

SISTEMA EMBEBIDO PARA FITOMONITOREO DE ARBOLES DE MANZANOS

Alvarado Ortega Fausto Alonso*, Martínez Rivera José A.*, Godínez García Francisco J.*, Gamero Inda Eduardo*, Arce Valdés Jesus Leonel**

*Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Durango
Maestría en Ingeniería
Blvd. Felipe Pescador # 1830 ote. C.P. 34080, Durango, Dgo., México
Tel.,6188290900

** Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de la Región de los Llanos
Calle Tecnológico #200 ote. C.P. 34700 Guadalupe Victoria, Durango, México.
Tel., 6768823712

jamartinez@itdurango.edu.mx, amtzr@yahoo.com

RESUMEN.

Se presenta el diseño y la implementación de un sistema embebido para el monitoreo del flujo de savia en árboles de manzana, se implementó un sistema de instrumentación y adquisición de datos de la temperatura de la xilema de un manzano, la información recolectada se transmite vía inalámbrica mediante dispositivos XBee series 2 en topología punto a punto a un sistema embebido donde se registra la información.

Las instalaciones en donde se verifico la funcionalidad de este sistema de comunicación son de la huerta *El Moral* que se encuentra ubicada en el municipio de Canatlán, en el estado de Durango, México

Palabras Clave: Fitomonitorio, Electrónica mixta, Sistema embebido.

ABSTRACT.

The design and implementation of an embedded system for sap flow monitoring in apple trees is presented.

An instrumentation and temperature of the xylem of an apple tree data-gathering system was implemented.

The data gathered is transmitted wirelessly through XBee Series 2 devices in an end-to-end embedded system where the data is registered.

The systems were implemented and verified in the apple orchard "El Moral", located in Canatlán, Durango, México.

Keywords: Phyto monitoring, mixed electronics, embedded system.

1. INTRODUCCIÓN

En la productividad de un huerto de árboles de manzanas, el flujo de savia del árbol influye directamente en la producción y calidad del fruto.

La técnica de fitomonitorio se basa en la microelectrónica e informática, con la cual se puede determinar el estado hídrico de un árbol de manzanas de manera invasiva, determinando las condiciones de riego y tiempos de fertilización.

La importancia y funcionalidad que tiene la xilema en un árbol, al ser un tejido homogéneo al interior de los árboles, se desarrolla junto con la planta incrementando la cantidad de anillos y generando tejido joven, aumentando la resistencia al

flujo de agua en los anillos internos, es decir se observa un mayor flujo de agua en los anillos externos a comparación de los anillos internos [1].

El consumo del agua y la disponibilidad esta entre los puntos más importantes para la productividad de los sistemas agrícolas, el uso de este recurso en las plantas es de mucha importancia para entender los procesos fisiológicos de las plantas [2].

La relación directa del flujo de savia con la variación estacional del diámetro del tronco y el índice de área foliar (LA), la cual está relacionada directamente con la radiación solar y logarímicamente con el déficit de vapor de presión [3], plantea el ajuste en el modelo de calibración para optimizar el agua aplicada en las plantaciones de dátiles en las regiones semiáridas.

Los factores que pueden afectar la medición de los gradientes térmicos naturales en la estimación de flujo de savia utilizando el método de disipación de calor [4] señalan que en los dos casos en el que se toma la medición, al tener encendido el calentador de la sonda y cuando este está apagado, registran en ambas condiciones los valores de los gradientes térmicos naturales.

Otros autores [5] mediante dispositivos de electrónica mixta, convierten las señales no eléctricas como temperatura, presión y humedad a señales cuantificables para su procesamiento, las señales eléctricas pueden ser amplificadas y normalizadas en un rango de medición para sistemas de control que pueden ser aplicados en procesos del sector agroindustrial.

En este artículo se muestra el desarrollo de dos sistemas embebidos que están comunicados inalámbricamente mediante dispositivos XBee Series 2 para el fitomonitorio de árboles de manzanas usando un Arreglo Análogo Programable en Campo (FPAA) AN221E04 como elemento de linealización para un diferenciador de temperatura. Los datos recabados se almacenan para su posterior procesamiento en una memoria microSD.

