

Avances en el desarrollo de un sistema de Monitoreo y Control de un Módulo de Producción de Cultivos Hidropónicos para regiones de latitudes elevadas¹

Esteban GESTO¹, Karim HALLAR¹, Leonardo GONZALEZ¹, Osiris SOFIA¹, Jorge BIRGI^{1,2}, Daniel LAGUIA¹, Verónica GARGAGLIONE^{1,2,4}, Pablo PERI^{1,2,4} and César ARAUJO PRADO³

¹ Instituto de Tecnología Aplicada, Universidad Nacional de la Patagonia Austral
{egesto, khallar, osofia, lgonzalez, dlaguia}@uarg.unpa.edu.ar

² Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria
{birgi.jorge, gargaglione.veronica, peri.pablo}@inta.gob.ar

³ Comando Conjunto Antártico
cesar.i.araujo.p@hotmail.com

⁴ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

Resumen. La agricultura familiar es la forma de producción de alimentos predominante a nivel mundial. En latitudes elevadas, como las de Patagonia Austral, las técnicas de hidroponía compensan factores limitantes como la baja fertilidad del suelo y condiciones climáticas adversas para la producción vegetal. El monitoreo y control de las principales variables que inciden en la producción es necesario para aumentar la calidad de los cultivos y simplificar las labores culturales. En este trabajo se propone un sistema de monitoreo y control de bajo costo basado en tecnologías IoT para su aplicación en hidroponía. Para esto se diseñó e implementó un prototipo actualmente en funcionamiento que incorpora las cinco capas del modelo genérico de Internet de las Cosas o *Internet of Things* (IoT): objetos o percepción, red o transmisión, middleware, aplicación y negocio. Se presentan los detalles de la implementación de las propuestas particulares desarrolladas para cada una de estas capas y los resultados preliminares obtenidos.

Keywords: Agricultura Familiar, IoT, Internet, Ingeniería de Software.

1 Introducción

Se entiende por Agricultura Familiar un tipo de producción donde la unidad doméstica y la unidad productiva están físicamente integradas, la familia aporta la fracción predominante de la fuerza de trabajo utilizada en la explotación y la producción se dirige tanto al autoconsumo como al mercado [1]. De acuerdo a la definición del Foro Nacional de Agricultura Familiar, la Agricultura Familiar es una forma de vida y

¹ Este trabajo fue parcialmente financiado por el proyecto de investigación UNPA-UARG 29/A425-1 y el proyecto COFECyT N° 15356435.

una cuestión cultural que tiene como principal objetivo la “reproducción social de la familia en condiciones dignas” [2]. La gestión de la unidad productiva y las inversiones realizadas en ella es hecha por individuos que mantienen entre sí lazos de familia, la mayor parte del trabajo es aportada por los miembros de la familia, la propiedad de los medios de producción (aunque no siempre la tierra) pertenece a la familia, y es en su interior que se realiza la trasmisión de valores, prácticas y experiencias.

La ingesta de vegetales frescos es de suma importancia, dado que éstos presentan ciertas ventajas nutricionales y organolépticas si se los compara con alimentos conservados, los cuales en general poseen un alto contenido en sodio y conservantes que no resultan beneficiosos para la salud.

Una forma de producir estos vegetales frescos es mediante un ambiente artificial, en espacios reducidos y con el uso de técnicas hidropónicas. Estas técnicas están empezando a difundirse en nuestro país, aunque su creación con fines comerciales data de la década del '60, existiendo ya otros países que hace tiempo la utilizan en proyectos de *cityfarming* o *vertical farming* [3].

La hidroponía puede resultar de suma utilidad en zonas marginales para la agricultura, como las que se presentan en gran parte de la Patagonia Austral. En esta región predominan gran parte del año altas intensidades de viento y bajas temperaturas medias lo que dificulta el crecimiento de los cultivos, sobre todo aquellos producidos con métodos convencionales y al aire libre.

La combinación del cultivo sin suelo con los sistemas forzados (invernaderos, macro y microtúneles, etc.) constituyen una alternativa viables que permite a los pequeños y medianos productores cultivar durante todo el año y disminuir los riegos vinculados a la actividad hortícola. El cultivo hidropónico en ambientes extremos requiere del control de variables ambientales como temperatura del aire (T_a), humedad relativa (%HUM), flujo de fotones fotosintéticamente activos (PAR), además de variables vinculadas a la nutrición vegetal y medidas directamente en la solución nutritiva como: temperatura (T_{sol}), conductividad eléctrica (EC), potencial de hidrógeno (pH) y oxígeno disuelto (DO). Asimismo, otras variables a monitorear, aunque con una importancia relativa menor, son la humedad relativa del aire (%HUM) y los niveles de dióxido de carbono (CO_2).

