2 y 3 para luego compararla con la salida obtenida en el Puente 1. A continuación se presentan los resultados obtenidos, asumiendo un factor de galga de 2,11 como en el Puente 1.

Tipo de galga	**Marca**	$V_{in}(V)$	$\delta V_0(mV)$	$\epsilon(m/m)$	$C(N.m)$
Half-Bridge 1000Ω	Phidgets	5,426	0,20	$1{,}747 \times 10^{-5}$	8,58
Full-Bridge 1000Ω	Phidgets	5,429	0,20	$1{,}746 \times 10^{-5}$	8,57

La significativa diferencia en los resultados obtenidos entre el puente 1 y los puentes 2 y 3 sugiere que el factor de las galgas Phidgets es distinto de 2,11. El hecho de obtener el mismo comportamiento entre los dos tipos de galgas Phidgets minimiza la posibilidad que las diferencias observadas fuesen debido a un pegado incorrecto de las mismas. Luego, bajo la hipótesis de que todos los puentes se ven sometidos al mismo par, utilizando el par medido por las galgas de 350Ω se calcula el factor de las galgas Phidgets mediante la siguiente ecuación.

$$S_S = \frac{\delta V_0}{V_{ref}} \frac{8GI_p}{Tkc}$$

Tanto para el puente confeccionado con galgas Full-Bridge como para el confeccionado con galgas Half-Bridge se obtiene un factor de galga $S_{S_Phidgets}$ tal que

$$S_{S_Phidgets} = 2{,}00 \tag{9.1}$$

Si bien no se calculó la incertidumbre de esta calibración (ya que no fue necesaria para los restantes ensayos estáticos), debe notarse que la baja resolución en las medidas de tensión hace que el valor obtenido posiblemente tenga un error considerable (observar que se registraron medidas del orden de decenas de microvoltios con una resolución de $10\mu V$.

9.5. Ensayo 3 - Calibración de ganancia de amplificador

Para obtener la ganancia real del chip AD8556 y poder contrastarla contra la ganancia teóricamente programada se ensayó el dispositivo en el banco estático de pruebas. El circuito a implementar fue similar al de diseño (figura 7.2), con la diferencia de que se conectó una resistencia variable en la alimentación del puente. Con el multímetro Fluke 45 se midió voltaje a la entrada del amplificador AD8556 (salida del puente) y a la salida del mismo (voltaje amplificado).

El ensayo se realizó con el banco en reposo, sin aplicarle par al eje, con una ganancia programada de 1280 (ya que es el punto en el que se va a utilizar el dispositivo) y variando la alimentación del puente generando variaciones en la entrada al integrado AD8556.

El circuito de ensayo se presenta en la figura 9.6, los resultados relevados se tabulan en los Anexos.

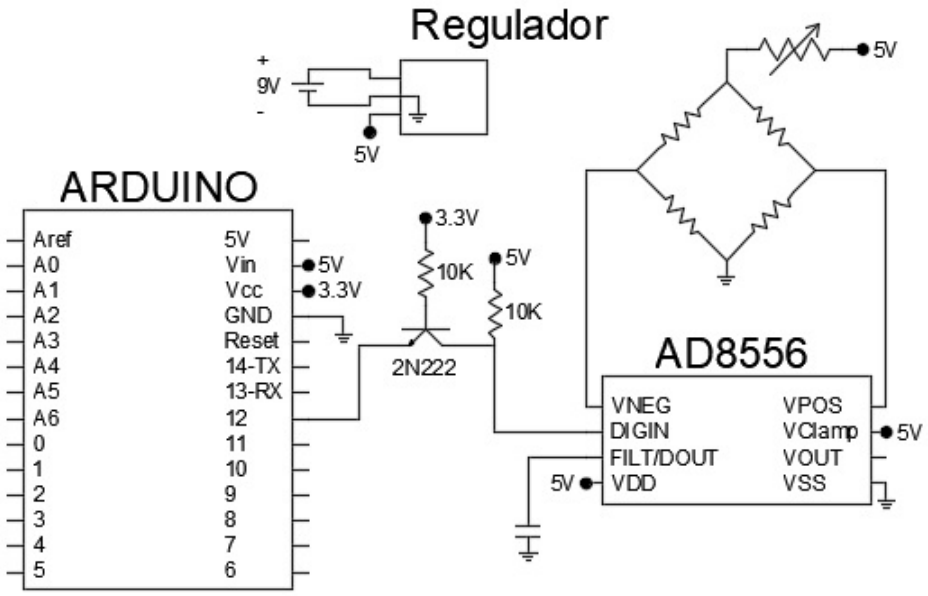


Figura 9.6: Circuito para ensayo de ganancia del AD8556.

A continuación se grafica $V_{OUT}(V)$ en función de $V_{IN}(V)$ en los puntos relevados.

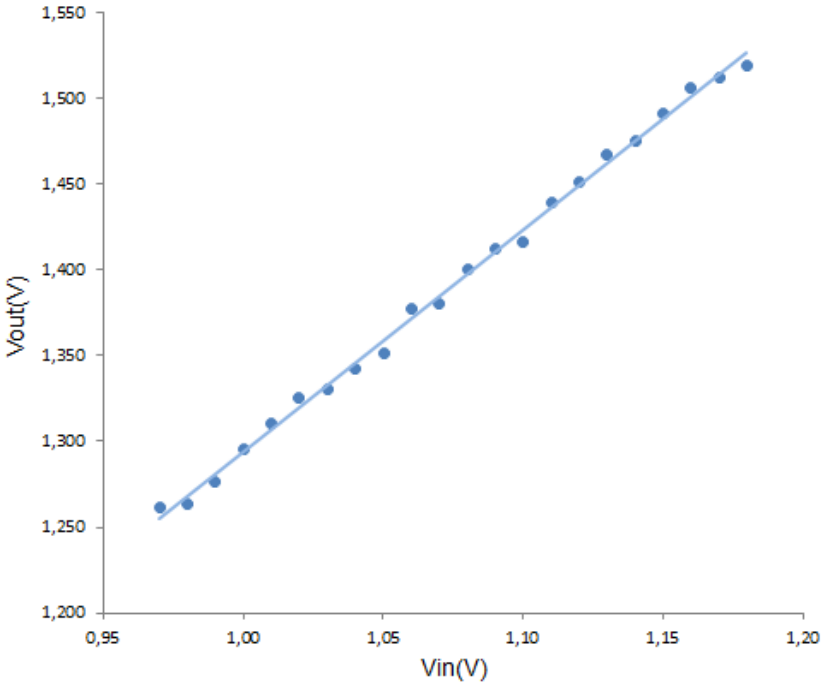


Figura 9.7: Resultados del ensayo de ganancia del AD8556.

Se observa en la figura 9.7 una gran linealidad en el comportamiento de la ganancia en función de variaciones de la tensión de entrada del puente.

Tomando en cuenta el análisis de incertidumbre detallado en los Anexos, se concluye que la ganancia del amplificador utilizado se puede expresar como:

$$G_{AD8556} = (1293{,}92 \pm 1{,}83)\ V/V$$

9.6. Ensayo 4 - Ensayo de sistema montado en Protoboard

El ensayo con el sistema montado en Protoboard se realizó una vez finalizadas todas las verificaciones del funcionamiento del dispositivo (correcto cableado, amplificación, comunicaciones, regulación de nivel de tensión, programación del Arduino, lectura de tensión en Arduino). Hasta ese momento se había trabajado con el Arduino UNO debido a la facilidad ya mencionada en la comunicación entre el amplificador y el microprocesador.

Previo a realizar el ensayo del sistema completo se reemplazó el Arduino UNO por el Arduino MKR 1000. Para esto se debió modificar el código de programación, en particular la parte referente a la libreria Softwareserial, ya que la misma no es soportada por el MKR 1000. Al no tener la posibilidad de transformar cualquier pin en un puerto de comunicación RX-TX se destinaron los pines seriales 14 (TX) y 13 (RX) del Arduino para esta función. Esto impidió poder realizar la lectura en simultáneo mediante Bluetooth y puerto serial a la PC, prestación que de todas formas resulta poco relevante siendo que la operación del equipo final sería únicamente a través de comunicación vía Bluetooth.

Además, se debió intercalar el Level Shifter entre los pines de comunicación del AD8556 y el Arduino ya que el Arduino MKR trabaja a 3,3V y el AD8556 a 5V, quedado el nivel 3,3 V por fuera de la banda de lectura segura.

El ensayo en sí consistió en conectar el dispositivo al puente de galgas Phidgets Half Bridge montado sobre el banco estático, aplicar fuerza sobre este y contrastar las medidas obtenidas por el dispositivo con aquellas medidas mediante el medidor Fluke 45.

Los resultados obtenidos se detallan en la tabla siguiente.

Ensayo	Medidor	Vo	Vf	δV	Diferencia
1	Fluke 45	1,251	1,495	0,244	0,4 %
	Dispositivo bajo ensayo	1,273	1,518	0,245	
2	Fluke 45	1,253	1,497	0,244	1,2 %
	Dispositivo bajo ensayo	1,265	1,512	0,247	
3	Fluke 45	1,253	1,494	0,241	1,6 %
	Dispositivo bajo ensayo	1,270	1,515	0,245	

Tabla 9.1: Ensayo final del sistema montado en Protoboard

Vistos los resultados, se aprecia una diferencia entre los instrumentos del entorno de 1 %. Se agrega como comentario que, a diferencia del circuito realizado, para el relevamiento de la medida mediante el Fluke tuvo que tomarse el valor instantáneo mostrado en el display. La señal allí representada sufría fluctuaciones en su valor que llegaban hasta las decenas de milivoltios. De ahí se tiene un error intrínseco a esa lectura de carácter estadístico ya que depende del momento en que se opta por tomar la medida. Es posible que los resultados fuesen aún más próximos si se promediasen las medidas del Fluke en una ventana de 1 segundo tal como lo hace el dispositivo diseñado.

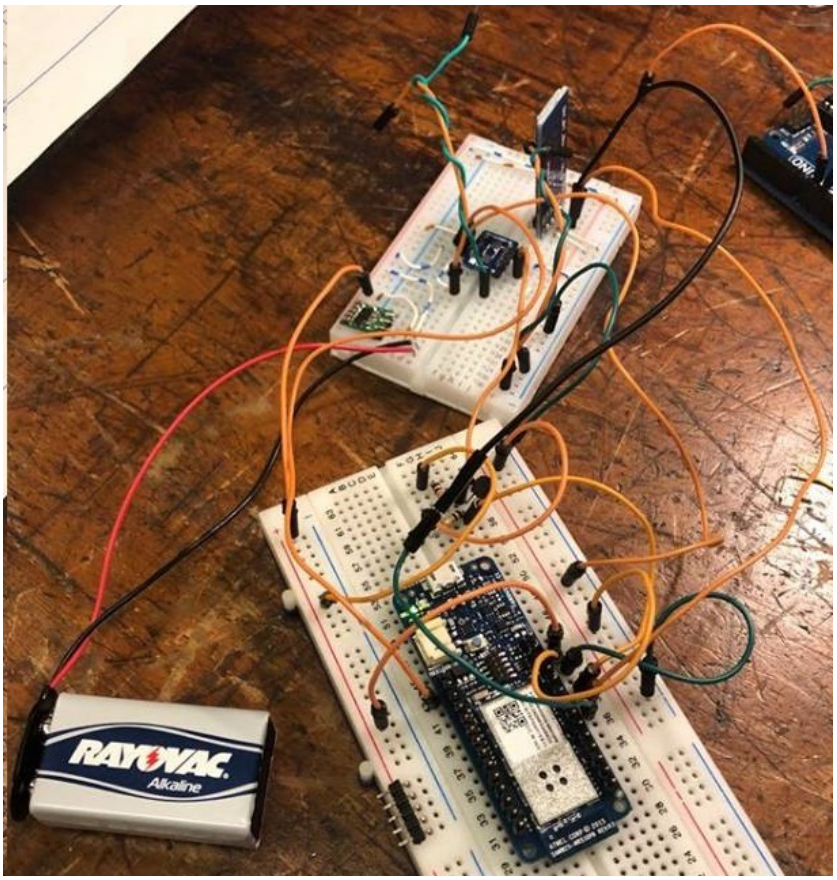


Figura 9.8: Sistema de medida dispuesto en Protoaboard

9.7. Ensayo 5 - Ensayo de PCB bajo 10Nm (5kg)

Al tener un sistema funcional, se llevó a cabo la ejecución del mismo en el PCB. Lo que restaba era comprobar que el PCB funcionaba de la misma manera que lo habían hecho los ensayos en Protoboard. Los resultados se observan en la tabla 9.2, los cuales son muy similares a los obtenidos en Protoboard. A su vez se adjuntan fotos del ensayo realizado en las figuras 9.9 y 9.10.

Ensayo	$V_o(V)$	$V_f(V)$	$\delta V(V)$
1	1.278	1.519	0.241
2	1.274	1.520	0.246
3	1.269	1.512	0.243

Tabla 9.2: Ensayo final del sistema montado en PCB

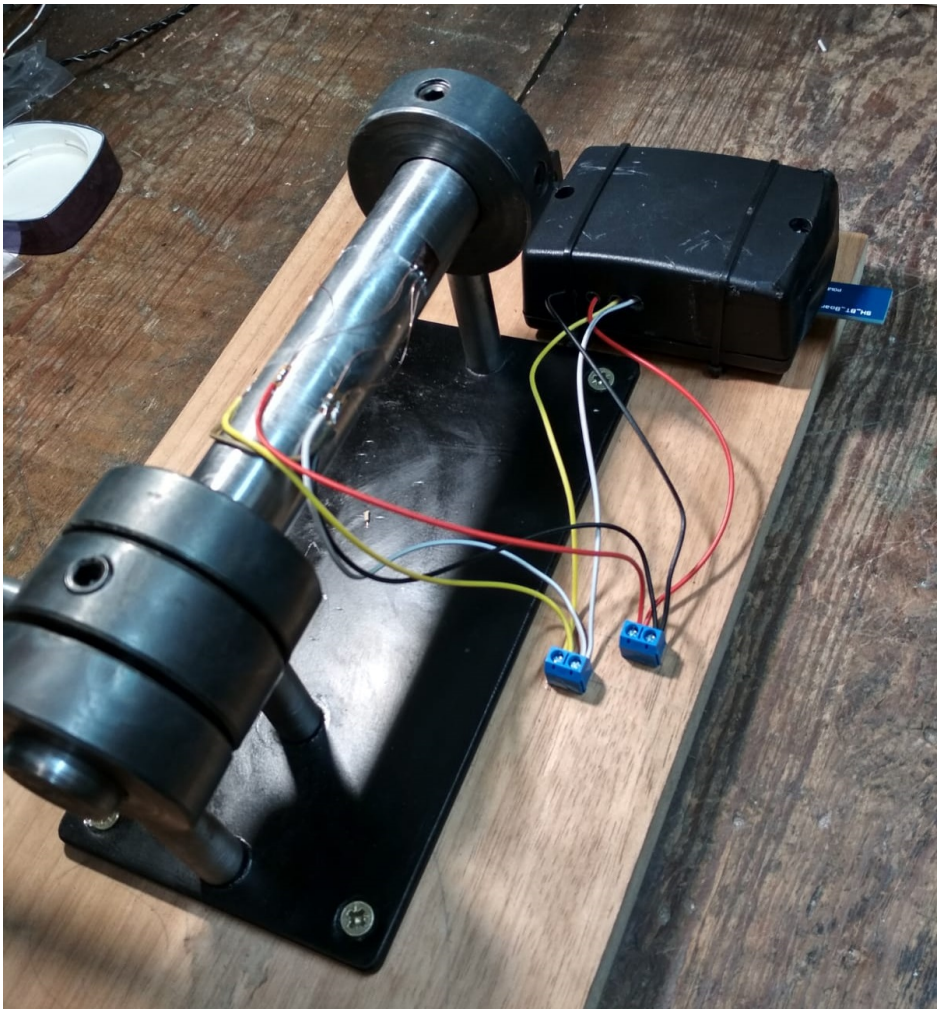


Figura 9.9: Banco de pruebas con PCB - Imagen 1

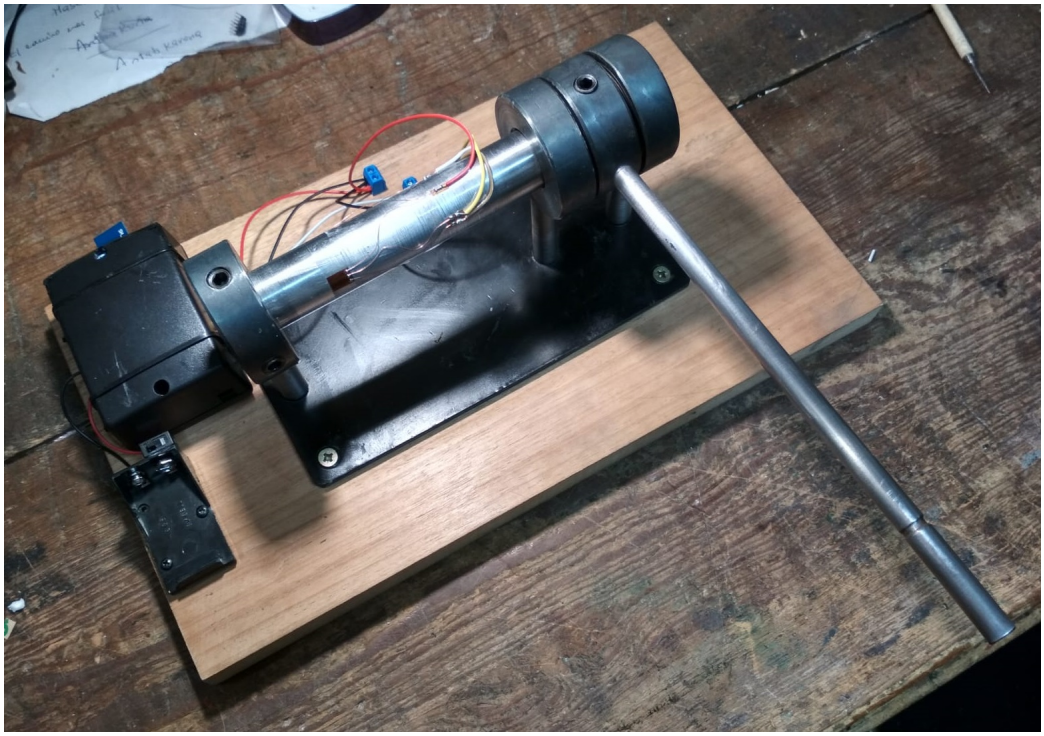


Figura 9.10: Banco de pruebas con PCB - Imagen 2

Capítulo 10

Ensayos sobre motor de inducción de 4HP

Una vez finalizados los ensayos estáticos, se pasó a probar el dispositivo en el motor. Para poder evaluar la calidad de las medidas obtenidas se realizaron medidas en simultáneo empleando una generatriz dinamométrica acoplada al eje. Las últimas fueron tomadas como referencia, en conjunto con su incertidumbre asociada que también fue calculada.