2. MÉTODO DE GRANIER.

El método Granier permite la estimación de flujo de savia en un árbol, este consiste en un divisor de temperatura conformado por dos termocuplas de material Hierro-Constantán, un extremo contiene un elemento calefactor que, al encenderse, el diferenciador de temperatura genera un voltaje equivalente a la temperatura, los extremos de la termocupla están separados de 10 cm a 15 cm, para que la segunda termocupla no se vea afectada por el elemento calefactor, la lectura en el diferencial de temperatura depende de la disipación térmica del agua al interior del árbol.

Por medio de este método se obtiene una diferencia de temperatura ΔT °C, entre los extremos del diferenciador, el cual es utilizado para la estimación de densidad de flujo de savia J_s [$ml\ cm^{-2}\ min^{-1}$], ecuación (1).

$$J_s = 0.714 \left(\left(\frac{\Delta T_{maxima}}{\Delta T_{real}} \right) - 1 \right)^{1.231} \quad (1)$$

Donde ΔT_{maxima} es la diferencia máxima de temperatura y ΔT_{real} es la diferencia real en cada ocasión que se realice la lectura.

El flujo de savia del árbol (F) [$ml\ min^{-1}$] se determina mediante la ecuación (2).

$$F = J_s A_x \quad (2)$$

Donde A_x representa el área de la xilema activa del árbol donde se insertaron los sensores [1].

2.1. Sistemas de instrumentación

La principal variable para el fitomonitorio es la diferencia de temperatura ΔT (°C) que existe entre dos puntos en el tronco del árbol, por lo que se implementa dos termocuplas tipo J en arreglo de diferenciador de temperatura, usando un FPAA AN221E04 en la etapa de linealización de la variable a monitorear, el dato es interpretado por un microcontrolador y enviado al sistema de registro mediante el protocolo de comunicación ZigBee a través de dispositivos XBee Series 2, Fig. 1. Se utiliza el ADC del microcontrolador ATmega328P para convertir el voltaje análogo proporcionado por el sistema electrónico de linealización, en seguida se obtiene el valor ΔT (°C) para ser transmitido a través del puerto serie al elemento transmisor (XBee Series 2).

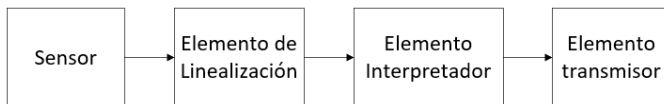


Fig. 1 Diagrama a bloques del sistema de monitoreo

El elemento sensor está compuesto por dos termocuplas y un resistor como elemento calefactor de referencia, la termocupla tiene una caída de tensión de $56\ \mu V/^\circ C$. El voltaje proporcionado por el diferenciador es de la magnitud de los

micro volts, por lo que se requiere una etapa de amplificación y linealización para proporcionar una salida lineal con respecto a la entrada.

En la terminal inversora y no inversora del FPAA AN221E04 se programó un amplificador tipo Chopper con una ganancia de 64 veces la señal de entrada, el cual permite manipular señales diferenciales de pequeña amplitud y de referencia flotante, este amplificador no genera su propia señal de referencia, requiriéndose un par de resistores entre la señal diferencial de entrada y el pin de VMRC, además se añade un Configurable Analog Module (CAM) filtro pasa baja con frecuencia de corte de 2KHz (CAM1), Fig. 2.

