

**DESARROLLO DE UN MODELO DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA LA
CALIBRACIÓN Y AJUSTE DEL SISTEMA DE PESAJE A EQUIPOS DE PRECISION
DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN EL INGENIO RIOPAILA CASTILLA S.A.**

JAIME ANTONIO AGUIRRE GONZÁLEZ

**UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA
ESCUELA DE CIENCIAS BÁSICAS, TECNOLOGÍAS E INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRONICA
CEAD PALMIRA**

2017

**DESARROLLO DE UN MODELO DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA LA
CALIBRACIÓN Y AJUSTE DEL SISTEMA DE PESAJE A EQUIPOS DE PRESICION
DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN EL INGENIO RIOPAILA CASTILLA S.A.**

JAIME ANTONIO AGUIRRE GONZÁLEZ

**Trabajo de Grado Aplicado para optar al título de
Ingeniero Electrónico**

Director

Ing. Leonardo Fabio García Sanclemente

**UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA
ESCUELA DE CIENCIAS BÁSICAS, TECNOLOGÍAS E INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRONICA
CEAD PALMIRA**

2017

NOTA DE ACEPTACIÓN

DEDICATORIA

*A Dios por bendecirme y permitirme
dar un gran paso en mi vida profesional.*

*A mis padres, esposa y seres queridos por el apoyo
Incondicional a lo largo de este camino.*

AGRADECIMIENTOS

A Dios.

Por brindarme la posibilidad de formarme como Ingeniero en Electrónico, llenarme de sabiduría, fortaleza y acompañarme en cada paso de esta meta trazada.

A mi esposa y padres.

Por su apoyo incondicional, por su constante motivación y por el amor brindado que permite que cada día sea mejor persona.

A Riopaila-Castilla S.A.

Por ser un facilitador para ejecución de este informe, siendo participe en mi formación académica-profesional.

Asesores Profesionales como:

Ing. Oscar Iván Jiménez

Ing. Sergio Andrés García

Ing. Leonardo Fabio García

Se agradece toda su colaboración y generación de aportes e información para el desarrollo del trabajo de grado aplicado.

Mil Gracias.

Jaime Antonio Aguirre González

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	10
2. JUSTIFICACIÓN	11
3. OBJETIVOS	12
4.1. Objetivo General	12
4.2. Objetivos específicos.....	12
4. MARCO TEÓRICO.	13
4.1. Antecedentes.....	13
4.2. Marco conceptual	15
4.2.1. Agricultura de precisión	15
4.2.2. Mantenimiento preventivo	15
4.2.3. Mantenimiento basado en rcm	16
4.2.3.1. Pasos del RCM	17
4.2.4. Celda de carga	18
4.2.4.1. Funcionamiento de una celda de carga.....	18
4.2.4.2. Puente de Wheatstone.....	19
4.3. Calibración de la celda de carga.....	20
5. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	21
6. DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA.....	21
6.1. Localización geográfica:	21
6.2. Análisis técnico:	22
6.3. Análisis económico o financiero:	22
6.4. Análisis social:.....	23
6.5. Análisis ambiental:	24
7. SISTEMA DE PRECISION Y MONITOREO <i>EMVICAÑA</i>	25
8. PLAN DE MANTENIMIENTO BASADO EN CONFIABILIDAD.....	26
8.1. Fallas del sistema de pesaje.....	26
8.2. Fallas inherentes sistemas de pesaje.....	27
8.2.1. Falla en el sistema elevador	27

8.2.2. Falla en el sistema extractor primario	28
8.2.3. Otras fallas inherentes al sistema de pesaje	28
8.3. Mantenimiento preventivo.....	29
9. DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA DE DIAGNOSTICO Y CALIBRACIÓN	31
9.1. Caracterización de una celda de carga.....	31
9.1.1. Desarrollo del hardware de la herramienta	32
9.1.2. Desarrollo del software de la herramienta	37
10. RESULTADOS	38
11. CONCLUSIONES	42
12. RECOMENDACIONES.....	43
13. REFERENCIAS.....	44
14. ANEXOS.....	46
15. GLOSARIO	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Pasos del RCM	17
Figura 2. Esquema del puente de Wheatstone.	19
Figura 3. Sistema de precisión integrada en la cosechadora de caña.....	25
Figura 4. Estado de las celdas de carga visualizado a través del monitor de rendimiento de <i>Emvicaña</i>	26
Figura 5. Regresión de la caracterización de la celda de carga	32
Figura 6. Circuito acondicionador de la señal proveniente de la celda de carga	33
Figura 7. Regresión de la tensión de la celda de carga amplificada	35
Figura 8. Esquema de conexiones de hardware de la herramienta	36
Figura 9. Prueba de la herramienta de diagnóstico y calibración de celdas de carga	38
Figura 10. Celda de carga con la herramienta de calibración.	39
Figura 11. Calibración y ajuste de las celdas de carga en el proceso de pesaje.....	39

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Presupuesto global del proyecto	22
Tabla 2. Descripción de gastos de personal	23
Tabla 3. Costo de equipos y software	23
Tabla 4. Material e insumos de oficina.....	23
Tabla 5. Medidas preventivas y correctivas en el sistema de pesaje	29
Tabla 6. Medidas preventivas y correctivas en el sistema elevador	30
Tabla 7. Medidas preventivas y correctivas en el sistema extractor.....	30
Tabla 8. Caracterización de una celda de carga.....	31
Tabla 9. Tensión amplificada de la celda de carga asociada a cada peso patrón.....	34
Tabla 10. Error de la herramienta	35
Tabla 11. Descripción de las conexiones de la herramienta	36
Tabla 12. Verificación de los datos obtenidos con el sistema <i>Emvicaña</i> con los obtenidos en la báscula cañera del Ingenio.....	40
Tabla 13. Costo y horas de mantenimiento ponderadas en el mes de junio de 2017 sin emplear el plan de mantenimiento basado en confiabilidad y julio de 2017 empleando el plan de mantenimiento.....	41

RESUMEN

Título:

DESARROLLO DE UN MODELO DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA LA CALIBRACIÓN Y AJUSTE DEL SISTEMA DE PESAJE A EQUIPOS DE PRECISION DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN EL INGENIO RIOPAILA CASTILLA S.A.¹

Autores: Jaime Antonio Aguirre González²

Palabras Claves: Agricultura de precisión, Monitores de rendimiento, Caña de azúcar, Cosecha mecanizada, Mantenimiento preventivo basado en confiabilidad (RCM), Celda de carga.

Una de las etapas del ciclo de vida de la industria azucarera, es la recolección de la caña de azúcar, este proceso se puede realizar a través de métodos tales como la cosecha mecanizada, que se caracteriza por extraer automáticamente el cultivo, con el propósito de mejorar la productividad, a través de sistemas de monitoreo y control de variables físicas. Sin embargo, debido al uso continuo, malas maniobras, mal diseño o desajustes mecánicos, las celdas de carga usadas para sensar el peso, sufren golpes ocasionando averías y desajustes que afectan la medición. Este proyecto, busca identificar las celdas de carga afectadas, con el fin de desarrollar un modelo de mantenimiento que permita calibrar y recuperar cómodamente las celdas estropeadas y ajustar aquellos elementos que puedan alterar la medición en el proceso de pesaje de la caña de azúcar, de esta manera, aumentar la disponibilidad de la máquina y disminuir los tiempos de parada que afectan la productividad de la cosecha. Finalmente, se desarrollará un sistema electrónico que sirva como herramienta para la calibración de cada una de las celdas de carga por separado, para garantizar una correcta medición y desarrollo de los mapas de productividad.

¹ Trabajo de Grado Aplicado modalidad en investigación

² Escuela de ciencias básicas, tecnologías e Ingenierías. Director: Ing. Leonardo Fabio Garcia

ABSTRACT

TITLE:

DEVELOPMENT OF A PREVENTIVE MAINTENANCE MODEL FOR THE CALIBRATION AND ADJUSTMENT OF THE WEIGHTING SYSTEM TO PRESENCE EQUIPMENT OF THE SUGAR CANE IN THE INGENIO RIOPAILA CASTILLA S.A.³

AUTHOR: Jaime Antonio Aguirre González⁴

KEYWORDS: Precision agriculture, Performance monitors, Sugarcane, Mechanical harvesting, Preventive maintenance based on reliability (RCM), Load cell.

One of the stages of the life cycle of the sugar industry, is the harvesting of sugar cane, this can be done through methods such as mechanized harvesting, characterized by automatically remove the crop, with the purpose of improving productivity, through systems of monitoring and control of physical variables. However, due to continuous use, bad moves, bad design or mechanical misalignments, load cells used for sensing the weight, suffer strokes causing damage and imbalances that affect the measurement. This project seeks to identify the affected load cells, in order to carry out a maintenance plan that allows damaged sensors calibrate and adjust those elements that can alter the measurement in the process of weighing the sugar cane, in this way, increase the availability of the machine and reduce the downtime affecting the productivity of the crop. Finally, an electronic system that serves as a tool for calibration of load cells separately to ensure reliable measurement and development of maps of productivity will be developed.

³Degree Project

⁴School of basic sciences, Technologies and Engineering. Director: Ing. Leonardo Fabio García Sanclemente.

1. INTRODUCCIÓN

Riopaila Castilla es una empresa agroindustrial colombiana del sector azucarero, con más de 98 años en el mercado nacional e internacional, en busca de implementar soluciones tecnológicas e innovadoras, con el fin de tener procesos de producción mucho más eficientes y eficaces, para la obtención de productos derivados de la caña de azúcar (Riopaila Castilla S.A., 2017).

La cosecha mecanizada es una de las etapas de los procesos llevados a cabo por la industria azucarera, el cual consiste en recolectar la caña de azúcar del cultivo de forma automatizada por máquinas cosechadoras y monitorizada a través de un sistema precisión que permite controlar y obtener información detallada a partir de la medición directa del proceso de cosecha en el cultivo. Cuya información es usada para la elaboración de los mapas de rendimiento o productividad, que representan claramente las áreas homogéneas en términos de productividad y variabilidad espacial en diferentes partes de un cultivo plantado (Mantovani & Magdalena, 2014, pág. 78)

Los equipos de precisión cuya herramienta tecnológica consiste en la captura de datos de cosecha como son los datos de posición georeferenciada y la toma del peso de la caña de azúcar por unidad de área durante la operación de la máquina. El sistema de pesaje por bascula apoyado por cuatro celdas de carga que sensan el peso de la caña, sin embargo, durante este proceso se puede presentar alteración de la información registrada a causa de diferentes factores como malas maniobras, uso excesivo y falta de mantenimiento, que provocan que las celdas de carga del sistema se descalibren.

