

Inline Force Sensor Development for Electrical Motors for Mining Operations in Chile: A New Inspection Protocol

Miguel Carrasco, *Member, IEEE*, Francisco Álvarez, *PRODIN*, Ramiro Velázquez, *Member, IEEE*, Javier Concha and Ignacio Perez-Cotapos *Student Member, IEEE*,

Resumen—Electric motors are among the most widely used electro-mechanical systems in the mining industry in Chile. As they are physically present in virtually all phases of the production process, they must be regularly inspected. In order to maintain a maximum level of operability and to avoid the occurrence of catastrophic failures and unscheduled stoppages, regular, planned reviews to measure the internal parameters of their components are performed manually. This part of the process presents serious shortcomings, such as significant inspection times, information input errors and, in some cases, measurement errors resulting from the technical difficulty of physically taking the measurement. This research presents the design, development and evaluation of a new sensor to support the inspection of brush-holder spring tensions as well as the integration of a digital gauge to control other critical dimensions of the brush-holder mounting. Its purpose is to provide the mining industry with a new system and a fully automated inspection protocol to ease maintenance and control tasks, particularly focusing on reducing inspection times. These products are expected to increase the equipment operating life, as well as delivering a maintenance report of the motor's key parameters which directly benefits the Key Performance Indicators (KPI) of mining management.

Index Terms—Electrical Motor sensor, SAG grinding drill motor, inspection protocol.

I. INTRODUCCIÓN

Chile posee una posición dominante en la extracción de cobre a nivel mundial, con una participación en el mercado global de un 30% [1]. Lamentablemente, debido a una gran caída del precio del cobre, muchas empresas mineras nacionales e internacionales instaladas en Chile han visto una reducción sostenida en sus niveles de utilidad, generando el cierre de operaciones e incluso la venta de activos [2]. Algunos de los factores que explican esta caída se deben —entre otros— a un alto costo de la energía eléctrica [3], dificultad en la obtención del agua [4], una menor ley de cobre [5], incremento en el costo del petróleo [3] y evaluaciones negativas de impacto ambiental [6]. A modo de cuantificar las pérdidas, un reciente reporte de la Comisión Chilena de Cobre (Cochilco) indica que durante el período 2010-2015 los márgenes operacionales

de las empresas mineras instaladas en Chile han caído un 48% [3]. Junto con reducir el personal, mejorar los procesos de producción, y la logística interna de las empresas, una de las pocas variables que manejan las empresas consiste en aumentar la confiabilidad en la productividad de sus máquinas, principalmente como un incremento en la disponibilidad de los equipos; motivación central de esta investigación.

Uno de los mayores problemas asociados a la productividad tiene relación con la detención no programada por fallas en una línea productiva. Para la gran minería, el costo de detención por falla de un molino *Semi-Autogenous Grinding* (SAG) varía entre 10.000 a 50.000 USD/h; valores que pueden ser aún mayores, dependiendo del tipo de falla y posición donde se encuentre el defecto¹. Esto se debe a que la extracción y el procesamiento de mineral se realiza en procesos en serie, donde claramente la falla de un equipo repercute en los procesos posteriores. Ante este alto costo, las compañías mineras han desarrollado departamentos de confiabilidad cuyo foco es evitar las fallas a través de planes de desarrollo de sistemas de detección temprana de fallas y programas de mantenimiento preventivo, lo cual es cuantificado dentro de sus propios KPIs (Key Performance Indicators) de gestión interna.

Aunque en los últimos años la industria ha desarrollado diversos tipos de sensores para detectar fallas mecánicas en motores empleados en faenas mineras, hasta la fecha no se han desarrollado sistemas que permitan determinar fallas en los sistemas de transmisión de corriente por medio de escobillas de carbón. El carbón de conducción es un componente en constante desgaste, por ello requiere una inspección regular, junto con paradas de mantención periódicas. A pesar de su relevancia, sólo algunos carbones y sistemas integrados de monitoreo permiten conocer su estado actual, y así determinar el momento cuando éstos deben ser reemplazados. Según el conocimiento de los autores, actualmente no existen sistemas automatizados que permitan evaluar el estado del porta escobilla y los resortes de presión del carbón. Estos dos componentes son claves en el correcto funcionamiento del motor, ya que un desgaste inadecuado no solo afecta el propio carbón, sino el anillo rozante, elemento central del motor y de alto costo de reparación. Por otra parte, en muchas instalaciones la tarea de

Miguel Carrasco, Javier Concha and Ignacio Perez-Cotapos are with Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Adolfo Ibáñez, Av. Diagonal Las Torres 2700, Peñalolén, Chile, corresponding author: miguel.carrasco@uai.cl

Francisco Álvarez is with PRODIN SpA. Condell 679. Providencia. Santiago, Chile.

Ramiro Velázquez is with Universidad Panamericana. Campus Aguascalientes. Facultad de Ingeniería. Josemaría Escrivá de Balaguer 101, Aguascalientes, Ags., 20290, México.

¹Estos valores normalmente no son declarados en forma oficial por las empresas ni en sus estados financieros ya que tienen un carácter estratégico y confidencial.

inspección es extremadamente compleja, lo cual genera errores en la medición debido a la dificultad del inspector para situar los elementos de medición en una posición correcta.

Considerando la situación actual, esta investigación presenta la evaluación de un nuevo prototipo de medición e inspección de porta escobillas de motores eléctricos que utilizan escobillas de carbón como mecanismo de transmisión de corriente eléctrica. El presente desarrollo no está centrado en un sistema que actúe mientras el motor se encuentra en funcionamiento, sino como un apoyo al proceso de inspección, en especial centrada en facilitar el trabajo del inspector durante el proceso de verificación de los parámetros del motor. En un ambiente de alto riesgo como lo es la minería, la tarea de inspección resulta crítica, ya que permite mantener el correcto funcionamiento de los equipos y de los procesos de acuerdo a pautas estandarizadas.

I-A. Base técnica

En todas las etapas del proceso minero se pueden encontrar motores eléctricos de gran potencia. Algunos ejemplos de estos equipos corresponden a palas de carguío, camiones fuera de pista, correas transportadoras, molinos, chancadores, entre otros. Debido a las características de aplicación y tonelaje, estos son accionados eléctricamente. Para este fin se utilizan escobillas de carbón que son las encargadas de transmitir la corriente a través de un sistema de anillos rozantes desde las partes fijas a las rotatorias (diagrama en Fig.1).