Por otro lado, existen otras variables cuyo monitoreo resulta de importancia para hacer más eficientes la mano de obra, el manejo del cultivo y la operación del sistema, como por ejemplo el nivel de agua en los tanques de soluciones o el caudal del flujo de la solución nutritiva en las entradas y salidas del sistema. Además, el monitoreo y registro de la tensión eficaz (V) y la corriente eléctrica consumida (I) permite determinar, en última instancia, la eficiencia energética de la instalación, como función de la energía invertida en la generación de un kilogramo de cultivo, y constituyen datos de relevancia en zonas aisladas o con un suministro de energía renovable. Finalmente, una instalación de este tipo debería contar con sensores para la seguridad, tales como un sensor de humo y/o llama, y un sensor de derrames.

En este sentido, el concepto de Internet de las Cosas o *Internet of Things* (IoT, por sus siglas en inglés), emerge como una alternativa a la hora de monitorear y recabar factores ambientales que permitan incrementar la eficiencia de la producción de cultivos hidropónicos [4, 5].

El estado actual del arte, en lo referente al control y monitorización de cultivos hidropónicos mediante sistemas IoT se ve reflejado en numerosas publicaciones. Por ejemplo, en [6] se describe un sistema para cultivo de plantas en interiores completamente automatizado y basado en una red IoT, capaz de operar con independencia del clima exterior. [7] muestra un sistema de cultivo hidropónico, basado en la plataforma Raspberry Pi, que permite controlar la circulación de agua para el cultivo y monitorear el pH, la temperatura, la humedad y el nivel del depósito de agua, así como mostrar los datos en tiempo real en una *website*.

El presente trabajo se enmarca en el Proyecto de Investigación 29/A425-1 “Internet del Futuro: aplicaciones de IoT en la Patagonia Austral” y en el proyecto de innovación productiva “El cultivo hidropónico *indoor* como herramienta para el fortalecimiento de la agricultura periurbana en Tierra del Fuego”, es llevado adelante de manera conjunta entre el Consejo Federal de Ciencia y Tecnología (COFECyT), el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), la Universidad Nacional de la Patagonia Austral (UNPA) y el Gobierno de Tierra del Fuego, y presenta los avances en el desarrollo de un sistema de bajo costo para el monitoreo y control de cultivos hidropónicos en ambientes controlados, mediados por la utilización de tecnologías IoT.

1.1 Objetivos

El objetivo de este trabajo es realizar un primer acercamiento en la incorporación de tecnología para el monitoreo y control de sistemas de cultivo hidropónicos *indoor* en NFT (*Nutrient Film Technique*) [8], haciendo hincapié no solo en las características geográficas y climáticas de Patagonia Sur, sino también en el aprovechamiento de tecnologías disponibles en la región.

Cuando se comenzó con este trabajo se plantearon objetivos específicos, consistentes en: (a) proponer la estructura arquitectónica para un sistema de monitoreo y control de un módulo de cultivo hidropónico para latitudes elevadas, (b) identificar cada una de las tecnologías adecuadas para los componentes de la arquitectura del sistema, (c) crear un prototipo ajustándose a los apartados (a) y (b), (d) evaluar el prototipo, (e) identificar los problemas encontrados y documentar las lecciones aprendidas, (f) difundir los hallazgos.

1.2 Hipótesis

Se espera que la introducción de tecnología para los módulos hidropónicos de latitudes elevadas mejore la productividad de los cultivos a la vez que facilite la mano de obra en la agricultura familiar. Para ello este trabajo plantea el desarrollo e implementación de un sistema de bajo costo adaptado a Patagonia Sur y destinado a los núcleos de agricultura familiar que trabajen con técnicas hidropónicas y que tengan intenciones de incorporar tecnología a su proceso de producción.

Por un lado, se plantea la construcción de sensores utilizando hardware libre, para mantener bajos costos en la adquisición de equipamiento; por otro lado el diseño e

implementación de una arquitectura de software que permita realizar el monitoreo y control de todas las variables relevantes para el correcto desarrollo de los cultivos.

El sistema emplea recursos tecnológicos actualmente disponibles en los ámbitos de Internet de las Cosas y computación en la Nube (*cloud computing*). Como resultado se pretende el desarrollo de un panel de monitoreo del estado instantáneo e histórico de las variables de interés, dentro del módulo de cultivo, que sea accesible tanto desde un sitio web y como así también desde un *smartphone*.

1.3 Mejora tecnológica para el sector

Las condiciones climáticas dominantes en el sur de la Patagonia dificultan la producción de muchas especies frutihortícolas. La baja intensidad de luz, alta velocidad del viento y las bajas temperaturas del aire no sólo perjudican a los cultivos, sino que en muchos casos impiden totalmente su desarrollo en época invernal. La calibración y puesta en marcha de un módulo de cultivo *indoor* con tecnología de producción en un ambiente controlado y utilizando técnicas como la hidroponía, permitiría aumentar la producción local de alimentos y producir a lo largo de todo el año, incluso con una menor necesidad de mano de obra y abastecimiento de agua.