Por lo tanto, en este trabajo se presenta el desarrollo de un modelo de mantenimiento preventivo para la calibración y ajuste del sistema de pesaje a equipos de precisión de la caña de azúcar, que permitan evitar daños futuros y paradas no programadas que afecten la productividad del Ingenio.

2. JUSTIFICACIÓN

La instrumentación electrónica ha jugado un papel muy importante en el sector industrial de la caña a la hora de controlar procesos y obtener información del mismo en tiempo real. La báscula de pesaje de la caña de azúcar, es uno de los sistemas integrados en las cosechadoras, que tiene como función pesar la caña luego de ser troceada, y registrar dicha información para posteriormente ser procesada. Durante este proceso, las celdas de carga son expuestas a averías causadas por sistemas inherentes como el sistema elevador para el transporte de la caña troceada y el sistema de limpieza, que afectan determinadamente la medición y por consiguiente la productividad de la jornada de operación.

En un principio, las celdas de cargas afectadas durante el proceso eran sustituidas por nuevas celdas, lo cual generaba un costo extra para el Ingenio en la compra de dicho repuesto. Con el pasar del tiempo se optó por tratar de recuperar dichos elementos, sometiéndolo a diferentes métodos, los cuales solo eran posibles llevarse a cabo en campo y utilizando el sistema de pesaje integrado de la cosechadora, lo cual implica someterla a paradas no programadas, y por consiguiente a periodos de improductividad, sin contar de que se trataba de un proceso tedioso y complejo realizado por 2 o más técnicos, por esta razón, se desarrolló una herramienta que permita diagnosticar y calibrar las celdas de carga por separado, sin la necesidad de la utilización del sistema integrado de la cosechadora.

La programación de un plan de mantenimiento preventivo centrado en confiabilidad o RCM ayuda a evitar posibles fallas que puedan presentarse durante la operación de la cosechadora, garantizando su operatividad y confiabilidad de los datos obtenidos por los sensores debidamente calibrados. También se alargaría la vida útil del sistema de pesaje y se lograría reducir costos de reparaciones adicionales. De esta manera, la empresa se verá beneficiada en su capacidad de producción y competitividad.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

Desarrollar un modelo de mantenimiento preventivo, en el cual se implementará una herramienta que permita diagnosticar y calibrar las celdas de carga del sistema de pesaje en las cosechadoras del Ingenio Riopaila Castilla S.A.

3.2. Objetivos específicos

- Desarrollar un plan de mantenimiento preventivo de los sistemas inherentes al proceso de pesaje de la cosechadora basado en confiabilidad o RCM.
- Desarrollar una herramienta de diagnóstico y calibración de las celdas de carga (basado en microcontrolador).
- Verificar que el proceso de calibración sea correcto a través de la comparación entre los datos registrados por el sistema *Emvicaña* (equipo de precisión) y la báscula ubicada en el Ingenio.

4. MARCO TEÓRICO.

4.1. Antecedentes

El campo de la agricultura de precisión es muy amplio, y desde el punto de vista de investigación y desarrollo tecnológico, estos sistemas están compuestos por subsistemas estudiados en diferentes disciplinas. Particularmente, el sistema de pesaje integrado en las cosechadoras debe mantenerse en óptimas condiciones, para obtener un registro confiable del peso de la caña para la elaboración de los mapas de productividad. Teniendo en cuenta que este trabajo pretende mejorar las condiciones de la báscula en los equipos de precisión y evitar situaciones que afecten la medición, para garantizar la correcta elaboración de los mapas de productividad, a continuación se presentan algunos trabajos en los que se utilizan elementos de la agricultura de precisión:

En el artículo de los autores (Orozco & Ramírez, 2015) presentan una revisión acerca de sistemas de información basados en Agricultura de precisión y aplicables a cultivos de caña de azúcar, haciendo énfasis en las tecnologías utilizadas, la gestión de datos y sus arquitecturas, la cual presentaron una propuesta capaz de facilitar la optimización en distintas etapas del ciclo de vida de la caña de azúcar.

El trabajo desarrollado por (Cerri & Graziano, 2003) tuvo como objetivo principal generar un mapa de rendimiento sobre el cultivo de la caña de azúcar en Brasil, en el que se incluyó el diseño y prueba de un sistema de monitoreo del rendimiento, montado sobre una cosechadora CASE 7700, el cual contaba con un dispositivo de medición integrado por una balanza apoyada sobre celdas de carga, un sistema de adquisición de datos y un GPS. Como resultado se obtuvo el mapa de rendimiento sobre un área de 43 hectáreas, cuya precisión se validó al comparar el peso registrado por la balanza de la cosechadora y el peso de una balanza electrónica que registro el peso total de la cosecha recolectada, el cual presentó un error medio del 0.96% y error máximo de 6.4%.

El autor (Cox, 2003) en el desarrollo de su trabajo propone una serie de técnicas para medir el flujo de masa de caña de azúcar, las cuales están basados en un sistema integrado de transporte

con rodillos y una balanza, cuyos resultados fueron comparados con el medidor de caudal másico implementado sobre un camión. Los resultados que se obtuvieron reflejan que las técnicas propuestas no ofrecen una precisión esperada, y la técnica conocida como “pesaje pad” ofrece el mayor potencial para medir con precisión el caudal másico con una sola calibración, de acuerdo a las pruebas realizadas a las técnicas propuestas bajo las mismas condiciones.

La Agricultura de Precisión en la cosecha del Ingenio Riopaila Castilla S.A. inicio en el año 2007 con el programa de mapeo y recolección de datos de la variabilidad química de los suelos para fortalecer la siembra y la fertilización del cultivo; conforme al desarrollo se utilizó la tecnología de medición compuesta en la localización precisa con coordenadas en un sistema de información geográfica, con buenos resultados se extendió en la cosecha manual para generar mapas de rendimiento con equipos Enalta PCA1000 para conocer la productividad en los lotes del cultivo de la caña de azúcar durante el proceso de la cosecha, en el año 2010 se implementó un nuevo sistema de monitoreo a bordo de las máquinas de corte mecánico llamado SimproCaña con tecnología Enalta, estos equipos de precisión y monitoreo de producción fueron instalados en la nueva flota de cosechadoras John Deere adquirida por la empresa.

A la hora de hablar de herramientas para la medición del peso de las celdas de carga, nos encontramos con una variedad de productos que tiene la capacidad de conocer el estado de los sensores.

A medida que la tecnología avanza, crean productos cada vez más confiables, multifuncionales y su función principal es testear sensores de masa, fuerza, presión, entre otras. En el mercado actual, existen herramientas digitales para probar celdas de carga. Una de las herramientas es el calibrador de celdas de carga LC II que a pesar de su elevado costo, se caracteriza por ser versátil, recargable, conexión USB y funcionalidades de registro de datos en SD, Display, test, entre otras. (Vishay Precision Group, 2014)

Otra marca es la IPM 650, un medidor de panel digital basado en microcontroladores que monitorea la actividad de una amplia gama de sensores. (Futek, 2012) Por tal razón la herramienta de diagnóstico y calibración de celdas de carga modelo 1022 tedeo huntleigh se puede desarrollar a bajo costo, como prototipo acondicionado al requerimiento del proyecto, y no está ligado a las características limitadoras de los productos convencionales.

4.2. **Marco conceptual**

4.2.1. **Agricultura de precisión**

La Agricultura de Precisión comienza con un muestreo de suelos en campo georeferenciado satelitalmente con ayuda de GPS. Las muestras son enviadas al Laboratorio de Suelos para su respectivo análisis.

Las recomendaciones en Tasa variada y la ubicación georefenciada son transmitidas a un computador y un GPS instalado en los tractores para ejecutar la labor en forma integrada con roturación, subsuelo y aporque. Estos equipos, del mismo modo, permiten monitorear la calidad de aplicación y eficiencia de la labor.

Siguiendo con el liderazgo tecnológico, se crean los mapas de productividad que muestran el potencial de cada punto del lote, generados a partir de información GPS, sensores de peso y computadoras instaladas en las alzadoras manual y cosechadoras de caña. (Riopaila Castilla S.A.)

4.2.2. **Mantenimiento preventivo**

El mantenimiento preventivo es la ejecución de un sistema de inspecciones periódicas programadas racionalmente sobre el activo fijo de la planta y sus equipos. Con el fin de detectar condiciones o estados inadecuados de esos elementos, que pueden ocasionar circunstancialmente paros en la producción o deterioro grave de máquinas, equipos o instalaciones, y realizar en forma permanente el cuidado de mantenimiento de la planta para evitar tales condiciones, mediante la ejecución de ajustes o reparaciones, mientras las fallas potenciales están aún en estado inicial de desarrollo. (Sierra, 2005, pág. 14)

La función principal del mantenimiento preventivo es conocer el estado actual de los equipos, mediante los registros de control llevados en cada uno de ellos y en coordinación con el departamento de programación, para realizar la tarea preventiva en el momento más oportuno. Consiste en una serie de actuaciones sistemáticas en las que desmontan las máquinas y se observan para reparar o sustituir los elementos sometidos a desgaste. (Alvarizaes, 2010, pág. 12)

Sus principales ventajas frente a otros tipos de tareas de mantenimiento son: Evita las averías mayores como consecuencia de pequeñas fallas. Prepara las herramientas y repuestos. Aprovecha realizar las reparaciones en el momento más oportuno tanto para producción como para mantenimiento. Distribuye el trabajo de mantenimiento optimizando la cuadrilla de reparación. Y disminuye la frecuencia de los paros, pero los aprovecha para realizar varias reparaciones diferentes al mismo tiempo. (Sierra, 2005, pág. 14)

4.2.3. **Mantenimiento basado en RCM**

El objetivo fundamental de la implantación de un Mantenimiento Centrado en Fiabilidad o RCM en una planta industrial es aumentar la fiabilidad de la instalación, es decir, disminuir el tiempo de parada de planta por averías imprevistas que impidan cumplir con los planes de producción. Los objetivos secundarios pero igualmente importantes son aumentar la disponibilidad, es decir, la proporción del tiempo que la planta está en disposición de producir, y disminuir al mismo tiempo los costos de mantenimiento. El análisis de los fallos potenciales de una instalación industrial según esta metodología aporta una serie de resultados (Renovetec, 2013):

- Mejora la comprensión del funcionamiento de los equipos.
- Analiza todas las posibilidades de fallo de un sistema y desarrolla mecanismos que tratan de evitarlos, ya sean producidos por causas intrínsecas al propio equipo o por actos personales.
- Determina una serie de acciones que permiten garantizar una alta disponibilidad de la planta.