En los últimos años la industria minera ha reportado un creciente auge en el uso de sensores tales como temperatura, vibraciones, esfuerzos mecánicos y presión para la detección de fallas mecánicas, los que han ayudado enormemente a reducir el número de fallas catastróficas de partes de alto esfuerzo en máquinas estáticas [7]–[10]. A pesar de ello, los sistemas de porta escobillas sólo han logrado avances limitados. Fabricantes como Siemens, ABB o Schunk han implementado sistemas de alerta cuando el carbón ha llegado a su punto límite y no un sistema de evaluación de otros parámetros internos del porta escobilla. Si bien las escobillas son consideradas como elementos de desgaste, por pequeñas que parezcan en relación al tamaño del motor, la falta o mal funcionamiento de alguna de ellas da por resultado la detención del mismo. Estas fallas se pueden producir, entre otras, por variables como desgaste prematuro de las escobillas, mala presión de contacto o distribución de corriente no uniforme, provocando alzas de temperaturas, arcos eléctricos y debilitamiento del aislamiento eléctrico al interior del motor [11]. La permanencia de una de estas situaciones anómalas en el tiempo puede llevar a una falla catastrófica del motor. Aunque se han desarrollado métodos de predicción basados en el diseño de modelos y estimación de parámetros, hasta hoy no hay forma de predecir en forma exacta el momento en que fallarán [12]–[14]. Normalmente se habla de los sistemas de portaescobillas como cajas negras, ya que la única manera de saber qué ocurre al interior de la máquina es efectuando un frenado completo junto a sus procesos asociados.

A pesar del enorme desarrollo tecnológico presente en la minería [15], el porta escobillas posee un sistema mecánico

relativamente simple. Un resorte de tracción une el eje de sujeción a un tirador generando una fuerza de tracción. El tirador está conectado mecánicamente a un muelle armado el cual finalmente ejerce una tensión sobre el carbón dentro del cajetín (Fig.1). Finalmente, el carbón efectúa una presión constante sobre la superficie del anillo del motor permitiendo el flujo de corriente a las partes rotatorias.

I-B. Proceso de inspección actual

La complejidad de los procesos de inspección se incrementa cada año en todas las industrias; representando un 20 % del presupuesto a nivel operacional [16]. Las razones de este incremento se deben –según [17]– a (1) complejidad en la mantención de sistemas electro-mecánicos, y el software asociado, (2) impacto de los costos ocultos que afectan la relación entre las operaciones de producción –equipamiento seguro y calidad de la producción–, versus los costos de los servicios y contratos tercerizados, y (3) mantención y administración de sistemas eco eficientes, y seguros ambientalmente. Lamentablemente, gran parte del dinero administrado para los procesos de inspección es mal gastado ya que es realizado en forma descoordinada, y en general es ejecutado en forma correctiva [18]. La industria minera no está ajena a estos costos, los cuales hemos visto que pueden ser aún mayores. Aunque en la década de 1990 gran parte del trabajo de inspección era propio de las empresas mineras, actualmente son realizados por empresas tercerizadas (SGS, Siemens) que reportan sus resultados a las respectivas unidades de mantención, con estándares a nivel mundial [19].

En relación a los procesos de inspección en motores eléctricos, ésta consiste en la inspección realizada por un operador in situ. Para ello se requieren instrumentos de medición que permitan medir variables propias del porta escobillas tales como un dinamómetro para medir la presión del resorte, un calibre interno para medir las medidas axiales internas, y un calibre externo para medir el largo de la escobilla. Aunque todas las

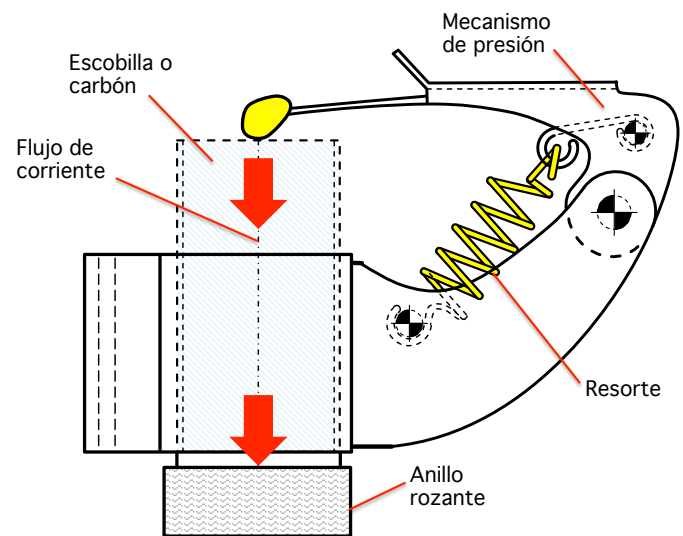


Figura 1. Esquema de carbón dentro del porta escobillas y contacto con anillo rozante.

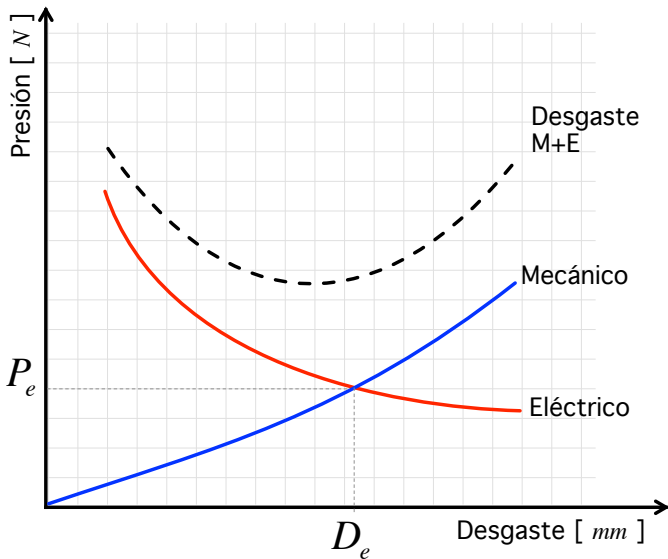


Figura 2. Modelo de desgaste mecánico versus presión del resorte

mediciones son relevantes, la presión del cajetín es fundamental ya que está relacionada con la fricción que realiza el carbón sobre el anillo rozante. Una presión muy elevada acelera el desgaste mecánico del carbón. Al contrario, una baja presión genera arcos eléctricos, produciendo un rápido deterioro de los componentes eléctricos en el anillo, el carbón y el mismo porta carbón [20]. Gracias a una correcta medición es posible comprobar que los parámetros de los distintos mecanismos de presión se encuentran dentro de los rangos recomendados para generar un desgaste uniforme, y así asegurar que el desgaste se encuentra dentro de los rangos establecidos por las pautas de mantenimiento. En general el plan de mantención busca encontrar un punto óptimo que se encuentra en la intersección de las curvas desgaste mecánico/eléctrico, situada en el punto (D_e, P_e) (Fig.2). Esta intersección generalmente se logra a través de un ajuste manual, sin embargo, debido a que la operación minera se encuentra en constante funcionamiento, es difícil de mantener en el tiempo.