Por su parte, la utilización de herramientas de control automático o semi automático de las variables ambientales de dicho módulo permite garantizar la estabilidad de las variables que actúan directa e indirectamente en el desarrollo de las plantas, aportando calidad a la producción y una mayor homogeneidad del cultivo. Por su parte, el control automático de una parte del sistema de producción, disminuye la carga de trabajo, que en un sistema hidropónico representa un 45,40% de la inversión inicial [9]. Asimismo, la automatización de parte del sistema disminuirá en gran medida el esfuerzo destinado a labores manuales, generalmente rutinarias, dando lugar a otras actividades donde la presencia del operario es indispensable para garantizar todo el potencial de las especies en producción. La Internet de las Cosas se presenta en este punto como una alternativa interesante a la hora de diseñar una arquitectura eficiente y de bajo costo.

1.4 Internet de las Cosas

Según la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), la Internet de las Cosas (también llamada Internet de los Objetos) es “la infraestructura mundial para la sociedad de la información que propicia la prestación de servicios avanzados mediante la interconexión de objetos (físicos y virtuales) gracias a la interoperabilidad de tecnologías de la información y la comunicación presentes y futuras” [10].

El paradigma IoT está cambiando nuestras vidas porque, por definición, se imbrica en nuestro mundo cotidiano al punto de pasar inadvertida [11]. Los objetos IoT recolectan ingentes cantidades de datos que difunden automáticamente hacia otros objetos, aplicaciones, servicios y sistemas con la intención declarada de mejorar la calidad de vida de las personas.

Se requerirán esfuerzos adicionales en la obtención de modelos arquitecturales de referencia adaptados a aspectos particulares de IoT [12, 13], tales como modelos de

dominio, de información, funcionales, la respuesta en tiempo real y el modelado propiamente dicho (lenguajes y extensiones [14], definiciones, etc.).

Modelo arquitectónico.

En cuanto a su arquitectura, un modelo IoT genérico se representa con cinco capas:

1. *Capa de objetos o percepción*: Esta capa recolecta e intercambia información entre los sensores de los objetos físicos. Sensores y actuadores proveen las diferentes funcionalidades. Los datos son transferidos a la capa de red.
2. *Capa de red o transmisión*: Esta capa transfiere de forma segura la información de los dispositivos sensores al sistema de procesamiento de información (capa de middleware).
3. *Capa de middleware*: Esta capa es responsable de la gestión del servicio y tiene un enlace a la base de datos. Recibe la información de la capa de red y la deposita en la base de datos. Realiza el procesamiento de información y la computación ubicua, toma decisiones automáticas en función de los resultados.
4. *Capa de aplicación*: Esta capa proporciona una administración global de la aplicación basada en la información de los objetos procesados en la capa de middleware.
5. *Capa de Negocio*: Esta capa es responsable de la administración del sistema general de IoT, incluidas las aplicaciones y los servicios. Construye modelos de negocio, gráficos, diagramas de flujo, etc. en función de los datos recibidos de la capa de aplicación. El verdadero éxito de la tecnología IoT también depende de los buenos modelos de negocio. En base al análisis de resultados, esta capa ayudará a determinar las acciones futuras y las estrategias comerciales.

2 Diseño e implementación de la arquitectura IoT

Para abordar este desarrollo tecnológico se plantea trabajar de manera iterativa e incremental, encontrándose el equipo concluyendo una primera etapa al momento de la redacción de este trabajo, donde se realizó un prototipo que permitirá analizar la viabilidad técnica de la solución y su aplicación en un ambiente real. El mismo fue incorporado a un módulo cerrado para cultivos hidropónicos que está siendo desarrollado conjuntamente con el Grupo de Investigación Forestal, Agrícola y Manejo del Agua de la Estación Experimental Agropecuaria Santa Cruz (INTA) [15, 16].

La arquitectura resultante aplicada a este prototipo surgió en base a distintas experiencias y a la selección de diversos componentes tanto de hardware como de software. La misma puede observarse en la Fig. 1 y será detallada en las secciones posteriores del presente trabajo.

Para la segunda etapa se planea concretar un producto apto para replicación a mayor escala y su utilización en ambientes de producción.

