

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



**Sistema de caracterización de parámetros climáticos en Mini
Jardines Clonales Forestales bajo ambiente protegido.**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de
Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura**

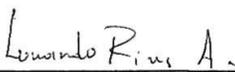
Jose Pablo Fallas Zúñiga

Cartago, Junio 2011.

TEC | Tecnológico
de Costa Rica
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA
PROYECTO DE GRADUACIÓN
TRIBUNAL EVALUADOR

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

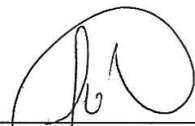
Miembros del Tribunal



Ing. Leonardo Rivas Arce
Profesor lector



Ing. Juan Scott Chaves Noguera
Profesor lector



Ing. Johan Carvajal Godínez
Profesor asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

Cartago, Junio 2011.

Declaratoria de Autenticidad

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, Junio 2011.



Jose Pablo Fallas Zúñiga
Cédula: 1-1231-0671

Resumen

En el presente informe se detalla el proceso seguido para el diseño e implementación de un sistema de caracterización de parámetros climáticos en mini jardines clonales bajo ambiente controlado. El proyecto se realizó para la Escuela de Ingeniería Forestal del Tecnológico de Costa Rica, específicamente para el programa GENFORES (GENética FOREStal), dirigido por el Dr. Olman Murillo Gamboa. Esta agrupación cuenta con aposentos especiales para la siembra de clones forestales durante varias etapas de su crecimiento, estos aposentos (mini jardines clonales) deben mantenerse bajo condiciones ambientales controladas, especialmente temperatura, cantidad de luz y humedad relativa para el óptimo desarrollo de los árboles en sus primeras etapas de vida.

Las condiciones presentes en los mini jardines han probado estar relacionadas con el éxito en el desarrollo de los clones forestales, sin embargo no se cuenta con datos que permitan caracterizar o modelar estas condiciones, datos que permitirían la reproducción de las condiciones en nuevos mini jardines instalados en otras ubicaciones. Además, el valor científico de modelos de desarrollo óptimo para clones forestales es muy alto en el ámbito investigativo y se podrían obtener a partir de los datos recolectados con la red de sensores.

En el proyecto desarrollado se diseñó e implementó un sistema que permite la caracterización del ambiente en los mini jardines. Los parámetros considerados fueron luz, humedad relativa y temperatura. Se instalaron una serie de sensores para cada uno de estos parámetros en varios mini jardines, el manejo de la información se dio por medio de una red inalámbrica de sensores bajo la arquitectura CRTECMote, desarrollada por la Escuela de Ingeniería en Electrónica del Tecnológico de Costa Rica. Los datos recopilados por la red de sensores son visibles desde internet, por medio de cualquier navegador web desde el cual se ingresa a una página web residente en el microcontrolador central de la red.

Palabras claves: CRTecMote, GENFORES, SIWA-RTOS, Mini jardines clonales forestales, humedad relativa, luz, temperatura.

Summary

In this document is presented the details of the process followed in the design and implementation of a system for characterization of weather parameters in mini clonal forest gardens under controlled environment conditions. This project was done for the Forest Engineering School of the Technological Institute of Costa Rica, specifically for the GENFORES program (Genetics Forest), directed by PhD. Olmán Murillo Gamboa. These group possesses installations for the growth of forest clones during several stages of their development, these installations must be kept under controlled environmental conditions, specially temperature, amount of light and relative humidity in order to achieve the optimal development of the forest clonal species during their first stages of life.

The actual conditions in the mini gardens have proven to be very good for the development of forest clones; however there is not data that allows characterizing or modeling these conditions, this data could allow the reproduction of the conditions at new mini gardens installed in different locations. Also, the scientific value of optimum development models for forest clones is very valuable in the research community and these models could be reached through the data acquired by the system developed in this project.

In this project was designed and implemented a system that allows the characterization of the environment at the mini gardens. The considered parameters were light, relative humidity and temperature. A series of sensors was installed for each one of these parameters in several mini gardens; the handling of the information was done through a wireless sensor network (WSN) under the CRTECMote architecture developed by the Electronics Engineering School of the Technological Institute of Costa Rica. The collected data is visible through internet thanks to an embedded web page inside the main node of the system.

Key words: CRTECMote, GENFORES, SIWA-RTOS, mini clonal forest gardens, relative humidity, light, temperature.

Agradecimiento

Le quiero agradecer primero que todo a mi familia por acompañarme durante todo mi período de estudio, sin su constante apoyo nunca hubiera logrado cumplir mis objetivos. A mi hermano Marcell, constante compañía durante toda mi vida, pase lo que pase siempre estaremos juntos. A mi hermana Pamela, sus chineos y sus palabras de aliento son parte de lo que me da fuerzas cada día. A mi madre y a mi padre, GRACIAS.