El proceso de inspección generalmente es realizado por un equipo de dos o más operadores humanos altamente cualificados debido al alto riesgo de muerte en caso de mal operación y/o daño permanente a las instalaciones [11]. Normalmente el trabajo consiste en el ajuste del porta carbón y la medición de tensión de los resortes. Para ello el motor debe estar detenido, frenado y desenergizado. Esto requiere que el personal a cargo de la inspección utilice un bloqueo con candados del panel de operación; proceso conocido como bloqueo LOTO [21], asegurando así el máximo control de la máquina y evitando la ocurrencia de accidentes.

El procedimiento de inspección y/o revisión se divide normalmente en tres etapas: (1) medición y cambio de carbones, (2) regulación de porta carbones y (3) medición de tensión de trabajo de los resortes del cajetín. En relación a la medición, generalmente es evaluada la presión resultante sobre las escobillas de la fuerza ejercida por el mecanismo de resorte, medidas internas del porta escobilla, estado del anillo

rozante. Esta información permite generar reportes e informes del estado del motor, junto con una evaluación visual del motor. En caso que exista alguna disconformidad, se procede a la regulación o recambio de piezas.

El protocolo de medición utilizado hoy en día contempla formularios en papel donde se registran las mediciones de cada una de las partes inspeccionadas. Lamentablemente este proceso es lento, engorroso, y sujeto a error ya que conlleva una alta carga del operador humano en tareas de recopilación y captura de información, con un potencial error en la medición, lectura, o inclusive en la digitalización de los datos. Lo anterior dificulta diseñar un mecanismo para evaluar el estado de la máquina en el tiempo, ya que no es posible contar con un historial de datos, el cual podría ayudar a diseñar modelos preventivos de fallas, y control de trazabilidad, como aquellos que sí existen en sistemas completamente automatizados [22], [23].

I-C. Molinos SAG

Los motores eléctricos empleados en la molienda SAG son de gran dimensión. Éstos poseen múltiples puntos de contactos ya que los molinos deben mover estructuras de gran tonelaje; del orden de 12 metros de diámetro y mayores a 100 tpd [24]. Para ello utilizan una combinación de pares de porta escobillas cada uno con resortes independientes distribuidos en distintas cámaras alrededor del molino. Cada punto de contacto corresponde a las distintas fases del motor donde se transfiere la corriente de las escobillas hacia las bobinas, y cada uno de éstos debe ser inspeccionado, fotografiado y calibrado en caso de ser necesario. Debido a la magnitud y las dimensiones físicas del motor, junto con los espacios confinados donde se deben realizar las tareas de mantenimiento, el tiempo asociado a la inspección se incrementa ya que es necesario desplazarse dentro de la estructura en cada fase del proceso.

Aunque los carbones dependen del tipo de configuración del motor, la industria utiliza normalmente carbones en configuración de pares. En particular, los carbones de molinos SAG –sobre la cual se toma como referencia nuestro desarrollo– poseen una dimensión de 50.00 x 25.00 x 16.00 mm. Sobre ellos se ejerce una presión constante de $7.84 \text{ N} \pm 0.05 \text{ N/cm}^2$. Debido a las dimensiones reducidas del carbón y el porta escobilla y los espacios dentro de la cámara de inspección, la propia manipulación de instrumentos de medición se transforma en una tarea compleja, sujeta a errores ya sea por la manipulación u operación.

II. REDISEÑO DEL PROTOCOLO DE INSPECCIÓN

En vista de las limitaciones descritas, el nuevo protocolo propuesto introduce avances en dos ámbitos: Hardware y Software. (1) Hardware, se ha desarrollado un nuevo sensor que determina la presión ejercida sobre el resorte del cajetín y un adaptador inalámbrico de un calibre de medición axial. (2) Software, se ha implementado un software de control que es utilizado durante el proceso de inspección y controlado a través de una aplicación móvil (APM)–implementada en App-Inventor [25]–. Ésta recopila la información de los sensores en forma inalámbrica y almacena la información en cada punto

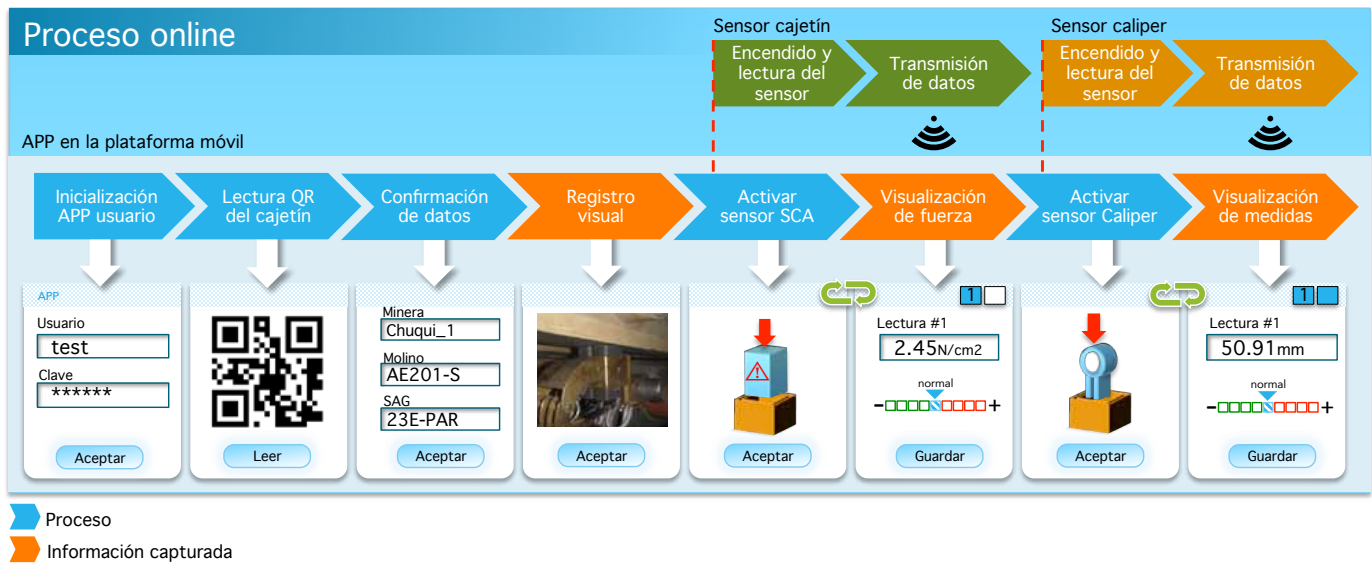


Figura 3. Esquema general del proceso de inspección a través de la aplicación móvil APM.

de inspección; fase denominada proceso online, junto con un proceso de generación automática de reportes (GAR) la cual utiliza la información anteriormente almacenada por la aplicación online para generar un reporte de los datos leídos en forma automatizada; esta última diseñada como aplicación de escritorio.