Las acciones tendentes a evitar los fallos pueden ser de varios tipos:

- Determinación de tareas de mantenimiento que evitan o reducen estas averías.
- Mejoras y modificaciones en la instalación.
- Medidas que reducen los efectos de los fallos, en el caso de que estos no puedan evitarse.

- Determinación del stock de repuesto que es deseable que permanezca en planta, como una de las medidas paliativas de las consecuencias de un fallo.
- Procedimientos operativos, tanto de operación como de mantenimiento.
- Planes de formación.

4.2.3.1. Pasos del RCM

Los pasos a seguir para la implementación de un plan de mantenimiento basado en RCM son:

1. Identificación del elemento a analizar.
2. Determinación de las funciones del elemento.
3. Determinación de lo que constituirá un fallo de esas funciones.
4. Identificación de las causas de esos fallos funcionales.
5. Identificación de los efectos de esos fallos.
6. Utilización de la lógica RCM para seleccionar la estrategia adecuada.
7. Documentación del programa de mantenimiento y depuración del mismo conforme se adquiere experiencia en la operación del elemento.

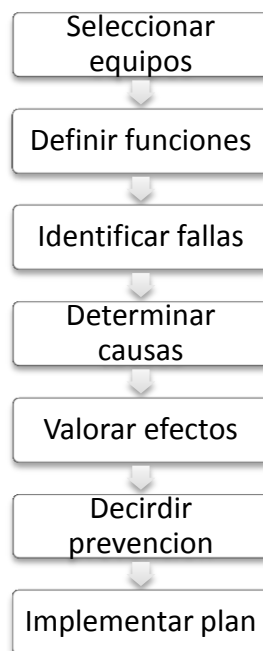


Figura 1. Pasos del RCM
Adaptado de: (Araujo)

4.2.4. Celda de carga

Una celda de carga es un transductor utilizado para convertir una fuerza en una señal eléctrica. Esta conversión empieza a partir de un dispositivo mecánico, es decir, la fuerza que se desea medir deforma la galga extensiométrica, y por medio de medidores de deformación (galgas) obtener una señal eléctrica con la cual se adquiere el valor de la fuerza. (5 Hertz Electronica, 2017)

La celda de carga tiene 4 cables de diferentes colores que permite identificar la forma correcta de conexión:

1. Green = Alimentación (5 ~ 12 V_DC)
2. White = Salida de voltaje (-)
3. Red = Salida de voltaje (+)
4. Black = Alimentación (GND)

4.2.4.1. Funcionamiento de una celda de carga

Las celdas de carga convierten la carga que actúa sobre ellos en señales eléctricas. La medición se realiza con pequeños patrones de resistencias que son usados como indicadores de tensión con eficiencia, a los cuales llamamos medidores.

Los medidores están unidos a una viga o elemento estructural que se deforma cuando se aplica peso, a su vez, deformando el indicador de tensión. Cuando se deforma el medidor de deformación la resistencia eléctrica cambia en proporción a la carga.

Esto se logra por medio de un puente Wheastone, el cual se utiliza para medir resistencias desconocidas mediante el equilibrio de “brazos” del puente. Estos están contruidos por cuatro resistencias que forman un circuito cerrado. En el caso de las celdas de carga las resistencias son los medidores de deformación. (5 Hertz Electronica, 2017)

4.2.4.2. Puente de Wheatstone

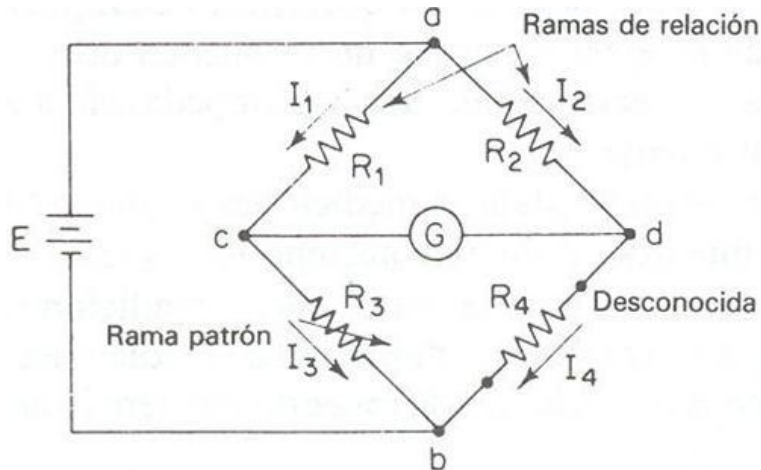


Figura 2. Esquema del puente de Wheatstone.

Fuente: (Elimperioelectricista)

Donde E es la fuente de tensión, R_1 , R_2 y R_3 son las resistencias de valor conocido, R_4 es la resistencia de valor desconocido y G representa un galvanómetro u otro medidor sensible a la corriente eléctrica.

El puente de wheatstone se emplea para determinar, con gran precisión, el valor de una resistencia desconocida. Utilizando para ello su relación con otras tres resistencias.

La corriente que pasa por el galvanómetro depende de la diferencia de potencial entre los puntos c y d. La relación matemática que determina el valor de la resistencia desconocida se cumple solo cuando el puente está en equilibrio, es decir, cuando el potencial en el galvanómetro es 0V, por lo tanto, no existe corriente en él. Cuestión por la que se hace necesaria la presencia del galvanómetro (para observar el punto donde no haya corriente y marque 0).

Ahora bien, éste equilibrio aparece cuando el voltaje a-c es igual al voltaje a-d ó el voltaje b-c sea igual al voltaje b-d, según la terminal de la fuente que se tome en cuenta.

Entonces:

$$\begin{aligned} V_1 &= V_2 \\ I_1 \cdot R_1 &= I_2 \cdot R_2, \quad (1) \end{aligned}$$

Para el circuito debe cumplirse que la corriente en el galvanómetro sea 0, por lo tanto:

$$I_1 = I_3 = \frac{E}{R_1 + R_3}, \quad (2)$$

$$I_2 = I_4 = \frac{E}{R_2 + R_4}, \quad (3)$$

Sustituyendo (2) y (3) en (1)

$$\begin{aligned} I_1 \cdot R_1 &= I_2 \cdot R_2 \\ \left(\frac{E}{R_1 + R_3}\right) R_1 &= \left(\frac{E}{R_2 + R_4}\right) R_2 \\ E \cdot R_1(R_2 + R_4) &= E \cdot R_2(R_1 + R_3) \\ R_1(R_2 + R_4) &= R_2(R_1 + R_3) \\ R_1R_2 + R_1R_4 &= R_1R_2 + R_2R_3 \\ R_1R_4 &= R_2R_3, \quad (4) \end{aligned}$$

Esta última expresión es la expresión para el equilibrio del puente de wheatstone, y, si R_4 es R_x entonces la ecuación que determinará el valor de R_x es:

$$R_x = R_3 \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

4.3. Calibración de la celda de carga

Usted puede utilizar la siguiente fórmula para convertir la salida en voltios a partir de la celda de carga de una fuerza ya medida.

$$\text{Peso o Fuerza esperada [Kg]} = K \times (\text{Medición [V]} - \text{Compensación})$$

Donde “ K ” es la ganancia que va a cambiar dependiendo de la unidad de fuerza o de peso que se desea medir. El desplazamiento varía entre las celdas individuales, por lo que es necesario tomarse en cuenta para cada sensor por separado.

Es importante inicialmente registrar la salida que tiene el sensor mientras está en reposo, para así considerar las variaciones actuales de temperatura. Una vez conociendo la compensación adecuada, con un peso conocido podemos resolver la ecuación para “ K ”.

También puede calibrar la celda de carga con múltiples pesos conocidos y usar estos para modelar una ecuación lineal. (5 Hertz Electronica, 2017)

5. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Los mapas de productividad en el sector agrícola, particularmente en la industria azucarera, indican que tan próspero y factible es un terreno para cultivar, este proceso es desarrollado a través de la información suministrada por equipos de instrumentación y geolocalización de gran precisión. Dicha información es captada durante la recolección de la caña de azúcar. Sin embargo, por el uso continuo, malas maniobras y demás factores, los sistemas de instrumentación son expuestos a alteraciones durante la operación, hasta el punto que se desajustan o fallan, enviando información poco confiable, por esta razón, es inevitable dejar de reemplazar celdas de carga en algunos caso en buen estado ya que no se cuenta con una herramienta para calibrarlas. Debido a esto, se generan gastos significativos de dinero al año por la adquisición de nuevas celdas de carga para prevenir oportunamente fallas, que conlleven a paradas de mantenimiento no programadas que afectan la operación de la cosechadora.

6. DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA

6.1. Localización geográfica:

Riopaila Castilla S.A. se encuentra ubicada en el departamento del Valle del Cauca, al suroccidente de Colombia. La empresa cuenta con dos plantas fabriles, una ubicada en el Km1 vía La Paila, Zarzal (Planta Riopaila) y la otra en el KM 30 vía Cali- Florida (Planta Castilla).

El desarrollo de un modelo de mantenimiento preventivo en el sistema de pesaje de las cosechadoras de Riopaila Castilla S.A, planta castilla se centra en la realización de ciertas actividades que permiten evitar averías complejas, para corregirlas, es necesario transportar la cosechadora al taller, lo cual genera costo adicionales considerables al ingenio, de este modo, el plan de mantenimiento se desarrolla en el campo de operación y siguiendo el modelo desarrollado.

Por otro lado, la herramienta desarrollada para el diagnóstico y calibración de las celdas de carga es muy versátil, de tal manera que puede ser utilizada tanto en campo como en el taller.

6.2. Análisis técnico:

El desarrollo de un plan de mantenimiento preventivo centrado en confiabilidad (RCM) permite evitar fallas que alteran el buen funcionamiento de la cosechadora y del sistema de pesaje. En el plan se indican procedimientos técnicos para prever dichas fallas, basados en las especificaciones del fabricante y experiencias de campo. Para poder ejecutar algunos de los procedimientos, es necesario hacer uso de una herramienta para diagnosticar y calibrar las celdas de carga. La herramienta inicialmente se desarrollará como un prototipo, la cual se implementará sobre una plataforma basada en microcontrolador para ser sometida a pruebas por parte de Riopaila Castilla S.A.