También le debo agradecer al Ing. Sebastián López por todo su aporte a este proyecto, su conocimiento en los principales temas en los que se basa la implementación técnica del sistema diseñado permitieron que la solución planteada se pudiera implementar de la mejor manera posible.

Además, a mi profesor guía durante este proyecto Ing. Johan Carvajal, gracias a su constante empuje, iniciativa, pro actividad y a sus acertados consejos se pudo llevar este proyecto a buen norte, logrando culminar de gran manera una importante etapa del proyecto liderado por el llamado CRTecMote.

No puedo dejar por fuera a todos mis compañeros de estudio, muchos de los cuales pasaron a formar parte de mi vida como grandes amigos con tintes de hermanos.

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1. Estudio y comprensión del problema.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Entorno donde se desarrolló el proyecto.....	2
1.2.1 GENFORES.....	2
1.3 Generalidades del problema.....	3
1.3.1 Requerimientos.....	3
1.3.2 Restricciones.....	4
1.4 Síntesis del problema.....	5
1.5 Importancia de la solución.....	5
1.5.1 Económica.....	5
1.5.2 Social.....	5
1.5.3 Ambiental.....	6
1.6 Meta.....	7
1.7 Objetivos.....	7
1.7.1 Objetivo General.....	7
1.7.2 Objetivos específicos.....	7
Capítulo 2. Marco Teórico.....	8
2.1 Ambientes controlados.....	8
2.2 CRTECMOTE.....	9
2.3 Medición de parámetros ambientales.....	10
2.3.1 Temperatura.....	10
2.3.2 Humedad Relativa.....	12
2.3.3 Luz.....	13
2.4 Sistemas comerciales similares al desarrollado.....	14
2.4.1 TmoteSky IV.....	15
2.4.2 MICAz.....	15
2.5 PIC32 Ethernet Kit.....	16
2.6 SIWA-RTOS.....	17
2.7 Protocolo de comunicación I ² C.....	18
2.8 Sistema de archivos en dispositivos de almacenamiento masivo USB.....	20
2.9 TCP/IP.....	20
Capítulo 3. Procedimiento Metodológico.....	22
3.1 Metodología utilizada.....	22
3.1.1 Inducción al proyecto.....	22
3.1.2 Estudio de FreeRTOS.....	22
3.1.3 Definición de variables a medir.....	22
3.1.4 Estudio de sensores.....	23
3.1.5 Compra de equipo.....	23

3.1.6	<i>Gira a Tecnológico en Santa Clara de San Carlos.</i>	23
3.1.7	<i>Definición de arquitectura de red y ubicación de sensores.</i>	24
3.1.8	<i>Programación del microcontrolador.</i>	24
3.1.9	<i>Montaje del hardware.</i>	24
3.1.10	<i>Prueba del sistema.</i>	25
3.2	Descripción del Hardware.	25
3.2.1	<i>Aspectos Generales.</i>	25
3.2.2	<i>Montaje físico de los nodos RFD.</i>	26
3.2.3	<i>Montaje físico del nodo FFD.</i>	29
3.3	Descripción del Software.	30
3.3.1	<i>Aspectos Generales.</i>	30
3.3.2	<i>Software de los nodos RFD.</i>	31
3.3.3	<i>Software del nodo FFD.</i>	42
Capítulo 4.	Resultados	50
4.1	Selección de sensores	50
4.2	Configuración del sistema	51
4.3	Validación de las mediciones.	55
Capítulo 5.	Análisis de resultados	61
5.1	Puesta en marcha del sistema.	61
5.2	Validación de las mediciones.	62
Capítulo 6.	Conclusiones y recomendaciones	69
6.1	Conclusiones	69
6.2	Recomendaciones	70
Capítulo 7.	Bibliografía	71
	Hoja de información del proyecto	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Ejemplo de siembra bajo ambiente controlado.....	8
Figura 2.2. Diagrama de bloques de la arquitectura CRTECMOTE antes del proyecto. [4].....	10
Figura 2.3. Sensores comerciales de temperatura[6].....	11
Figura 2.4. Sensores de humedad relativa [6].....	13
Figura 2.5. Fotodetectores comerciales [6].....	14
Figura 2.6. Fotografía de Sistema TmoteSky IV [12].....	15
Figura 2.7. Fotografía de sistema MICAz [13].....	16
Figura 2.8. Diagrama de bloques del PIC32 Ethernet Starter Kit y del del PIC32. [14].....	17
Figura 2.9. Trama de una comunicación I2C. [17].....	19
Figura 2.10 Modelo de capas de TCP/IP.....	21
Figura 3.1. Topología de la red implementada.....	26
Figura 3.2. Diagrama general nodos RFD.....	27
Figura 3.3. Conexiones eléctricas de bus I2C.[21].....	28
Figura 3.4. Sensibilidad del fotodiodo BPW43.[21].....	28
Figura 3.5. Respuesta del circuito de medición de luz.[21].....	29
Figura 3.6. Diagrama general nodo FFD.....	30
Figura 3.7. Main del software de los nodos.....	31
Figura 3.8. Diagrama de flujo de tarea <i>taskMIWI</i> en nodos RFD.....	32
Figura 3.9. Diagrama de flujo función <i>StartTransfer</i>	34
Figura 3.10. Diagrama de flujo función <i>TransmitOneByte</i>	35
Figura 3.11. Diagrama de flujo de función <i>StopTransfer</i>	35
Figura 3.12. Diagrama de flujo de la función <i>MeasurementRequest</i>	36
Figura 3.13. Trama requerida para inicio de medición.[23].....	36
Figura 3.14. Posibles tramas de datos en el bus I ² C. [23].....	37
Figura 3.15. Diagrama de flujo de función <i>DataFetch</i>	38
Figura 3.16. Diagrama de flujo de función <i>Read_One</i>	39
Figura 3.17. Diagrama de flujo de función <i>READ_LIGHT_ALL</i>	41
Figura 3.18. Diagrama de flujo de la tarea <i>taskMIWI</i>	42
Figura 3.19. Diagrama de flujo de la tarea <i>Storage</i>	44
Figura 3.20. Diagrama de flujo de la función <i>FILL_ETH_BUFF</i>	45
Figura 3.21. Interfaz gráfica de la página principal.....	48
Figura 3.22. Interfaz gráfica de la página de visualización de datos.....	49
Figura 4.1. Empalme de cables que conectan los sensores con el controlador.....	54
Figura 4.2. Sensor de humedad relativa y temperatura con protecciones físicas.....	54
Figura 4.3. Interfaz gráfica de la página de visualización de datos.....	55
Figura 5.1. Muestras de temperatura tomadas para el nodo 1.....	63