Para realizar este sistema, se han diseñado e integrado distintos componentes con un reducido tamaño los cuales se insertan en el cajetín del porta escobilla. El sistema propuesto posee módulos de transmisión y sensores, junto con un sistema de batería el cual permite una eficiente descarga/carga. A continuación se presenta en detalle cada uno de los subsistemas de la aplicación y el nuevo protocolo de automatización con todos sus componentes.

II-A. Inicialización de la aplicación móvil y registro visual

La aplicación móvil (APM) ha sido diseñada para facilitar la tarea de recopilación de información en las tareas de inspección. Permite al usuario tener control sobre todos los sensores ya que almacena los valores que éstos envían directamente a la aplicación. A nivel de procesos, el primer procedimiento corresponde al ingreso del usuario al software. Posteriormente la APM solicita al usuario leer un código QR [26] que está situado en un punto estratégico al lado del cajetín que se desea inspeccionar. Los datos almacenados en el código QR son leídos por la APM y contienen información sobre la estación, molino y punto de inspección; la cual ha sido previamente ingresada y dispuesta en el punto a inspeccionar. Esta información es el punto de inicio del proceso de inspección ya que toda información adicional es incorporada junto a la localización del porta escobilla (Fig.3). Una vez aceptados los parámetros anteriores, la aplicación solicita al usuario capturar una imagen del punto a inspeccionar. Esta información es relevante especialmente si se requiere realizar un cambio o reemplazo de partes dañadas y/o desgastadas. La información

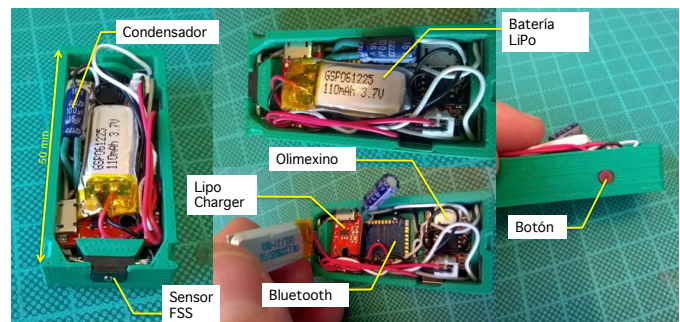


Figura 4. Prototipo funcional del sensor SCA.

es almacenada temporalmente en la memoria del dispositivo móvil, la cual es posteriormente subida a la nube en cuanto exista conexión a la red Internet.

II-B. Sensor cajetín (SCA)

El sensor del cajetín (SCA) se ha fabricado en Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), simulando un carbón real con similares dimensiones y propiedades mecánicas. Su función es medir la fuerza aplicada por el mecanismo de resorte una vez que ha sido insertado completamente en el porta escobillas. El sistema se energiza cuando el botón del sensor hace contacto con las paredes internas del porta escobilla (ver Fig.4). Cuando ello ocurre, el microcontrolador y la antena Bluetooth se energizan, permitiendo una comunicación inalámbrica entre el sensor y el dispositivo móvil con la aplicación APM. Para facilitar el proceso, la aplicación cuenta con los números de registro de enlace con la antena.

El prototipo utiliza un microcontrolador Olimexino 85S ya que posee una reducida dimensión, bajo consumo eléctrico (300 μ A), junto con un amplio rango operacional de temperatura (-45°C to +85°C) [27]. Según el programa señalado en la

Fig.5, el microcontrolador activa la comunicación serial con la antena, y luego comienza la lectura del sensor de fuerza. Una vez que se ha determinado el promedio de últimas 100 mediciones móviles, se envía el valor numérico a la antena Bluetooth a través de una comunicación serial establecida previamente entre la aplicación móvil y el sensor. La antena SMD RN42 recibe el valor enviado por el microcontrolador, y lo reenvía a la APM vinculada con el sensor; proceso que es realizado mientras el sensor se encuentre inserto dentro del porta escobillas.

El sensor SCA utiliza un sensor de fuerza Honeywell FSS Low Profile en el cabezal, con una sensibilidad de 0.1 mV/gram. Este tipo de sensor resulta adecuado para aplicaciones donde se requiere una alta sensibilidad a pequeños cambios en la fuerza ejercida longitudinalmente. En cuanto a la administración de la energía, se ha empleado una batería Lipo de 110 mA, la cual es gestionada por la placa Sparkfun Lipo Charger Basic, y activada a través de un botón de contacto localizado en forma lateral al sensor SCA. Esto significa que el sensor permanece encendido únicamente cuando se encuentre inserto en el cajetín. Según el consumo eléctrico del circuito, el sensor puede ser empleado 8 horas de trabajo continuo antes que la batería se descargue completamente (Fig. 6).

II-C. Calibre inalámbrico interno

Otra fase fundamental del proceso de inspección consiste en el análisis de las medidas internas del cajetín porta escobilla. Las vibraciones generadas por un espacio incorrecto entre el carbón y el cajetín generan un desgaste inadecuado entre ambas piezas, lo cual redundará en un mal funcionamiento del motor y un desgaste prematuro e incorrecto del carbón; principalmente por el cambio de ángulo interno del carbón.

Para facilitar el proceso de inspección, se ha implementado un calibre con comunicación inalámbrica, el cual está integrado a la aplicación del mismo modo que el sensor SCA. Para ello, se ha empleado un calibre digital USB Krøpling de medición interna el cual posee un teclado que permite la manipulación directa del usuario sobre el sensor (Fig.7). El procedimiento consiste en insertar el calibre dentro del porta escobilla y aceptar la medida mientras se encuentre en posición de lectura. Esto permite el envío de información a la aplicación, junto con la visualización de las tolerancias permitidas.