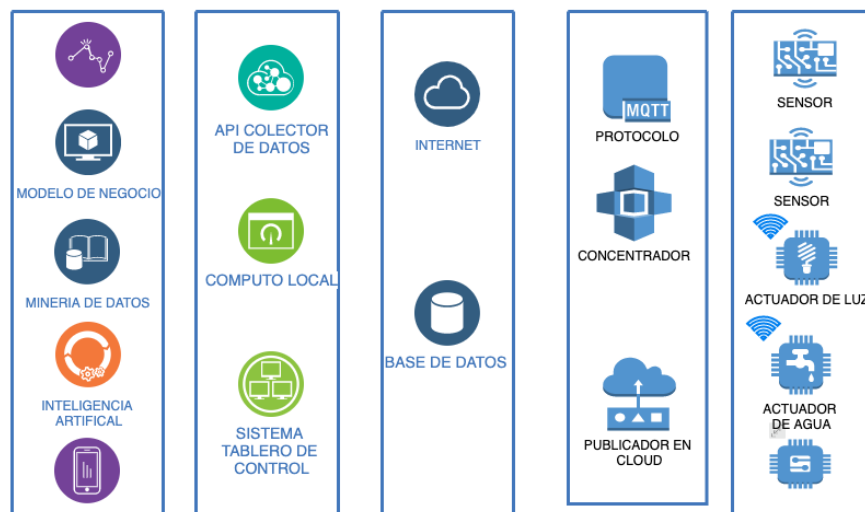


Fig. 1. Modelo arquitectónico de cinco capas

2.1 Capa de objetos o de percepción

En esta capa incluimos todos los componentes de hardware de procesamiento, de sensores y actuadores, así como firmware y software que permiten la comunicación usando Internet.

Los dispositivos multipropósito elegidos son el módulo ESP12 (NodeMCU) y el módulo ESP01, ambos basados en el chip procesador ESP8266 que integra el soporte para comunicaciones WiFi (802.11 b/g/n) y la pila completa de protocolos TCP/IP. Se ha optado por esta tecnología por ser módulos de bajo costo, gran disponibilidad en el mercado local, y disponer de numerosas y variadas librerías de programación de código abierto (*open source*). Su programación está soportada por el conocido y versátil IDE de Arduino [17].

Los módulos ESP01 tienen la ventaja de ser más pequeños y económicos que los ESP12 y se pueden utilizar cada vez que el número de puertos digitales de propósito general (GPIOs) necesarios sea inferior a 4, y sólo cuando no se requiera medir una señal analógica. En caso contrario se recurre a la ESP12 que cuenta con una entrada Analógico/Digital (A/D) y una gran cantidad de puertos GPIO.

Todos los sensores y actuadores desarrollados en esta etapa se comunican con uno de estos módulos, ya sea por un puerto digital de propósitos generales (GPIO), o por el único puerto analógico disponible, A0 (solo en el caso del ESP12). Cualquier sensor analógico del sistema (por ejemplo, sensores de nivel, pH, transductores de tensión y corriente, etc.), debe entregar una señal de tensión convenientemente acondicionada, que se digitaliza mediante el conversor A/D en el puerto A0. Cualquier sensor digital entrega una señal binaria en niveles lógicos de 0 a 3.3V que puede procesarse, ya sea directamente, o mediante un driver que maneje un protocolo de transmisión serie de entre los siguientes: 1-Wire, I2C, SPI o UART.

Temperatura Ambiente y Humedad Relativa (T amb, %HUM)

En los sistemas hidropónicos completamente cerrados o *indoor*, es vital mantener la temperatura ambiente en valores óptimos para los cultivos, no solo porque esta variable está directamente relacionada con el crecimiento y el desarrollo de estos, sino también porque las variaciones de temperatura afectan la solubilidad de las sales nutrientes y la disponibilidad de oxígeno disuelto en la solución, modificando así la nutrición de las plantas y por ende su desempeño productivo. En general, el control de la temperatura en un valor exacto no es crítico, siempre y cuando se mantenga dentro del rango óptimo para el cultivo (típicamente entre 20°C y 27°C, dependiendo de la especie).

Para la medición en el interior del módulo se utilizó un sensor digital del tipo DHT22 pre-calibrado, con una exactitud de ± 1°C en el rango de -50°C a 50°C. Cabe destacar que este módulo entrega al mismo tiempo la humedad relativa del ambiente con una precisión de ± 5%.

También se experimentó con un sensor del tipo BMP180, con exactitud de ± 1°C en el rango de -40°C a 85°C para registrar las temperaturas en el exterior del módulo, que eventualmente permitirán realizar un control del tipo *feedforward* (prealimentación), posibilitando al sistema reaccionar o ajustar ciertas variables en función de los cambios climáticos que se estén produciendo en el exterior del módulo.

Energía

La monitorización de la energía es conveniente cuando el cultivo se halla ubicado en zonas remotas o de difícil acceso. Por su parte también puede resultar de interés medir la eficiencia de la instalación en términos de energía consumida por unidad de masa del vegetal producido. Se implementa midiendo la tensión y corriente instantáneas en la entrada del tablero eléctrico de la instalación.

El circuito del prototipo desarrollado para la medición de la tensión eléctrica (Fig. 2.a) se compone de un transformador de 220V a 12V genérico con un rectificador y un divisor de tensión. La tensión de entrada al convertor A/D del módulo IoT es entonces aproximadamente proporcional al valor pico de la tensión de la fase de interés.