El proceso de medidas sobre el eje del motor se desarrolló en tres etapas.

Medidas piloto

En primer lugar se llevaron a cabo pruebas para evaluar el correcto funcionamiento del equipo, ya que hasta esa instancia no se había probado en movimiento. Sobre el eje del motor se montó un puente conformado por dos galgas Phidget tipo Half Bridge. El puente se montó en el afán de poder conectar el dispositivo a un sistema sensible a las deformaciones y evaluar los distintos parámetros que se deseaba verificar. En esta instancia no se llevaron a cabo pruebas de precisión, sino funcionales, razón por la cual no se emplearon las galgas HBM. Se listan a continuación los ensayos realizados:

- **Prueba de funcionamiento de las comunicaciones Bluetooth girando a 1500rpm:** El resultado fue satisfactorio siendo perfectamente posible la comunicación con el equipo en esas condiciones.
- **Evaluación de influencia del movimiento en fluctuación de las medidas:** Se conectó el equipo al puente de galgas y cargó el motor mediante la generatriz a carga próxima a la nominal. Luego se realizaron medidas consecutivas en una ventana de dos minutos obteniendo desviaciones máximas de 4 bits en las medidas. La lectura mostrada por el Arduino era del entorno de 2007 por lo que la desviación máxima correspondió a 0,2 % de la medida, por lo que se consideró satisfactorio el ensayo.

- **Ensayo de respuesta a carga:** Se evaluó simplemente si al cargar el motor la lectura del equipo se modificaba en forma razonable respecto al valor en reposo. El ensayo fue exitoso, no se registraron los resultados por carecer de valor siendo que las galgas colocadas no eran las HBM.

Ensayo bajo norma IEEE Std. 112

Luego de verificar el correcto funcionamiento del equipo se realizó un ensayo bajo norma IEEE Std. 112 para evaluar los resultados obtenidos por el equipo en relación a las medidas de la generatriz dinamométrica. Para ello, se retiró el anterior puente de galgas y se colocaron las HBM. Los resultados obtenidos se detallan en profundidad en el presente capítulo.

Ensayo de respuesta a varios puntos de carga

Por último, se llevó a cabo un ensayo en el cual se cargó el motor en distintos puntos a pasos pequeños para estudiar el rendimiento global del sistema en todo el rango de puntos de carga. En particular, se evaluaron la posibles ventajas de calibrar el sistema previo a efectuar las medidas.

10.1. Circuito de ensayo

Con el fin de poder estudiar varios puntos, se implementó un circuito de alimentación al motor y a la generatriz dinamométrica. La generatriz se conectó a un banco de resistencias para consumir la potencia generada por el motor. Para poder variar la potencia a entregar por la máquina, se utilizó una fuente de excitación DC independiente (Variac 0-200V/ 8A). El circuito se observa en la figura 10.1.

Para poder "seleccionar" el par a medir, se debe comprender el funcionamiento de la generatriz dinamométrica. La carcasa de la misma (la cual cuenta con dos brazos de balanza soldados) no se encuentra fijada a la base de la máquina, lo que le permite girar al cuando el eje lo hace, pero esta limitada por topes. De esta manera el par entregado en el eje por el motor es, en régimen, igual y opuesto al par ejercido por la balanza. Así, al agregar pesas en la balanza es posible contrarrestar el par ejercido sobre la carcasa de la dinamométrica.

Conociendo el largo del brazo (35,8cm) y mediante una combinación de pesas, se "elige" el par que se desea que el motor entregue. Para ello, se conecta el motor y se va variando la tensión de alimentación independiente DC hasta que la potencia entregada por la generatriz hacia al banco de resistencias sea tal que los brazos de la balanza se encuentren en equilibrio. En este punto el par entregado es el mismo que el indicado por la balanza de la dinamométrica.

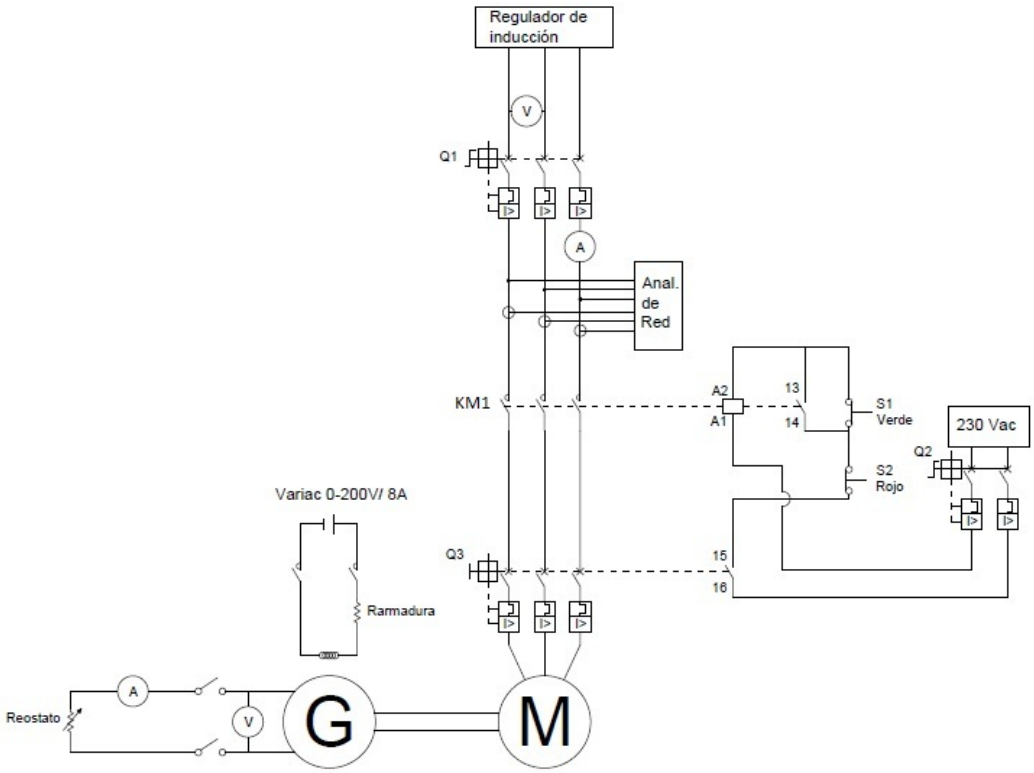


Figura 10.1: Esquema del circuito de ensayos sobre el motor.

Los elementos del circuito se describen a continuación:

- Regulador de inducción: Transformador, que permite variar la tensión de alimentación del motor (únicamente utilizado para los ensayos bajo norma)
  Modelo: Siemens - Schuckert RT + RT 37
  Frecuencia nominal: 50Hz
  Tensión nominal: 220V primario, $\pm 2 \times 71/\sqrt{3}$ V
  Corriente nominal: 2 x 12A primario, 26A secundario
  Potencia nominal: 5,4kVA para carga con $cos(\phi) = 0,8$
  Rango tensión de salida: 110V - 330V

- Interruptor termomagnético
  Modelo: Merlin Gerin multi9 C60N
  Corriente nominal: 50A
  Poder de corte: 6kA

- Transformadores de intensidad
  Modelo: BDX 74A
  Frecuencia: 50Hz / 60Hz
  Relación de transformación: 250/5A (Se lo transforma en un 25/5A bobinando el primario 10 vueltas). Clase 0.6.

- Anal. de Red: Analizador de redes, se utilizó el CVMK2. Central de medida de alta precisión (clase 0.2), cuyo fin es el control y la supervisión de los principales parámetros eléctricos.

- Contactor
  Modelo: Lovato BF 38 00 A
  Corriente de empleo: 38A (AC3)
  Potencia AC3: 11kW (230V), 17,5kW (400V)

  - Contacto frontal:
    Modelo: Lovato BFX10 11
    Tipo: 1NO + 1NC

- Guardamotor
  Modelo: Lovato SM1C 44
  Corriente de disparo térmico: 13-18A (regulable)
  Poder de corte último: 25kA (400V), 100kA (240V)
  Corriente de disparo magnético: 216A

  - Contacto lateral Modelo: Lovato SMX12 11
    Tipo: 1NO + 1NC

- Circuito de comando: Circuito conectado al contactor KM1, que mediante un juego de pulsadores enciendo o apaga el motor.

- Motor de inducción:
  Modelo: WEG 100L 493
  Frecuencia nominal: 50Hz
  Tensión nominal: 380V estrella, 220V triángulo
  Corriente nominal: 6,9A estrella, 12A triángulo
  Potencia nominal: 4HP
  Velocidad nominal: 1420rpm

- Generatriz Dinamométrica
  Modelo: Siemens - Schuckert aG66b
  Tensión nominal: 110V
  Corriente nominal: 36A
  Potencia nominal: 4kW (1500rpm), 1,15kW (500rpm)
  Resistencia de campo: $54,7\Omega$

10.2. Ensayo de eficiencia según norma

Para el ensayo de eficiencia se aplicó el manual de la norma explicado a continuación. Se tomaron dos medidas para el par, una según la dinamométrica y la otra según el método propuesto (llamado *MCEMI* por facilidad), con el fin de obtener los distintos resultados con su correspondiente incertidumbre. Para esta prueba se utilizaron las galgas HBM.

Los objetivos del ensayo se listan a continuación:

- Demostrar la posibilidad de realizar un ensayo bajo norma sin la necesidad de estar en un ambiente de laboratorio.
- Comparar los resultados obtenidos con la dinamométrica y el dispositivo, así como la incertidumbre de ambos métodos de medida.

Se realizaron también medidas directas de eficiencia, aplicarle los ajustes de la norma, cuyo resultado depende de las condiciones bajo las cuales se realiza el ensayo. El objetivo de esta medida apunta a simular una situación donde se deseara conocer el rendimiento de un motor operando en las condiciones naturales en las que se encuentra en el día a día (por ejemplo en una industria).

10.2.1. Manual de aplicación de la norma IEEE Std. 112

Se realiza el procedimiento que indica la norma para ensayos según el método A, aplicable a motores de potencia menor a 1kW. En el caso del proyecto desarrollado se contó con un motor de 4 HP, por lo que habría que aplicar el método B, pero de todas formas, al ser un valor cercano a 1kW, se asumirá que las "Stray load losses" son despreciables. El método es directo, por lo que la eficiencia se obtiene a través de la división entre la potencia de salida y la de entrada, ajustadas por temperatura. A continuación, se detallan números de cláusulas y ecuaciones dentro de la norma.

Resistencia en frío (5.4)

Se registra en frío la resistencia de entrada y la temperatura ambiente.

Con la máquina en la conexión del ensayo, medir las tres resistencias de fase para obtener un valor más específico.

Medir la temperatura ambiente según el procedimiento de la norma IEEE 119-1974. Si la máquina tiene medidores ya incorporados, se debe corroborar que la temperatura ambiente coincida con la temperatura medida en las resistencias de la máquina.

Ensayo de temperatura a carga nominal (5.8)

Se realiza un ensayo para determinar la temperatura específica de la máquina, t_s, que se define como la temperatura a la que estaría funcionando la máquina

en carga nominal, a una temperatura ambiente de 25^oC. Se define como la suma entre la temperatura ambiente, 25^oC, y el aumento de temperatura, t_{rise}.

La máquina debe estar alejada de cualquier motor, cinta o elemento que pueda inferir en los resultados de la temperatura. No se consideraran válidos aquellos resultados obtenidos en un ambiente de temperatura fluctuante.

Según se específica, en este método se cargará al motor en la condición nominal (5.8.3.1), es decir, tensión y corriente nominal. En el caso de que no se tenga corriente nominal se debe ajustar el t_{rise} por la siguiente ecuación:

$$t_{rise} = t_{medido}(\frac{I_n}{I_{medido}})^2 \tag{10.1}$$

El ensayo debe terminar una vez que el cambio de temperatura sea de 1^oC o menos luego de 30 minutos. Llegado a tal punto es que se realizan las medidas correspondientes.

La resistencia de estator debe de ser medida de manera veloz una vez apagado el mismo para determinar el ascenso de temperatura (según Tabla 3 de la norma no se pueden superar los 30 segundos para considerar válida la medida).

El valor de la temperatura final t_t se obtiene de la siguiente manera:

$$t_t = \frac{R_t}{R_b}(t_b + k_1) - k_1 \tag{10.2}$$

donde:

- R_t Resistencia medida (en Ω)
- R_b Resistencia en frío (en Ω)
- t_b temperatura en la cual se midió R_b (^oC)
- k_1 234,5 para cobre y 225 para aluminio

Si la temperatura ambiente es 25^oC, t_s es t_t. En caso contrario se debe ajustar de la siguiente manera:

$$t_s = t_t + 25^oC - T_{amb} \tag{10.3}$$

Ensayo bajo carga (5.6.1)

Se debe cargar a la máquina en valores escalonados con la misma diferencia aproximadamente entre 25 % y 100 % (por ejemplo: 25 %, 50 %, 75 %, 100 %) y otros 2 puntos elegidos convenientemente por arriba del 100 %, pero menores al 150 %.

Las medidas de potencia eléctrica, corriente, voltaje, frecuencia, velocidad, par, temperatura de estator o resistencia, deben de ser tomadas en cada punto. Se recomienda arrancar del valor de carga más alto e ir descendiendo.

En cuanto a la medida del par, el dispositivo debe ser capaz de detectar un cambio del 0.25 % de la medida (4.3.1).

Este ensayo debe realizarse de la manera más rápida posible con el fin de minimizar los cambios de temperatura durante la prueba respecto al ensayo anterior. Se recomienda esperar unos minutos, una vez cargado el motor, para que se estabilice la temperatura.

Potencia mecánica

De la ecuación 10 de la norma:

$$P = \frac{2n_{esp}T}{60} = \frac{n_{esp}T}{k_2} \tag{10.4}$$

donde:

- P es la potencia mecánica en W
- n_{esp} es la velocidad calculada, con los respectivos ajustes
- k_2 es 9,549 para T en N.m
- T es el par en N.m

Cálculos

Los cálculos a realizar se detallan en la tabla de la sección 9.3 (A2 del anexo) de la norma. Se debe de corregir: el deslizamiento, las pérdidas en el estator y el par.

Deslizamiento (5.3.2)

$$s = \frac{n_s + n_{medido}}{n_s} \tag{10.5}$$

Dado que el deslizamiento está directamente relacionado con la resistencia del rotor, debe de ser corregido por temperatura, según la ecuación 9 de la norma:

$$s_s = \frac{s_t(t_s + k_1)}{(t_t + k_1)} \tag{10.6}$$

donde

- s_s deslizamiento corregido a t_s
- s_t deslizamiento medido o calculado
- t_s temperatura específica
- t_t temperatura medida durante el ensayo de temperatura en carga
- k_1 234,5 para cobre y 225 para aluminio

Pérdidas en el estator (ecuación 64)

Se debe medir la potencia de entrada al estator y sumarle un factor de corrección P_c:

$$P_c = I_t^2 R_s - I_t^2 R_t \tag{10.7}$$

donde:

- I_t corriente de línea
- R_t resistencia promedio al apagarse el motor
- R_s resistencia a la temperatura específica

Correcciones dinamométricas

Para realizar estas correcciones se debe realizar un ensayo sin carga del motor. Dado que se utilizó un trasductor montado en el eje del motor antes de la carga, no fue necesario, ya que las pérdidas por acoplamiento no afectan significativamente la eficiencia (5.6.1.2).

Determinación de la eficiencia

Una vez corregidas las potencias de entrada y salida se obtiene el resultado de la eficiencia:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \tag{10.8}$$

Características generales del ensayo

La norma indica que se deben cumplir ciertos requisitos:

- THD < 0.05 (se debe aproximar a una onda sinusoidal).
- El desbalance de tensiones no puede exceder el 0.5 %. El mismo se mide como la desviación, en porcentaje, del promedio de las tensiones.
- No se admiten grandes variaciones de frecuencia durante los ensayos (máximo 0,33 % de la frecuencia promedio).