El circuito asociado al calibre permite que la aplicación pueda leer los datos del instrumento únicamente cuando el usuario acepta la lectura. Para tal efecto, se ha empleado un USB host keyboard reader que permite leer los datos enviados por el calibre mediante una conexión USB. Posteriormente, los datos son procesados por un microcontrolador Arduino Pro Mini y luego re-enviados a través de la antena Bluetooth. El sistema cuenta con una batería de 500 mA, la cual asegura un funcionamiento continuo del instrumento de al menos 24 horas. Debido a que se utiliza un batería LiPo, el sistema cuenta con un circuito de carga y administración asociado, junto con un interruptor de apagado (Fig.8).

```
#include <SoftSerial.h>
#include <TinyPinChange.h>
#define TTL_RX_PIN 1
#define TTL_TX_PIN 0
#define SERIAL_RATE 9600

SoftSerial TtlSerial(TTL_RX_PIN, TTL_TX_PIN);
const int muestras = 100;
int data_A[muestras] = {};
int data_B[muestras] = {};
int acumA, acumB, diff;

void setup() {
  TtlSerial.begin(SERIAL_RATE);
}

void loop() {
  acumA = 0;
  acumB = 0;

  for (int i = 0; i < muestras; i++) {
    data_A[i] = analogRead(1);
    data_B[i] = analogRead(2);
    acumA += data_A[i];
    acumB += data_B[i];
  }
  acumA/=muestras;
  acumB/=muestras;
  diff = abs(acumA - acumB);

  TtlSerial.write(char(diff));
  delay(1000);
}
```

Figura 5. Procesamiento de datos en el sensor SCA.

II-D. Generación automática de reportes (GAR)

Una vez que el proceso de inspección ha finalizado, el inspector debe generar un reporte con los datos recopilados durante el proceso de inspección. Para facilitar esta tarea, todos los datos que hayan sido obtenidos mediante la APM son almacenados en la nube a través del servicio online de almacenamiento de archivos. Una vez completada la sincronización, el operador ejecuta la aplicación de escritorio de generación automática de reportes (GAR); proceso detallado en la Fig.9.

El software se compone de cinco etapas detalladas brevemente a continuación. (1) Verificación de software: se verifica si el software de sincronización de archivos se encuentra instalado; en caso contrario, automáticamente realizará su descarga. (2) Creación de carpetas: Se verifica si las carpetas compartidas entre la aplicación móvil (APM) y las carpetas instaladas en el computador se encuentran creadas; en caso contrario, son generadas. (3) Selección de archivos: Cuando los archivos han sido sincronizados, el software despliega un listado con los archivos compartidos dentro del visualizador de la aplicación. Luego, el usuario debe buscar los datos a procesar para la generación de reportes presionando el botón "Buscar". Una vez seleccionado el archivo, aparecerá

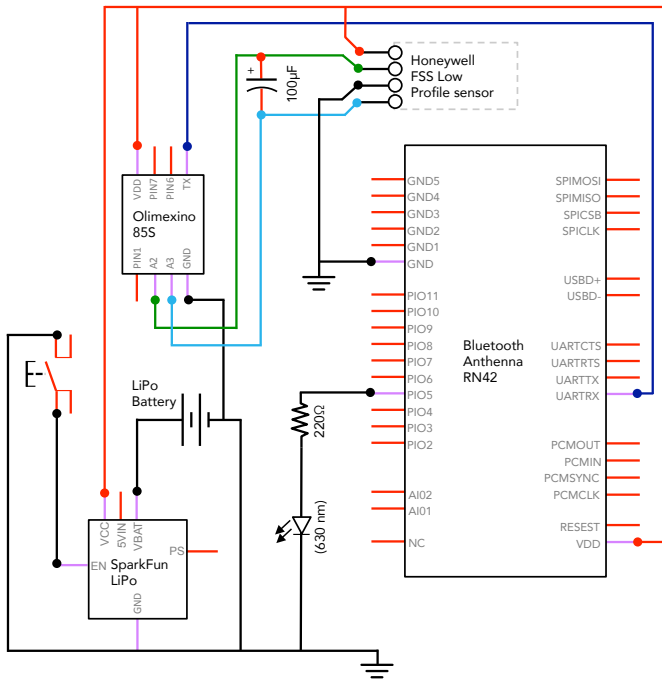


Figura 6. Circuito asociado sensor cajetín con sus componentes electrónicos.

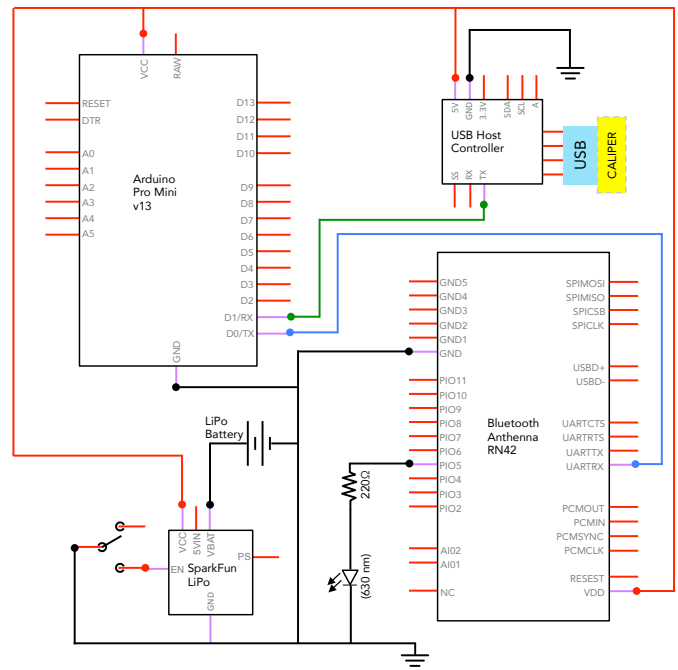


Figura 8. Circuito de la unidad inalámbrica del calibre.