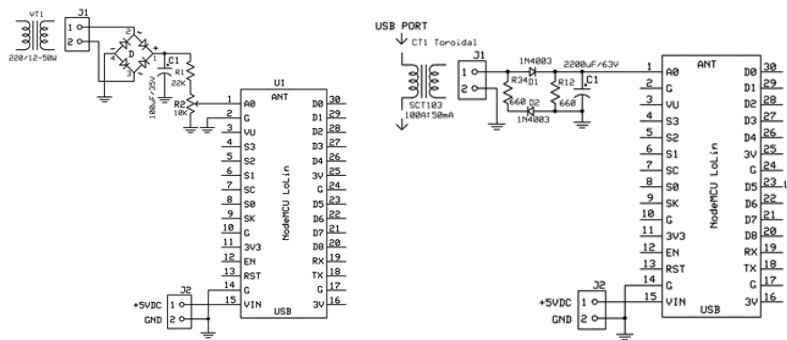


Fig. 2. Circuitos para sensado de Tensión (Izquierda) y Corriente (Derecha).

El circuito que mide la corriente (Fig. 2.b) se construye mediante un transformador de corriente SCT013 de núcleo partido, no invasivo, de bajo costo de hasta 100 Amperes. De esa forma, la tensión de entrada de estado permanente en el convertor A/D del dispositivo es aproximadamente proporcional al valor eficaz de la corriente que circula por la línea de alimentación del tablero que se quiere medir.

Actuadores

Los actuadores permiten modificar variables físicas del entorno. En esta categoría incluimos sistemas de aire acondicionado (HVACs), calefactores, ventiladores, luces PAR, Iluminación ambiente, bombas de circulación, dosificadoras, etc. En módulos hidropónicos en contexto de frío extremo se hace necesario utilizar uno o más calefactores que permitan compensar la pérdida de calor a través de los paneles del módulo.

El manejo de dispositivos eléctricos monofásicos de funcionamiento a 220V y de hasta 10 Amperes puede realizarse a través de relés optoacoplados, activados a través de una señal digital (fig. 3).

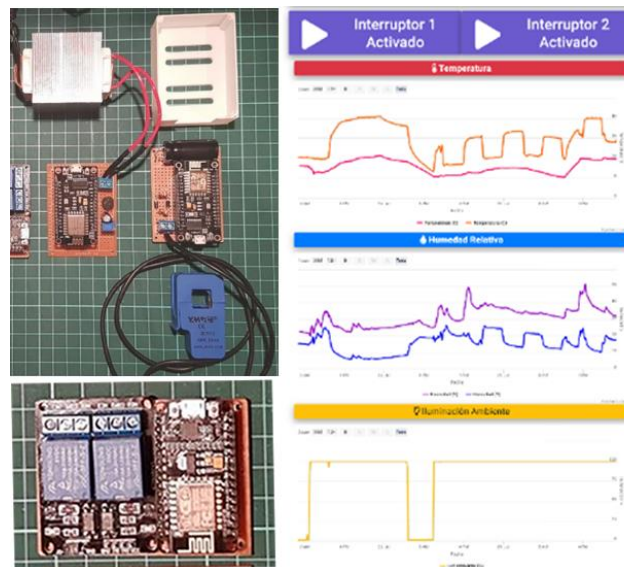


Fig. 3. Prototipo de actuador para comando de calefacción y curvas de accionamiento.

2.2 Capa de red o transmisión

Los prototipos descritos en las secciones precedentes hacen necesario contar con una tecnología que permita tanto el envío de datos desde los mismos (telemetría), como la comunicación en sentido inverso (accionamiento de los actuadores). Puntualmente en este caso de estudio, la tecnología de acceso elegida es WiFi, debido a que es una tecnología que utiliza un espectro de frecuencia sin licencia, un buen nivel de seguridad y facilidad de implementación [18]. Dado que ni el corto alcance ni el

consumo elevado representan un problema en una instalación como la aquí tratada, se entiende que WiFi es una buena solución de acceso de conectividad para este propósito.

El módulo ESP8266 puede funcionar tanto como estación (modo STA), como punto de acceso (modo SoftAP) o en ambos simultáneamente. Este último modo permite implementar redes tipo mallada (*mesh*). En nuestro sistema se ha utilizado exclusivamente el modo STA, para acceder a una red de área local con conectividad a Internet mediante un *router* de borde. Naturalmente las tramas WiFi se encapsulan en paquetes IPv4 que a su vez se transportan mediante segmentos UDP/TCP.

2.3 Capa de middleware

El middleware tiene varias funciones, como la gestión de dispositivos y datos, la gestión de aplicaciones, adaptación de protocolos, analítica, etc. El módulo de gestión de aplicaciones provee una interfaz para que las aplicaciones de alto nivel y los usuarios interactúen con los dispositivos. El gestor de aplicaciones proporciona un mecanismo de autenticación de usuarios mediante credenciales para acceder a la información bajo un paraguas de seguridad en cuanto a la exposición de los datos. Dispone de una interfaz de programación de aplicaciones (API por sus siglas en inglés), donde se establecen un conjunto de subrutinas, procedimientos y funciones que facilitan la comunicación e interacción, con cierto nivel de abstracción, entre aplicaciones y dispositivos IoT.