10.2.2. Estudio de incertidumbre

Para el estudio de la incertiumbre en la medida de eficiencia se estudian las ecuaciones de los distintos ensayos. En el primer ensayo la incertidumbre es directa, ya que se mide una resistencia (R_f, resistencia en frío). La temperatura específica responde a la ecuación 10.9 y el análisis de incertidumbre se presenta a continuación.

$$t_s = \frac{R_t}{R_f}(t_{amb} + k_1) - k_1 + 25^oC - t_{amb} \tag{10.9}$$

Las variables medidas en este caso son R_t, R_f y t_{amb}, por lo que la incertidumbre queda definida de la siguiente manera:

- $\sigma t_s = \sqrt{(\frac{\partial t_s}{\partial R_t})^2 \sigma R_t^2 + (\frac{\partial t_s}{\partial R_f})^2 \sigma R_f^2 + (\frac{\partial t_s}{\partial t_{amb}})^2 \sigma t_{amb}^2}$
  - $\frac{\partial t_s}{\partial R_t} = \frac{t_{amb} + k_1}{R_f}$
  - $\frac{\partial t_s}{\partial R_f} = -\frac{R_t(t_{amb} + k_1)}{R_f^2}$
  - $\frac{\partial t_s}{\partial t_{amb}} = \frac{R_t}{R_f} - 1$

A su vez, se puede obtener la resistencia específica según la ecuación 10.10, y su incertidumbre correspondiente.

$$R_s = R_f \frac{t_s + k_1}{t_{amb} + k_1} \tag{10.10}$$

- $\sigma R_s = \sqrt{(\frac{\partial R_s}{\partial R_f})^2 \sigma R_f^2 + (\frac{\partial R_s}{\partial t_s})^2 \sigma t_s^2 + (\frac{\partial R_s}{\partial t_{amb}})^2 \sigma t_{amb}^2}$
  - $\frac{\partial R_s}{\partial R_f} = \frac{t_s + k_1}{t_{amb} + k_1}$
  - $\frac{\partial R_s}{\partial t_s} = \frac{R_f}{t_{amb} + k_1}$
  - $\frac{\partial R_s}{\partial t_{amb}} = -R_f \frac{t_s + k_1}{(t_{amb} + k_1)^2}$

Para el estudio de incertidumbre de la eficiencia, se analizó la ecuación 10.11, la cual deriva del análisis propuesto en la tabla de la sección 9.3 (A2 del anexo) de la norma.

$$\eta = 100 \frac{Pmec_{corregida}}{Pelec_{corregida}} \tag{10.11}$$

La potencia eléctrica se obtiene mediante la suma de la potencia eléctrica medida (P_{medida}) y un factor de corrección (F), que depende de las pérdidas en el estator a temperatura específica (R_sloss) y a la temperatura de ensayo (R_tloss).

$$Pelec_{corregida} = P_{medida} + F \tag{10.12}$$

$$F = R_sloss - R_tloss \tag{10.13}$$

$$R_sloss = 1{,}5I^2R_s \tag{10.14}$$

$$R_tloss = 1{,}5I^2R_t \tag{10.15}$$

En cuanto a la potencia mecánica corregida ($Pmec_{corregida}$) depende del par (el cual no se ajusta por el sistema de medida propuesto) y de la velocidad. El segundo término (N_{esp}) sufre correcciones debido a que el deslizamiento se ajusta por temperatura. Se obtiene el deslizamiento s_s a temperatura específica (t_s) mediante el deslizamiento obtenido (s_t) que depende de la velocidad medida (N_t) a cierta temperatura t_t. Las ecuaciones se detallan a continuación.

$$Pmec_{corregida} = \frac{T.N_{esp}}{9{,}549} \tag{10.16}$$

N_s refiere a la velocidad de sincronismo, la cual se asume 1500rpm

$$N_{esp} = N_s(1 - s_s) \tag{10.17}$$

$$s_s = s_t\frac{(t_s + k_1)}{(t_t + k_1)} \tag{10.18}$$

$$s_t = \frac{N_s - N_t}{N_s} \tag{10.19}$$

$$t_t = \frac{R_t}{R_f}(t_{amb} + k_1) - k_1 \tag{10.20}$$

Incertidumbre de los factores

De estas ecuaciones se deducen todos los factores que tendrán una incertidumbre estrictamente relacionada con la medida:

Factor	**Incertidumbre**	**Definición**
P_{medida}	Res. y ex. analizador de red	Pot. eléctrica medida a la entrada
I	Res. y ex. analizador de red	Corriente de fase a la entrada
R_t	Res. y ex. mulímetro	Resistencia ensayo
T	Sistema de medida MCEMI	Par medido
N_t	Res. y ex. tacómetro	Velocidad medida
R_f	Res. y ex. mulímetro	Resistencia en frío
t_{amb}	Res. y ex. termómetro	Temperatura ambiente

Tabla 10.1: Incertidumbre de los factores medidos.

Incertidumbre expandida

De acuerdo a las ecuaciones anteriormente planteadas se puede obtener la incertidumbre de la medida de la eficiencia. A continuación se presenta una lista con la incertidumbre de cada una de las ecuaciones:

- 10.11: $\sigma\eta = \sqrt{(\frac{\partial\eta}{\partial Pelec_{correg}})^2\sigma Pelec_{correg}^2 + (\frac{\partial\eta}{\partial Pmec_{correg}})^2\sigma Pmec_{correg}^2}$
  - $\frac{\partial\eta}{\partial Pelec_{correg}} = -\frac{100 Pmec_{correg}}{Pelec_{correg}^2}$
  - $\frac{\partial\eta}{\partial Pmec_{correg}} = \frac{100}{Pelec_{correg}}$
- 10.12: $\sigma Pelec_{correg} = \sqrt{\sigma P_{medida}^2 + \sigma F^2}$ (Las derivadas son 1)
- 10.13: $\sigma F = \sqrt{\sigma R_s loss^2 + \sigma R_t loss^2}$ (Las derivadas son 1)
- 10.14: $\sigma R_t loss = \sqrt{(\frac{\partial R_s loss}{\partial I})^2\sigma I^2 + (\frac{\partial R_s loss}{\partial R_s})^2\sigma R_s^2}$
  - $\frac{\partial R_s loss}{\partial I} = 2 \times 1{,}5 I.R_s = 3I.R_s$
  - $\frac{\partial R_s loss}{\partial R_s} = 1{,}5 I^2$
- 10.15: $\sigma R_t loss = \sqrt{(\frac{\partial R_t loss}{\partial I})^2\sigma I^2 + (\frac{\partial R_t loss}{\partial R_t})^2\sigma R_t^2}$
  - $\frac{\partial R_t loss}{\partial I} = 2 \times 1{,}5 I.R_t = 3I.R_t$
  - $\frac{\partial R_t loss}{\partial R_t} = 1{,}5 I^2$
- 10.16: $\sigma Pmec_{correg} = \sqrt{(\frac{\partial Pmec_{correg}}{\partial T})^2\sigma T^2 + (\frac{\partial Pmec_{correg}}{\partial N_{esp}})^2\sigma N_{esp}^2}$
  - $\frac{\partial Pmec_{correg}}{\partial T} = \frac{N_{esp}}{9{,}549}$
  - $\frac{\partial Pmec_{correg}}{\partial N_{esp}} = \frac{T}{9{,}549}$
- 10.17: $\sigma N_{esp} = \sqrt{(\frac{\partial N_{esp}}{\partial s_s})^2\sigma s_s^2}$
  - $\frac{\partial N_{esp}}{\partial s_s} = N_s$

- 10.18: $\sigma s_s = \sqrt{(\frac{\partial s_s}{\partial s_t})^2 \sigma s_t^2 + (\frac{\partial s_s}{\partial t_s})^2 \sigma t_s^2 + (\frac{\partial s_s}{\partial t_t})^2 \sigma t_t^2}$
  - $\frac{\partial s_s}{\partial s_t} = \frac{t_s + k_1}{t_t + k_1}$
  - $\frac{\partial s_s}{\partial t_s} = \frac{s_t}{t_t + k_1}$
  - $\frac{\partial s_s}{\partial t_t} = -s_t \frac{t_s + k_1}{(t_t + k_1)^2}$
- 10.19: $\sigma s_t = \sqrt{(\frac{\partial s_t}{\partial N_t})^2 \sigma N_t^2}$
  - $\frac{\partial s_t}{\partial N_t} = -\frac{1}{N_s}$
- 10.20: $\sigma t_t = \sqrt{(\frac{\partial t_t}{\partial R_t})^2 \sigma R_t^2 + (\frac{\partial t_t}{\partial R_f})^2 \sigma R_f^2 + (\frac{\partial t_t}{\partial t_{amb}})^2 \sigma t_{amb}^2}$
  - $\frac{\partial t_t}{\partial R_t} = \frac{t_{amb} + k_1}{R_f}$
  - $\frac{\partial t_t}{\partial R_f} = -\frac{R_s(t_{amb} + k_1)}{R_f^2}$
  - $\frac{\partial t_t}{\partial t_{amb}} = \frac{R_s}{R_f}$

Incertidumbre en el par

En este ensayo se midió el par según la ecuación 10.21, donde m es la masa en la balanza en kg y L el largo de los brazos de la dinamométrica en metros.

$$T = m \times L \times 9{,}81 \tag{10.21}$$

Para el estudio de la incertidumbre se despreció el ángulo en el que están los brazos, asumiendo que las variaciones del mismo se pueden considerar despreciables, por lo poco que afectan en la ecuación. De esta manera, la incertidumbre expandida queda definida como:

- $\sigma T = \sqrt{(\frac{\partial T}{\partial m})^2 \sigma m^2 + (\frac{\partial T}{\partial L})^2 \sigma L^2}$
  - $\frac{\partial T}{\partial m} = 9{,}81L$
  - $\frac{\partial T}{\partial L} = 9{,}81m$

10.2.3. Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos en los ensayos descritos. Se presentan tablas con las variables medidas y finalmente los resultados de eficiencia. Los cálculos y las incertidumbres se presentan en le anexo.

Valores Generales

Motor	4HP Trifásico
Marca	Weg
Modelo	100L 493
$T_{ref}(^{o}C)$	25
$k1$ (constante del cobre)	225
$f(Hz)$	50
$N_s(rpm)$	1500
$L(m)$ (largo del brazo)	0,3575

Tabla 10.2: Valores generales del ensayo

Resistencia en frío

Bornes	R_f (Ω)
UV	1,33
VW	1,36
WU	1,32
Promedio	1,34

t_{amb} (^oC)	**18**

Tabla 10.3: Resultados del ensayo de resistencia en frío

Temperatura específica

Bornes	**Tensión (V)**	R_t (Ω)
UV	220,8	1,65
VW	219,4	1,61
WU	220,1	1,59
Promedio	220,1	1,62

Bobinado	$I(A)$
1	12,08
2	11,80
3	11,56
Promedio	11,81

$_t$ (^oC)	68,90
t_s (^oC)	**75,90**
R_s (Ω)	**1,66**

Tabla 10.4: Resultados del ensayo de temperatura específica

Ensayos bajo carga

Para los ensayos bajo carga se tomaron cuatro puntos cercanos a 25 %, 50 %, 75 % y 100 % de carga nominal. Las medidas tomadas se reflejan en la tabla 10.5, donde la masa fue la que se colocó en la balanza, mientras que el par es el medido según el método propuesto (*MCEMI*). El resto de las medidas es común a ambos métodos.

Carga	**100 %**	**75 %**	**50 %**	**25 %**
Tensión (V)	219,6	219,8	220,5	219,9
R_t (Ω)	1,63	1,61	1,46	1,42
I (A)	11,90	9,88	8,24	7,25
$Pelec_{medida}$ (kW)	3,728	2,808	1,903	1,065
Masa (kg)	5,70	4,30	2,79	1,39
$\mathbf{N}_t$ (rpm)	1422	1445	1467	1488
T (Nm)	21,60	16,26	9,40	4,11

Tabla 10.5: Medidas de los ensayos bajo carga

Vale destacar que si bien se realizó un único ensayo por cada punto, el mismo se puede dividir en dos: eficiencia directa (eficiencia medida como la división entre potencia mecánica y potencia eléctrica) y eficiencia según norma (con los ajustes correspondientes de temperatura). De esta manera se observan las tablas 10.6 y 10.7, que muestran los resultados obtenidos en ambos ensayos, con sus incertidumbres asociadas, por ambos métodos. En las imágenes 10.2 y 10.3 se grafican los resultados.

Carga	**Eficiencia**$_{dinam.}$ (%)	**Eficiencia**$_{MCEMI}$ (%)
100 %	79,7 ± 1.5	86.1 ± 2.6
75 %	81.0 ± 1.3	87.3 ± 2.6
50 %	78.0 ± 1.3	74.9 ± 2.3
25 %	70 ± 1.5	59.0 ± 2.2

Tabla 10.6: Resultados de eficiencia según norma

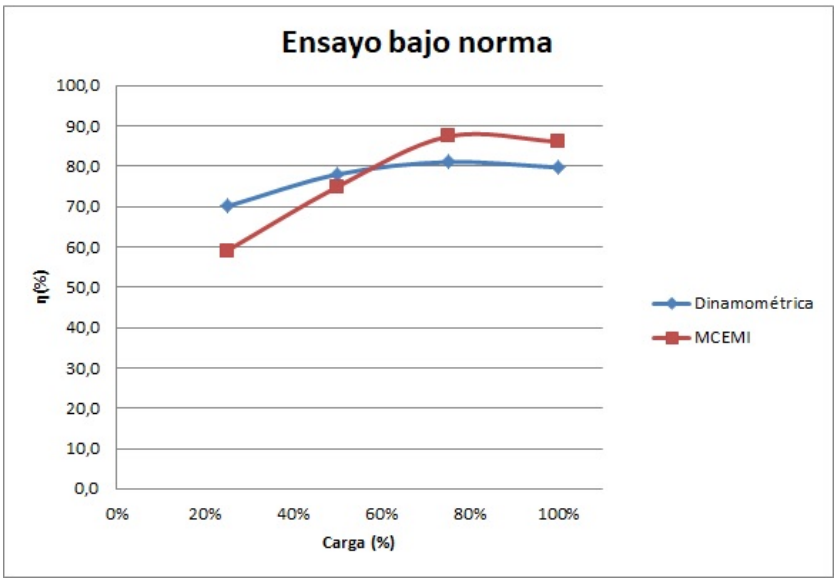


Figura 10.2: Eficiencia calculada según norma IEEE Std 112

Carga	**Eficiencia**$_{dinam.}$ (%)	**Eficiencia**$_{MCEMI}$ (%)
100 %	79,9 ± 0.5	86.3 ± 2.2
75 %	81.3 ± 0.5	87.6 ± 2.2
50 %	79.0 ± 0.6	75.9 ± 2.0
25 %	71.3 ± 0.6	60.1 ± 2.0

Tabla 10.7: Resultados de eficiencia por medida directa

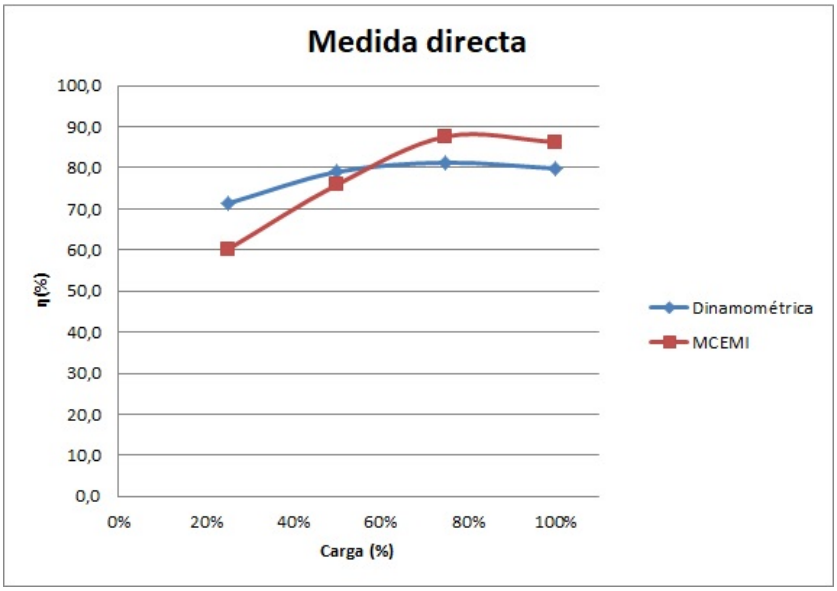


Figura 10.3: Eficiencia medida.

10.2.4. Análisis de resultados

El análisis que se realiza corresponde a ambos ensayos, medida directa y según norma. Por contener un desarrollo más exhaustivo y más factores de ajuste, los resultados bajo norma cuentan con una incertidumbre mayor. Analizando las incertidumbres obtenidas por el método MCEMI para ambos ensayos, se observa la importancia que tiene la propia incertidumbre en el par, de mayor peso que la de la temperatura.

Comparando las medidas según dinamométrica (medida patrón) con el método propuesto, vemos que los resultados son cercanos, pero difieren. A la vez, se observa que las bandas de incertidumbre no se solapan, salvo en el caso del 50 %.

En el punto correspondiente al 25 % de carga, la medida difiere considerablemente, lo cual es entendible, ya que se manejan diferencias de voltaje mucho más pequeñas, por lo que cualquier fluctuación afecta profundamente el resultado.

A medida que la carga fue aumentando, también lo hizo la temperatura de la máquina y del propio instrumento de medida (cobre de estator y rotor, carcasa, rotor y las galgas). Según la sección de "servicios y soportes" ([15]) de la página web de HBM hay que tomar varias consideraciones respecto a cómo afecta la temperatura:

- Dilatación del material (en nuestro caso el acero del rotor)
- Coeficiente de temperatura del factor de galga
- Influencia de la temperatura en la constante elástica
- Autocalentamiento de la galga extensométrica
- Fluencia del adhesivo

En primer lugar, cada material tiene una constante de expansión distinta, y aumentan su dilatación a medida que lo hace la temperatura. Esto deriva en que a mayores temperaturas, los materiales presentan una dilatación "aparente". Dicho fenómeno se puede entender como una deformación independiente del par, que depende únicamente de la temperatura.

Para este caso, se sugiere la utilización de galgas autocompensadas, las cuales se desarrollan específicamente para cada material, y contrarrestan la deformación aparente variando su deformación respecto a la temperatura. El costo de las mismas es un impedimento para su empleo en el actual proyecto.

Una forma más económica de compensar este efecto requeriría de una medida en paralelo de la temperatura en el rotor a la misma vez que se miden las deformaciones. El fabricante entrega un gráfico, así como una ecuación para compensar los cálculos, donde se mide la dependencia de la deformación unitaria de la galga respecto a la temperatura. En las galgas autocompensadas puede seguir existiendo un "error" residual, el cual no es lineal, por lo que utilizando estas se compensaría este factor.

Los efectos en la medida debidos al coeficiente de temperatura del factor de galga, influencia de la temperatura en la constante elástica y autocalentamiento de la galga extensómetrica se pueden considerar despreciables.

El factor de galga relaciona la deformación con la variación de la resistencia. Según [15], los valores típicos del correspondiente coeficiente de variación por temperatura son de $0,01\,\%/K$. Mientras tanto, la constante elástica, propiedad que depende del material del rotor, tiene valores típicos en el acero de $-0,02\,\%/K$ ([15]).

La tensión de alimentación de las galgas hace que se calienten con respecto al eje del motor. El útimo absorbe el calor de las mismas en menor o mayor medida produciendo que, si el eje es mal conductor de calor, pueda existir mucha diferencia de temperatura entre su superficie y las galgas. Esto puede interferir en el funcionamiento de las galgas.

Finalmente está el efecto sobre el adhesivo utilizado (Super Glue, marca Gorilla). El adhesivo es vital, ya que es el encargado de transferir la deformación del material a la galga. Si bien se sugiere utilizar pegamentos especiales para galgas, los mismos son costosos y díficiles de conseguir.