Figura 5.2. Muestras de humedad relativa tomadas para el nodo 1.	64
Figura 5.3. Muestras de temperatura tomadas para el nodo 2.	65
Figura 5.4. Muestras de humedad relativa tomadas para el nodo 2.	65
Figura 5.5. Muestras de temperatura tomadas para el nodo 3.	66
Figura 5.6. Muestras de humedad relativa tomadas para el nodo 3.	66
Figura 5.7. Iluminación obtenida a partir de mediciones de voltaje.....	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Resumen de características sensor HYT-271.....	27
Tabla 4.1. Datos experimentales obtenidos para el nodo 1.	56
Tabla 4.2. Datos experimentales obtenidos para el nodo 2.	57
Tabla 4.3. Datos experimentales obtenidos para el nodo 3.	58
Tabla 4.4. Valores de voltaje e iluminación obtenidos con los sensores de luz.....	60
Tabla 5.1. Diferencia entre valores de referencia y experimentales para el Nodo 1.	62
Tabla 5.2. Diferencia entre valores de referencia y experimentales para el Nodo 2.	65
Tabla 5.3. Diferencia entre valores de referencia y experimentales para el Nodo 3.	66
Tabla 5.4. Valores de correlación para los datos experimentales obtenidos.	67

Capítulo 1. Estudio y comprensión del problema.

1.1 Introducción.

Hoy en día se están desarrollando programas a nivel nacional para introducir el concepto de cultivo de madera. Muchas de estas iniciativas han surgido del esfuerzo del Tecnológico de Costa Rica por medio de la Escuela de Ingeniería Forestal gracias al programa GENFORES liderado por el Dr. Olman Murillo. Este es un programa que mezcla ingeniería genética aplicada a especies forestales maderables con técnicas de cultivo innovadoras, además se persigue un intercambio de conocimientos entre la academia y la industria maderera nacional. GENFORES es el ente científico y director de esta iniciativa hacia el cultivo de madera de forma sostenible y rentable. Dentro del proceso científico necesario para alcanzar las metas establecidas se encuentra la siembra de las semillas de clones de árboles superiores genéticamente bajo ambientes controlados.

En el presente proyecto se recorre el proceso de investigación, diseño, implementación, pruebas y verificación de un sistema que permita adquirir datos exactos y precisos acerca de las principales variables climatológicas que afectan el desarrollo de los clones forestales en sus etapas tempranas. El fin del desarrollo del proyecto es contribuir a la gran labor que viene realizando el equipo de GENFORES en cuanto a la tecnificación en el cultivo de madera, además de servir como una plataforma de pruebas para la red inalámbrica de sensores CRTECMOTE desarrollada por la Escuela de Ingeniería Electrónica. Así, el presente proyecto une dos grandes ramas investigativas y construye un puente de cooperación entre proyectos de gran envergadura dentro del Tecnológico de Costa Rica.