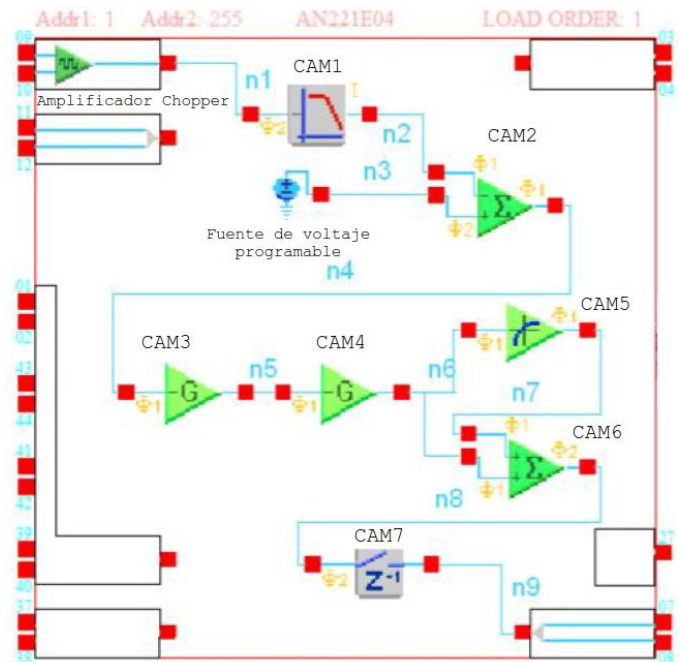


Fig. 2 Programación de FPAA

Para mejorar el desempeño del convertidor análogo-digital del FPAA, se utiliza un amplificador diferenciador (CAM2), donde al voltaje de entrada se le resta a un voltaje de la fuente programable que el sistema embebido contiene, la señal de salida es del orden de μV , se añade un par de gainhold (CAM3 Y CAM4), para amplificarla al orden de mV y el valor se direcciona a una tabla de búsqueda que contiene el CAM TransferFunction (CAM5) la cual cuenta con 256 valores, los cuales son usados para la compensación de la no linealidad del sensor.

El CAM6 sumador, se utiliza para crear su propia señal nula de compensación en fase 2 ($\phi 2$), para finalizar la operación de linealización, se utiliza un CAM de muestreo y retención (CAM7), el cual proporciona un valor digital.

La señal proporcionada por el módulo FPAA AN221E04 es procesada por el elemento de interpretación, el microcontrolador Atmega328P, que controla el accionamiento

de un elemento calefactor cada 10 minutos, el cual dura encendido 30 segundos alcanzando una temperatura de 60 °C y además prepara la cadena de datos que se envía por medio de un XBee Series 2 programado como Router AT al sistema de registro. La cadena de datos está formada por el valor del diferencial de temperatura ΔT (°C) y un dígito binario para indicar si el calentador está apagado (0) o encendido (1).

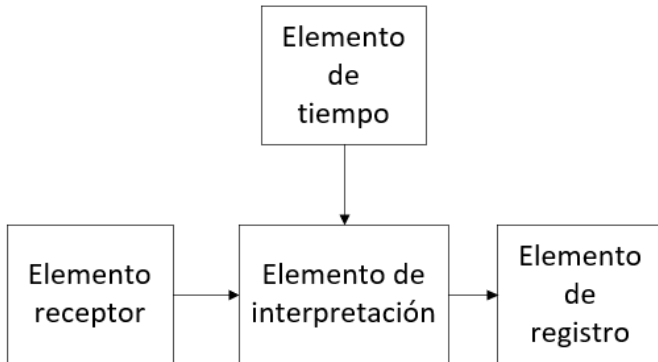


Fig. 3 Diagrama a bloques del sistema de registro

El sistema de registro cuenta un módulo XBee Series 2 programado como Coordinador AT, el cual recibe la cadena de datos enviada por el sistema de monitoreo y la procesa, mediante la ecuación (1) se estima la densidad de flujo de savia y por medio de la ecuación (2) se determina el valor del flujo de savia almacenando los resultados en un archivo Excel en la memoria microSD junto con los datos de fecha y tiempo obtenidos por el módulo RTC 1302, Fig. 3.