6.3. Análisis económico o financiero:

A continuación se relacionan se muestran las tablas que relaciona el presupuesto global del proyecto y sus derivados

RUBROS	TOTAL
Personal	\$12.972.096
Equipos y Software	\$2.400.000
Insumos de oficina	\$660.000
TOTAL	\$16.032.096

Tabla 1. Presupuesto global del proyecto

Nombres y Apellidos	Titulo		Función	Dedicación [Meses]	Totales
	Formación básica	Posgrado			
Jaime Antonio Aguirre	Est. de Pregrado	-	Investigador principal	6	\$12.972.096
TOTAL					\$12.972.096

Tabla 2. Descripción de gastos de personal

Descripción	Cantidad	Justificación de uso en el proyecto	Totales
Computador	1	Equipo para llevar a cabo el proyecto y administrar la información generada.	\$ 2.000.000
Electrónica	1	Arduino, LCD 16x2, Circuitos integrados y demás elementos electrónicos	\$ 434.200
TOTAL			\$2.434.200

Tabla 3. Costo de equipos y software

Descripción	Total
Implementos Papelería	\$ 150.000
Tóner impresora	\$ 300.000
Fotocopias	\$ 60.000
Desplazamientos	\$ 150.000
TOTAL	\$ 660.000

Tabla 4. Material e insumos de oficina

En resumen, para el desarrollo del proyecto debe de contar con un presupuesto de \$16.032.096.

Para Riopaila Castilla S.A.; la herramienta para diagnosticar y calibrar celdas de carga, le generaría una reducción de costos en la adquisición de celdas de carga, ya que se podrían recuperar un gran número de celdas descalibradas, que normalmente son sustituidas por celdas nuevas. Además se garantiza la elaboración de graficas de rendimiento del suelo de gran confiabilidad que permiten tomar decisiones estratégicas en la compañía, también es importante resaltar la utilidad y versatilidad que tiene la herramienta para el desarrollo de un buen mantenimiento preventivo en el sistema de pesaje de las cosechadoras.

6.4. Análisis social:

El sistema de pesaje integrado en las cosechadoras envían un flujo de datos a servidores, estos datos son procesados por software especializados para obtener mapas de productividad, de los

cuales se extrae gran cantidad de información, que muestra características importantes del suelo, por tal razón, el sistema de pesaje debe estar funcionando correctamente y las celdas de carga debidamente calibradas para obtener mapas de productividad confiables, y así, los cañicultores pueden tomar decisiones oportunas para el mejoramiento de los cultivos de sus haciendas para lograr una mayor productividad. (Ver Anexo B)

6.5. **Análisis ambiental:**

Desde el punto de vista ambiental, el desarrollo de este proyecto permite recuperar celdas de carga para ser reutilizadas, ya que en Riopaila Castilla S.A. no se cuenta con un buen plan para el desecho de estos dispositivos, que de no hacerlo debidamente puede ocasionar daños al medio debido a los materiales con que están contruidos estos sensores. Por otro lado, al contar con unos mapas de productividad confiables, se pueden implementar estrategias para recuperar suelos inviables para cosechar.

7. SISTEMA DE PRECISION Y MONITOREO *EMVICAÑA*

Emvicaña es un sistema de monitoreo que está conformado por una antena GPS, un sistema de registro de datos conectados a sensores de peso que mide el flujo de masa con una báscula de gran precisión, cuyo sistema son integrados en las cosechadoras del Ingenio Riopaila Castilla S.A. Equipos que permiten recolectar y grabar datos de la producción agrícola para la elaboración de los mapas de productividad (Garcia Jimenez, 2017). La instalación del sistema de precisión se encuentra distribuida en las cosechadoras de acuerdo a la Figura 3.



Figura 3. Sistema de precisión integrada en la cosechadora de caña
Fuente: (Garcia Jimenez, 2017)

Para identificar las celdas de carga averiadas, se visualiza la tensión que registra la báscula en vacío en el monitor de rendimiento del sistema *Emvicaña*, es decir, los valores de tensión sin carga, deben estar entre el rango de 1.0 V y 1.9 V que garantiza un registro correcto de los datos que se vayan a sensor.

Particularmente, en la Figura 4 se visualiza el estado en el que se encuentra cada celda de carga, donde se puede identificar a través del monitor de rendimiento de *Emvicaña* que las celdas 1, 2 y 4, están fuera del rango de tensión, por lo tanto, deben ser calibradas para garantizar una correcta medición.

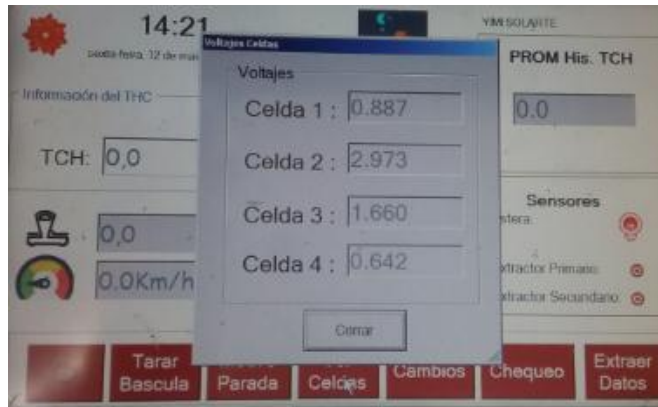


Figura 4. Estado de las celdas de carga visualizado a través del monitor de rendimiento de *Emvicaña*

8. PLAN DE MANTENIMIENTO BASADO EN CONFIABILIDAD

Es un procedimiento sistemático y estructurado para determinar los requerimientos de mantenimiento de los activos en su contexto de operación, llamado *Mantenimiento centrado en Confiabilidad*, consiste en analizar las funciones de los activos, ver cuáles son sus posibles fallas, luego preguntarse por los modos o causas de fallas, estudiar sus efectos y analizar sus consecuencias.

A partir de la evaluación de las consecuencias, se determinan las medidas preventivas más adecuadas al contexto de operación, para que sean técnicamente factibles y económicamente viables.

8.1. Fallas del sistema de pesaje

Particularmente, en el sistema de pesaje se presentan algunas fallas, las cuales se pueden clasificar de acuerdo a la magnitud de la falla:

- **Falla crítica:** Esta falla ocurre por graves golpes, rayones, lo que ocasiona daños irreparables en las celdas de carga, lo cual conlleva a un paro inmediato de la máquina cosechadora.

- **Falla importante:** Esta falla ocurre también por golpes importantes, que ocasiona daños como, errores de medición de peso de caña en las celdas, dependiendo de la magnitud de las fallas, puede o no originar un paro de la máquina cosechadora.
- **Falla tolerable:** Esta falla ocurre por pequeños golpes, vibraciones considerables o por material incrustado por debajo de las celdas, además no tienen incidencia inmediata sobre el proceso de recolección de caña y en las medidas de peso.

Luego de observar los datos obtenidos en campo y evidenciar algunas eventualidades durante la operación de la cosechadora, se identificaron elementos asociados a sistemas inherentes que ocasionan daños al sistema de pesaje de la cosechadora.

8.2. Fallas inherentes sistemas de pesaje

8.2.1. Falla en el sistema elevador

- **Falla crítica:** Ocasiona paros en la máquina cosechadora, cuando la falla asociada al sistema elevador afecta drásticamente partes de este, originando fallas como: ruptura de las cadenas elevadoras, excesivo alargamiento de la cadena, lo que hace que las esteras levanten o doble el plato de la báscula, base que esta soportada sobre las celda, produciendo daños irreparables en las celdas.
- **Fallas importantes:** Estiramiento de las cadenas por encima del nivel permitido, lo que ocasiona grandes vibraciones, y golpes o atascamiento en la base de las celdas de carga, que puede conllevar a un paro de la máquina.
- **Fallas tolerables:** Fallas en las tablillas, ocasionadas por el desgaste de los bujes por uso continuo de la máquina, lo que conlleva a que estas no realicen bien el trabajo de recolección de la caña, además que a su vez permiten que raye el plato de la báscula y exista un desgaste prematura del teflón, originando errores de medición de peso y golpes sobre la base, pero según sea el nivel de esta falla, no implicaría un paro inmediato de la máquina.

8.2.2. Falla en el sistema extractor primario

- **Falla crítica:** Aspas del motor hidráulico en mal estado y baja velocidad de extracción, lo que origina que estas no extraigan la materia extraña de la caña es decir, el sistema no elimina basura, hojas y la suciedad de caña que permite el ingreso de esta al sistema de pesaje que altera el peso de la materia prima (caña de azúcar).
- **Falla importante:** Perforaciones en el capuchón por cuerpos extraños, lo que ocasiona falta de turbulencia para aspirar la materia extraña, lo que implica una adicción en el peso con respecto a la materia prima.
- **Falla tolerable:** Perdida de potencia y presión del sistema hidráulico, de caudal y velocidad en el motor hidráulico, asociado a falta de lubricación, desgaste en las piezas mecánicas como la piñonería del motor y el circuito hidráulico lo cual origina que este pierda eficiencia en su tarea de extracción.

8.2.3. Otras fallas inherentes al sistema de pesaje

- Golpes, doblamiento del plato de la báscula que está soportada sobre las celdas de carga, lo que ocasiona altos o bajos registros de peso.
- Se produce una alta tensión para fijar el armado de la base del sensor con la balanza (plato de lámina y teflón), problema de prácticas de manufactura.
- Desajuste de tornillería que soporta el plato sobre las celdas de carga, lo que ocasiona también errores de medición de peso.
- No registro de datos de peso cuando se visualiza al sistema *Emvicaña* valores de 0.633 V; un valor diferencial que representa problemas en los terminales eléctricos ya sea aislamiento eléctrico, humedad, sulfato en los pines.
- La Acumulación gradual de suciedad, barro y materia extraña alrededor del plato de báscula, en particular en los bordes y lo mismo de la tolerancia que debe existir entre la celda de carga y la base galvanizada que permita el movimiento de la basculación de las piezas, introduce errores de medición.

- Fuera del centro del plato de la báscula con respeto al chasis del piso del elevador con que se frena el movimiento de basculación en los bordes que ocasiona errores de medición.

