

Conference Paper

Device for Determining Variations in Stem Thickness of Trees

Dispositivo para determinar variaciones en el grosor del tallo de los árboles

F. Freire^{1,2}, J. Chimarro^{2*}

¹Carrera de Mecatrónica, Universidad UTE, Rumipamba y, Bourgeois, Quito 170147

²Centro de Física, Universidad Central del Ecuador, Av. Universitaria, Quito 170129

IX CONGRESO
INTERNACIONAL DE
INVESTIGACIÓN DE LA RED
ECUATORIANA DE
UNIVERSIDADES Y
ESCUELAS POLITÉCNICAS Y
IX CONGRESO
INTERNACIONAL DE
CIENCIA TECNOLOGÍA
EMPRENDIMIENTO E
INNOVACIÓN
SECTEI-ESPOCH 2022

Corresponding Author: J.
Chimarro; email:
jochimarro@uce.edu.ec

Published: 9 November 2023

Production and Hosting by
Knowledge E

© Freire, Chimarro. This article is distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License](#), which permits unrestricted use and redistribution provided that the original author and source are credited.

Abstract

In precision agriculture, obtaining accurate information in real-time is essential when making relevant decisions; for example, to determine the hydric stress of plants, continuous monitoring of different plant variables such as stem thickness is required, since this is a very relevant indicator to define the water need. For this purpose, a low-cost prototype was developed to constantly monitor the fluctuations of the diameter of the trunk of a tree. The device has been designed so that it can acquire information autonomously with the help of a control software,. The sensitivity of the device allows measuring variations of up to 8 mm, which is considered optimal for this type of need. During the development of the prototype, the mechanical and electronic structure was designed using simulation software, considering the technical characteristics and functional requirements of the sensor, a control system and power supply. The prototype was built using a 3D printer, the mathematical model used in the control system was validated in a controlled environment presenting a percentage error of 2%, which is considered acceptable, prior to the implementation of the prototype in the field.

Keywords: *agriculture, water stress, log diameter, 3D model.*

Resumen

En la agricultura de precisión la obtención de información precisa y en tiempo real es fundamental al momento de tomar decisiones relevantes; por ejemplo, para determinar el estrés hídrico de las plantas se requiere de un monitoreo continuo de diferentes variables de la planta como el grosor del tallo puesto que este es un indicador de mucha relevancia para poder definir la necesidad hídrica. Con esta finalidad se desarrolló un prototipo de bajo costo para monitorear constantemente las fluctuaciones del diámetro del tronco de un árbol, el dispositivo ha sido diseñado de manera que pueda adquirir información de forma autónoma apoyado por un software de control, la sensibilidad del dispositivo permite medir variaciones hasta de 8 mm, lo cual se considera óptimo para este tipo de necesidad. Durante el desarrollo del prototipo se diseñó la estructura mecánica y electrónica utilizando software de simulación, tomando en cuenta las características técnicas y requerimientos funcionales del sensor, del sistema de control y alimentación. El prototipo se construyó utilizando una impresora 3D, el modelo matemático utilizado en el sistema de control fue validados en un entorno controlado presentando un error porcentual del 2 %, lo cual se considera aceptable, previo a la implementación del prototipo en campo.

Palabras Clave: *Agricultura, Estrés hídrico, Diámetro de troco, Modelo 3D.*

 OPEN ACCESS



1. Introducción

En la agricultura moderna obtener información precisa y en tiempo real de los cultivos es fundamental, para analizar el comportamiento de diferentes variables que influyen de manera directa en el crecimiento de las plantas y la calidad del fruto, entre estas variables está el estrés hídrico, para la cual, uno de sus indicadores principales constituye la contracción del troco; comprender el estrés hídrico proporciona información valiosa sobre el desarrollo de los cultivos y optimiza la programación del riego [1, 2, 3].

En ciertas regiones el agua de riego es escasa, por lo que el uso de técnicas precisas de riego con horarios establecidos en tiempos adecuados es esencial para el desarrollo de las plantas [4], para esto, el realizar mediciones continuas del estrés hídrico de la planta permiten tomar decisiones más precisas al momento de realizar el riego puesto que solamente se realizaría la misma cuando sea necesario; esto optimiza la cantidad de agua utilizada mejora la productividad y produce un bienestar socioeconómico para las zonas agrícolas [5].