2.2. Calibración del dispositivo de medición

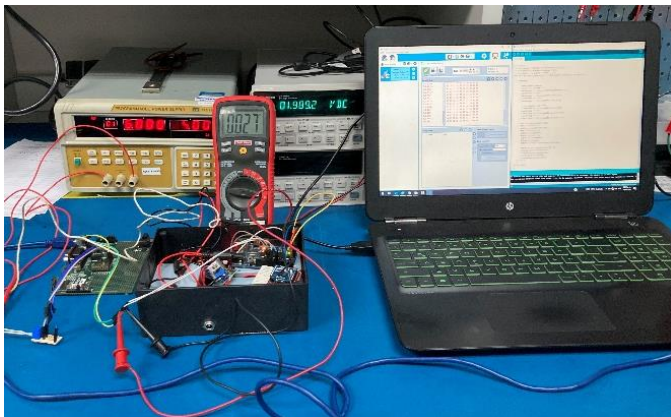


Fig. 4 obtención de la curva de respuesta

Por medio de un termómetro patrón calibrado, se obtiene la diferencia de temperatura que se tiene entre el punto A y el punto B de la termocupla tipo J, para incrementar la temperatura en el punto A, Fig. 4, se calienta por medio del elemento calefactor, obteniendo un aumento de voltaje

proporcionado por el elemento de linealización (FPAA AN221E04), el registro de los valores de temperatura, voltaje a la salida del elemento de linealización y el voltaje convertido por el microcontrolador ATmega328P, permiten determinar por el método de mínimos cuadrados la curva característica que define el comportamiento del elemento sensor, Fig. 5 se observa la respuesta y la curva característica del sensor.

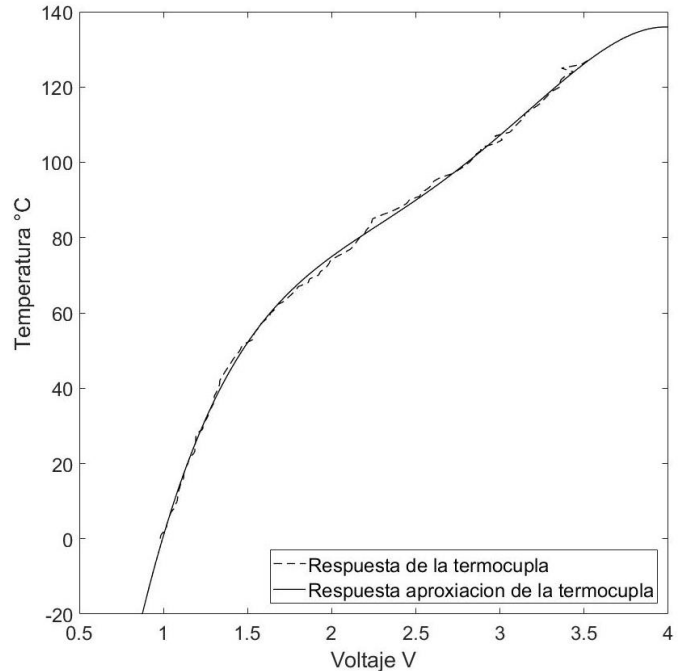


Fig. 5 Curva de caracterización del sensor

El modelo matemático del elemento sensor de expresa mediante la ecuación (3).

$$\Delta T = p_1 V^4 + p_2 V^3 + p_3 V^2 + p_4 V + p_5 \quad (3)$$

Donde los valores de los regresores son $p_1 = -7.0312$, $p_2 = 76.71$, $p_3 = -305.43$, $p_4 = 558.9$ y $p_5 = -322.31$.

Donde ΔT representa la estimación de la temperatura proporcionada por el elemento sensor y V representa la lectura del voltaje linealizado por el FPAA AN221E04.

3. DISCUSION DE RESULTADOS

La instalación del sensor y del elemento calefactor, es de forma invasiva en el manzano, se insertan a 2.5 cm de profundidad, en donde existe un mayor flujo de savia, los extremos de la termocupla están separados por una distancia de 10 cm.

Las perforaciones en donde se encuentran los extremos del diferenciador de temperatura y el elemento calefactor, se rellenan con cera de abeja para cicatrizar las heridas del tronco y aislarlas del medio del medio ambiente.

El tronco del árbol tiene un diámetro de 9.87 cm por lo que el área de la xilema activa en el tronco es de 42.19 cm². Un extremo del diferenciador se sitúa en la parte inferior del tronco, mientras que el otro extremo se ubica en la parte superior con el elemento calefactor, Fig. 6.