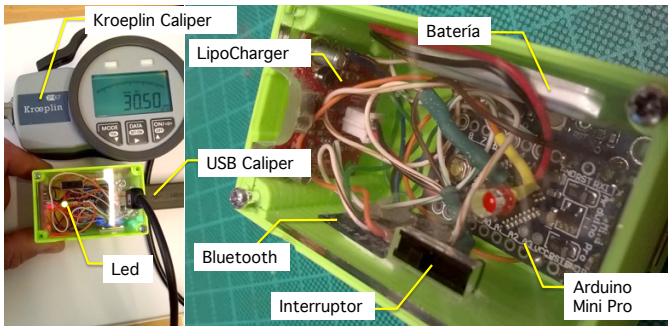


Figura 7. Prototipo real de funcionalidad inalámbrica del calibre.

una descripción con el id del molino y la fecha en que se realizaron las medidas. Al presionar “Aceptar” se despliega en una nueva pestaña llamada “Exportar” una visualización de los datos en formato planilla. (4) Exportar datos: permite visualizar los datos, exportarlos a una planilla Excel con la información histórica del molino además de un informe en formato PDF con la información relevante para elaborar un reporte. (5) Generación de reportes: una vez presionado el botón “Exportar” y marcada la opción de “Abrir informe al finalizar”, se abrirá el informe en formato PDF.

III. EVALUACIÓN ELECTRO-MECÁNICA

Esta sección presenta la evaluación de las propiedades del sensor y del sistema de calibración del sensor SCA. Para ello se ha confeccionado un análisis físico-mecánico y electrónico para evaluar su aplicación a nivel industrial, las cuales son detalladas a continuación.

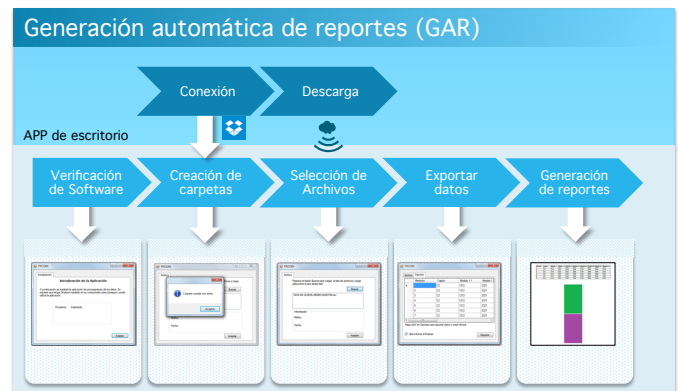


Figura 9. Proceso de generación automática de reportes (GAR) a través de la sincronización de archivos.

III-A. Análisis de propiedades mecánicas

Con el objetivo de comprobar si la geometría del sensor es lo suficientemente robusta como para no deformarse debido a los esfuerzos aplicados por el mecanismo de resorte, se ha realizado un análisis modal a través del Método de Elementos Finitos (MEF) [28] según el diseño 3D y simulando material ABS. Se busca demostrar que el SCA no se trabará dentro del cajetín y que por lo tanto la medición será exactamente la misma que recibiría una escobilla instalada en su lugar.

El análisis ha sido realizado con el Software SolidWorks 2014. Comprende un análisis estático, considerando material ABS. Para las sujeciones se consideran cuatro condiciones de Rodillo/Control deslizante para las paredes que hacen contacto con el cajetín del portaescobillas permitiendo solo movimiento en la dirección radial del anillo; como ocurre en la realidad. Adicionalmente se fija la cara que va en contacto con el sensor

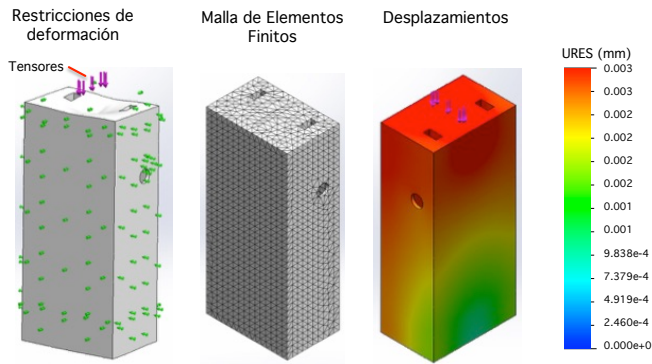


Figura 10. Restricciones del modelo y desplazamientos generados por esfuerzos mecánicos.

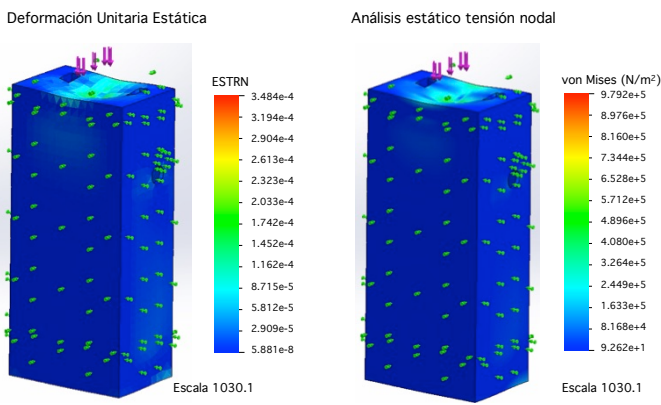


Figura 11. Simulación de deformación del sensor a través de una simulación modal MEF.

de fuerza en la dirección radial (detalles en la Fig. 10).

Las cargas externas son aplicadas en el centro de la cara superior de SCA, distribuidas uniformemente en un rectángulo de 0.5 mm por 1.5 mm que representa el contacto del pivote del mecanismo de resorte con la base del SCA. El valor de la fuerza aplicada para el correcto funcionamiento de una escobilla de estas dimensiones, según la especificación del fabricante es de 7.84 N. Para la malla se utilizaron 21.870 elementos cuadráticos de alto orden con 36.446 nodos. La malla seleccionada es Malla sólida estándar de cuatro puntos Jacobianos.

Gracias a la simulación, se ha obtenido que las máximas deformaciones obtenidas del análisis son 0.003 mm (ver Fig.11), comprobando que el diseño mecánico del SCA es lo suficientemente robusto para no deformarse de manera significativa mientras recibe la carga del mecanismo de resorte. Se muestra además un perfil en corte de las deformaciones obtenidas del análisis en las partes internas del sensor empleando una escala de color para resaltar el nivel de desplazamiento interno (ver detalles en Fig.12).