Para Llerena [6], el estrés hídrico produce efectos negativos en las funciones vitales de la planta, así como en muchos procesos fisiológicos como la turgencia celular, reducción de la tasa de expansión celular así como la disminución de la síntesis de pared celular y reducción de síntesis de proteínas. Para el cacao el riego tiene que fluctuar entre 1500 – 2500 mm en las zonas bajas más cálidas y 1200 – 1500 mm en los valles, es de tener en cuenta que el cacao es muy sensible a la escasez de agua por lo que implementar un sistema de drenaje adecuado es necesario para evitar el estrés hídrico [7], de igual manera, la temperatura es esencial para el crecimiento y floración, en el cual las temperaturas adecuadas rondan los 21 °C y 25 °C respectivamente, puesto que temperaturas más bajas o extremas provocan alteraciones fisiológicas [7, 8].

2. Materiales y Métodos

El dispositivo fue desarrollado utilizando la metodología del modelo en V, Figura 1 [10], aplicado al desarrollo de sistemas mecatrónicos que comprende de las siguientes etapas: definición de requerimientos, diseño del sistema, modelado y análisis del modelo e integración del sistema para obtener el producto final [11].

Los requerimientos fueron establecidos considerando factores económicos, ambientales y de funcionamiento del dispositivo.

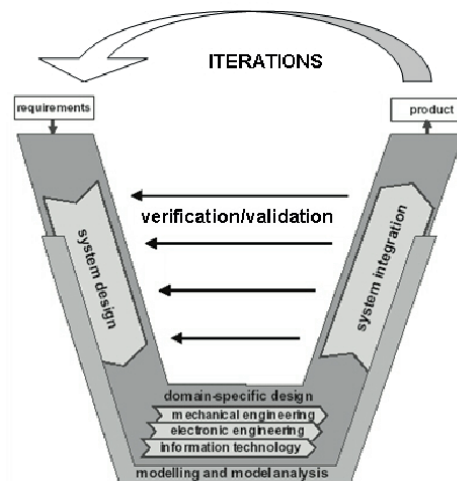


Figura 1

Modelo en V [10].

2.1. Sensor de Efecto Hall

Un sensor de efecto hall (Figura 2) se basa en el efecto del mismo nombre, haciendo que un conductor afectado por un campo magnético genere una variación de tensión; estos sensores utilizan semiconductores que reemplazan a los metales, esto en pro de evitar la conductividad y ayudar a la sensibilidad, este tipo de sensores presentan una ventaja al poder ser usados en ambientes adversos como humedad, polvo y vibraciones [12].



Figura 2

Sensor de efecto hall [13].

En la Tabla I podemos observar las características del sensor KY – 024.

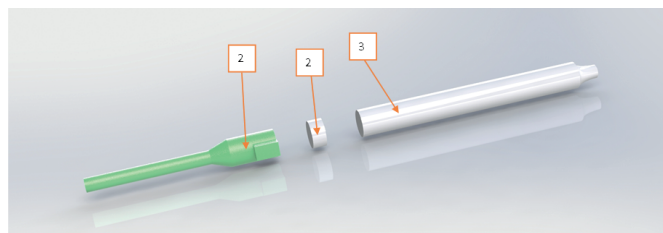
Tabla 1

Sensor KY – 024 [13].

SENSOR KY – 024	
Alimentación	3 a 5 VDC
Señal digital	Integrada
Señal analógica	Integrada
Material	PCB
Dimensiones	4,0 x 2,6 x 3,2 mm

2.2. Sistema de eje de punto

El sistema de eje de punto (Figura 3) es el elemento principal en la toma de datos, consiste en un sistema conformado de un eje plástico (Figura 3 - 1), un imán de neodimio (Figura 3 - 2) y un eje de acero que termina en punta (Figura 3 - 3) el cual está encargado de transmitir la expansión y contracción del tallo de los árboles de cacao, el diseño del eje plástico consta de una muesca sobresaliente que evita la rotación del imán de neodimio, puesto que, una variación de la posición del imán provoca una lectura de datos errónea.

**Figura 3**

Sistema de eje de punto.

2.3. Estructura de soporte

El diseño de la estructura de soporte (Figura 4) se desarrolló respondiendo a las necesidades del proyecto y características de los árboles de cacao; se utilizó software CAD/CAM [14] para el diseño y una impresora 3D [15] para la creación del prototipo en plástico (ABS) [16].

Posteriormente se procedió a realizar simulaciones y pruebas con la estructura de soporte para evaluar su funcionalidad, los estudios de esfuerzos con diferentes materiales permitieron determinar que el plástico ABS, es un material apto para este tipo de proyectos.