Fig. 6 Instalación de termocupla y calentador

El sistema de monitoreo se instaló a una distancia de 30 cm. al tronco del árbol de manzano, cuenta con un acondicionador entre el módulo FPAA AN221E04 y el microcontrolador ATmega328P, el cual está conectado al módulo XBee series 2, estos dispositivos se encuentran alojados en un par de gabinetes a prueba de agua y polvo, Fig. 7.

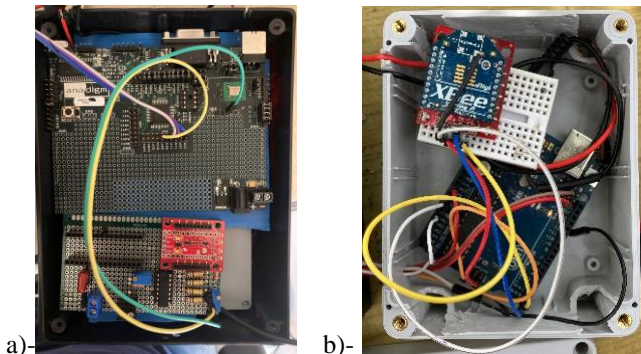


Fig. 7 Sistema de monitoreo, a)- FPAA y acondicionador de señal b)- Microcontrolador ATmega328P y modulo XBee Series 2

Ubicado a 15 metros, se encuentra el sistema de registro, Fig. 8 que está conformado por el elemento receptor XBee serie dos, al recibir la cadena de datos el microcontrolador ATmega2560 procesa y separa las dos variables recibidas para ser procesadas

en una tabla, a su vez este elemento recibe datos del reloj de tiempo real (RTC) y el programa residente en el microcontrolador separa la información recibida en los siguientes campos: fecha, hora, calentador encendido, temperatura, densidad de flujo de savia y flujo de savia, estas variables son almacenadas en una tabla Excel en el elemento de registro, Tabla 1.

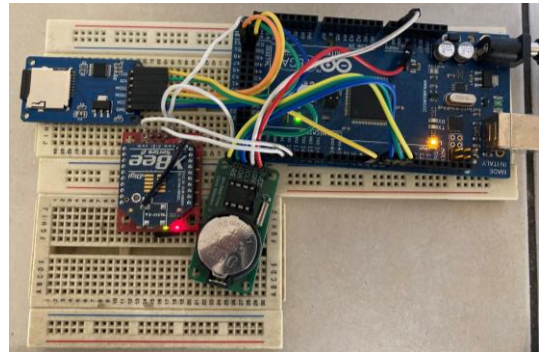


Fig. 8 Sistema de registro

Tabla 1 Registro histórico de variables de interés

Fecha	Tiempo	Voltaje	Heater	Temperatura	Js [ml cm-2 min-1]	F [ml min ⁻¹]
19/06/2021	15:14:53	1.2903	0	35.63448391	0.805849461	33.99878874
19/06/2021	15:14:54	1.3148	0	37.87679174	0.695398725	29.33887221
19/06/2021	15:14:55	1.3099	0	37.43572116	0.715844862	30.20149473
19/06/2021	15:14:56	1.305	0	36.99098333	0.737070273	31.09699481
19/06/2021	15:14:57	1.2952	0	36.09039305	0.782026865	32.99371342
19/06/2021	15:14:59	1.3343	0	39.59628953	0.621024908	26.20104087
19/06/2021	15:15:00	1.3099	0	37.43572116	0.715844862	30.20149473
19/06/2021	15:15:01	1.3196	0	38.30533218	0.676088234	28.52416257
19/06/2021	15:15:02	1.3148	0	37.87679174	0.695398725	29.33887221

En la Fig. 9, se muestra la gráfica de ΔT (°C) entre los dos puntos del diferenciador de temperatura que se obtiene cuando el elemento calefactor se acciona, por lo que la temperatura aumenta paulatinamente y se iguala la temperatura entre los dos puntos después de diez minutos.