En cuanto al efecto de la temperatura en los adhesivos, hay límites que deben ser respetados, ya que varían el factor de galga efectivo. En nuestro caso, según las especificaciones técnicas, la temperatura máxima es de 220^oF (104^oC). Considerando que el rotor está a menor temperatura que el bobinado de estator (ya que no esta encerrado en la carcasa), y observando los valores de t_t obtenidos para cada uno de los ensayos bajo carga, se deduce que este límite no fue traspasado.

Al aumentar la carga del motor aumenta la temperatura del eje y de las galgas, aumentando la diferencia entre los valores relevados por la dinamométrica y el método MCEMI.

De todas formas, como todo modelo teórico, existen diferencias con las medidas "reales", más allá de la temperatura. En el caso del trabajo desarrollado se pueden explicar por varias razones, como por ejemplo:

- Ubicación de las galgas (puede que no se respete el criterio de estar a un diámetro de distancia de los puntos donde se ejerce el par)
- Modelado del eje del rotor (no ser un cilindro perfecto)
- Valor real de la constante G (el material puede sufrir variaciones con el tiempo)
- O simplemente por el rango de validez del modelo que como todo modelo teórico permite describir la realidad hasta cierto nivel de precisión

Lo importante a valorar es que los resultados obtenidos, tanto a nivel de par como de eficiencia son bastante cercanos a los valores medidos con la referencia, si

bien no tan precisos. De esta manera se puede considerar que el sistema de medida es útil, y realizando ciertas mejoras se podría llegar valores mucho más precisos.

Una posibilidad de mejora en las medidas podría lograrse mediante una calibración previa del equipo. Para ello, un punto trascendental es la linealidad de la respuesta en distintos puntos de carga, ya que de esta forma midiendo un punto conocido se puede ajustar las medidas en otros puntos. Importa destacar que en ese caso se abandona el modelado teórico de la deformación en lo que concierne a la deducción del par mediante deformación, sino que se pasa a hacer un cálculo que vincula par y variación de tensión conocidos en un punto extrapolándolo linealmente a otras medidas de variación de tensión para deducir el par ejercido.

Con el fin de probar este método, se procedió a desarrollar un ensayo de calibración de las galgas para distintos puntos del par, para evaluar la linealidad del sistema. Se realizaron las medidas en un tiempo acotado con el fin de evitar desviaciones originadas por el calentamiento del eje.

10.3. Ensayo de linealidad de la respuesta

Se procedió a relevar numerosos puntos de carga del motor tomando el valor de par obtenido por la generatriz como referencia. El objetivo fue evaluar cuan lineal era la respuesta y, en caso de serlo, cuanto podrían llegar a mejorar las medidas si se tomase un punto conocido como referencia para el resto. Los resultados obtenidos se presentan a continuación en función del porcentaje de carga.

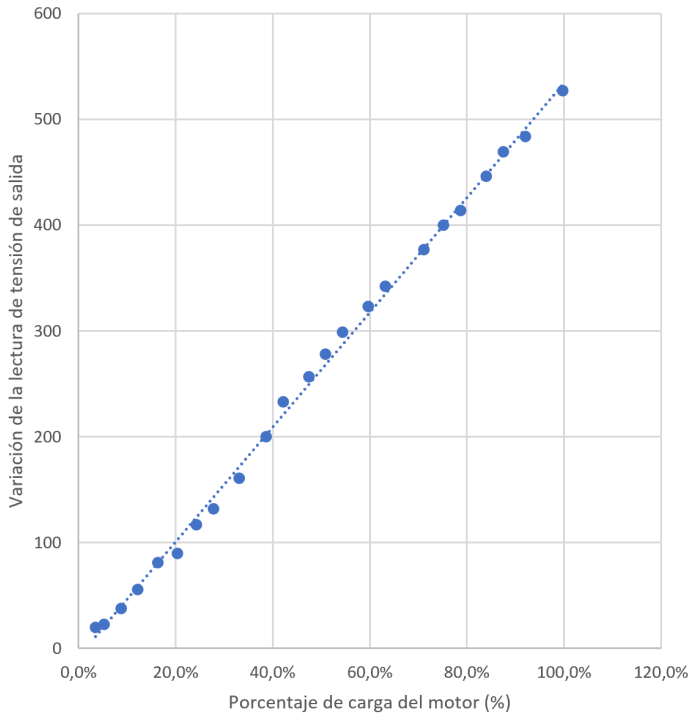


Figura 10.4: Lectura obtenidas para distintos puntos de carga

Se comprobó una fuerte tendencia a la linealidad en las medidas realizadas, en todo el rango medido. Por otra parte, se repitieron las observaciones hechas durante el ensayo bajo carga, siendo que el valor de par medido mediante el método propuesto se apartó más de lo admisible del valor de referencia en casi la totalidad de las medidas (ver tabla siguiente). En base a estas dos observaciones se procedió a evaluar de la misma forma los resultados que se obtendrían si se calibrase el instrumento en algún punto de operación. Se eligió la medida tomada con 5kg en la balanza de la dinamométrica (87,5 % de carga) como punto de referencia. De esta forma los demás puntos se ajustan mediante el cálculo siguiente

$$T_i = \delta V_i \times \frac{T_{5kg}}{\delta V_{5kg}} \tag{10.22}$$

El procedimiento para hacer uso de la ecuación anterior sería el siguiente:

- Se lleva al motor a un estado de carga conocido, en este ejemplo llamado T_{5kg}.
- Se releva el valor de variación de tensión en dicho punto, en este ejemplo llamado δV_{5kg}
- Se lleva el motor a los puntos de funcionamiento en los cuales se desea conocer el valor del par.
- Se releva el valor de la variación de tensión δV_i
- Se aplica la ecuación anterior para conocer el valor de par en el punto T_i

La utilidad de este procedimiento está sujeta a poder ejercer un par conocido sobre el eje teniendo el puente montado sobre el mismo.

Los resultados de ambos métodos se presentan en la tabla siguiente.

% carga	Masa (kg)	Lectura reposo	Lectura carga	Variación Lectura	T med (N.m)	T ref (N.m)	T calib (N.m)
99,7 %	5,7	1351	1878	527	21,16	19,99	19,70
92,1 %	5,264	1351	1835	484	19,43	18,46	18,10
87,5 %	5	1351	1820	469	18,83	17,54	17,54
84,0 %	4,8	1350	1796	446	17,91	16,83	16,68
78,7 %	4,5	1353	1767	414	16,62	15,78	15,48
75,2 %	4,3	1346	1746	400	16,06	15,08	14,96
71,1 %	4,064	1350	1727	377	15,14	14,25	14,10
63,1 %	3,61	1344	1686	342	13,73	12,66	12,79
59,6 %	3,41	1345	1668	323	12,97	11,96	12,08
54,4 %	3,11	1338	1637	299	12,01	10,91	11,18
50,9 %	2,91	1343	1621	278	11,16	10,21	10,39
47,4 %	2,71	1342	1599	257	10,32	9,50	9,61
42,2 %	2,41	1341	1574	233	9,36	8,45	8,71
38,7 %	2,21	1350	1550	200	8,03	7,75	7,48
33,1 %	1,89	1341	1502	161	6,46	6,63	6,02
27,8 %	1,59	1336	1468	132	5,30	5,58	4,94
24,3 %	1,39	1338	1455	117	4,70	4,87	4,37
20,4 %	1,164	1333	1423	90	3,61	4,08	3,36
16,4 %	0,936	1333	1414	81	3,25	3,28	3,03
12,2 %	0,7	1335	1391	56	2,25	2,45	2,09
8,7 %	0,5	1334	1372	38	1,53	1,75	1,42
5,2 %	0,3	1334	1357	23	0,92	1,05	0,86
3,5 %	0,2	1333	1353	20	0,80	0,70	0,75

Tabla 10.8: Comparación de resultados: método teórico vs. método calibración

% carga	Error medida según método (%)	Error medida calibrado (%)
99,7 %	5,85 %	1,43 %
92,1 %	5,27 %	1,98 %
87,5 %	7,39 %	0,00 %
84,0 %	6,38 %	0,94 %
78,7 %	5,33 %	1,92 %
75,2 %	6,50 %	0,83 %
71,1 %	6,21 %	1,10 %
63,1 %	8,46 %	1,00 %
59,6 %	8,44 %	0,98 %
54,4 %	10,07 %	2,50 %
50,9 %	9,37 %	1,85 %
47,4 %	8,57 %	1,10 %
42,2 %	10,69 %	3,07 %
38,7 %	3,61 %	3,52 %
33,1 %	2,47 %	9,18 %
27,8 %	4,95 %	11,49 %
24,3 %	3,63 %	10,26 %
20,4 %	11,48 %	17,57 %
16,4 %	0,92 %	7,74 %
12,2 %	8,41 %	14,71 %
8,7 %	12,99 %	18,98 %
5,2 %	12,23 %	18,27 %
3,5 %	14,49 %	6,61 %

Tabla 10.9: Error relativo de medidas según método y luego de calibrar

Se aprecia que los resultados obtendidos aplicando la calibración sugerida son significativamente mejores que aplicando el método con base en la teoría de deformaciones del eje. En el rango entre la carga nominal y aproximadamente el 50 %, el error relativo de la medida con la calibración se ubica por debajo del 2 % siendo esta una resolución satisfactoria. A menores estados de carga empeoran los resultados, debido a que el punto de calibración se seleccionó cercano a la carga nominal. De todas formas, el presente trabajó se orientó hacia motores operando entre 50 % y por encima del 100 % de sus estados de carga, lo cual vuelve menos relevantes los puntos por debajo de dicho rango.

En las gráficas siguientes se muestran las diferencias entre los dos métodos comprando los errores absolutos y relativos de cada medida respecto a la referencia de la dinamométrica en función del porcentaje de carga del motor.

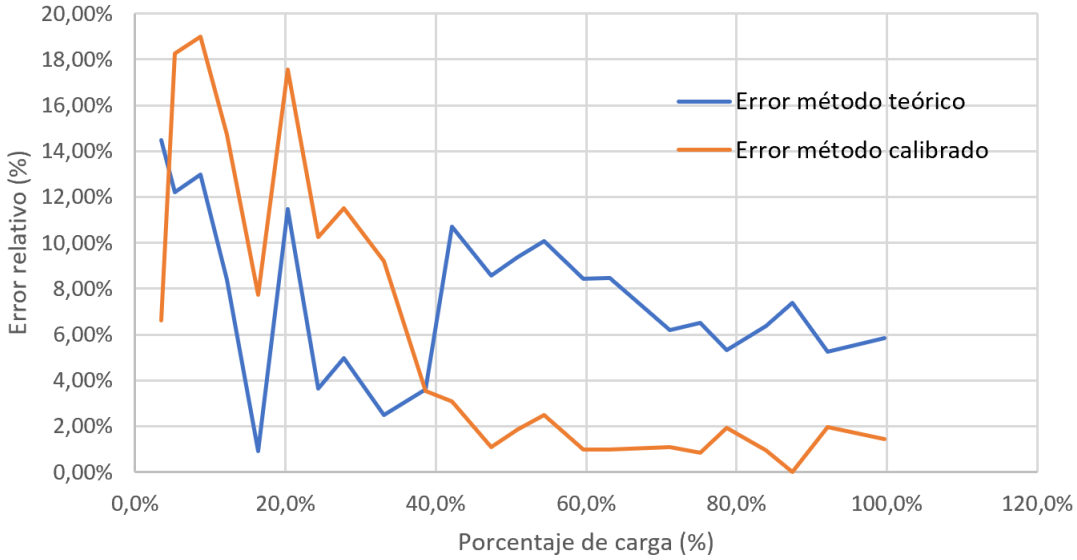


Figura 10.5: Comparativa de errores relativos empleando ambos métodos

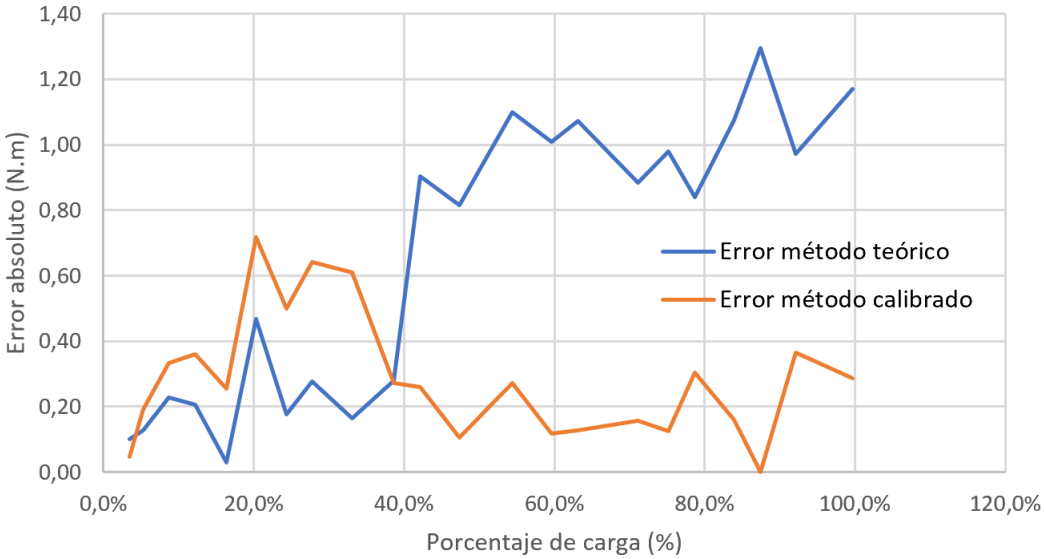


Figura 10.6: Comparativa de errores absolutos empleando ambos métodos

Capítulo 11

Evaluación de método desarrollado

En este capítulo se presentan reflexiones sobre el método desarrollado, sus ventajas, desventajas, sus variantes y los aspectos donde se identifica un potencial de mejora.

En primer lugar, se recuerda el espíritu inicial del proyecto desarrollado desde el momento que se optó por implementar el sistema de medida mediante galgas extensiométricas. Este fue desde un principio, evaluar el potencial de implementación del método en motores y la precisión de las medidas obtenidas. Si bien es un método repetidamente mencionado en la bibliografía recabada, no se encontraron casos de aplicación similares a lo desarrollado en el presente proyecto. Por lo tanto, la evaluación del método que se lleva a cabo a continuación, reside en evaluar el método de medida en comparación con los estándares de otros métodos y los requerimientos que se identificaron inicialmente, no siendo posible estudiar sus resultados en relación a experiencias similares.

11.1. Principales reflexiones

Analizando exclusivamente los resultados obtenidos luego del ensayo del método sobre el motor se podría llegar a la conclusión que este falló en cuanto a los requerimientos que se definieron inicialmente. Las medidas realizadas con el dispositivo tuvieron un error sistemático en todos los ensayos realizados respecto a las medidas de referencia, utilizando un método de medida convencional. El producto obtenido al cierre del proyecto no podría aún ser comercializado, ni tampoco empleado fuera de laboratorio para medir eficiencia de motores en industrias.

No obstante, al considerar el camino transitado a lo largo del trabajo desarrollado podría también llegarse a la conclusión que los resultados fueron satisfactorios dentro del objetivo de lograr construir un equipo en base a los requerimientos de diseño e implementar y ensayar un sistema de medida alternativo. Desde esta perspectiva, el producto final dista aún de ser un producto para uso industrial pero,

aún así, se obtienen resultados próximos a las medidas de referencia. Esto lleva a pensar que un posterior desarrollo del sistema supliendo las falencias identificadas y mejorando los aspectos más críticos podría mejorar aún más la calidad de las medidas. En dicho caso, el producto final obtenido en el presente proyecto sería el punto de partida sobre el cual trabajar para explotar el potencial del sistema de medida.

El trabajo realizado permitió identificar ciertas debilidades y carencias del método desarrollado, algunas de ellas ya asumidas desde el comienzo y otras encontradas al momento de implementar el equipo.

11.2. Falencias y debilidades identificadas

Las debilidades del sistema de medida puede dividirse en dos grupos. Aquellas asociadas al método en sí mismo y aquellas asociadas al equipo de medida implementado.

Comenzando por las debilidades del método en sí mismo, se presenta en la siguiente lista los puntos débiles identificados.

- **Necesidad de montaje manual de puente de galgas:** el hecho de tener que montar manualmente el puente de galgas sobre el eje introduce un factor de error humano al método, lo cual no es deseable. Esto hace que el método de medida dependa también en el operario que lo implementa en cada caso.
- **Tiempo de montaje:** si bien el montaje del puente sobre el eje es sencillo insume un tiempo de aproximadamente 20 minutos. Si se agrega el montaje del sistema completo sobre el eje, la duración del montaje aumenta a entre 40 y 50 minutos debido a la necesidad de realizar las conexiones entre las galgas y el equipo encima del motor.
- **Modelado teórico:** basar el ensayo sobre el modelado teórico de la deformación del eje acarrea un cierto error como se pudo apreciar en los ensayos realizados. Es probable que al igual que todo modelado su validez tenga sentido hasta cierto nivel de precisión, ya sea en los factores utilizados o en las ecuaciones planteadas. De aquí la necesidad de calibración de las medidas *in situ*.
- **Accesibilidad al eje:** Una condición fundamental para la aplicación del método es la capacidad de acceder al eje del motor. En aquellos casos en que no se tuviera acceso al eje, el método no puede ser implementado. Además, en algunos casos, aún con el eje accesible puede llegar a ser dificultoso la colocación del puente de galgas si el espacio disponible en el eje es pequeño.

En cuanto a las debilidades del equipo construido, estas se presentan a continuación:

- **Tamaño:** si bien se apuntó a desarrollar un dispositivo del menor tamaño posible, sería deseable reducir aún más el tamaño del mismo, más aún teniendo en cuenta que las envolventes protectoras lo aumentan en forma significativa.

- **Funciones y código de programación:** el potencial de un microcontrolador como el Arduino MKR1000 lleva a pensar que podrían realizarse más operaciones con el dispositivo, como por ejemplo medir temperatura del eje, o velocidad de giro. Además, podría desarrollarse una programación más compleja con ajustes automáticos (por ejemplo de ganancia del amplificador) en función de los parámetros leídos.

11.3. Potencial de mejora

En base a las debilidades del método identificadas y presentadas en la sección anterior, y en conjunto con otras consideraciones se elaboró una lista de los puntos donde existe potencial para mejorar el sistema desarrollado.