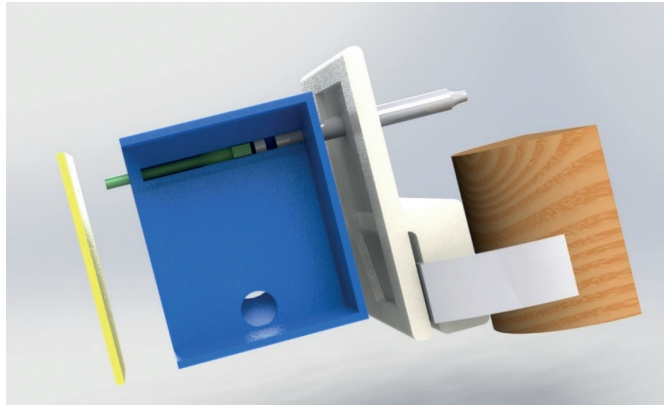


Figura 4

Estructura de soporte.

Las simulaciones se basaron en determinar el criterio de Von Mises [17] para diferentes materiales y cargas sometidas a la estructura de soporte anclada al tallo de un árbol, utilizando el paquete SolidWorks [15]. En la Figura 5 se presenta el resultado de la simulación, aplicando una fuerza de 10 N, el resultado está ligeramente por debajo del límite elástico del material.

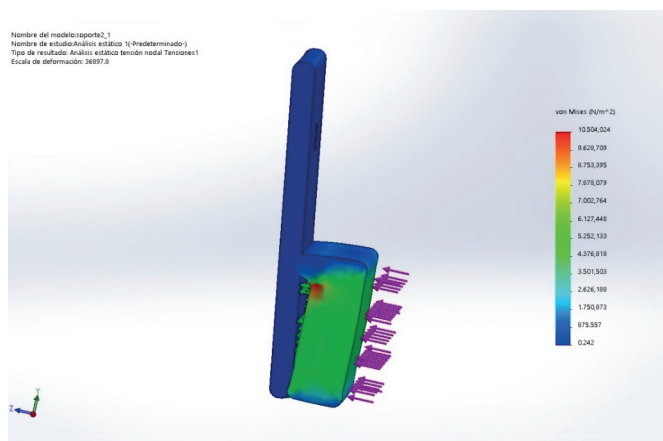


Figura 5

Esfuerzos de Von Mises.

2.4. Sistema de control

Para implementar el sistema de control [18] debemos modelarlo, para lo cual, se obtiene la información requerida del sensor KY – 024 utilizado, mediante la variación controlada del eje de punto, esto se puede observar en la Figura 6.

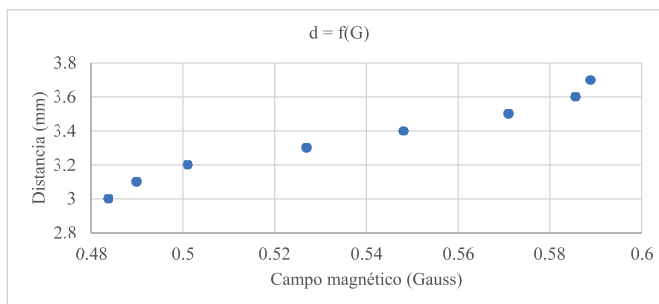


Figura 6

Datos obtenidos.

A partir de un análisis de la Figura 6, se puede determinar que la relación distancia vs. Campo magnético, no representa una función lineal [19]; por lo tanto, utilizar una regresión lineal simple no es factible, de ahí que una regresión polinómica es la adecuada para ajustar los valores presentados a una ecuación que pueda lograr un error mínimo con los valores obtenidos.

La ecuación general de la regresión polinómica es [20]:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + \dots + a_n \cdot x^n \tag{1}$$

Siendo que la suma de los cuadrados de los errores sería:

$$S_r = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 \cdot x_i - a_2 \cdot x_i^2 - \dots - a_m \cdot x_i^m)^2 \tag{2}$$

En donde los coeficientes de deben minimizar a una suma de cuadrados:

$$\begin{bmatrix}
 n & \sum x_{1i} & \sum x_{2i} & \dots & \sum x_{mi} \\
 \sum x_{1i} & \sum x_{1i}^2 & \sum x_{2i}x_{1i} & \dots & \sum x_{1i}x_{mi} \\
 \sum x_{2i} & \sum x_{2i}x_{1i} & \sum x_{2i}^2 & \dots & \sum x_{2i}x_{mi} \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\
 \sum x_{mi} & \sum x_{mi}x_{1i} & \sum x_{mi}x_{2i} & \dots & \sum x_{mi}^2
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 a_0 \\
 a_1 \\
 a_2 \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 a_m
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 \sum y_i \\
 \sum x_{1i}y_i \\
 \sum x_{2i}y_i \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 \sum x_{mi}y_i
 \end{bmatrix} \tag{3}$$

Teniendo en cuenta los datos obtenidos por sensor (Tabla II)

Podemos realizar una tabla con las aproximaciones necesarias para el cálculo de la regresión (Tabla III).