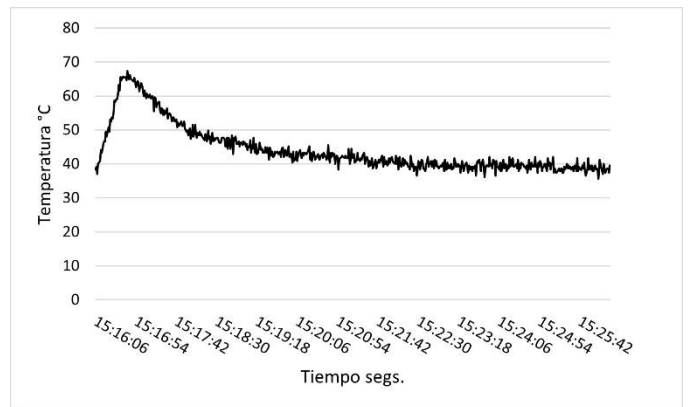


Fig. 9 Diferencia de temperatura obtenida

En la Fig. 10 se muestra la variación de la densidad de flujo de savia en un intervalo de once minutos en horario diurno, el valor mínimo de la gráfica es $0.0480 \text{ ml cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ cuando el elemento calefactor esta por apagarse (temperatura máxima) y cuando la temperatura se iguala en las termocuplas el valor de la densidad de flujo de savia tiene una tendencia creciente obteniendo el valor estable de $0.6387 \text{ ml cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$. En horario nocturno el valor mínimo de la densidad de flujo de savia es de $0.0396 \text{ ml cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ y cuando la temperatura se iguala en las termocuplas el valor de la densidad de flujo de savia tiene una tendencia creciente obteniendo el valor estable de $0.8564 \text{ ml cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$, Fig. 11.

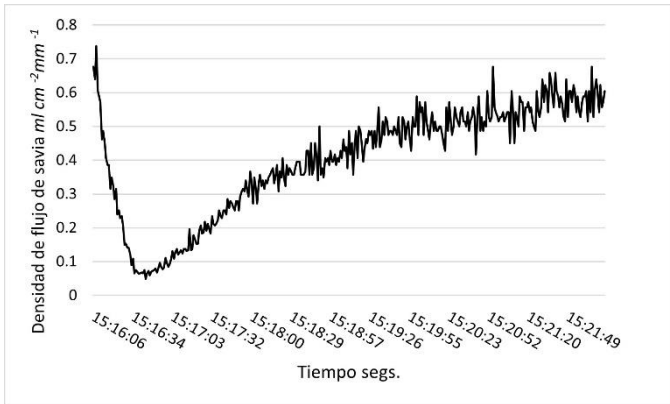


Fig. 10 Densidad de flujo de savia en horario diurno

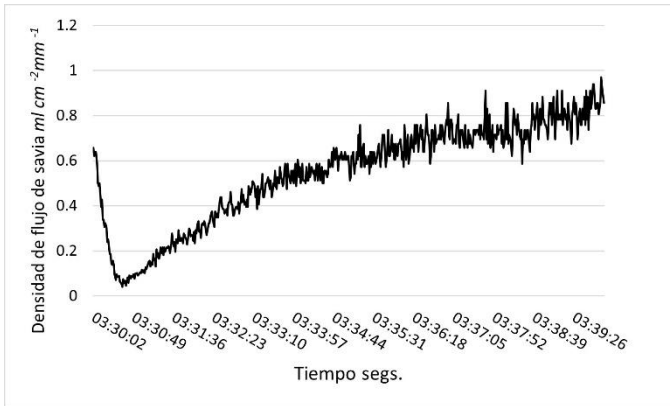


Fig. 11 Densidad de flujo de savia en horario nocturno

Mediante la ecuación (2) se determina el flujo de savia en un horario diurno, Fig. 12, se observa la tendencia creciente en el flujo de savia hasta un valor estable de $28.52 \text{ ml min}^{-1}$, en un horario nocturno, el flujo de savia alcanza un valor estable superior al del horario diurno $36.13 \text{ ml min}^{-1}$, Fig. 13.