Sistema de amarre al eje: resulta evidente que el sistema elegido para sostener el dispositivo al motor en el presente trabajo cumple un rol exclusivamente funcional a los efectos de llevar a cabo los ensayos realizados. El dispositivo debiera contar con un sistema de amarre más robusto y ajustable al eje a ensayar. El circuito podría ir integrado a la base de sujeción, constituyendo de esta forma un único producto.

Conexión de las galgas: sería deseable trabajar con galgas ya conectadas entre sí (puente) y al conjunto base de sujeción - circuito, y de esta forma evitar tener que realizar las conexiones una vez montado todo sobre el eje (lo cual implica soldar los componentes en esas condiciones). Las galgas podría pegarse al eje estando ya cableadas al dispositivo. En dicho caso, sería deseable que los cableados tengan cierto grado de protección mecánica y grosor para ser fácilmente manipulables y de esta forma poder sujetarlos al eje para evitar su movimiento durante la operación del motor.

Interfaz del ususario: la interfaz empleada resultó ser poco atractiva al uso. En este punto, existen muchas aplicaciones que permiten crear una interfaz dedicada al producto que, además, permita la comunicación Bluetooth con el dispositivo. De esta forma se lograría tener una aplicación especial para el equipo que mostrase los parámetros de interés y de la forma que se quisiera. Esto podría ser acompañado de mejoras en el código de programación del microcontrolador para poder aumentar las prestaciones del dispositivo.

Electrónica del dispositivo: el circuito desarrollado tiene gran potencial de mejoramiento, principalmente debido a que lo realizado se ideo con el objetivo de satisfacer los requerimientos solicitados de la forma más simple que se pudiese.

Distintas técnicas aplicadas a instrumentación de medida podrían ser implementadas en el dispositivo para mejorar su calidad como instrumento de medida.

Profundización del estudio: este punto no guarda relación con el dispositivo en sí sino con el tiempo empleado en ensayos y análisis de resultados. Nuevos ensayos tendrían que ser llevados a cabo para aumentar la variedad de pruebas realizadas al dispositivo, así como para trabajar sobre los factores de error identificados. El estudio en profundidad de los efectos de la temperatura del eje sobre las medidas obtenidas, el efecto de la muesca, el error en el valor G del material son algunos de los puntos sobre los que se debe profundizar. Por otro lado, también es necesario evaluar el potencial de aplicación del sistema en distintos tamaños de motores, ensayando distintos motores dentro de un rango de potencias. Ese proceso llevaría con toda seguridad a identificar nuevos potenciales de perfeccionamiento del dispositivo, siguiendo un proceso de mejora continua del mismo.

11.4. Método con calibración previa - ventajas y consideraciones

Por último, se hace una mención aparte al método sugerido sobre el final del capítulo 10 que consistiría en realizar una calibración previo a tomar las medidas sobre el motor.

Los resultados probaron que este método ofrecía significativas mejoras respecto al método basado en el modelado teórico de las deformaciones, en lo referente al par medido. En contrapartida, es necesario la caracterización en un punto de operación, lo cual introduce la necesidad de desarrollar un método para poder ejercer en el motor un par cercano al que se medirá posteriormente.

La gran ventaja de este método es que se desprende de la mayor parte de los asuntos teóricos detrás del fenómeno medido y las medidas pasan a ser un simple ajuste de carácter proporcional. Por otra parte, todo instrumento de medida necesita ser calibrado para asegurar la confiabilidad en sus medidas. En este caso, la calibración no se realiza en laboratorio sino que se efectúa en cada motor a ensayar. En contrapartida, la gran desventaja del método es la dependencia con el punto que se selecciona para realizar la calibración, obteniéndose distintos valores de par según en cual punto se calibra el instrumento. Además, deberían realizarse una mayor cantidad de ensayos para evaluar si la hipótesis de linealidad se cumple para todo tipo de material.

Esta calibración debería realizarse previo a ensayar un nuevo motor, ya que su objetivo es caracterizar la respuesta del equipo a cada motor en particular. Por otro lado, de comprobarse la dependencia de las medidas con la temperatura, dicha calibración debiera realizarse en las mismas condiciones de temperatura del eje (o similares) que el punto que posteriormente se medirá. Esto podría lograrse

cargando el motor en el punto a medir hasta llegar al equilibrio térmico, frenarlo, realizar la calibración y volver a ponerlo en funcionamiento para proceder con las medidas.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 12

Conclusiones

En primer lugar, en lo referente a los objetivos establecidos inicialmente, el proyecto cumplió en forma satisfactoria cada uno de ellos. En particular, el objetivo de desarrollo del instrumento de medida, de carácter opcional al inicio, terminó siendo el corazón del trabajo desarrollado y, como agregado, presentó resultados muy alentadores.

Respecto al estudio de la importancia de la eficiencia como mecanismo de ahorro energético y ambiental, se presentó un estudio detallado mostrando el potencial de las campañas de eficiencia energética. Además, se llevó adelante el análisis de los factores que afectan la eficiencia en los motores de inducción mediante el estudio de su modelado eléctrico.

Se estudió la norma IEEE Std. 112, norma de referencia para ensayos de motores de inducción. Se llevó a cabo un análisis detallado de la misma con el objetivo de comprender sus procedimientos, particularmente el espíritu con el cual se definen la forma de ensayar los motores y los factores de correción a aplicar, así como para poder replicar sus lineamientos en el método de medida in-situ desarrollado.

En cuanto a las tecnologías existentes para la medida del par, se relevaron las opciones disponibles en plaza. Se llegó a la conclusión que, si bien muchas de ellas presentan características favorables a la problemática a resolver, por diversos factores existe un margen para proponer un método alternativo que mejore los resultados y sea más interesante desde lo económico.

Analizados los puntos anteriores, es que se procedió a desarrollar, implementar y ensayar un sistema de medida basado en las exigencias de medida en campo. El planteo desarrollado, tal cual fue explicado en el capítulo 11 (evaluación del método), mostró que el sistema desarrollado cumplió satisfactoriamente con los requerimientos de implementación. Distinto fue el balance realizado a la calidad de las medidas relevadas, que si bien presentaron resultados de precisión aceptable considerando que fue una primera implementación, no llegaron al nivel requerido inicialmente. Aún así, se planteó una posibilidad de mejora al método median-

te calibración, con la cual se obtuvieron resultados de calidad significativamente superior. Esto último abre la puerta a una perspectiva sumamente alentadora en cuanto al perfeccionamiento del método que puede ser llevado a cabo mediante futuros desarrollos.

A modo de conclusión final, si bien hay una cantidad importante de aspectos con potencial de mejora que debieran ser desarrollados a futuro, este proyecto presenta el camino a seguir para la obtención de un método de medida que cumpla con los requerimientos establecidos. El dispositivo implementado resultó ser sumamente satisfactorio en relación a los recursos disponibles para su realización y al acotado tiempo de desarrollo disponible. En cuanto a los futuros desarrollos que surgirán de este trabajo, siguiendo las mejoras propuestas y buscando otras alternativas, es posible darle continuidad a esta idea, la cual presenta grandes posibilidades de generar un dispositivo efectivo y comercializable en un futuro.

Capítulo 13

Anexos

13.1. Capítulo 2 - Antigüedad de motores en estudio

Antigüedad	CON conver. de frec.	SIN conver. de frec.	Compresores de Aire	**TOTAL**	**TOTAL %**
0-5 años	1.454	5.672	1.481	**8.606**	8,6 %
6-10 años	5.233	10.115	756	**16.105**	16,1 %
11-15 años	10.336	10.422	1.235	**21.993**	21,9 %
16-20 años	1.447	5.284	643	**7.373**	7,3 %
21-30 años	941	4.603	503	**6.047**	6,0 %
31-40 años	776	719	11	**1.505**	1,5 %
Más de 40 años	8	3.305	5	**3.318**	3,3 %
Antigüedad NO informada	2.899	31.138	349	**35.387**	35 %
TOTAL	**23.094**	**72.257**	**4.982**	**100.333**	100 %

Tabla 13.1: Antigüedad de motores relevados (Fuente [4])

13.2. Ensayo de ganancia del AD8556

Se tabulan los datos relevados en el ensayo de ganancia del chip AD8556:

$V_{in}(mV)$	$V_{out}(V)$	**Ganancia** (V/V)
0,97	1,262	1.301,03
0,98	1,264	1.289,80
0,99	1,277	1.289,90
1,00	1,295	1.295,00
1,01	1,310	1.297,03
1,02	1,325	1.299,02
1,03	1,330	1.291,26
1,04	1,342	1.290,38
1,05	1,351	1.286,67
1,06	1,377	1.299,06
1,07	1,380	1.289,72
1,08	1,400	1.296,30
1,09	1,412	1.295,41
1,10	1,416	1.287,27
1,11	1,439	1.296,40
1,12	1,451	1.295,54
1,13	1,467	1.298,23
1,14	1,475	1.293,86
1,15	1,491	1.296,52
1,16	1,506	1.298,28
1,17	1,512	1.292,31
1,18	1,519	1.287,29
	Promedio	**1.293,92**

Tabla 13.2: Resultados ensayos AD8556.

Incertidumbre

Se calculó la incertidumbre tipo A, ya que se tomaron 22 medidas. Para ello se aplicó la siguiente ecuación:

$$\sigma_{med} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{22}(x_i - \langle x \rangle)^2}{22(22-1)}} \tag{13.1}$$

En la tabla 13.3 se observa el procedimiento para hallar el valor de incertidumbre:

Ensayo	$V_{in}(mV)$	$V_{out}(V)$	**Gain** (V/V)	$x_i - \langle x \rangle$	$(x_i - \langle x \rangle)^2$
1	0,97	1,262	1.301,03	7,11	50,55
2	0,98	1,264	1.289,80	-4,13	17,02
3	0,99	1,277	1.289,90	-4,02	16,18
4	1,00	1,295	1.295,00	1,08	1,16
5	1,01	1,310	1.297,03	3,11	9,66
6	1,02	1,325	1.299,02	5,10	26,00
7	1,03	1,330	1.291,26	-2,66	7,07
8	1,04	1,342	1.290,38	-3,54	12,51
9	1,05	1,351	1.286,67	-7,25	52,63
10	1,06	1,377	1.299,06	5,14	26,37
11	1,07	1,380	1.289,72	-4,20	17,65
12	1,08	1,400	1.296,30	2,38	5,64
13	1,09	1,412	1.295,41	1,49	2,23
14	1,10	1,416	1.287,27	-6,65	44,20
15	1,11	1,439	1.296,40	2,48	6,13
16	1,12	1,451	1.295,54	1,61	2,61
17	1,13	1,467	1.298,23	4,31	18,57
18	1,14	1,475	1.293,86	-0,06	0,00
19	1,15	1,491	1.296,52	2,60	6,76
20	1,16	1,506	1.298,28	4,35	18,96
21	1,17	1,512	1.292,31	-1,61	2,60
22	1,18	1,519	1.287,29	-6,63	43,99
		Promedio	**1.293,92**	σ_a	**0,92**

Tabla 13.3: Incertidumbre ensayo AD8556.

Utilizando un factor de cobertura k=2, se obtiene un valor de incertidumbre de 1.83 V/V

13.3. Ensayo de eficiencia

Se presentan los cálculos correspondientes al ensayo de eficiencia (bajo norma y medida directa), tanto para calcular la misma como las incertidumbres correspondientes (asociada a factor k=1 y relativa). Se confeccionan tablas con los valores medidos y con los valores calculados, asumiendo en todos los casos distribución uniforme. A continuación se define las dos incertidumbres, así como el factor de cobertura y se presenta la tabla 13.4, con las especificaciones de los instrumentos.

- Incertidumbre por resolución: $u_{res} = \dfrac{resolucion}{2\sqrt{3}}$
- Incertidumbre por exactitud: $u_{exc} = \dfrac{exactitud}{\sqrt{3}}$

- Factor de cobertura: $k = 2$

Variable medida	**Res**	**Exactitud**	**Instrumento**
$Pelec_{medida}$ (kW)	0,001	0,5 %+0.01	CVMK2
I (A)	0,01	0,5 %+0.01	CVMK2
L (m)	0,001	-	Regla
m (kg)	0,01	-	Balanza
Nt (rpm)	1	0,05 %+1	Tacómetro Testo 465
Resistencia (Ω)	0,01	0,05 %+8+0,02Ω	Fluke 45
T_{amb} (^{o}C)	1	1	Termómetro

Tabla 13.4: Incertidumbre de los instrumentos utilizados en los ensayos

Para la incertidumbre en las medidas del par según método MCEMI se observan la tablas 13.5 y 13.6, con los instrumentos utilizados para realizar las medidas.

Factores	**Incertidumbre**	**Valor**	**Incertidumbre**
S_ε	0,01	2,07	0,0207
θ (rad)		0,78539816	0,03490659
G	0,005	8,00E+10	4,00E+08
G_{AD8556}	0,0014	1293	1,8102

Tabla 13.5: Incertidumbre de los factores para la medida del par

Variable medida	**Resolución**	**Exactitud**	**Instrumento**
c (m)	0,00005		Calibre
R_{10k1} (Ω)	1	0.05 %+2	Fluke 45
R_{10k2} (Ω)	1	0,05 %+2	Fluke 45
Bits Arduino	1		Arduino MKR1000
Vard (V)	0,001	0,025 %+0.002	Fluke 45

Tabla 13.6: Incertidumbre de los instrumentos para la medida del par

13.3.1. Eficiencia según norma

Resistencia en frío

Variable	**Valor medido**	**Incert. asoc. (k=1)**	**Incert. rel. (%)**
R_f (Ω)	1,34	0,06	4,35
T_{amb}(^{o}C)	18	0,6	3,6

Tabla 13.7: Incertidumbre ensayo resistencia en frío

Temperatura específica

Variable	Valor medido	Incert. asoc. (k=1)	Incert. rel. (%)
R_t (Ω)	1,62	0,06	3,60

Variable	Valor calculado	Incert. asoc. (k=1)	Incert. rel. (%)
t_s (^{o}C)	75,90	16,61	21,89
R_s (Ω)	1,66	0,12	7,04

Tabla 13.8: Incertidumbre ensayo temperatura específica

Ensayo bajo carga

Dinamométrica

En cuanto a largo del brazo se midió el mismo con regla, obteniendo un valor de 0,3575 mts, con incertidumbre asociada (k=1) 0,003 e incertidumbre relativa 0,08 %.

CON conver.
de frec.

Variable	Valor medido	Incert. asoc. (k=1)	Incert. rel. (%)
R_t (Ω)	1,63	0,06	3,58
I (A)	11,90	0,04	0,34
P_{medida} (kW)	3,728	0,011	0,30
$m(kg)$	5,70	0,003	0,05
N_t (rpm)	1422	1	0,07

Variable	Valor calculado	Incert. asoc. (k=1)	Incert. rel. (%)
t_t (^{o}C)	71,33	16,71	23,43
s_t (pu)	0,05	0,0007	1,32
s_s (pu)	0,05	0,0042	8,00
Nesp (Rpm)	1420,8	6,3	0,45
T (Nm)	19,99	0,02	0,10
$Pmec_{corr}$ (kW)	2,97	0,0	0,46
$R_t$loss (W)	346,04	12,59	3,64
$R_s$loss (W)	351,39	24,84	7,07
F (W)	5,34	27,85	521,09
$Pelec_{corr}$ (kW)	3,73	0,03	0,81
η (%)	79,7	0,7	0,93

Tabla 13.9: Incertidumbre ensayo bajo carga 100 % con según norma dinamométrica

Variable	**Valor medido**	**Incert. asoc. (k=1)**	**Incert. rel. (%)**
R_t (Ω)	1,61	0,06	3,61
I (A)	9,88	0,03	0,35
P_{medida} (kW)	2,808	0,009	0,31
m (kg)	2,81	0,003	0,10
N_t (Rpm)	1445	1	0,07

Variable	**Valor calculado**	**Incert. asoc. (k=1)**	**Incert. rel. (%)**
t_t (^{o}C)	68,30	16,61	24,32
s_t (pu)	0,04	0,0007	1,88
s_s (pu)	0,04	0,0031	8,13
Nesp (Rpm)	1443,57	4,6	0,32
T (Nm)	15,08	0,01	0,09
$Pmec_{corr}$ (kW)	2,28	0,0	0,33
$R_t$loss (W)	236,13	8,69	3,68
$R_s$loss (W)	242,25	17,13	7,07
F (W)	6,12	19,20	313,62
$Pelec_{corr}$ (kW)	2,81	0,02	0,75
η (%)	81,0	0,7	0,82

Tabla 13.10: Incertidumbre ensayo bajo carga 75 % con dinamométrica

Variable	**Valor medido**	**Incert. asoc. (k=1)**	**Incert. rel. (%)**
R_t (Ω)	1,46	0,06	3,98
I (A)	8,24	0,03	0,36
P_{medida} (kW)	1,903	0,006	0,32
m (kg)	2,79	0,003	0,10
N_t (Rpm)	1467	1	0,07

Variable	**Valor calculado**	**Incert. asoc. (k=1)**	**Incert. rel. (%)**
t_t (^{o}C)	41,03	15,71	38,28
s_t (pu)	0,02	0,0007	3,16
s_s (pu)	0,02	0,0022	8,68
Nesp (Rpm)	1462,67	3,2	0,22
T (Nm)	9,78	0,01	0,13
$Pmec_{corr}$ (kW)	1,50	0,0	0,26
$R_t$loss (W)	148,90	6,02	4,04
$R_s$loss (W)	168,42	11,91	7,07
F (W)	19,52	13,35	68,38
$Pelec_{corr}$ (kW)	1,92	0,01	0,76
η (%)	78,0	0,6	0,81

Tabla 13.11: Incertidumbre ensayo bajo carga $50\,\%$ según norma con dinamométrica

Variable	**Valor medido**	**Incert. asoc. (k=1)**	**Incert. rel. (%)**
R_t (Ω)	1,42	0,06	4,09
I (A)	7,25	0,03	0,37
P_{medida} (kW)	1,065	0,004	0,34
m (kg)	1,39	0,003	0,21
N_t (Rpm)	1488	1	0,07

Variable	**Valor calculado**	**Incert. asoc. (k=1)**	**Incert. rel. (%)**
t_t (^{o}C)	33,76	15,47	45,84
s_t (pu)	0,01	0,0007	8,73
s_s (pu)	0,01	0,0011	11,93
Nesp (Rpm)	1486,05	1,7	0,11
T (Nm)	4,87	0,01	0,22
$Pmec_{corr}$ (kW)	0,76	0,0	0,25
$R_t$loss (W)	112,15	4,66	4,16
$R_s$loss (W)	130,42	9,23	7,07
F (W)	18,27	10,34	56,59
$Pelec_{corr}$ (kW)	1,08	0,01	1,01
η (%)	70,0	0,7	1,04

Tabla 13.12: Incertidumbre ensayo bajo carga 25 % según norma con dinamométrica

Multiplicando las incertidumbres asociadas por el factor de cobertura se obtiene la incertidumbre expandida, que se refleja en la tabla 13.13.