Tabla 2

Datos Obtenidos por el sensor.

x	0,484	0,489	0,501	0,527	0,548	0,571	0,586	0,589
y	3	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7

Tabla 3

Mínimos cuadrados.

n	y	x	x ²	x ³	x ⁴	x ⁵	x ⁶	x • y	x ² • y	x ³ • y
1	3	0,484	0,234	0,113	0,055	0,026	0,013	1,451	0,702	0,340
2	3,1	0,490	0,240	0,118	0,058	0,028	0,014	1,519	0,744	0,365
3	3,2	0,501	0,251	0,126	0,063	0,032	0,016	1,603	0,803	0,402
4	3,3	0,527	0,278	0,146	0,077	0,041	0,021	1,739	0,916	0,483
5	3,4	0,548	0,300	0,165	0,090	0,049	0,027	1,864	1,021	0,560
6	3,5	0,571	0,326	0,186	0,106	0,061	0,035	1,999	1,141	0,652
7	3,6	0,586	0,343	0,201	0,118	0,069	0,040	2,108	1,235	0,723
8	3,7	0,589	0,347	0,204	0,120	0,071	0,042	2,179	1,283	0,755
∑	26,8	4,295	2,319	1,259	0,687	0,377	0,208	14,461	7,846	4,279

La cual nos genera una matriz con 4 ecuaciones 4 incógnitas (Tabla IV).

Tabla 4

Matriz de ecuaciones.

a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	
∑x ³	∑x ²	∑x	8	∑y
∑x ⁴	∑x ³	∑x ²	∑x	∑x • y
∑x ⁵	∑x ⁴	∑x ³	∑x ²	∑x ² • y
∑x ⁶	∑x ⁵	∑x ⁴	∑x ³	∑x ³ • y

Realizando las operaciones tenemos la ecuación de nuestro modelo:

$$y = 298.88x^3 - 480.75x^2 + 262.74x - 45.39 \tag{4}$$

3. Resultados y Discusión

Para comprobar la funcionalidad del prototipo, se realizan pruebas controladas con un calibrador para comprobar la funcionalidad del mismo una vez implementada la ecuación 4 en el sistema de control, los datos obtenidos por el prototipo se muestran en la Tabla V, es de notar que al momento de realizar comparaciones de valores reales con los presentados por el prototipo el mismo presenta un error porcentual que no supera



el 1,37 % (ver Figura 7) lo cual nos indica que la ecuación del modelo implementado es correcta.

Tabla 5

Mediciones de distancias.

Valor Teórico	Valor Calculado	Error Porcentual
3	3,04	1,37%
3,1	3,09	0,46%
3,2	3,16	1,34%
3,3	3,30	0,02%
3,4	3,41	0,16%
3,5	3,53	0,90%
3,6	3,63	0,77%
3,7	3,65	1,31%

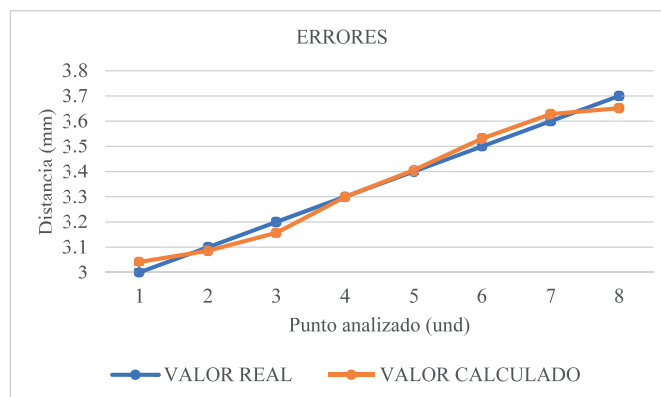


Figura 7

Errores.

4. Conclusiones

El prototipo (dendrómetro) en las pruebas realizadas presenta un desenvolvimiento satisfactorio, puesto que permite medir variaciones en un rango de 8 mm, con un error porcentual que no supera el 1.37 %, esto ratifica que el prototipo desarrollado está dentro de los parámetros adecuados y puede ser utilizado para realizar las mediciones de uno de los indicadores del estrés hídrico.