8.3. Mantenimiento preventivo

Una vez identificados los elementos que ocasionan las fallas o descalibración del sistema de pesaje, se procede a documentar un plan de mantenimiento que permita evitar dichas fallas, y así, prolongar el tiempo de disponibilidad del sistema de pesaje en la cosechadora de caña.

La realización del mantenimiento preventivo de los equipos de monitoreo en la cosechadora precisamente en el sistema de pesaje y los sistemas relacionados se presenta un procedimiento operacional y mantenimiento estandarizados con las respectivas actividades que se deberá realizar en cada mantenimiento con intervalos de tiempo en horas de servicio de la máquina según la sugerencias del fabricante (Case, 2014) para garantizar el estado de la celdas y su correcta medición en el funcionamiento a dichos equipos de apoyo para el programa de agricultura de precisión en la cosecha mecánica.

En la Tabla 5, se muestra las medidas preventivas y correctivas para evitar averías en el sistema de pesaje, teniendo en cuenta que la limpieza y la revisión deben realizarse cada 25 horas de operación.

Tabla 5. Medidas preventivas y correctivas en el sistema de pesaje

Protocolos de mantenimiento del sistema de Precisión							
Sistema de pesaje	Componentes	Tareas de mantenimiento		Mantenimientos		Clasificación de las gamas	
	Celdas de carga de 100Kg	Limpieza	Cambio	Limpieza externa de la celda para remover elementos extraños que generan errores de medición	Cambio de conectores eléctricos o cableado de la celda	Eléctrico cada 25 horas	Eléctrico cada 2000 horas
	Sistema de acondicionamiento de señales	Cambio			Cambio de Amplificador de instrumentación AD620	Eléctrico	
	Sistema de procesamiento de señales	Cambio			Cambio de módulo de procesamiento	Eléctrico	

	Estructura física	Limpieza	Ajuste	Limpieza exterior al plato o base que soporta las celdas	Ajuste de tornillería, para centrar o nivelar el plato	Mecánico cada 25 horas	Mecánico cada 250 horas
--	-------------------	----------	--------	--	--	------------------------	-------------------------

En la Tabla 6 se muestra las medidas preventivas y correctivas para evitar averías en el sistema de pesaje asociadas con el sistema elevador, teniendo en cuenta que los bujes de las tablillas se cambian a las 1000 horas.

Tabla 6. Medidas preventivas y correctivas en el sistema elevador

Protocolos de Mantenimiento del sistema Transporte de Caña							
Sistemas	Componentes	Tareas de mantenimiento		Mantenimientos		Clasificación de las gamas	
Sistema elevador	Cadena elevadora	Verificación		Se verifica el estado de la cadena con la ayuda del Horómetro para observar las horas de funcionamiento del sistema elevador		Mecánico cada 150 horas	
		Ajuste		Templar la cadena elevadora		Mecánico cada 250 horas	
		Verificación	Cambio	Verificar la longitud de las cadenas y proceder a acortarlas en sus dimensiones adecuadas para el trabajo	Reemplazar el conjunto de la cadena y la cinta antidesgaste por una nueva	Mecánico cada 1000 horas	Mecánico cada 3500 horas
	Traviesas	Cambio		Cambio de los bujes de las traviesas	Cambio de las traviesas	Mecánico cada 500 horas	Mecánico cada 1500 horas

En la Tabla 7. Se muestra las medidas preventivas y correctivas para evitar averías en el sistema de pesaje asociadas con el sistema extractor, teniendo en cuenta que la limpieza se realiza cada 25 horas.

Tabla 7. Medidas preventivas y correctivas en el sistema extractor

Protocolos de Mantenimiento del Sistema Limpieza							
Subsistema	Equipo	Tareas de mantenimiento		Mantenimientos		Clasificación de las gamas	
Extractor primario	Motor hidráulico	Lubricación	Cambio	Lubricación de los rodamientos y engranajes de caja de transmisión	Cambio de los rodamientos y piñones Cambio del motor hidráulico	Mecánico cada 250 horas	Mecánico cada 1500 horas Mecánico cada 3000 horas
		Revisión		Revisión del estado de la presión y caudal del sistema hidráulico del motor		Mecánico cada 1000 horas	
		Limpieza		Limpieza exterior e interior del motor		Mecánico cada 25 horas	
	Aspas	Cambio		Se cambian las aspas cuando están averiadas, desgaste o vibración		Mecánico cada 250 horas	
	Capuchón	Verificación		Verificación del estado del capuchón para repararlo o cambiarlo		Mecánico cada 1000 horas	

9. DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA DE DIAGNOSTICO Y CALIBRACIÓN

9.1. Caracterización de una celda de carga

Antes de desarrollar el hardware y software de la herramienta de diagnóstico y calibración, se debe caracterizar una de las celdas de carga que esté funcionando correctamente, para determinar características importantes del sensor, como la ecuación característica del sensor y ganancia que debe tener la etapa de amplificación de señal del circuito a implementar.

Para la caracterización de la celda de carga se usaron los siguientes recursos:

- Una celda de carga TDA Modelo 1022 de 100 [Kg]
- Pesos patrón de 1 [Kg] y 5 [Kg]
- Un multímetro digital

Sobre la celda de carga en la parte donde se realiza el esfuerzo mecánico, se colocaron pesos de 1 [Kg] hasta 15 [Kg], donde se obtuvieron los resultados consignados en la Tabla 8.

Tabla 8. Caracterización de una celda de carga

Peso [kg]	Tensión Celda [mV]
1	0,161
2	0,253
3	0,345
4	0,439
5	0,531
6	0,625
7	0,716
8	0,807
9	0,901
10	0,994
11	1,089
12	1,180
13	1,275
14	1,368
15	1,463

De la Tabla 8, se construye la gráfica de la Figura 5, donde se aprecia que la celda de carga tiene un comportamiento lineal, cuya ecuación característica es

$$\text{Tensión [V]} = 9,29 \times 10^{-5} * (\text{Peso [Kg]}) + 6,65 \times 10^{-5} \quad (1)$$

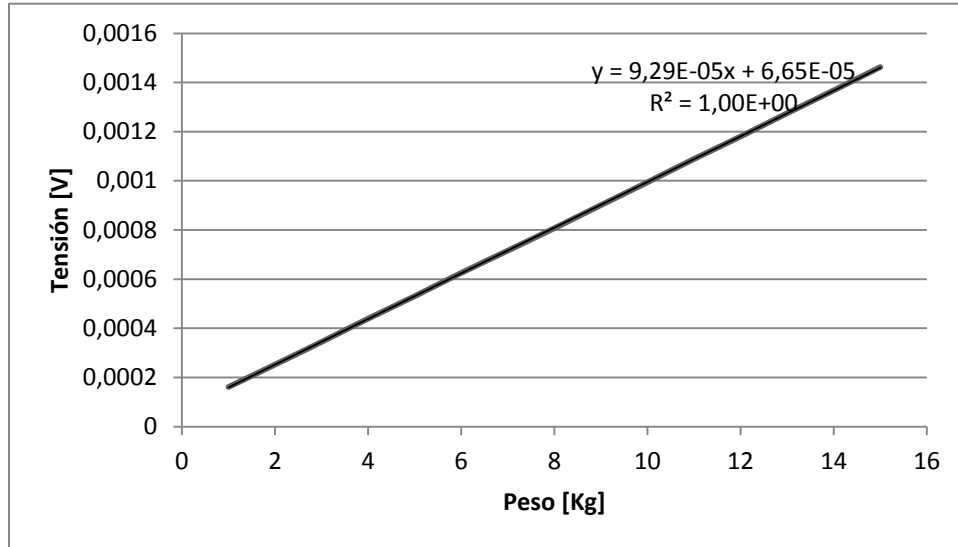


Figura 5. Regresión de la caracterización de la celda de carga

9.1.1. Desarrollo del hardware de la herramienta

El hardware implementado en el desarrollo de la herramienta se muestra en la Figura 6, que consta de:

Plataforma arduino: Es usado para la adquisición de los datos y la transmisión de la información requerida en un display LCD. Debido a que no se ha desarrollado una herramienta que permita diagnosticar y calibrar las celdas de carga en Riopaila Castilla S.A. El prototipo de la herramienta se desarrollará en Arduino, ya que dicha plataforma ofrece grandes prestaciones y facilidades para la realización de pruebas por parte del área encargada en la compañía.

Registro de patrón: son dos pulsadores que permiten seleccionar el valor del peso patrón con el cual se realizará la calibración de la celda afectada.

Adecuación de señal: para ajustar la señal obtenida de la celda de carga se implementó el circuito de la Figura 6, el cual consta de una etapa de amplificación, una etapa de filtrado y una etapa de regulación que actúa como protección para evitar daños en la tarjeta de adquisición de datos.

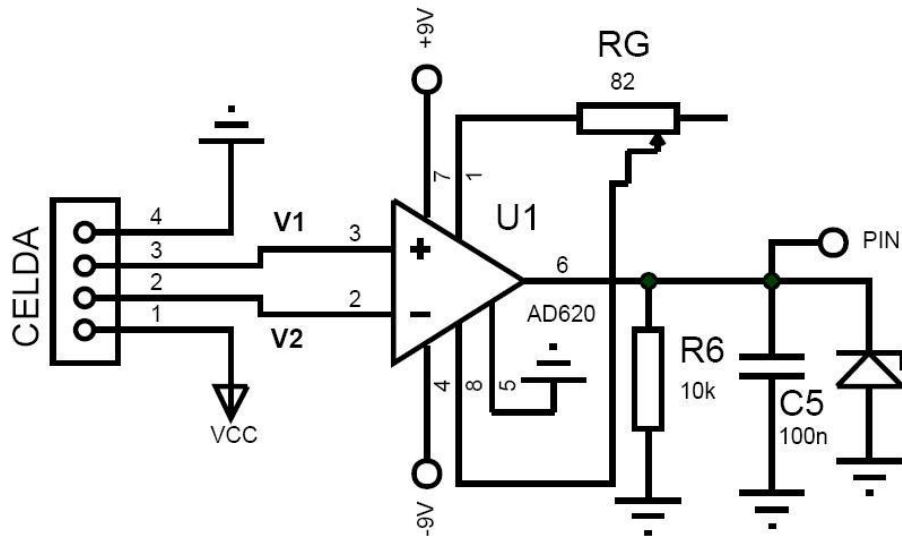


Figura 6. Circuito acondicionador de la señal proveniente de la celda de carga
Fuente: (Coughlin & Driscoll, 1999)

La herramienta se diseñó para un rango de medida de 0,1 [Kg] hasta 89 [Kg], por lo tanto, la tensión máxima que suministra la celda de carga se obtiene al sustituir dicho valor en la ecuación 1

$$\text{Tensión [V]} = 9,29 \times 10^{-5} * (89) + 6,65 \times 10^{-5} = 8,33 \text{ [mV]}$$

Teniendo en cuenta que la tensión máxima que puede captar el puerto analógico A0 es 5 [V], la etapa de amplificación debe tener una ganancia de:

$$G = \frac{V_o}{V_i} = \frac{5 \text{ [V]}}{8,33 \text{ [mV]}} \approx 600$$

Por lo tanto, el valor de la resistencia R_G mostrada en el circuito de la Figura 6, se obtiene de la ficha técnica del circuito integrado de referencia AD620:

$$G = 1 + \frac{49400}{R_G} \quad (2)$$

Donde G es la ganancia de amplificación y R_G es la resistencia que permite ajustar la ganancia, despejando R_G de la ecuación 2 se obtiene que:

$$R_G = \frac{49400}{G - 1} = \frac{49400}{600 - 1} \approx 82 \Omega$$

Visualización: Es la conexión entre el microcontrolador y una pantalla LCD 16x2 que permite desplegar la información correspondiente a la medida del peso sensado, el peso patrón que se está utilizando y el error de la medición.