Carga	**Eficiencia(%)**
100 %	79.7 ± 1.5
75 %	81.0 ± 1.3
50 %	78.0 ± 1.3
25 %	70.0 ± 1.5

Tabla 13.13: Eficiencia según norma con incertidumbres. Dinamométrica

MCEMI

Las medidas preliminares en el dispositivo para la medida del par se reflejan en la tabla 13.14.

Variable	**Valor medido**	**Incert. asoc. (k=1)**	**Incert rel. (%)**
Vard (V)	3,315	0,002	0,05003004
R_{10k1} (Ω)	8366	3,58140982	0,04280911
R_{10k2} (Ω)	8372	3,58313624	0,04279905
c (m)	0,014025	1,4E-05	0,10291449

Tabla 13.14: Medidas preliminares para obtener el par

Variable	**Valor medido**	**Incert. asoc. (k=1)**	**Incert. rel. (%)**
$Bits_{Ard}$ Carga	1758	0,28867513	0,01642066
Vcarga (V)	1,42314286	0,00074937	0,05265589
δv_0 (V)	0,00033683	8,5846E-07	0,25486342
$Bits_{Ard}$ Vmeas	3227	0,28867513	0,00894562
Vmeas (V)	2,61233333	0,00132768	0,05082351
Vref (V)	5,22279447	0,00308917	0,05914784
ε_θ	3,1156E-05	3,2205E-07	1,0336604
Ip	6,0776E-08	2,5019E-10	0,41165795
T (Nm)	21,6017316	0,26443444	1,2241354

Tabla 13.15: Incertidumbre medida de par: 100 %

Variable	**Valor medido**	**Incert. asoc. (k=1)**	**Incert. rel. (%)**
R_t (Ω)	1,63	0,06	3,58
I (A)	11,90	0,04	0,34
P_{medida} (kW)	3,728	0,011	0,30
T (Nm)	21,60	0,26	1,22
N_t (Rpm)	1422	1	0,07

Variable	**Valor calculado**	**Incert. asoc. (k=1)**	**Incert. rel. (%)**
t_t (^{o}C)	71,33	16,71	23,43
s_t (pu)	0,05	0,0007	1,32
s_s (pu)	0,05	0,0042	8,00
Nesp (Rpm)	1420,80	6,3	0,45
$Pmec_{corr}$ (kW)	3,21	0,0	1,30
$R_t$loss (W)	346,04	12,59	3,64
$R_s$loss (W)	351,39	24,84	7,07
F (W)	5,34	27,85	521,09
$Pelec_{corr}$ (kW)	3,73	0,03	0,81
η (%)	86,1	1,3	1,53

Tabla 13.16: Incertidumbre ensayo bajo carga 100 % según norma con método MCEMI

Variable	**Valor medido**	**Incert. asoc. (k=1)**	**Incert. rel. (%)**
$Bits_{Ard}$ Carga	1715	0,289	0,01683
Vcarga (V)	1,388	0,000733	0,05279
δv_0 (V)	0,00025	8,05163E-07	0,31754
$Bits_{Ard}$ Vmeas	3227	0,289	0,00895
Vmeas (V)	2,612	0,00133	0,05082
Vref (V)	5,22	0,00309	0,05915
ε_θ	2,34538E-05	2,46469E-07	1,05087
Ip	6,07759E-08	2,50189E-10	0,41166
T (Nm)	16,26	0,201431911	1,23870

Tabla 13.17: Incertidumbre medida de par: 75 %

Variable	**Valor medido**	**Incert. asoc. (k=1)**	**Incert. rel. (%)**
R_t (Ω)	1,61	0,06	3,61
I (A)	9,88	0,03	0,35
P_{medida} (kW)	2,808	0,009	0,31
T (Nm)	16,26	0,20	1,24
N_t (Rpm)	1445	1	0,07

Variable	**Valor calculado**	**Incert. asoc. (k=1)**	**Incert. rel. (%)**
t_t (^{o}C)	68,30	16,61	24,32
s_t (pu)	0,04	0,0007	1,88
s_s (pu)	0,04	0,0031	8,13
Nesp (Rpm)	1443,57	4,6	0,32
$Pmec_{corr}$ (kW)	2,46	0,0	1,28
$R_t$loss (W)	236,13	8,69	3,68
$R_s$loss (W)	242,25	17,13	7,07
F (W)	6,12	19,20	313,62
$Pelec_{corr}$ (kW)	2,81	0,02	0,75
η (%)	87,3	1,3	1,48

Tabla 13.18: Incertidumbre ensayo bajo carga 75 % según norma con método MCEMI

Variable	**Valor medido**	**Incert. asoc. (k=1)**	**Incert. rel. (%)**
$Bits_{Ard}$ Carga	1557	0,289	0,01854
Vcarga (V)	1,260	0,000673	0,05335
δv_0 (V)	0,00015	7,1901E-07	0,49078
$Bits_{Ard}$ Vmeas	3227	0,289	0,00895
Vmeas (V)	2,612	0,00133	0,05082
Vref (V)	5,22	0,00309	0,05915
ε_θ	1,35511E-05	1,51164E-07	1,11551
Ip	6,07759E-08	2,50189E-10	0,41166
T (Nm)	9,40	0,121577762	1,29399

Tabla 13.19: Incertidumbre medida de par: 50 %

Variable	**Valor medido**	**Incert. asoc. (k=1)**	**Incert. rel. (%)**
R_t (Ω)	1,46	0,06	3,98
I (A)	8,24	0,03	0,36
P_{medida} (kW)	1,903	0,006	0,32
T (Nm)	9,40	0,12	1,29
N_t (Rpm)	1467	1	0,07

Variable	**Valor calculado**	**Incert. asoc. (k=1)**	**Incert. rel. (%)**
t_t (^{o}C)	41,03	15,71	38,28
s_t (pu)	0,02	0,0007	3,16
s_s (pu)	0,02	0,0022	8,68
Nesp (Rpm)	1462,67	3,2	0,22
$Pmec_{corr}$ (kW)	1,44	0,0	1,31
$R_t$loss (W)	148,90	6,02	4,04
$R_s$loss (W)	168,42	11,91	7,07
F (W)	19,52	13,35	68,38
$Pelec_{corr}$ (kW)	1,92	0,01	0,76
η (%)	74,9	1,1	1,52

Tabla 13.20: Incertidumbre ensayo bajo carga 50 % según norma con método MCEMI

Variable	**Valor medido**	**Incert. asoc. (k=1)**	**Incert. rel. (%)**
$Bits_{Ard}$ Carga	1429	0,289	0,02020
Vcarga (V)	1,157	0,000624	0,05395
δv_0 (V)	0,00006	6,68163E-07	1,04629
$Bits_{Ard}$ Vmeas	3227	0,289	0,00895
Vmeas (V)	2,612	0,00133	0,05082
Vref (V)	5,22	0,00309	0,05915
ε_θ	5,90688E-06	8,55624E-08	1,44852
Ip	6,07759E-08	2,50189E-10	0,41166
T (Nm)	4,10	0,065120562	1,59005

Tabla 13.21: Incertidumbre medida de par: 25 %

Variable	**Valor medido**	**Incert. asoc. (k=1)**	**Incert. rel. (%)**
R_t (Ω)	1,42	0,06	4,09
I (A)	7,25	0,03	0,37
P_{medida} (kW)	1,065	0,004	0,34
T (Nm)	4,11	0,07	1,58
N_t (Rpm)	1488	1	0,07

Variable	**Valor calculado**	**Incert. asoc. (k=1)**	**Incert. rel. (%)**
t_t (^{o}C)	33,76	15,47	45,84
s_t (pu)	0,01	0,0007	8,73
s_s (pu)	0,01	0,0011	11,93
Nesp (Rpm)	1486,05	1,7	0,11
$Pmec_{corr}$ (kW)	0,64	0,0	1,59
$R_t$loss (W)	112,15	4,66	4,16
$R_s$loss (W)	130,42	9,23	7,07
F (W)	18,27	10,34	56,59
$Pelec_{corr}$ (kW)	1,08	0,01	1,01
η (%)	59,0	1,1	1,88

Tabla 13.22: Incertidumbre ensayo bajo carga 25 % según norma con método MCEMI

Multiplicando las incertidumbres asociadas por el factor de cobertura se obtiene la incertidumbre expandida, que se refleja en la tabla 13.23.

Carga	**Eficiencia(%)**
100 %	86.1 ± 2.6
75 %	87.3 ± 2.6
50 %	74.9 ± 2.3
25 %	59.0 ± 2.2

Tabla 13.23: Eficiencia según norma con incertidumbres. MCEMI

13.3.2. Medida directa de eficiencia

Dinamométrica

Variable	**Valor medido**	**Incert. asoc. (k=1)**	**Incert. rel. (%)**
P_{medida} (kW)	3,728	0,011	0,30
L (m)	0,3575	0,0003	0,08
m (kg)	5,70	0,003	0,05
N_t (Rpm)	1422	1	0,07

Variable	**Valor calculado**	**Incert. asoc. (k=1)**	**Incert. rel. (%)**
T (Nm)	19,99	0,02	0,10
Pmec (kW)	3,0	0,0	0,12
η (%)	79,9	0,3	0,33

Tabla 13.24: Incertidumbre ensayo eficiencia directa 100 % con dinamométrica

Variable	**Valor medido**	**Incert. asoc. (k=1)**	**Incert. rel. (%)**
P_{medida} (kW)	2,808	0,009	0,31
L (m)	0,3575	0,0003	0,08
m (kg)	4,30	0,003	0,07
N_t (Rpm)	1445	1	0,07

Variable	**Valor calculado**	**Incert. asoc. (k=1)**	**Incert. rel. (%)**
T (Nm)	15,08	0,02	0,11
Pmec (kW)	2,3	0,0	0,13
η (%)	81,3	0,3	0,33

Tabla 13.25: Incertidumbre ensayo eficiencia directa 75 % con dinamométrica

Variable	**Valor medido**	**Incert. asoc. (k=1)**	**Incert. rel. (%)**
P_{medida} (kW)	1,903	0,006	0,32
L (m)	0,3575	0,0003	0,08
m (kg)	2,79	0,003	0,10
N_t (Rpm)	1467	1	0,07

Variable	**Valor calculado**	**Incert. asoc. (k=1)**	**Incert. rel. (%)**
T (Nm)	9,78	0,01	0,13
Pmec (kW)	1,5	0,0	0,15
η (%)	79,0	0,3	0,35

Tabla 13.26: Incertidumbre ensayo eficiencia directa 50 % con dinamométrica

Variable	**Valor medido**	**Incert. asoc. (k=1)**	**Incert. rel. (%)**
P_{medida} (kW)	1,065	0,004	0,34
L (m)	0,3575	0,0003	0,08
m (kg)	1,39	0,003	0,21
N_t (Rpm)	1488	1	0,07

Variable	**Valor calculado**	**Incert. asoc. (k=1)**	**Incert. rel. (%)**
T (Nm)	4,87	0,01	0,22
Pmec (kW)	0,8	0,0	0,23
η (%)	71,3	0,3	0,42

Tabla 13.27: Incertidumbre ensayo eficiencia directa 25 % con dinamométrica

Al igual que en los casos anteriores se multiplica por el factor de cobertura para obtener la incertidumbre. Los resultados se muestran en la tabla 13.28.

Carga	**Eficiencia (%)**
100 %	79.9 ± 0.5
75 %	81.3 ± 0.5
50 %	79.0 ± 0.6
25 %	71.3 ± 0.6

Tabla 13.28: Eficiencia medida directa con incertidumbres. Dinamométrica

MCEMI

Variable	**Valor medido**	**Incert. asoc. (k=1)**	**Incert. rel. (%)**
P_{medida} (kW)	3,728	0,011	0,30
T (Nm)	21,60	0,264	1,22
N_t (Rpm)	1422	1	0,07

Variable	**Valor calculado**	**Incert. asoc. (k=1)**	**Incert. rel. (%)**
Pmec (kW)	3,2	0,0	1,23
η (%)	86,3	1,1	1,26

Tabla 13.29: Incertidumbre ensayo eficiencia directa $100\,\%$ con MCEMI

Variable	**Valor medido**	**Incert. asoc. (k=1)**	**Incert. rel. (%)**
P_{medida} (kW)	2,808	0,009	0,31
T (Nm)	16,26	0,201	1,24
N_t (Rpm)	1445	1	0,07

Variable	**Valor calculado**	**Incert. asoc. (k=1)**	**Incert. rel. (%)**
Pmec (kW)	2,5	0,0	1,24
η (%)	87,6	1,1	1,28

Tabla 13.30: Incertidumbre ensayo eficiencia directa $75\,\%$ con MCEMI

Variable	**Valor medido**	**Incert. asoc. (k=1)**	**Incert. rel. (%)**
P_{medida} (kW)	1,903	0,006	0,32
T (Nm)	9,4	0,122	1,29
N_t (Rpm)	1467	1	0,07

Variable	**Valor calculado**	**Incert. asoc. (k=1)**	**Incert. rel. (%)**
Pmec (kW)	1,4	0,0	1,30
η (%)	75,9	1,0	1,33

Tabla 13.31: Incertidumbre ensayo eficiencia directa $50\,\%$ con MCEMI

Variable	**Valor medido**	**Incert. asoc. (k=1)**	**Incert. rel. (%)**
P_{medida} (kW)	1,065	0,004	0,34
T (Nm)	4,11	0,065	1,58
N_t (Rpm)	1488	1	0,07

Variable	**Valor calculado**	**Incert. asoc. (k=1)**	**Incert. rel. (%)**
Pmec (kW)	0,6	0,0	1,59
η (%)	60,1	1,0	1,62

Tabla 13.32: Incertidumbre ensayo eficiencia directa 25 % con MCEMI

Multiplicando por el factor de cobertura se obtiene la incertidumbre. Los resultados se reflejan en la tabla 13.33.

Carga	**Eficiencia (%)**
100 %	86.3 ± 2.2
75 %	87.6 ± 2.2
50 %	75.9 ± 2.0
25 %	60.1 ± 2.0

Tabla 13.33: Eficiencia medida directa con incertidumbres. MCEMI

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Referencias

[1] B. de Wachter, "Electric motors in the energy transition," *ECI*, Agosto 2018.

[2] Transport and Environment, "Co2 emissions from cars: the facts," *2018 European Federation for Transport and Environment AISBL*, Abril 2018.

[3] Infobae, "En la Argentina circulan 12,5 millones de vehículos." `http://www.infobae.com/economia/2017/05/24/en-la-argentina-circulan-125-millones-de-vehiculos/`. Online; accessed: 20-September-2018.

[4] DNE-MIEM, "Estudios de base para el diseño de estrategias y políticas energéticas: relevamiento de consumos de energía sectoriales en términos de energía útil a nivel nacional," vol. Informe del sector industrial, 2006.

[5] P. E. Phelan, J. Swanson, F. Chiriac y V. Chiriac, "Designing a mesoscale vapor-compression refrigerator for cooling high-power microelectronics," *The Ninth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena In Electronic Systems (IEEE Cat. No.04CH37543)*, June 2004.

[6] WEG, "Selección de motores eléctricos." `http://ecatalog.weg.net/tec_cat/retornoinvestmotor_web.asp?cd_mercado=000L`. Online; accessed: 29-September-2018.

[7] J. F. Mora, "Máquinas eléctricas," pp. 259–378, 2003.

[8] IEEE Power Engineering Society, "Standard test procedure for polyphase induction motors and generators," February 2004.

[9] P. J. P. Pillay, V. Levin, "In-situ induction motor efficiency determination using the genetic algorithm," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 13, December 1998.

[10] A. Y. L. Karnava, Ch. K. Vacharides, "On the development of an on-site induction motor efficiency estimator framework," *9th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission Distribution and Energy Conversion MEDPOWER*, November 2014.

[11] E. P. Popov and T. A. Balan, "Mecánica de sólidos," pp. 207–235, 2000.

[12] C. W. de Silva, "Vibration fundamentals and practice," pp. 488–508, 2000.

[13] Analog Devices, *Digitally Programmable Sensor Signal Amplifier with EMI Filters - Ad8556 Datasheet*, 2005-2015. Rev B.

[14] Fluke Corporation, *45 Dual Display Mltimeter Service Manual*, 1999. Rev. 1.

[15] HBM, "Servicios y soportes hbm."
`https://www.hbm.com/es/6725/articulo-compensacion-de-temperatura-en-\`
`galgas-extensometricas/`.
Online; accessed: 28-September-2018.