En esta etapa se ha utilizado ThingSpeak [19], una plataforma IoT de uso gratuito, que permite almacenar, mediante el envío de datos a través de internet, los datos de los dispositivos IoT, a través de un API que opera sobre el protocolo HTTP. De esta manera cada sensor, con acceso a internet, transmite la información periódicamente hacia la nube, alojando los datos en lo que la plataforma denomina canales.

Los datos se recolectan cada treinta segundos. La periodicidad está limitada actualmente por características del servicio de almacenamiento utilizado. Los datos que se están recolectando al momento de escribir este trabajo son: temperatura y presión atmosférica externa, temperatura y humedad del aire en dos bandejas de cultivo, luz ambiental, tensión y corriente eficaz de la instalación eléctrica, y estado de apertura de la puerta de ingreso al módulo.

Por otra parte, los dispositivos actuadores se accionan haciendo uso de la aplicación MathWorks TalkBack [20], que brinda la posibilidad de generar una cola de comandos en la nube, para ser consumidos por los sensores. Éstos consultan la misma en forma periódica a través de HTTP, y evalúan los comandos pendientes de ejecución, reaccionando en consecuencia.

Así, se tiene el gobierno en forma remota de un termostato ambiente y un calefactor, pudiendo activar las combinaciones necesarias para verificar el estado de aislamiento térmico del módulo y analizar su correlación con la temperatura externa.

2.4 Capa de aplicación

Esta es la capa que brinda los servicios verticales. La infraestructura propuesta se basa principalmente en un producto de software que permita visualizar las variables recolectadas de los sensores en una serie de gráficos y reportes estadísticos que muestren el estado de todas las variables de interés para el cultivo y su evolución en el tiempo.

En una primera instancia, a fin de monitorear los prototipos, se desarrolló una aplicación en lenguaje HTML y JavaScript (Fig. 4), que se comunica a través del API proporcionado por el servicio ThingSpeak para obtener la información almacenada en la nube y luego desplegarla en un tablero de control accesible vía web.

A su vez, la aplicación permite el envío de comandos HTTP POST a Talkback, a fin de cambiar el estado de los relés de control de la calefacción y el termostato.



Fig. 4. Panel de Control para monitoreo de los prototipos.

2.5 Capa de negocio

Dentro de lo concerniente a las actividades en esta capa, con el objetivo de optimizar la producción de productos frutihortícolas, y buscando utilizar de manera eficiente los recursos tales como la energía, nutrientes, agua y mano de obra, se está organizando un conjunto de técnicas tales como la minería de datos, el aprendizaje automático (redes neuronales, *deep learning*, etc.), y herramientas o plataformas para el análisis de datos, tal como BigML [21] a través de las cuales se podrá analizar la información recolectada, a fin de establecer una configuración que permita maximizar la producción de frutas y verduras dentro del módulo.

3 Análisis y Discusión

Este trabajo representa un resumen de las actividades a nivel de prototipado que se están llevando a cabo para la implementación del sistema de monitoreo y control de un módulo cerrado de cultivo hidropónico. En iteraciones futuras se prevé realizar mejoras en diversos aspectos, las cuales son detalladas a continuación.

Se implementará un Gateway que, contando con recursos de memoria y procesamiento suficientes, como los suministrados por una Raspberry PI 3 B+, permitirá realizar funciones de mayor nivel más cerca del borde de la red (computación *fog* y *edge* [22]).

Se dispondrá de mediciones de sensores de temperatura del agua, conductividad eléctrica, pH, y oxígeno disuelto de la solución nutritiva, radiación fotosintéticamente activa (Luz PAR), así como de otras variables auxiliares.

En próximos desarrollos del sistema, las mediciones se utilizarán para obtener, en base a modelos computacionales, otras variables tales como: biomasa, transpiración, energía invertida por planta, agua consumida, etc. Todas las variables contribuirán a una base de datos que podrá utilizarse para la optimización de los procesos implicados [23].

La asistencia remota es otro campo del que se puede sacar partido. El sistema puede producir recomendaciones para los servicios o disparar acciones automáticamente, por ejemplo, en caso de fallas. Una vez que se tiene una gran cantidad de información disponible se puede implementar un sistema de diagnóstico por medio de extracción de reglas a partir de la misma [24].

El grupo preliminar de sensores y actuadores (sensores de temperatura-humedad, sensor de temperatura en el exterior, sensores de corriente y tensión, sensor de luz ambiental, sensor de apertura de puerta y relés de control de termostato ambiente y calefacción) han estado operando desde hace más de doce meses (a agosto de 2020), habiéndose obtenido hasta el momento 3.600.000 registros, a una tasa de 10.000 mensajes diarios, lo que permite afirmar que la plataforma IoT es fiable y se puede extender su utilización a los sensores principales del cultivo.

La gran mayoría de los componentes de nuestro sistema son de bajo costo, dado que se tomaron como base elementos COTS (*Commercial Off-The-Shelf*) fabricados masivamente para abastecer a mercados como la comunidad *maker*, etc. Los precios aproximados en la República Argentina de algunos de los sensores y actuadores utilizados, oscilan entre los 6 y 25 dólares.