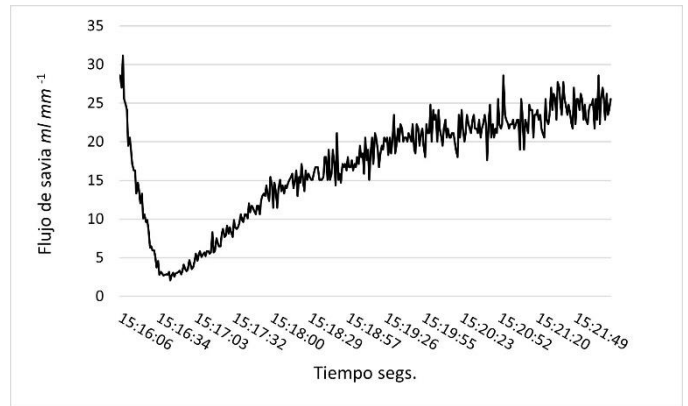


Fig. 12 Flujo de savia en horario diurno

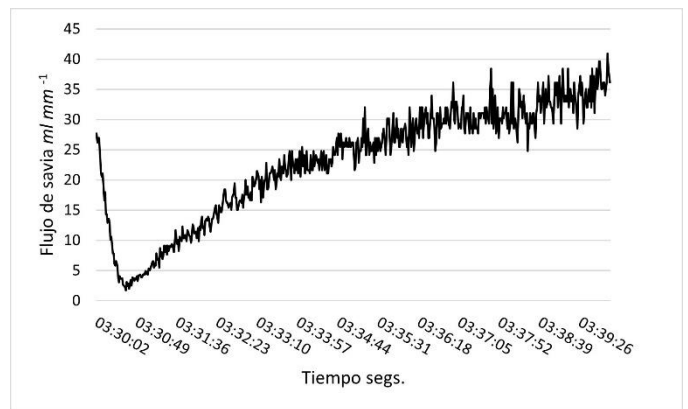


Fig. 13 Flujo de savia en horario nocturno

4. CONCLUSIONES

En este artículo se presentó el diseño de un sistema embebido que permite la detección de flujo de savia en manzanos, los resultados aquí mostrados permiten que el agricultor tome una decisión en relación con la irrigación de la huerta de manzanos en base a los datos obtenidos, lo cual permite un ahorro del recurso hídrico.

Derivado del diseño propuesto por [1], el sistema embebido de fitomonitorio cuenta con la característica de usar un registro de datos en tiempo real con conexión inalámbrica, añadiéndole movilidad al sistema para que este pueda ser usado en otros arboles de la huerta de manzanos.

Aplicando la metodología de linealización de la termocupla propuesta por [6] se linealiza mediante un FPAA el elemento sensor aplicado al sistema embebido de fitomonitorio, por lo que las mediciones adquiridas en el intervalo de tiempo propuesto son exactas.

Los datos obtenidos permiten realizar una planificación adecuada de la aplicación de riego ya que este se debe aplicar solo cuando el árbol lo demande, es decir cuando el flujo de savia es mínimo.

5. REFERENCIAS

- [1] M. E. Fernandez y J. E. Gyenge, Técnicas de Medición en Ecofisiología Vegetal, Conceptos y procedimientos, Buenos Aires: INTA, 2010.
- [2] A. L. R. P. D. Dragoni, «Transpiration of apple trees in a humid climate using heat pulse sap flow gauges calibrated with whole-canopy gas exchange chambers,» *Agricultural and Forest meteorology*, vol. 130, p. 10, 7 February 2005.
- [3] D. Chen, Y. Wang, S. Liu, X. Wei y X. Wang, Response of relative sap flow to meteorological factors under different soil moisture conditions in rainfed jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) plantations in semiarid Northwest China, Yangling 712100, China: Agricultural Water Management, 2012.
- [4] J. G. Lopez, *Estimacion de flujo de saia utilizando el metoo de disipacion de calor: analisis de datos*, Suecia: Swedish University of Agricultural Sciences, 2016.
- [5] E. D. M. Peter Ivanov Yakimov, *Sensors Interfacing Using FPAA*, Sozopol, Bulgaria: Universidad Tecnica de Sofia, 2004.
- [6] Anadigm, «Anadigm,» 27 October 2011. [En línea]. Available: https://www.anadigm.com/_apps/AN221012-U214.zip.