III-B. Calibración del sensor SCA

Se ha implementado un sistema mecánico conectado a un dinamómetro de precisión PCE con lectura en pantalla para

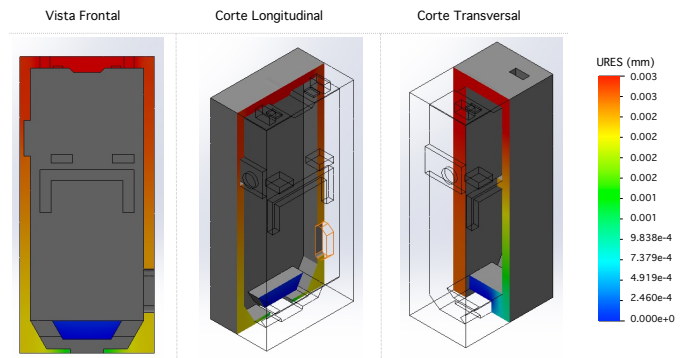


Figura 12. Perfil de corte sujeto a deformaciones mecánicas.

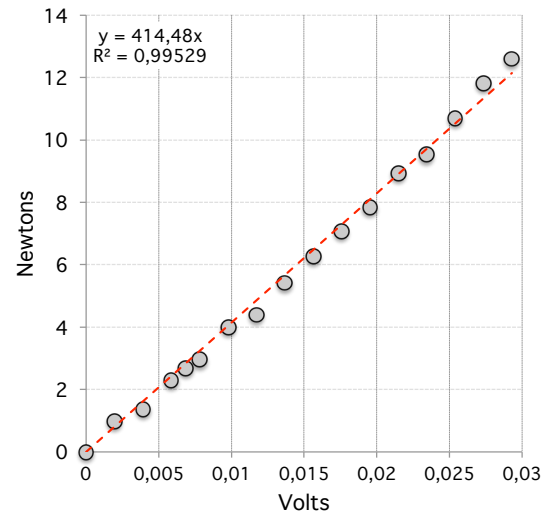


Figura 13. Curvas de calibración del sensor y estimación de conversión Fuerza/Voltaje.

generar la calibración del sensor. A medida que varía la fuerza ejercida sobre el sensor, se registra el voltaje obtenido junto con el valor generado por el dinamómetro. Cada lectura fue realizada con una espera de 10 segundos por cada incremento de fuerza para estabilizar la lectura del sensor. Como se aprecia en la Fig.13, los resultados indican una alta precisión y estabilidad en las pruebas de calibración efectuadas en laboratorio. El sensor SCA se ha diseñado para recibir una mayor carga, sin embargo, esto no ocurre en la práctica ya que las fuerzas son menores a 15 N. A partir de este resultado, el procedimiento de lectura que se encuentra integrado en el software del sensor SCA realiza la conversión de voltaje a fuerza empleando la siguiente ecuación $fuerza = voltaje \times 414,48$; modelo lineal generado a partir del método de mínimos cuadrados.

IV. CONCLUSIÓN

Esta investigación ha presentado el desarrollo de un nuevo sensor de inspección en motores eléctricos de molinos SAG junto a un nuevo protocolo de inspección; sistema orquestado por un software de inspección. El sistema propuesto permite automatizar las tareas de inspección, recopilación de datos, evaluación de parámetros, y generación de reportes; proceso que en la actualidad es efectuado en forma completamente

manual. A nivel de hardware se ha presentado el desarrollo de dos sistemas de medición del motor en modo offline, en particular un sensor SCA que simula un carbón con similares propiedades mecánicas, y un adaptador inalámbrico de calibre. En cuanto al software, se ha desarrollado un aplicación portátil que evalúa en tiempo real el rango de los valores medidos, y un software de escritorio que permite la generación de reportes empleando los datos almacenados durante una o más jornadas de inspección. Para facilitar este proceso, la solución está basada en un esquema de sincronización de archivos asíncrona basada en el almacenamiento de archivos en la nube.

A modo de evaluar las capacidades mecánicas y físicas del sensor SCA, se han analizado los parámetros de fuerza a través de un sistema mecánico calibrado con un sensor de fuerza, así como los parámetros de desgaste y esfuerzo a través de un análisis de elementos finitos (FEM). Los resultados confirman que el diseño mecánico permite determinar correctamente la tensión del resorte en forma indirecta ya que la deformación máxima del sensor SCA, debido a los esfuerzos generados, es de 0.003 mm, por lo cual se considera despreciable la deformación elástica del componente como error en la medida de tensión del resorte. Como trabajo futuro resta generar un único instrumento de medición integrado que pueda medir las fuerzas del resorte y las mediciones internas del cajetín; de esta forma sólo sería necesario para el inspector introducir un único instrumento de medición en el porta escobillas y el cerrar el sistema mientras la aplicación toma las medidas. Por otra parte, se pueden aprovechar técnicas de aprendizaje de máquinas a modo de establecer modelos predictivos sobre los datos capturados en el tiempo.