3.1 Control de temperatura ambiente interior

Dado que el contenedor de cultivo está concebido para operar en elevadas latitudes, existen dos factores físicos principales que determinarán el éxito de su operación: la temperatura ambiente interior y el flujo de fotones de radiación fotosintéticamente activa (luz PAR) con la que se cuenta. Estas dos variables no son independientes (al menos para el tipo de luminaria escogida: lámparas de Sodio de Alta Presión, HPS, Philips modelo SON-T 400W) por los siguientes motivos:

1. El contenedor presenta un grado muy elevado de aislación térmica respecto del exterior a fin de proveer la temperatura más favorable a los cultivos en su interior.
2. El punto anterior implica que cualquier fuente de energía calorífica en el interior del contenedor es capaz de elevar rápidamente la temperatura del mismo.
3. Las lámparas HPS, aunque representan una buena solución para el aporte de los $250 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ de luz PAR necesarios para la producción [25], tienen una eficacia luminosa de 123 lm/W, que implican una eficiencia máxima de aproximadamente 22% [26]. Intuitivamente, significa que gran parte del 78% restante se transforma en energía radiante no visible, elevando la temperatura del recinto.
4. Al tratarse de focos de luz (prácticamente puntuales, no difusos) tienden a producir importantes gradientes térmicos en el interior del contenedor y cerca de las plantas.
5. La diferencia encontrada entre la capacidad de aislación del suelo y el resto del contenedor ha producido gradientes térmicos importantes en la dirección vertical. Durante ensayos preliminares se obtuvieron medidas de temperatura que indican diferencias de unos 7°C entre cada uno de los tres pisos de las bandejas de cultivo (separadas verticalmente unos 57cm) cuando el suelo se encontraba a 0°C .

Estas observaciones sugieren la necesidad de medir y controlar la temperatura en forma distribuida en todo el contenedor, presumiblemente con un sensor de temperatura por cada bandeja de cultivo. El control de la temperatura deberá asegurar que las plantas se encuentren en su rango de temperatura óptimo, estén o no encendidas las luces PAR, para lo cual se prevé utilizar dos mecanismos: el control de la calefacción, y la utilización de ventiladores para forzar el desplazamiento del aire caliente hacia estanterías inferiores. En este sentido es deseable que durante el día se manejen temperaturas cercanas a los 20° o 24° C, mientras que durante la noche la misma debe descender y mantenerse próxima a los 11° C [27].

4 Conclusiones

En este trabajo se presentan los avances hacia la implementación de un módulo cerrado de producción hidropónica apto para latitudes elevadas y de bajo costo, destinado a núcleos de agricultura familiar.

El sistema emplea recursos tecnológicos ampliamente disponibles en el mercado, del ámbito de la Internet de las Cosas y computación en la nube, para lo cual se han diseñado y fabricado prototipos de sensores con conexión WiFi, para la medición de variables críticas, como temperatura y humedad ambiente interior y exterior, y actuadores que permiten accionar a distancia distintos dispositivos eléctricos, como por ejemplo un equipo de calefacción. Además se implementaron otros sensores para la toma de información de interés, como la tensión y el consumo eléctrico, intensidad de luz ambiente y estado de apertura de puerta.

Los dispositivos se han mantenido en funcionamiento sin necesidad de intervención humana por más de doce meses, recibiendo hasta la fecha aproximadamente 3.600.000 mensajes desde el módulo vía Internet, por lo que se puede considerar que

la tecnología seleccionada es aplicable a estos fines, con una relación costo-beneficio aceptable.

Por otra parte se ha elaborado un panel de monitoreo y control, que permite visualizar las distintas variables de forma ágil vía Internet, toda vez que permite el gobierno de los actuadores de forma remota.

El equipo de investigación planea incorporar nuevos sensores, específicos para el control de los cultivos, incluyendo además hardware que permita optimizar el uso de la red de datos local y proveer seguridad antes fallos.