Para desplegar el valor de peso en unidades de kilogramos, se realizó el registro de la Tabla 9. A partir de dicha tabla se construye la gráfica de la Figura 7.

Tabla 9. Tensión amplificada de la celda de carga asociada a cada peso patrón.

Peso [kg]	Tensión celda amplificada [V]
1	0,10
2	0,15
3	0,20
4	0,25
5	0,30
6	0,35
7	0,40
8	0,45
9	0,50
10	0,55
11	0,60
12	0,65
13	0,70
14	0,75
15	0,80

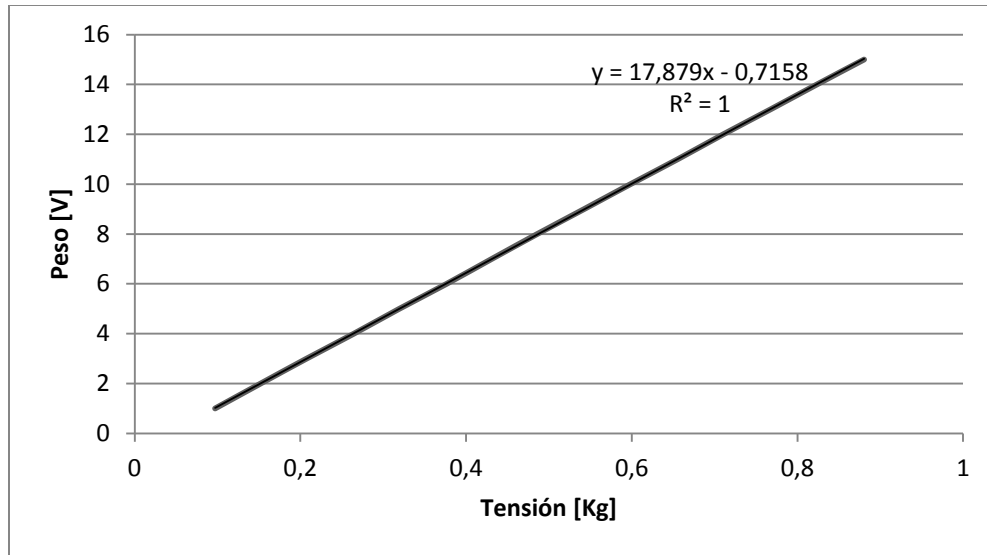


Figura 7. Regresión de la tensión de la celda de carga amplificada

En la Figura 7, nuevamente se evidencia la tendencia lineal del sistema y la ecuación que permite realizar la conversión de unidades de tensión a unidades de Kilogramos.

$$Peso [Kg] = 17,879 * (Tensión AD620 [V]) - 0,7158 \quad (3)$$

En la Tabla 10, se muestra el peso medido por la herramienta, asociado a su respectivo peso patrón, de este modo, se puede obtener un error aproximado de +/- 2 %.

Tabla 10. Error de la herramienta

Peso [kg]	Peso Medido [Kg]	Error [%]
1	1,02	1,646
2	2,00	0,010
3	2,99	0,264
4	4,01	0,280
5	4,99	0,109
6	6,01	0,227
7	6,99	0,171
8	7,97	0,358
9	8,98	0,205
10	9,98	0,172
11	11,00	0,017
12	11,99	0,123
13	13,00	0,033

14	14,01	0,040
15	15,02	0,164

A continuación se muestra el esquema de conexiones de cada una de las etapas de la herramienta desarrollada.

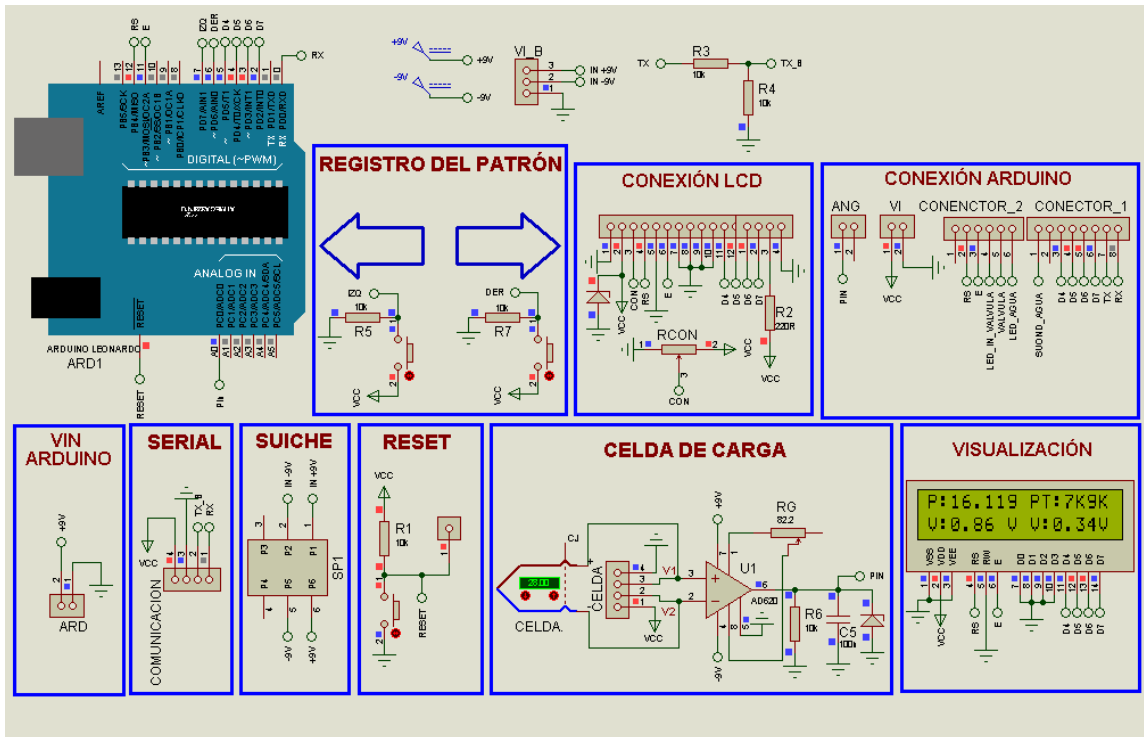


Figura 8. Esquema de conexiones de hardware de la herramienta

Las conexiones de los esquemas de la Figura 8, se pueden interpretar mejor a través de la Tabla 11, teniendo en cuenta que los amplificadores de la etapa “celda de carga”, se les suministra la energía a través de dos baterías de 9 voltios.

Tabla 11. Descripción de las conexiones de la herramienta

Etapas	Pin	Conexión al Arduino	Descripción
Celda de carga	VC	Vin	Alimentación 5v
	V+		Salida de voltaje positivo
	V-		Salida de voltaje negativo
	GND	GND	0v
	PIN	A0	Señal adecuada de la celda de carga

Visualización	VSS	GND	Conexión GND
	VDD	VCC	Alimentación 5v
	VEE	CON	Control de contraste de la LCD
	RS	12	Selección del registro de control/registro de datos: RS=0 Selección del registro de control RS=1 Selección del registro de datos
	R/W	GND	Señal de lectura/escritura R/W=0 El módulo LCD es escrito RW=1 El módulo LCD es leído
	E	11	Señal de activación del módulo LCD E=0 Módulo desconectado E1= Módulo conectado
	D0 - D3	GND	
	D4	5	Bus de datos bi-direccional. A través de estas líneas se realiza la transferencia de información entre el módulo LCD y la plataforma arduino que lo gestiona
	D5	4	
	D6	3	
D7	2		
Reset	RESET	RESET	Interruptor que restablece el arduino
Switche	IZQ	7	Pulsadores que permiten seleccionar el valor de la celda patrón
	DER	6	

9.1.2. Desarrollo del software de la herramienta

El software de la herramienta se encuentra en este documento como ANEXO A al final de este documento.

10. RESULTADOS

Los resultados más significativos obtenidos en el desarrollo de un modelo de mantenimiento están basados en confiabilidad, el cual permite evitar y corregir fallas oportunamente para garantizar el correcto funcionamiento del sistema de pesaje de las cosechadoras de Riopaila Castilla S.A. Por otro lado, como parte de los objetivos del proyecto, se implementó una herramienta que permite diagnosticar y ajustar las celdas de carga descalibradas durante la operación de la cosechadora, con la finalidad de recuperarlas y reutilizarlas nuevamente, de esta manera, se genera una disminución de gastos económicos en la compañía, teniendo en cuenta que normalmente las celdas averiadas, se sustitúan por unas nuevas.



Figura 9. Prueba de la herramienta de diagnóstico y calibración de celdas de carga

En la Figura 9 se visualiza en funcionamiento la herramienta de diagnóstico y calibración de las celdas de carga. Se realizó la prueba con un peso patrón de 10 [Kg], (2 pesos de 5 [Kg]) y la medición es de 10,02 [Kg], por lo tanto la medición tiene aproximadamente un error de 0.25 %, de este modo, al ser mínimo el error, es posible afirmar que la celda se encuentra en buen estado y calibrada. De tener un error mayor al 10 % la celda de carga debe someterse a un proceso de deflexión utilizando tornillo sinfín como prensa como se muestra en la Figura 10 y 11, aunque no es un proceso avalado por el fabricante, es un método que se ha estado poniendo a prueba por parte de Riopaila Castilla S.A.