Índice de tablas

2.1. Análisis de la inversión al comprar un nuevo motor 12

5.1. Resultados de medida de eficiencia empleando algortimo genético . 29

7.1. Incertidumbre de factores a medir 56

8.1. Solicitudes de tiempo para reconocimiento de pulsos de programación (AD8556) 65
8.2. Formato de envía de información al amplificador AD8556 66

9.1. Ensayo final del sistema montado en Protoboard 84
9.2. Ensayo final del sistema montado en PCB 85

10.1. Incertidumbre de los factores medidos. 96
10.2. Valores generales del ensayo 99
10.3. Resultados del ensayo de resistencia en frío 99
10.4. Resultados del ensayo de temperatura específica 99
10.5. Medidas de los ensayos bajo carga 100
10.6. Resultados de eficiencia según norma 100
10.7. Resultados de eficiencia por medida directa 101
10.8. Comparación de resultados: método teórico vs. método calibración 106
10.9. Error relativo de medidas según método y luego de calibrar 107

13.1. Antigüedad de motores relevados (Fuente [4]) 117
13.2. Resultados ensayos AD8556. 118
13.3. Incertidumbre ensayo AD8556. 119
13.4. Incertidumbre de los instrumentos utilizados en los ensayos 120
13.5. Incertidumbre de los factores para la medida del par 120
13.6. Incertidumbre de los instrumentos para la medida del par 120
13.7. Incertidumbre ensayo resistencia en frío 120
13.8. Incertidumbre ensayo temperatura específica 121
13.9. Incertidumbre ensayo bajo carga 100 % con según norma dinamométrica 121
13.10Incertidumbre ensayo bajo carga 75 % con dinamométrica 122
13.11Incertidumbre ensayo bajo carga 50 % según norma con dinamométrica 123

13.12Incertidumbre ensayo bajo carga 25 % según norma con dinamométrica 124
13.13Eficiencia según norma con incertidumbres. Dinamométrica 124
13.14Medidas preliminares para obtener el par 125
13.15Incertidumbre medida de par: 100 % 125
13.16Incertidumbre ensayo bajo carga 100 % según norma con método MCEMI 126
13.17Incertidumbre medida de par: 75 % 126
13.18Incertidumbre ensayo bajo carga 75 % según norma con método MCEMI 127
13.19Incertidumbre medida de par: 50 % 127
13.20Incertidumbre ensayo bajo carga 50 % según norma con método MCEMI 128
13.21Incertidumbre medida de par: 25 % 128
13.22Incertidumbre ensayo bajo carga 25 % según norma con método MCEMI 129
13.23Eficiencia según norma con incertidumbres. MCEMI 129
13.24Incertidumbre ensayo eficiencia directa 100 % con dinamométrica . 130
13.25Incertidumbre ensayo eficiencia directa 75 % con dinamométrica . . 130
13.26Incertidumbre ensayo eficiencia directa 50 % con dinamométrica . . 131
13.27Incertidumbre ensayo eficiencia directa 25 % con dinamométrica . . 131
13.28Eficiencia medida directa con incertidumbres. Dinamométrica . . . 131
13.29Incertidumbre ensayo eficiencia directa 100 % con MCEMI 132
13.30Incertidumbre ensayo eficiencia directa 75 % con MCEMI 132
13.31Incertidumbre ensayo eficiencia directa 50 % con MCEMI 132
13.32Incertidumbre ensayo eficiencia directa 25 % con MCEMI 133
13.33Eficiencia medida directa con incertidumbres. MCEMI 133

Índice de figuras

2.1. Rendimientos energéticos por sector 10

3.1. Circuito monofásico equivalente del motor de inducción 17
3.2. Pérdidas en vacío en función de la tensión. 18
3.3. Balance de potencia 20

5.1. Modelo estrella equivalente de MI - Algoritmo genético 26

6.1. Deformación del eje 34
6.2. Esfuerzos y deformaciones unitarias cortantes (Fuente [7]) 35
6.3. Distribución esfuerzo en barra circular (Fuente [7]) 36
6.4. Efectos de tensión y compresión en un eje sometido a par 38
6.5. Puente de Wheatstone. 40
6.6. Disposición de las galgas en el eje 44

7.1. Diagrama de bloques de sistema de medida 47
7.2. Esquema de conexionado de componentes 51
7.3. Diagrama de consumos en el circuito 54
7.4. Chaveta insertada en muesca 55

8.1. Diseño de PCB 63
8.2. Circuito impreso sobre placa de cobre virgen 63
8.3. Circuito impreso estañado 64
8.4. Circuito impreso implementado con componentes 64
8.5. Circuito impreso implementado con componentes 64
8.6. Circuito impreso implementado con componentes 65
8.7. Diagrama de tiempos para el código 010011 (Amplificador AD8556) 65
8.8. Diagrama de estados de la programación del dispositivo 68
8.9. Pegado de cinta a utilizar como guía. 70
8.10. Pegado de galga extensiométrica en eje de motor. 70
8.11. Conexionado de galgas en eje 71

9.1. Banco de prueba - Plano general 75
9.2. Banco de prueba - Corte A-A 75
9.3. Banco de prueba - Corte B-B 76
9.4. Banco de pruebas estáticas 76

9.5. Respuesta de Puente 1 frente a diferentes cargas 80
9.6. Circuito para ensayo de ganancia del AD8556. 82
9.7. Resultados del ensayo de ganancia del AD8556. 82
9.8. Sistema de medida dispuesto en Protoaboard 84
9.9. Banco de pruebas con PCB - Imagen 1 85
9.10. Banco de pruebas con PCB - Imagen 2 86

10.1. Esquema del circuito de ensayos sobre el motor. 89
10.2. Eficiencia calculada según norma IEEE Std 112 101
10.3. Eficiencia medida. 101
10.4. Lectura obtenidas para distintos puntos de carga 104
10.5. Comparativa de errores relativos empleando ambos métodos 108
10.6. Comparativa de errores absolutos empleando ambos métodos . . . 108

Esta es la última página.
Compilado el martes 18 diciembre, 2018.
http://iie.fing.edu.uy/

Medida en Campo de Eficiencia en Motores de Inducción

J. Gibert, F. González & R. Schuster
Facultad de Ingeniería, Universidad de la República Uruguay

***Abstract*—Las dificultades que presenta la medida de eficiencia en los motores de inducción representa uno de los mayores obstáculos para la ejecución de auditorías energéticas integrales. En particular, la dificultad reside en la medida del par ejercido por el motor, debido a la escasez de equipos que permitan su medida en forma precisa. Atacando esta problemática es que se llevó a cabo el diseño e implementación de un equipo montable sobre el motor, que transmite al usuario la medida del par ejercido. La transmisión se realiza continuamente, en forma inalámbrica mientras el equipo gira junto al eje del motor. Se comprobó el buen funcionamiento del sistema y se lo ensayó sobre un motor de 4HP contrastando sus medidas con las obtenidas mediante la utilización de una generatriz dinamométrica acoplada al motor. Agregando al sistema una etapa de calibración previa en sitio se lograron diferencias inferiores a 2% respecto a las lecturas de la generatriz para un amplio rango de potencias. Los resultados obtenidos y la capacidad de medida comprobada garantizan el potencial de desarrollo del método desarrollado.**

Palabras claves: par, torque, eficiencia, incertidumbre, deformación, galga extensiométrica, amplificación, medida.

I. Introducción

El presente artículo presenta los principales resultados obtenidos del proceso de construcción y ensayo de un sistema capaz de medir el par ejercido por un motor eléctrico durante su funcionamiento. El sistema de medida se basa en la capacidad de establecer una correlación entre la deformación cortante que ocurre en la superficie del eje del motor y el par que la máquina está imponiendo.

Se diseñó e implementó un dispositivo basado en el uso de galgas extensiométricas, capaz de realizar tales medidas. El prototipo desarrollado se monta sobre el eje del motor y gira solidario al mismo, mientras transmite las lecturas de par mediante Bluetooth al usuario en tiempo real. Se ensayó un motor de 4 HP para evaluar la precisión del sistema y, a la par, se evaluaron otros aspectos del método desarrollado tales como la facilidad de implementación y las variables externas que influencian las medidas.

Se utilizó como guía para el ensayo del motor los lineamientos establecidos en la norma IEEE Std. 112.

Este trabajo fue llevado a cabo como Proyecto de Final de Carrera para la obtención del título de Ingeniero Electricista de los tres estudiantes autores de este artículo, bajo la tutela de los docentes Ing. Pablo Toscano e Ing. Ernesto Elenter. El proyecto contó con el apoyo del Instituto de Ingeniería Eléctrica (IIE) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República.

Juan Gibert, estudiante de la carrera de Ingeniería Eléctrica, perfil Sistemas Eléctricos de Potencia de la Facultad de Ingeniería UdelaR, Montevideo, Uruguay (mail: jgibert@fing.edu.uy).

Fernando González, estudiante de la carrera de Ingeniería Eléctrica perfil Sistemas Eléctricos de Potencia de la Facultad de Ingeniería UdelaR, Montevideo, Uruguay (mail: fgonzalez@fing.edu.uy).

Rodrigo Schuster, estudiante de la carrera de Ingeniería Eléctrica, perfil Sistemas Eléctricos de Potencia de la de Facultad de Ingeniería UdelaR, Montevideo, Uruguay (mail: rschuster@fing.edu.uy).

II. Teoría de la deformación de un eje

La aplicación de par en un tramo de eje cilíndrico ocasiona deformaciones que son plenamente descritas por la teoría de deformaciones de sólidos. La aplicación exclusiva de torsión genera en el material esfuerzos y deformaciones de tipo cortante que constituyen rotaciones de la superficie, sin efectos de dilatación/compresión.

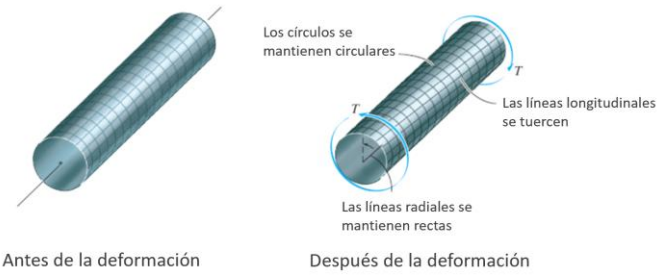


Figura 1: Efecto de la deformación por torsión

Los esfuerzos y deformaciones se vinculan linealmente mediante la ley de Hooke (τ esfuerzo, γ deformación unitaria cortante, G módulo de elasticidad)

$$\tau = G \times \gamma$$

El módulo de elasticidad es una constante característica de cada material.

Se define el rango de validez del modelo a continuación, como todo punto en el eje que se encuentre a un díametro o más de distancia de los puntos de aplicación del par o de cambios de sección. Dentro del rango de validez los resultados siguientes son válidos independientemente del punto del eje.

El esfuerzo cortante que aparece en la superficie se vincula en forma lineal con el par externo impuesto, afectado por el radio del eje (c) y el momento polar de inercia de la sección transversal (I_p).

$$\tau = \frac{Tc}{I_p}$$

Por otro lado, la deformación en un punto del eje responde a la ecuación siguiente, donde θ representa el ángulo a la horizontal sobre el cual se mide la deformación.

$$\varepsilon_\theta = \gamma \sin(\theta)\cos(\theta)$$

Al aplicar la ley de Hooke y la vinculación par-esfuerzo se incurre en la ecuación que permite vincular la deformación medida según una dirección según θ y el par externo impuesto al eje.

$$T = \frac{I_p G}{c \sin(\theta) \cos(\theta)} \varepsilon_\theta$$

Se infiere de la ecuación anterior que de tener la capacidad de medir deformaciones según la dirección definida por θ es posible medir el par.

III. Transductor de medida

El transductor de medida seleccionado es la galga extensiométrica, cuya función de vinculación resistencia-deformación es la siguiente.

$$\frac{\delta R}{R} = S_s \times \varepsilon$$

La medida de la variación de resistencia de la galga se realiza colocando 4 galgas activas e iguales en un puente de Wheatstone y dispuestas según las direcciones θ, θ+90°,- θ y θ-90° de forma que la variaciones sea iguales en valor y opuestas en galgas consecutivas del puente. En estas condiciones, la variación de la salida del puente es lineal con la variación de resistencia de las galgas, siguiendo la fórmula siguiente.

$$\frac{\delta v_0}{v_{ex}} = 4 \times \frac{\delta R}{R}$$

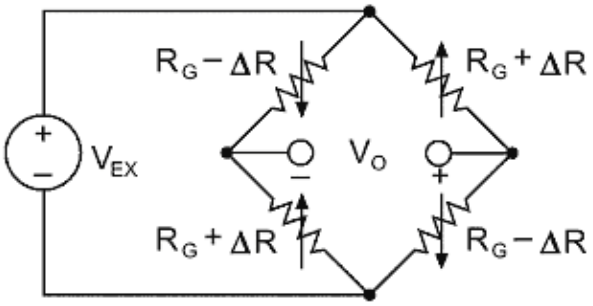


Figura 2: Puente de Wheatstone

Del razonamiento anterior se infiere que la vinculación entre la variación de la tensión de salida del puente con el torque aplicado en el eje del motor es la siguiente.

$$T = \frac{G I_p}{S_s \, c \, sin\theta cos\theta} \frac{\delta v_0}{v_{ex}}$$

IV. Diseño del sistema de medida

Con base en la teoría que indica que es posible medir el torque aplicado por el motor a través de la medida de la variación de la tensión de un puente de Wheatstone conformado por galgas montadas sobre el eje del motor, es que se procedió a diseñar un sistema de medida capaz de realizar tales registros.

El sistema tuvo los siguiente bloques elementales:

1) Alimentación
2) Regulador de tensión de alimentación
3) Puente de Wheatstones
4) Módulo amplificador de la salida del puente
5) Microcontrolador
6) Módulo Bluetooth para exportación inalámbrica de datos

La alimentación del sistema se acondiciona mediante el regulador y alimenta todos los elementos del circuito. La salida del puente de Wheatstone es amplificada y luego medida por el microntrolador. La medida se exporta al usuario en forma inalámbrica a través de comunicación bluetooth dado que el dispositivo trabaja girando en conjunto con el eje. Por otro lado mediante este puente de comunicación el usuario es capaz de comunicarse con el microcontrolador para configurar el amplificador.

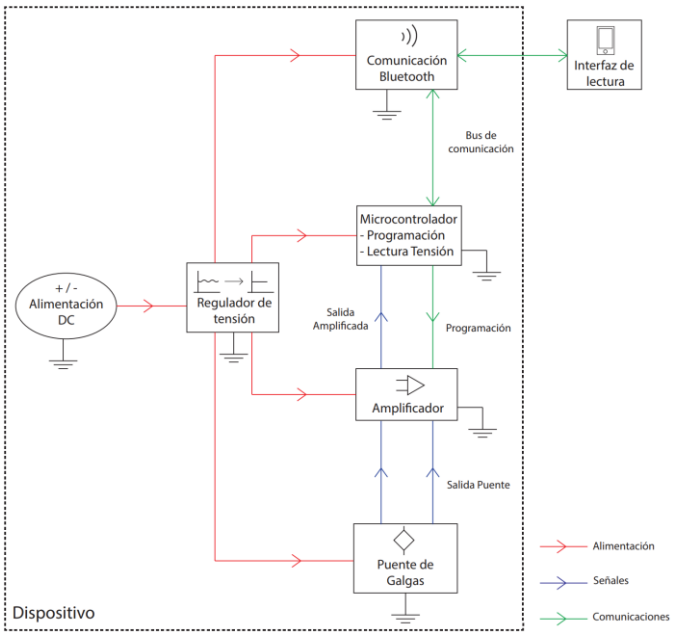


Figura 3: Diagrama de bloques del dispositivo diseñado

Los equipos seleccionados para cada etapa fueron los siguientes:

1) Alimentación: Pila 9V
2) Regulador de tensión: Regulador a 5V
3) Galgas: HBM 6/120XY21
4) Amplificador: AD8556
5) Microcontrolador: Arduino MKR1000
6) Módulo Bluetooth: Bluetooth HM-10

El esquema del circuito final implementado fue el siguiente:

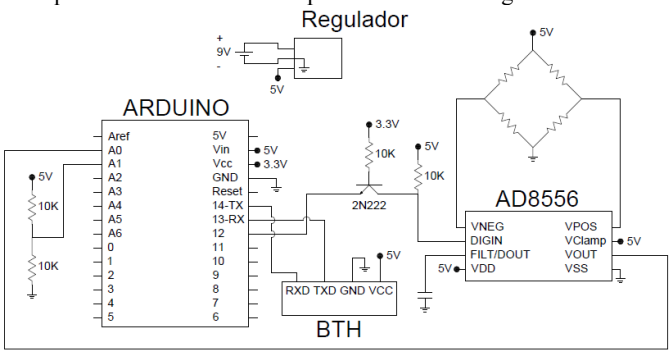
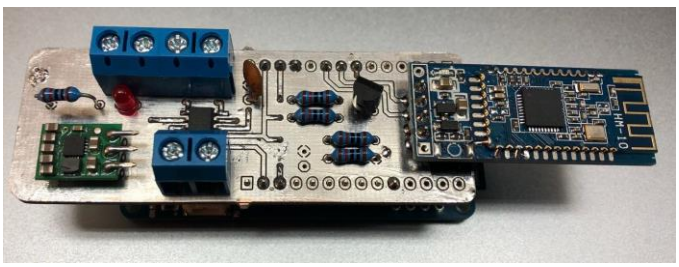


Figura 4: Circuito final del dispositivo de medida

El circuito se implementó en PCB con los componente seleccionados, resultando en la placa de las figuras debajo.



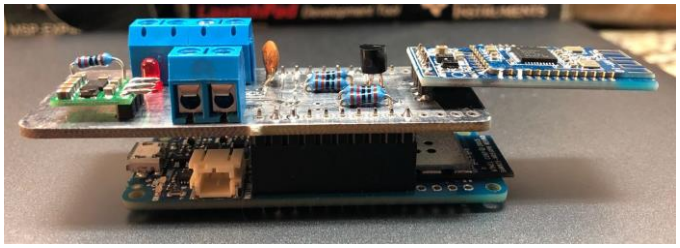


Figura 5: Fotografías del circuito implementado

V.
BASES PARA LOS ENSAYOS

Para ensayar el sistema de medida, se contrastaron los resultados obtenidos contra los obtenidos mediante el método tradicional de la generatriz dinamométrica.

El motor bajo ensayo fue un WEG modelo 100L493, trifásico de 4HP.
El circuito para el ensayo se presenta en la imagen a continuación, donde puede apreciarse la generatriz acoplada mecánicamente al eje del motor.

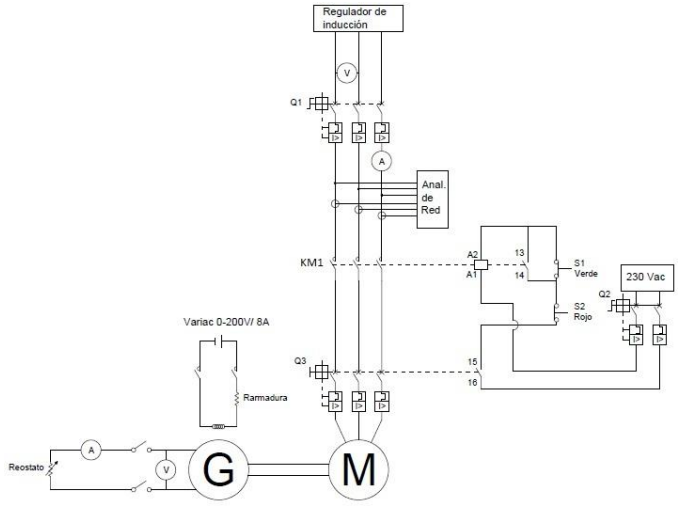


Figura 6: Circuito para ensayos sobre motor

Para la medida de los parámetros adicionales al par para medida de eficiencia y control de las condiciones del ensayo (Tensión, Frecuencia, Corriente, Potencia y Velocidad de Giro) se emplearon un analizador de redes CIRCUTOR CVMk2 y un tacómetro.