Referencias

1. Ramilo, D., Prividera, G., Villagra, C., Indelangelo, N., Main, C., Muscio, L., Preda, G.: La Agricultura Familiar en la Argentina. Diferentes abordajes para su estudio. (2013).
2. Federación de Organizaciones Nucleadas de la Agricultura: ¿Qué es la agricultura familiar?, <http://www.fonaf.org.ar/index.php/78-destacadas/73-que-es-la-fonaf>, last accessed 2020/05/16.
3. Krishnan, S., Student, M., Srivaishnavi, S.: A survey on Vertical Farming Saravanan M Student SKCET.
4. Amandeep, Bhattacharjee, A., Das, P., Basu, D., Roy, S., Ghosh, S., Saha, S., Pain, S., Dey, S., Rana, T.K.: Smart farming using IOT. In: 2017 8th IEEE Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference, IEMCON 2017. pp. 278–280. IEEE (2017). <https://doi.org/10.1109/IEMCON.2017.8117219>.
5. Prathibha, S.R., Hongal, A., Jyothi, M.P.: IOT Based Monitoring System in Smart Agriculture. In: Proceedings - 2017 International Conference on Recent Advances in Electronics and Communication Technology, ICRAECT 2017. pp. 81–84. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (2017). <https://doi.org/10.1109/ICRAECT.2017.52>.
6. Palande, V., Zaheer, A., George, K.: Fully Automated Hydroponic System for Indoor Plant Growth. In: Procedia Computer Science (2018). <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.03.028>.
7. Nurhasan, U., Prasetyo, A., Lazuardi, G., Rohadi, E., Pradibta, H.: Implementation IoT in System Monitoring Hydroponic Plant Water Circulation and Control. Int. J. Eng. Technol. 7, 122 (2018). <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.44.26965>.
8. Carrasco, G., Izquierdo, J.: La empresa hidropónica de mediana escala: La técnica de la solución nutritiva recirculante (“NFT”). Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe (1996).
9. Birgi, J., Bonil, R., Haro, H.: Producción hidropónica familiar de verduras de hoja bajo cubierta, análisis socioeconómico y financiero. (2018).
10. ITU Corporation: Internet of Things Global Standards Initiative, <http://www.itu.int/en/ITU-T/gsi/iot/Pages/default.aspx>, last accessed 2018/08/04.
11. Weiser, M.: The Computer for the 21st Century. Sci. Am. 265, 94–104 (1991). <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0991-94>.
12. Kramp, T., van Kranenburg, R., Lange, S.: Introduction to the internet of things.

- (2013). https://doi.org/10.1007/978-3-642-40403-0_1.
13. Romero, G.M.: Internet of Things Architecture IoT-A Project Deliverable D2.2 – Concepts for Modelling IoT-Aware Processes. (2012).
 14. Eterovic, T., Kaljic, E., Donko, D., Salihbegovic, A., Ribic, S.: An Internet of Things visual domain specific modeling language based on UML. In: 2015 25th International Conference on Information, Communication and Automation Technologies, ICAT 2015 - Proceedings. pp. 1–5. IEEE (2015). <https://doi.org/10.1109/ICAT.2015.7340537>.
 15. El INTA instala un sistema hidropónico en la Antártida - INTA Informa, <https://intainforma.inta.gob.ar/el-inta-instala-un-sistema-hidroponico-en-la-antartida/>, last accessed 2020/06/15.
 16. El cultivo hidropónico indoor como herramienta para el fortalecimiento de la agricultura periurbana en Tierra del Fuego. Proyecto de innovacion productiva Consejo Federal de Ciencia y Tecnología., <http://www.legistdf.gob.ar/lp/novedadesip/Asuntos Entrados 2019/As. N%BA 289-19.pdf>, last accessed 2020/06/18.
 17. Arduino - Software, <https://www.arduino.cc/en/main/software>, last accessed 2020/06/13.
 18. When it comes to the IoT, Wi-Fi has the best security | Network World, <https://www.networkworld.com/article/3410563/when-it-comes-to-the-iot-wi-fi-has-the-best-security.html>, last accessed 2020/05/29.
 19. IoT Analytics - ThingSpeak Internet of Things, <https://thingspeak.com/>, last accessed 2020/06/13.
 20. TalkBack App - MATLAB & Simulink, <https://www.mathworks.com/help/thingspeak/talkback-app.html>, last accessed 2020/06/13.
 21. BigML.com, <https://bigml.com/>, last accessed 2020/06/14.
 22. Bittencourt, L., Immich, R., Sakellariou, R., Fonseca, N., Madeira, E., Curado, M., Villas, L., DaSilva, L., Lee, C., Rana, O.: The Internet of Things, Fog and Cloud continuum: Integration and challenges. *Internet of Things*. 3–4, 134–155 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.iot.2018.09.005>.
 23. Guirado-Clavijo, R., Sanchez-Molina, J.A., Wang, H., Bienvenido, F.: Conceptual Data Model for IoT in a Chain-Integrated Greenhouse Production: Case of the Tomato Production in Almeria (Spain). *IFAC-PapersOnLine*. 51, 102–107 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.069>.
 24. Karimanzira, D., Rauschenbach, T.: Enhancing aquaponics management with IoT-based Predictive Analytics for efficient information utilization. *Inf. Process. Agric.* 6, 375–385 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2018.12.003>.
 25. Zhang, X., He, D., Niu, G., Yan, Z., Song, J.: Effects of environment lighting on the growth, photosynthesis, and quality of hydroponic lettuce in a plant factory. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 11, 33–40 (2018). <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181102.3420>.
 26. Roy Choudhury, A.K.: Principles of colour and appearance measurement. Woodhead (2014). <https://doi.org/10.1533/9780857099242>.
 27. Castagnino, A.M.: Manual de cultivos horticolas innovadores. Editorial Hemisferio Sur (2009).