Figura 10. Celda de carga con la herramienta de calibración.



Figura 11. Calibración y ajuste de las celdas de carga en el proceso de pesaje.

Finalmente, luego de haber recuperado un lote de celdas de carga las cuales fueron reutilizadas en cosechadoras de Riopaila Castilla, se comparó la cantidad de caña recolectada y registrada por el sistema de *Emvicaña* con la cantidad de caña registrada por la báscula ubicada en el ingenio luego de recolectarse la caña en vagones. De dicha manera, se obtuvieron los datos mostrados en la Tabla 12.

Tabla 12. Verificación de los datos obtenidos con el sistema *Emvicaña* con los obtenidos en la báscula cañera del Ingenio.

Vagón	Bascula Cañera [Toneladas]	Bascula Emvicaña [Toneladas]	% Error
20921	18,12	15,49	14,51
28363	13,93	12,78	8,24
38292	13,36	13,61	1,90
Total	45,41	41,89	7,76

En la Tabla 13, se puede visualizar que el error total no supera el 10 %, lo cual es un margen de error aceptable en el proceso, Dicho error es derivado del error ponderado de las 4 celdas del sistema de pesaje de la cosechadora, y por posibles pérdidas de caña en el transporte y el traspaso entre la cosechadora y los vagones (unidades de transporte).

Por otro lado, para referirse a los beneficios económicos que ha tenido Riopaila Castilla S.A. con la implementación de la herramienta de calibración; es importante saber que el precio aproximado en el mercado actual de una celda de carga es \$ 581.350, teniendo en cuenta que la empresa ha adquirido 13 cosechadoras en planta castilla y que el sistema de pesaje de cada cosechadora tiene instaladas 4 celdas de carga, es correcto afirmar que se debe poner en operación 52 celdas. En la última temporada (4 meses) desde el mes de marzo de 2017 a junio de 2017 se averiaron 24 celdas de carga de las cuales 11 fueron recuperadas. En cada temporada comprendida por 4 meses, la empresa adquiere normalmente un promedio de 20 celdas de carga para sustituir las celdas averiadas, es decir, que para la última temporada, se obtuvo un ahorro de \$ 6'394.850, equivalente al 55% del valor de la compra.

Otro beneficio que tiene la empresa se ve reflejado a través de la implementación del plan de mantenimiento basado en confiabilidad, donde se registró el tiempo improductivo de una de las cosechadoras del ingenio por el concepto de mantenimiento, cuyos datos se registran en la Tabla 13, teniendo en cuenta que cada hora de parada de la cosechadora representa un costo de \$ 187.600.

Tabla 13. Costo y horas de mantenimiento ponderadas en el mes de junio de 2017 sin emplear el plan de mantenimiento basado en confiabilidad y julio de 2017 empleando el plan de mantenimiento.

Mes	Plan de mantenimiento	Horas	Costo por hora	Total costo
Junio de 2017	sin RCM	158,4	\$ 187.600	\$ 29.715.840
Julio de 2017	con RCM	126	\$ 187.600	\$ 23.637.600
Ahorro por cosechadora/mes				\$ 6.078.240

De este modo, la empresa obtuvo un ahorro de \$ 79'017.120 en mes de julio al emplear el plan de mantenimiento basado en confiabilidad en las 13 cosechadoras, el cual representa el 20,45%.

11. CONCLUSIONES

- Con el desarrollo del proyecto se evidenció las causa raíces que provocaban daños en las celdas de carga, y a partir del modelo de mantenimiento centrado a la confiabilidad con el análisis de fallas y consecuencias, medidas preventivas y correctivas, se logró disminuir el daño físico en las celdas y prolongar su funcionamiento en el sistema de pesaje.
- Con el modelo de mantenimiento implementado, se logró disminuir fallas que afectaban el buen funcionamiento del sistema de pesaje de la cosechadora, y dar soluciones rápidas y oportunas a las fallas que se presenten.
- Con la implementación de la herramienta de diagnóstico y calibración de las celdas, se logró mejorar los tiempos de respuesta en cuanto a mantenimiento y al diagnóstico del estado operativo de los sensores. También disminuyó la cantidad de técnicos requeridos para realizar dicha tarea.
- Gracias a la implementación de la herramienta de diagnóstico y calibración de las celdas, se logró recuperar el 45,83% de las celdas que normalmente eran remplazadas por errores en las medidas, lo cual generó un ahorro significativo de dinero de 55% para Riopaila Castilla S.A.
- Con el uso de la herramienta de diagnóstico y calibración, se logra patronar las celdas de carga descalibradas, que anteriormente eran desechadas por no contar con la posibilidad de reutilizarlas.

12. RECOMENDACIONES

- Es importante cumplir de manera estricta con los tiempos de mantenimiento correctivo y preventivo, para prolongar la vida útil y lograr la mayor disponibilidad del sistema de pesaje como de otros sistemas relacionados a este, para evitar fallas potenciales y de mayor impacto en la máquina cosechadora, de modo que puede evitar paradas prolongadas, una baja productividad en la cosecha y por consiguiente importantes pérdidas económicas para la empresa.
- Monitorear constantemente el comportamiento en el tiempo de las celdas de carga recuperadas para observar cómo responden y así determinar la efectividad del trabajo de mantenimiento realizado sobre la celda, para luego hacer las correcciones pertinentes en el plan de mantenimiento.

13. REFERENCIAS

- Riopaila Castilla S.A.* (2017). Recuperado el 12 de 06 de 2017, de https://www.riopaila-castilla.com/index.php?option=com_content&view=article&id=4&Itemid=2
- 5 Hertz Electronica. (09 de 03 de 2017). *5HertzElectronica*. Obtenido de <http://5hertz.com/tutoriales/?p=690>
- Alvarizaes, R. (09 de 03 de 2010). Elaboración de programa de mantenimiento preventivo de las unidades de transporte local de DHL GLOBAL FORWARDING. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Araujo, R. L. (s.f.). Recuperado el 13 de 06 de 2017, de RCM Mantenimiento Centrado en Fiabilidad: <http://www.ingenieriamantenimiento.org/analisis-de-fallos/rcm-mantenimiento/>
- Case, a. (2014). *Manual de servicio cosechadora de caña A8000 A8800*. CNH industrial latin america ltda.
- Cerri, D., & Graziano, P. (2003). Brasil: Facultad de ingeniería agrícola, UNACAMP.
- Coughlin, R. F., & Driscoll, F. F. (1999). *Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales, Quinta edicion*. Mexico: Prentice Hall.
- Cox, G. J. (21 de 01 de 2003). Mass flow rate sensor for sugar cane harvester. *Mass flow rate sensor for sugar cane harvester*. US 6508049 B1.
- Elimperioelectricista*. (s.f.). Recuperado el 13 de 06 de 2017, de <https://elimperioelectricista.wikispaces.com/Mediciones+El%C3%A9ctricas>
- Futek. (2012). *Futek, Advanced sensor Technology .inc*. Recuperado el 06 de 09 de 2017, de IPM650 Product Manual: https://www.futek.com/files/Pdf/Manuals_and_Technical_Documents/IPM650Manual.pdf
- Garcia Jimenez, S. (2017). Monitores de rendimiento y su uso para agricultura de precisión. *Monitores de rendimiento EMVICANA*. Grupo empresarial Riopaila Castilla, Colombia: Seminario Agricultura de precision y herramientas tecnologicas por tecnicaña.org.
- Mantovani, E. C., & Magdalena, C. (2014). *Manual de agricultura de precisión*. PROCISUR - Montevideo: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).

- Orozco, Ó. A., & Ramírez, G. L. (11 de 12 de 2015). Sistemas de información enfocados en tecnologías de agricultura de precisión y aplicables a la caña de azúcar, una revisión. Medellín: Revista Ingenierías Universidad de Medellín .
- Renovetec. (2013). *Ingeniería del mantenimiento*. Recuperado el 13 de 16 de 2017, de Plan de mantenimiento basado en RCM: <http://ingenieriadelmantenimiento.com/index.php/26-articulos-destacados/17-plan-de-mantenimiento-basado-en-rcm>
- Riopaila Castilla S.A. (s.f.). Recuperado el 02 de 06 de 2017, de Copyright Riopaila Castilla S.A. 2013: https://www.riopaila-castilla.com/index.php?option=com_content&view=article&id=33&Itemid=38
- Sierra, G. (09 de 03 de 2005). Programa de mantenimiento preventivo para la empresa metalmecánica industrias AVM S.A. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Vishay Precision Group. (2014). *vishaypg*. Recuperado el 06 de 09 de 2017, de Model LC-II - Datasheet - Vishay Precision Group: <http://www.vishaypg.com/docs/11889/LC-II.pdf>