REFERENCIAS

- [1] F. Fuentes and C. J. García, "The business cycle and copper mining in Chile," *Cepal Review*, vol. 118, pp. 157–181, 2016.
- [2] J. E. Tilton, "Cyclical and secular determinants of productivity in the copper, aluminum, iron ore, and coal industries," *Mineral Economics*, vol. 27, no. 1, pp. 1–19, 6 2014. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/s13563-014-0045-9>
- [3] Chilean Copper Commission (Cochilco), *Seguimiento a los costos de la gran minería del cobre al 2015*, 2015.
- [4] P. L. Nester, E. Gayó, C. Latorre, T. E. Jordan, and N. Blanco, "Perennial stream discharge in the hyperarid Atacama Desert of northern Chile during the latest Pleistocene." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 104, no. 50, pp. 19724–9, 12 2007. [Online]. Available: <http://www.pnas.org/content/104/50/19724.full.pdfhtml>; <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18056645>; <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=PMC2148365>
- [5] M. Simpson, E. Aravena, and J. Deverell, "The future of mining in Chile," Tech. Rep., 2014.
- [6] D. Aitken, D. Rivera, A. Godoy-Faúndez, and E. Holzapfel, "Water Scarcity and the Impact of the Mining and Agricultural Sectors in Chile," *Sustainability*, vol. 8, no. 2, p. 128, 2 2016. [Online]. Available: <http://www.mdpi.com/2071-1050/8/2/128>
- [7] N. S. Reddy, M. S. Saketh, and S. Dhar, "Review of sensor technology for mine safety monitoring systems: A holistic approach," in *2016 IEEE First International Conference on Control, Measurement and Instrumentation (CMI)*, no. Cmi. IEEE, 1 2016, pp. 429–434. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7413784/>
- [8] B. A. U. Ttej and P. S. R. R. Ao, "Wireless Sensors Based Embedded System for Avoidance of Fatalities in Mines," *International Journal of Scientific Engineering and Technology Research*, vol. 04, no. 17, pp. 3147–3151, 2015.
- [9] a. Kumar, R. P. Verma, R. Mandal, S. Dutta, S. K. Chaulya, G. M. Prasad, and C. Author, "Application of Gas Monitoring Sensors in Underground Coal Mines and Hazardous Areas," *International Journal of Computer Technology and Electronics Engineering*, vol. 3, no. 3, 2013.
- [10] J. Ralston, D. Reid, C. Hargrave, and D. Hainsworth, "Sensing for advancing mining automation capability: A review of underground automation technology development," *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 24, no. 3, pp. 305–310, 5 2014. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmst.2014.03.003>; <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2095268614000469>
- [11] S. Muzaffar, K. Cummings, G. Hobbs, P. Allison, and K. Kreiss, "Factors Associated With Fatal Mining Injuries Among Contractors and Operators," *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, vol. 55, no. 11, pp. 1337–1344, 11 2013. [Online]. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24164762>; <http://content.wkhealth.com/linkback/openurl?sid=WKPJLP:landingpage{&}an=00043764-201311000-00014>
- [12] J. Sottile and L. Holloway, "Fault monitoring and diagnosis in mining equipment: current and future developments," in *Conference Record of the 1992 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, vol. 1992-Janua. IEEE, 1992, pp. 2026–2033. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/244201/>
- [13] W. Thomson and M. Fenger, "Current signature analysis to detect induction motor faults," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 7, no. 4, pp. 26–34, 2001. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/930988/>
- [14] Z. Gao, C. Cecati, and S. X. Ding, "A Survey of Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Techniques Part I: Fault Diagnosis With Model-Based and Signal-Based Approaches," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 6, pp. 3757–3767, 6 2015. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7069265/>
- [15] P. J. Bartos, "Is mining a high-tech industry?" *Resources Policy*, vol. 32, no. 4, pp. 149–158, 12 2007. [Online]. Available: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301420707000529>
- [16] R. Robertson and A. Jones, "Pay day," *Plant Engineering and Maintenance*, vol. 28, pp. 18–25, 2004.
- [17] R. D. Cigolini, A. V. Deshmukh, L. Fedele, and S. A. McComb, "Recent advances in maintenance and infrastructure management," *Recent Advances in Maintenance and Infrastructure Management*, vol. 7287, no. January, pp. 1–290, 2009.
- [18] T. Almgren and N. Andréasson, "Optimization models for improving periodic maintenance schedules by utilizing opportunities," *4th Production and Operations Management World Conference*, pp. 1–10, 2012.
- [19] M. Zubkova, "Report : Current Issues in the Chilean Mining, Sustainable Development Strategies Group (SDSG)," Tech. Rep., 2010.
- [20] R. H. Lee, "The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-18, no. 3, pp. 246–251, 5 1982. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4504068/>
- [21] M. Dudgeon, "Lockout/Tagout in Mining Seven Tips for Worker Safety," *Best Practices*, p. 70, 2013.
- [22] J. Lee, F. Wu, W. Zhao, M. Ghaffari, L. Liao, and D. Siegel, "Prognostics and health management design for rotary machinery systems—Reviews, methodology and applications," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 42, no. 1-2, pp. 314–334, 1 2014. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.06.004>; <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0888327013002860>
- [23] Y. Lei, J. Lin, Z. He, and M. J. Zuo, "A review on empirical mode decomposition in fault diagnosis of rotating machinery," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 35, no. 1-2, pp. 108–126, 2 2013. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2012.09.015>; <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0888327012003731>
- [24] G. Titichoca and L. Magne O., "Análisis del problema de medición de nivel de llenado en Molinos SemiAutógenos." *Remetallica*, vol. 23, no. 9, 2003.
- [25] D. Wolber, H. Abelson, E. Spertus, and L. Looney, *App Inventor for Android: Create Your Own Android Apps*. O'Reilly, 2011.
- [26] ISO/IE-18004:2006, "Information technology – Automatic identification and data capture techniques – QR Code 2005 bar code symbology specification," 2006.
- [27] Olimex, "Olimexino 328: User's Manual," 2013. [Online]. Available: https://www.olimex.com/Products/Duino/AVR/OLIMEXINO-328/resources/OLIMEXINO-328_{_}manual.pdf
- [28] K. J. Bathe, *Finite Element Procedures*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1995.



Miguel Carrasco, PhD. (Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, France. Pontifical University Catholic of Chile) Professor Carrasco's work is focused on Image Processing, Industrial applications and Human Computer Interaction. He is interested in particular in the development of automatic algorithms based on image processing and computer vision theory. His main research topics are: i) image processing for biology (virus, pollen segmentation), ii) computer vision for industrial inspection, iii) Industrial Internet of Things (IoT), and iv) failure

prediction based on pattern recognition. Past and current research includes on human-computer interaction, users' gaze gesture prediction with eye-trackers, automatic multiple visual inspection, telemedicine based on IoT.



Francisco Álvarez, Mechanical Engineer (2004, Universidad de Santiago, Chile), Master in Business Management (2012, Universidad Adolfo Ibáñez, Chile). Developed his career in producing and improving electromechanical mining parts based in reverse engineering and low scale manufacturing processes, using CAD/CAM and FEM analysis as primary motor. Currently is working in prototyping preventive maintenance systems oriented in critical mining equipment using Industrial IoT. WILA SPA Company Associate Director and PRODIN Chile

technical advisor.



Ramiro Velázquez received the Engineering degree in Electronics from Universidad Bonaterra (Mexico) in 1999, the MSc degree in Control Systems from INSA-Lyon (France) in 2000, and the PhD in Robotics from Université Pierre et Marie Curie - Paris 6 (France) in 2006. Since 2006, he is an Associate Professor at Universidad Panamericana (Mexico). He is past Dean of the Faculty of Engineering and currently serves as Vice-President for Research. He is considered an expert evaluator for the European Commission, CONACYT (Mexico),

and COLCIENCIAS (Colombia). He is member of the Mexican National Systems of Researchers (SNI-Level I). His current research interests are assistive technologies, mechatronic systems, and human-computer interaction.



Javier Concha, BSc (Universidad Adolfo Ibáñez, Santiago, Chile). His interest range from industries managment and the internet of things (IoT). He is currently finishing his professional degree and looking for further training through the development of a master degree.



Ignacio Pérez-Cotapos, BSc (Universidad Adolfo Ibáñez, Santiago, Chile). His interests range from programming (PHP-HTML-.NET) to operational research and project management. Coursing his last year in industrial engineering he looks forward to continuing his studies abroad with a focus on programming and graphic design.