Sobre el motor se realizaron dos ensayos principales. En primer lugar, se efectuó un ensayo basado en la norma IEE Std112, midiendo la eficiencia del motor en los puntos de carga 25%, 50%, 75% y 100% y contrastando los resultados obtenidos contra lo obtenidos mediante el método de la generatriz dinamométrica. En segundo lugar, se llevó a cabo una medida más extensa registrando el valor de variación de tensión medido por el instrumento en muchos puntos de funcionamiento con el objetivo de evaluar la linealidad de la medida de par.

El eje del motor bajo ensayo es de Acero 1045 por lo que su valor de G es de 80GPa, valor aceptado globalmente para el tipo de material.

Las siguientes imágenes muestran el dispositivo sobre el acople del motor con la carga y el puente de galgas colocado en el eje del motor.

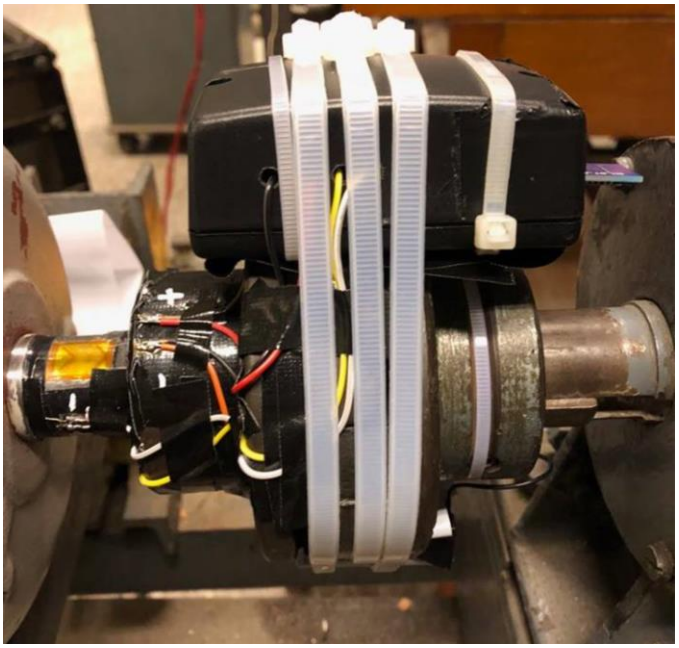


Figura 7: Dispositivo montado en el eje del motor (a la izquierda se observa una de las dos galgas Half Bridge pegadas sobre el eje del motor).

VI.
RESULTADOS OBTENIDOS

El primer ensayo arrojó los resultados de la Tabla 1 debajo. La incertidumbre de las medidas del equipo diseñado se calculó teniendo en cuenta los parámetros influyentes en la misma que, figuran en la ecuación de vinculación par-voltaje (G, I_p, c, θ,v_0,v_{ex}).

Carga (%)	η din. (%)	η MCEMI (%)
100	79.7 ± 1.5	86.1 ± 2.6
75	81.0 ± 1.3	87.3 ± 2.6
50	78.0 ± 1.3	74.9 ± 2.3
25	70.0 ± 1.5	59.0 ± 2.2

Tabla 1: Resultados obtenidos en el ensayo bajo norma IEE Std112

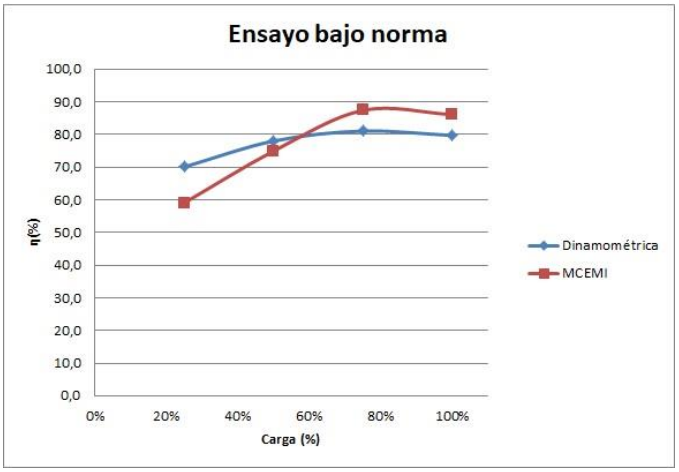


Figura 8: Resultados obtenidos en el ensayo bajo norma IEE Std112

Dos observaciones surgen del estudio realizado. Por un lado, la medida con el dispositivo diseñado acompaña la evolución de las medidas por la generatriz. Potr otro lado, las diferencias observadas son significativas no existiendo solapamientro de los intervalos de incertidumbre en los puntos 25%, 75% y 100%.

Luego de investigar las posibles fuentes de error, se llegó a la conclusión que el factor más probable de error era el propio modelado teórico del eje (el mismo presenta una chaveta para acoplar la carga que no es considerado por el modelo y, además, el punto de pegado de las galgas no fue posible localizarlo a una distancia de más de un diámetro de cada punto de aplicación de par).

Por consecuente, se buscó una alternativa que permitiera apartarse de la dependencia con el modelado teórico para la deducción del par. Esto no implica que no se tenga en cuenta, muchas de las consecuencias del modelado teórico son fundamentales tales como la linealidad o la maximización de la sensibilidad al pegar las galgas a 45°. Por el contrario, la alternativa propuesta únicamente elimina la utilización de la ecuación par-variación de tensión para inferir el par ejercido por el motor.

El ensayo que fue llevado a cabo consistió en medir la variación de tensión medida por el dispositivo en muchos puntos distintos de funcionamiento (medidos a través de la generatriz). Los resultados obtenidos fueron los siguientes.

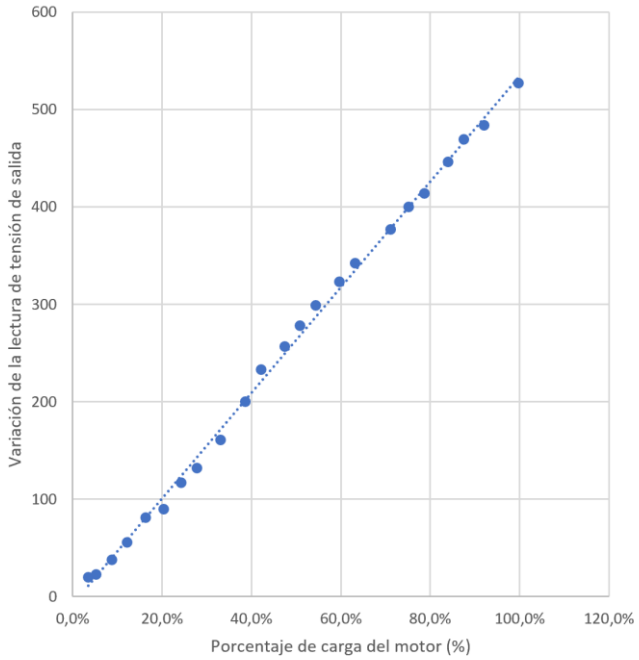


Figura 9: Lecturas a distintos estados de carga

Como se observa en la gráfica, la lectura del dispositivo es altamente lineal con el porcentaje de carga del motor. Esto implica que, de conocer el par en alguno de los puntos sería posible medir el par ejercido en otro punto de carga mediante una aproximación lineal. En la práctica, esto debería lograrse ejerciendo una torsión conocida con el dispositivo montado en el motor (sin necesidad de poner en funcionamiento el motor), registrar la variación de tensión obtenida para dicho valor de par y luego poner en funcionamiento el motor y tomar la lectura en el estado de funcionamiento normal.

Concretamente para este estudio, se tomó el valor de variación de tensión a 90% de nivel de carga. En base a dicho valor, y conociendo el par ejercido en el punto de carga seleccionado mediante la medida con la generatriz, se calculó el par ejercido en los restantes puntos y se lo comparó con la medida obtenida de la generatriz. Los resultados fueron contrastados con los obtenidos mediante el modelado teórico (método originalmente propuesto) y se reflejan en las gráficas siguientes.

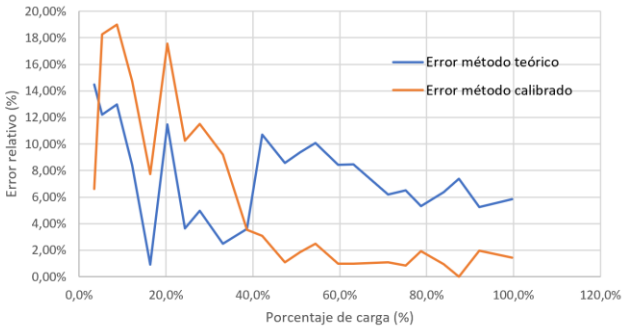


Figura 10: Error relativo de las medidas obtenidas con los dos métodos desarrollados respecto a las obtenidas con la generatriz.

Figura 11: Error absoluto de las medidas obtenidas con los dos métodos desarrollados respecto a las obtenidas con la generatriz.

Se observa que en un entorno del punto de calibración (40%-100%), el método de aproximación lineal mejora significativamente los resultados del primer método propuesto, llegando a tener errores relativos menores al 2% en casi todo el rango.

VII. Conclusiones

La propuesta desarrollada comprobó la factibilidad de implementar un método de mediada de par in-situ basado en la medida de las deformaciones del eje del motor cuando este es cargado con torsión.

Los resultados obtenidos con el método propuesto presentaron resultados ambiguos en lo que concierne la precisión requerida para el sistema de medida. Por un lado, el instrumento de medida registra en forma correcta fenómenos como la linealidad de la deformación y la evolución de la eficiencia del motor en función del nivel de carga. Por otro, los errores respecto a las medidas registradas mediante un método estándar de laboratorio son significativos, haciendo impracticable la implementación del método para llevar adelante un análisis preciso de eficiencia de un motor.

La alternativa propuesta, por el contrario, probó mejorar significativamente los resultados obtenidos llegando a niveles de precisión más adecuados para llevar adelante estudios de eficiencia.

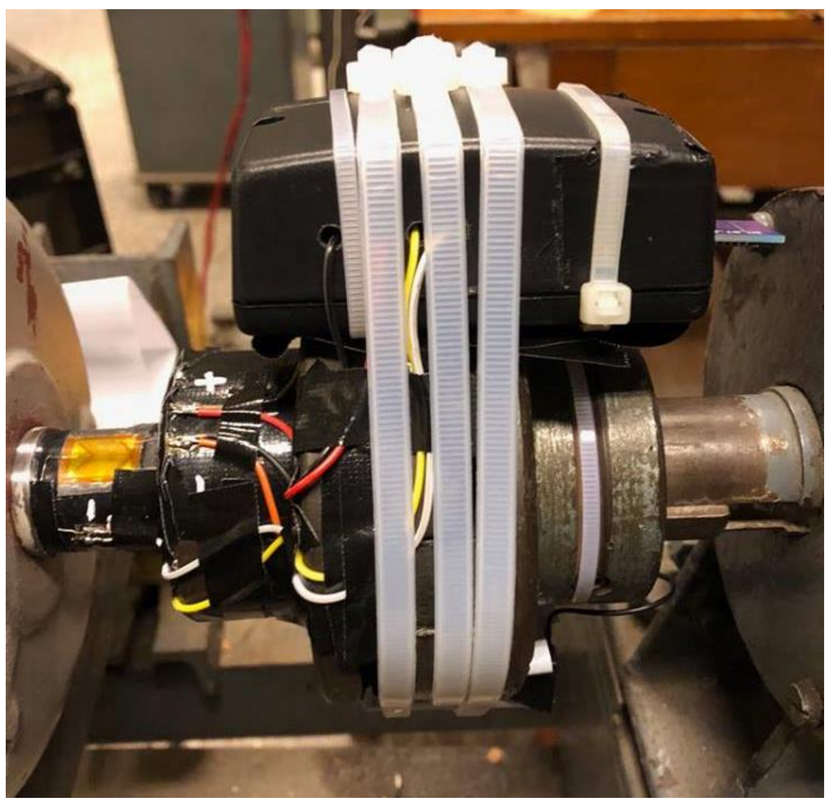
La desventaja apreciable del método alternativo es la necesidad de realizar una calibración previa y específica para cada motor a ensayar, con un sistema que no fue definido aún.

Por último, se reconoce que el sistema fue ensayado en un único motor. El estudio deberá ser profundizado mediante un proseguimiento de los ensayos en diversos motores de distinto porte.

MCEMI

Juan Gibert, IIE
Fernando González, IIE
Rodrigo Schuster, IIE

Ingeniería deMuestra
10 años



Medida de eficiencia de motores eléctricos

Los motores de inducción son altamente utilizados en la industria, siendo la principal máquina eléctrica a nivel de fuerza motriz. La medida práctica de su eficiencia es de un alto nivel de interés para las Campañas de Eficiencia Energética.

El proyectó MCEMI se enfocó en desarrollar un método de **Medida en Campo de Eficiencia de Motores de Inducción**.

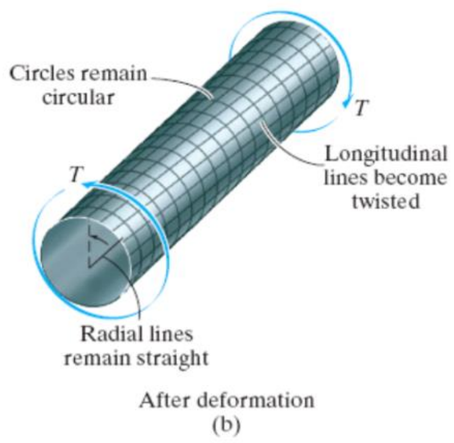
Ventajas del método:

- Fácil implementación
- Ejecución in-situ, sin intervenir las condiciones de operación
- Reducción del tiempo muerto de operación

Fundamento del método

El método se enfoca en relevar el torque ejercido por un motor, mediante la medida de la deformación del mismo.

$$T = \frac{2\, I_p G}{c}\, \varepsilon$$



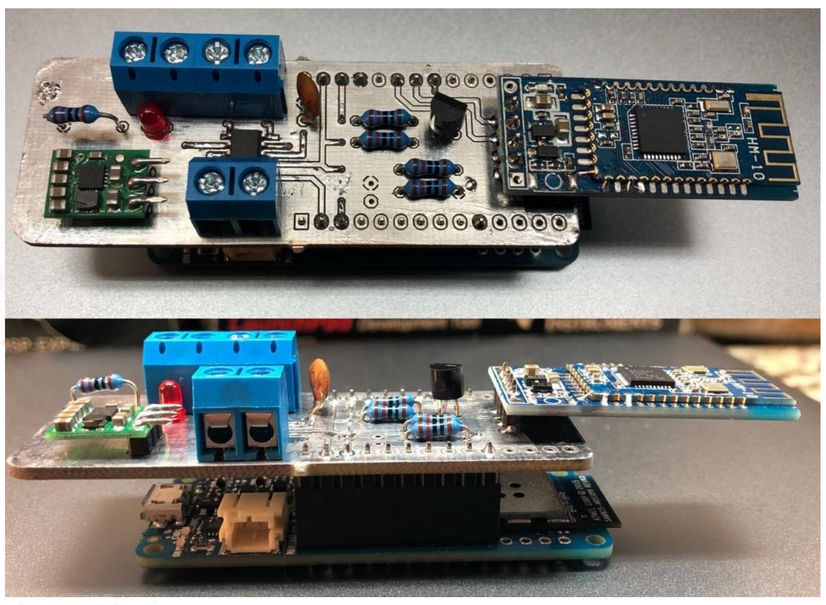
Elemento de medida: Galga extensiométrica

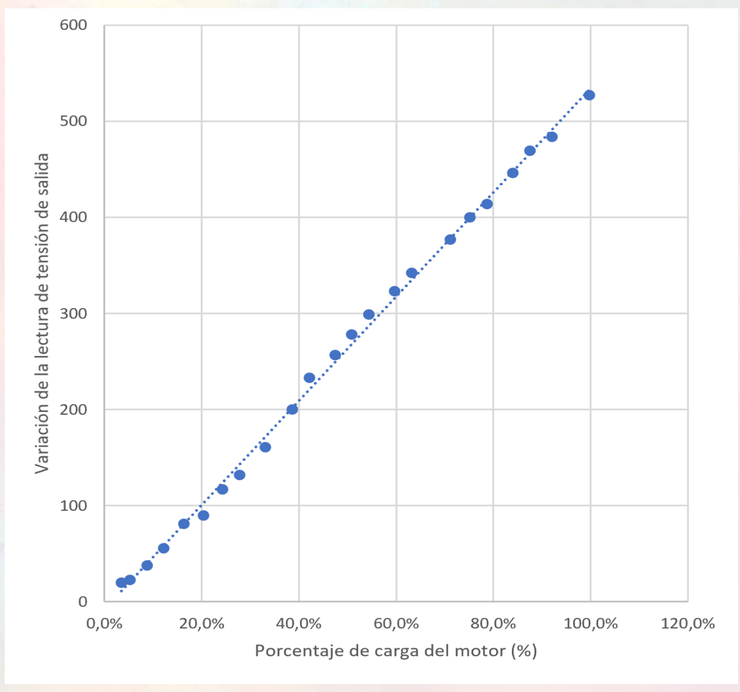
$$\frac{\delta R}{R} = S_s \varepsilon$$

Sistema de medida

Las medidas se obtienen mediante un dispositivo de diseño propio, que cuantifica las deformaciones mediante lectura de variaciones de tensión de un puente de galgas montado sobre el eje.

$$T = \frac{8\, I_p G}{k S_s c}\, \frac{\delta v}{v_{ref}}$$





Resultados obtenidos

Error en medida de torque mediante método **≤ 10%**

Considerado **alentador** pero **no suficiente**.

Por tratarse de un fenómeno lineal se propuso la variante de calibrar el sistema previo a ejecutar las medidas.

Error en medida de torque post modificación del método **≤ 2%**

Resultado que alienta a **proseguir** con el **desarrollo del sistema**.

Fundación Julio Ricaldoni
INGENIERÍA EN EL URUGUAY

FACULTAD DE INGENIERIA

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA URUGUAY