14. ANEXOS

ANEXO A

```
#include <LiquidCrystal.h>//incluir libreria de LCD
LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2); //incluir libreria de pines

//DEFINO VARIABLES
int i=0;

float peso(){ //Función peso
  int dato; //Variable donde se guarda el valor de conversion del AD620
  int entrada_peso = A0; //Defino A0 como entrada de la señal del AD620
  float voltaje_true; //Variable decimal donde se guarda el voltaje verdadero
del AD620
  float equi_voltaje; //Variable donde se guarda el resultado de una operación
  float peso_kg; //Variable donde se guarda el valor en Kg

//////////PESO EN Kg//////////
  float arreglo;
  arreglo=0;
  for (i=0;i<9000;i++){
    dato = analogRead(entrada_peso); //Lee la señal analoga del AD620
    equi_voltaje = (dato * 500.0)/(1023.0);
    arreglo=arreglo+equi_voltaje;
  }

  voltaje_true = (arreglo / (100.0*9000.0)); //voltaje verdadero del AD620
  peso_kg = ( (17.879 * voltaje_true) - 0.7158); //Ecuacion caracteristica de
la celda TDA
  return(peso_kg); //Retorna el valor del peso en Kg
} //Fin funcion peso
//////////

int izquierda = 9;
int derecha = 8;
int cont = 0;

void setup() { //Funcion de inicio de trabajo
  lcd.begin(16,2); //numero de columnas y filas (COLUMNAS,FILAS)
  pinMode(izquierda, INPUT);
  pinMode(derecha, INPUT);

  lcd.setCursor(4,0); // Ubicacion del mensaje "INGENIO" en la LCD
  delay(2000); //Retardo de 2 segundos
  lcd.print("INGENIO"); //Imprimo mensaje "INGENIO"
  delay(2000); //Retardo de 2 segundos
  lcd.clear(); //Borro todos los mensajes de la LCD
  lcd.setCursor(3,0); //Ubicacion del mensaje " RIOPAILA" en la LCD
  lcd.print(" RIOPAILA"); ////Imprimo mensaje " RIOPAILA"
  lcd.setCursor(4,1); //Ubicacion del mensaje " CASTILLA" en la LCD
```



```

lcd.print("CASTILLA"); //Imprimo mensaje "CASTILLA"
delay(3000); //Retardo de 3 segundos
lcd.clear(); //Borro todos los mensajes de la LCD
lcd.setCursor(2,0); //Ubicacion del mensaje "CALIBRADOR DE "
lcd.print("CALIBRADOR DE "); //Imprimo el emnsaje "CALIBRADOR DE "
lcd.setCursor(1,1); //Ubicacion del mensaje "CELDA DE CARGA"
lcd.print("CELDA DE CARGA"); //Imprimo el mensaje "CELDA DE CARGA"
delay(3000); //Retardo de 3 segundos
lcd.clear(); //Borro todos los mensajes de la LCD
lcd.print("P:      Kg"); //Imprimo el mensaje "PESO=          Kg"
lcd.setCursor(9,0);
lcd.print("PT: Kg");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("Error =          %");

//for (i=0;i<samples;i++){
//  reading[i]=0;
//}
} //Fin fucion setup

void loop() { //Funcion para ejecutar de forma ciclica el codigo contenido en
esta funcion

  float peso_tedeo = peso(); //Creo funcion peso y la guardo en peso_tedeo
  //float salida_AD620 = voltaje(); //Creo funcion voltaje y la guardo en
salida_AD620
  lcd.setCursor(2,0); //Ubicacion para mostrar el peso de la celda TDA
  lcd.print("      ");
  lcd.setCursor(2,0);
  lcd.print(peso_tedeo); //Imprimo el peso de la celda TDA
  //lcd.setCursor(0,1); //Ubicacion para mostrar el mensaje "VOL AD620=
V"
  //lcd.print("V:      V");
  //lcd.setCursor(2,1); //Ubicacion para mostrar el voltje de la celda TDA
  //lcd.print(salida_AD620); //Imprimo el voltaje de la celda TDA
  float e= (float) ((cont-peso_tedeo)/cont)*100.0;
  lcd.setCursor(8,1);
  lcd.print("      ");
  lcd.setCursor(8,1);
  lcd.print(abs(e),2);
  //delay(250);

//////////REGISTRO AVANCE DE PESO PATRON//////////
if(digitalRead(derecha)==1) {
  //delay(100);
  cont = cont+1; //incremento en 1 cont para avanzar registro
  if(cont>99) {
    cont=99;
  }
  lcd.setCursor(12,0);
  lcd.print("  ");
  lcd.setCursor(12,0);
  lcd.print(cont);
}

//////////REGISTRO RETROCEDE DE PESO PATRON//////////
if(digitalRead(izquierda)==1) {

```

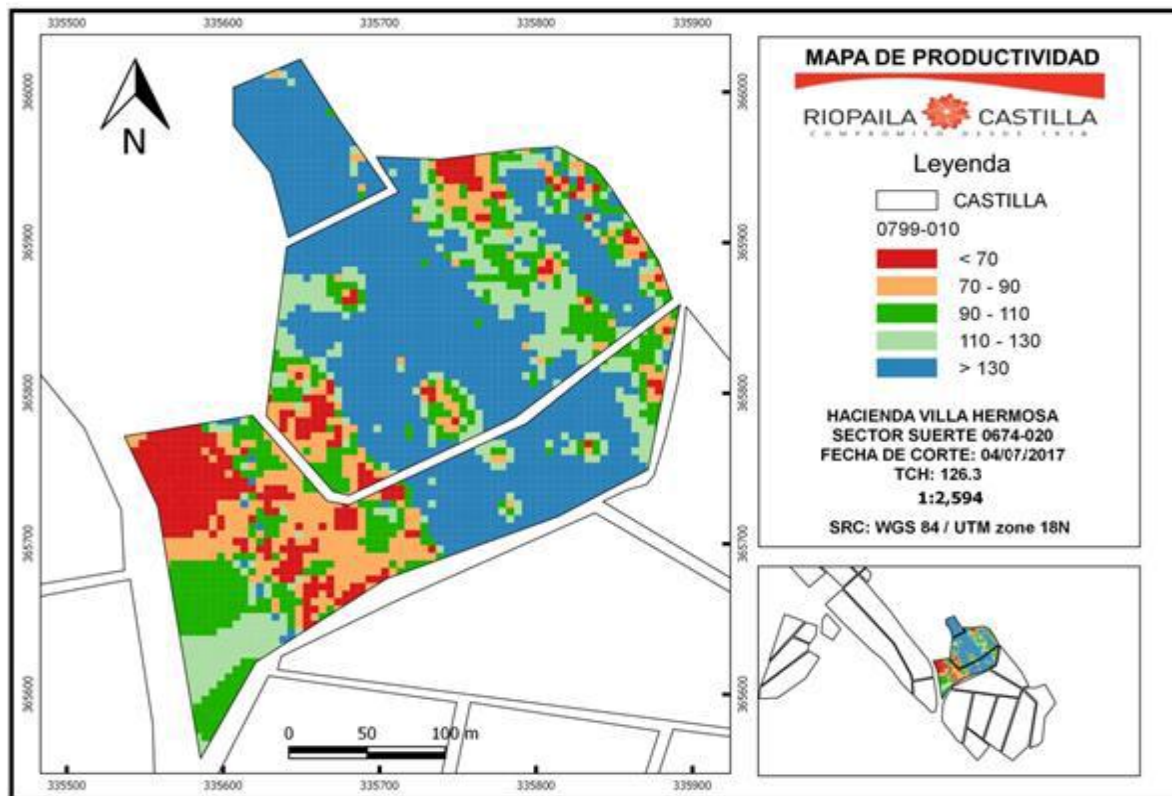
```

//delay(100);
cont = cont-1; ////decremento en 1 cont para retroceder registro
if(cont<0){
    cont=0;
}
lcd.setCursor(12,0);
lcd.print(" ");
lcd.setCursor(12,0);
lcd.print(cont);
}
} //fin funcion loop

```

ANEXO B

Mapa de productividad donde se reflejan los diferentes niveles de rendimiento del cultivo en toneladas de caña por hectárea (TCH) con referencia geográfica de un lote cosechado del Ingenio.



Fuente: Mapa de Rendimiento (Riopaila Castilla, 2017) Área suerte: 0674-020 (10,38 ha)

15. GLOSARIO

Amplificador de instrumentación: es un amplificador diferencial tensión-tensión cuya ganancia puede establecerse de forma muy precisa y que ha sido optimizado para que opere de acuerdo a su propia especificación aún en un entorno hostil. Es un elemento esencial de los sistemas de medida, en los que se ensambla como un bloque funcional que ofrece características funcionales propias e independientes de los restantes elementos con los que interacciona.

Arduino: es una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un microcontrolador Atmega y un entorno de desarrollo, diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios.

Cosecha mecánica: se refiere labores de cosecha para extraer el cultivo integral con cosechadoras de la caña de azúcar que hacen varias operaciones tales como corte, picado de los tallos (troceado), limpieza de la caña y cargue al equipo de transporte.

Dicho de un aparato, de una máquina, de un instrumento construido con singular esmero para obtener los mejores resultados posibles. Báscula

Elevador: está conformado por una tolva que acumula los trozos de caña, una base metálica que soporta una serie de tablillas que transportan la caña troceada y al final de la estructura vierte la carga pesada al vagón o remolque.

Extractor Primario: ventilador de limpieza conformado por cuatro aspas montado directamente al eje del motor hidráulico, cubierta por un capuchón con una velocidad variable de 800-1300rpm para generar alta turbulencia de aire para extraer la basura de la materia prima.

Mantenimiento correctivo: se denomina aquel que se realiza con la finalidad de reparar fallos o defectos que se presenten en equipos y maquinarias.

Mapa de productividad: son la representación gráfica de la productividad de un lote en un ciclo productivo específico, donde se reflejan los diferentes niveles de rendimiento del cultivo.

Microcontrolador: es un circuito integrado programable, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria. Está compuesto de varios bloques funcionales, los cuales cumplen una tarea específica.

Monitor de rendimiento: se refiere a una pantalla a color sensible al tacto. Recolecta datos para la elaboración de mapas de rendimiento en tiempo real. Informa parámetros de producción, superficie cosechada, kilos por lote, promedios, velocidad de avance, y otros datos de cosecha. Los datos son almacenados en memoria interna de la pantalla. El sistema incluye un receptor GPS interno de alta precisión. Unidades métricas e idioma en español.

Precisión: es aquella que se utiliza para hablar de la exactitud o la puntualidad de un sistema puede tener en su funcionamiento.

Proceso de tara: se refiere en las balanzas electrónicas, antes de pesar la muestra debe ponerse a cero la lectura con el contenedor (plataforma). Es decir desprejar el peso del contenedor y dejar a lectura a cero listo para pesar la materia prima.

Proteus: es un software muy utilizado por los ingenieros electrónicos para simular circuitos esquemáticos digitales y análogos en el entorno de ISIS, además de esto tiene la posibilidad de montar los circuitos en PCB, es decir físicos, en el entorno de ARES.

Rendimiento agrícola. es la relación de la producción total de un cierto cultivo cosechado por hectárea de terreno utilizada. Se mide usualmente productividad, que representan claramente las áreas homogéneas en términos de productividad para la caña de azúcar en toneladas de caña por hectáreas (TCH).

Sistema de Posicionamiento Global: más conocido por sus siglas en inglés, **GPS** (siglas de *Global Positioning System*), es un sistema que permite determinar en toda la Tierra la posición de un objeto (una persona, un vehículo, un lote) con una precisión de hasta centímetros (si se utiliza GPS diferencial), aunque lo habitual son unos pocos metros de precisión. El sistema fue desarrollado, instalado y empleado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos. Para determinar las posiciones en el globo, el sistema GPS se sirve de 24 satélites y utiliza la trilateración.

Tablillas: estructura tubular metálica que sirve para llevar la carga de la materia prima (caña troceada) distribuida uniformemente en la cadena del elevador también se le llama *traviesas*.