Para comprobar la funcionalidad operacional, el prototipo será llevado a campo, dónde se realizarán mediciones reales de la variación del tronco de los árboles de cacao, posterior a esto de verá la necesidad modificar la estructura y/o recalibrar el sensor para obtener mediciones más robustas



References

- [1] Freire Carrera FR, Chadrina O, Moreano Velasco J, Torres Blacio B, Garcia Orellana YD. Prototipo de un sistema de riego automatizado en árboles de cacao (*Theobroma cacao*) controlado vía internet con dispositivos móviles. *Av Investig En Ing.* 2019;16(2):93–106.
- [2] Clonch C, Huynh M, Goto B, Levin A, Selker J, Udell C. High precision zero-friction magnetic dendrometer. *HardwareX.* 1 October 2021;10:e00248. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2021.e00248>
- [3] Martínez Covalada HJ, Espinal CF, Ortiz Hermida L. La cadena del azúcar en Colombia: una mirada global de su estructura y dinámica 1991-2005. 2005.
- [4] Fernández JE, Cuevas MV. Irrigation scheduling from stem diameter variations: A review. *Agricultural and Forest Meteorology.* 15 February 2010;150(2):135-151. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.11.006>
- [5] Rada F, Jaimez RE, García-Núñez C, Azócar A. Relaciones hídricas e intercambio de gases en *Theobroma cacao* var. Guasare bajo períodos de déficit hídrico. *Revista de la Facultad de Agronomía.* 2005.
- [6] Llerena mejía IR. Disminución del estrés hídrico en el cultivo de cacao (*theobroma cacao* L.) Mediante el uso de algas marinas la troncal-cañar [phD thesis]. Universidad agraria del Ecuador; 2020.
- [7] Orozco L, López A. Balance de agua y requerimientos de riego en cacao. *Esquina Téc.* 2016;6(2):1–7.
- [8] Quiroz VJ, Amores F. Rehabilitación de plantaciones tradicionales de cacao en Ecuador. *Rehabilitation of traditional cocoa plantations in Ecuador* [Internet]. 2002 [cited 2023, 16 March]. Available from: <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/6771>
- [9] Garcia Lozano J, Moreno Fonseca LP. Respuestas fisiológicas de *Theobroma cacao* L. en etapa de vivero a la disponibilidad de agua en el suelo. *Acta Agronómica* [Internet]. 2015, 28 September[cited 2023, 16 March];65(1). Available from: http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/48161
- [10] Sell R, Tamre M. Integration of V-model and SysML for advanced mechatronics system design. 2005.
- [11] Lopez Fernandez DF, Mideros D. Diseño de un Sistema Inteligente y Compacto de Iluminación. *Enfoque UTE.* 2018, 30 March;9(1):226-235. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n1.283>



- [12] Villarroel Porras JA. Diseño y construcción de un sistema de registro y visualización de la velocidad real de un vehículo en circulación.
- [13] Cortés-Cortés JA. Evaluación de sensores para su conexión a tarjeta Arduino. 21 September 2017 [cited 15 March 2023]; Available from: <http://tauja.ujaen.es/jspui/handle/10953.1/7997>
- [14] Alghazzawi TF. Advancements in CAD/CAM technology: Options for practical implementation. *Journal of Prosthodontic Research*. 1 April 2016;60(2):72-84.
- [15] Surange V, Gharat P. 3D printing process using fused deposition modelling (FDM). *International Research Journal of Engineering and Technology*. 19 March 2016;Volume 3.
- [16] Roy R, Mukhopadhyay A. Tribological studies of 3D printed ABS and PLA plastic parts. *Mater Today Proceedings*. 1 January 2021;41:856-862.
- [17] Eraslan O, inan Ö. The effect of thread design on stress distribution in a solid screw implant: A 3D finite element analysis. *Clinical Oral Investigations*. 1 August 2010;14(4):411-416.
- [18] Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú, Ascencios d. Calibración, validación y automatización del sistema de riego por goteo subterráneo usando un microcontrolador arduino. *Revista de Investigaciones Altoandinas*. 23 January 2020;22(1):95-105.
- [19] Atorino JI, Bortolín LP, Rodríguez E, Farías RO, Rodríguez EE. Experimentos con un sensor de efecto Hall. *Latin-American Journal of Physics Education*. 2009;3(3):17.
- [20] García Martínez N del C. Aproximación discreta por mínimos cuadrados. 2006.