Para este capítulo introductorio se realizará una revisión del problema existente y la propuesta de solución del mismo así como las implicaciones positivas de la solución. Además se realizará una corta reseña de varios temas introductorios para comprender el porqué de la solución brindada.

1.2 Entorno donde se desarrolló el proyecto.

1.2.1 GENFORES.

Este es un programa que vincula la academia y la industria, creado a finales el año 2001 por el Dr. Olman Murillo Gamboa, profesor en la Escuela de Ingeniería Forestal del Tecnológico de Costa Rica y especialista en Mejoramiento Genético Forestal. GENFORES es la primera cooperativa de mejoramiento forestal en Costa Rica y cuenta con la participación de 11 empresas reforestadoras privadas que aportan recursos económicos y conocimiento, propiciando un intercambio tecnológico muy amplio entre todos los integrantes del grupo. Su misión es promover la exploración, conservación, utilización racional y mejoramiento de los recursos genéticos forestales.

GENFORES nació con el propósito de aumentar la productividad de las plantaciones forestales en el país, mediante mejoramientos genéticos que ayuden a disminuir los costos y aumentar la calidad de los árboles plantados por las organizaciones miembros. Además, esta organización propicia la colaboración omnidireccional de los participantes lo cual ayuda a disminuir costos de investigación, capacitación y de transferencia tecnológica.

Gracias a los aportes de este programa, la reforestación ha dado un giro radical en Costa Rica al comenzar a ver la siembra de árboles como un cultivo tal como lo son el café, banano, caña de azúcar, etc. Donde se busca un beneficio económico que determina a la actividad como un negocio muy rentable al establecer técnicas de preparación y manejo de suelos y sitios bien seleccionados para llevar a cabo las actividades se ha propiciado la incursión en el mercado de inversionistas tanto nacionales como extranjeros que buscan plantaciones donde se utilicen métodos de manipulación genética que garanticen árboles de calidad superior logrados gracias al uso de nuevas tecnologías de producción en invernaderos. [1]

Además, las actividades realizadas por GENFORES contribuyen activamente a mejorar la calidad académica de la carrera de Ingeniería Forestal del TEC ya que se ha logrado una alta vinculación con la industria, esto implica que los estudiantes de la carrera participan de

procesos de innovación e investigación en temáticas de real necesidad para el ambiente en el que se desarrollarán en su vida profesional.

En la sede del Tecnológico de Costa Rica en Santa Clara de San Carlos se encuentran unas instalaciones de GENFORES donde se realizan las capacitaciones de las empresas que entran a esta organización. Cada empresa nueva debe asignar un ingeniero con su debido grupo de subalternos encargados de llevar a cabo su propio programa de mejoramiento genético y construir un invernadero con un diseño aportado por GENFORES.[2]

1.3 Generalidades del problema.

1.3.1 Requerimientos.

Como se mencionó anteriormente, el programa GENFORES tiene operaciones en las instalaciones del Tecnológico de Costa Rica en San Carlos, en este lugar se cuenta con una serie de túneles con ambiente controlado, o mini jardines clonales para la siembra de los clones de árboles creados por ellos. Estos espacios deben presentar características climatológicas adecuadas para el óptimo desarrollo de los árboles en su etapa inicial tales como humedad relativa, temperatura y cantidad de luz, entre otras. Algunas de estas condiciones son manipuladas mediante sistemas de riego por microaspersión, que se realiza de manera automática mediante temporizadores y sistemas de apertura de válvulas, sin embargo las decisiones de la frecuencia de riego son hechas a partir de la experiencia de los encargados y no de datos científicos o históricos.

Actualmente el desempeño logrado en las recámaras con ambientes controlados es satisfactorio ante los requerimientos de GENFORES, sin embargo, no se cuenta con medidas de las características ambientales que permitan cuantificar el desempeño de este con datos recopilados en el lugar, ante esta situación, los encargados de GENFORES acuden al personal de la Escuela de Ingeniería Electrónica, específicamente al Ing. Johan Carvajal, coordinador del proyecto de investigación CRTECMOTE para analizar la posibilidad de implementar un sistema que permita tomar mediciones y así cuantificar el desempeño del ambiente de

desarrollo de los árboles en su etapa temprana para buscar potenciales mejoras con el fin de aumentar las posibilidades de reproducir estas condiciones de crecimiento de los árboles en otras locaciones.

1.3.2 Restricciones.

Dentro de las restricciones que se deben destacar está que el nivel de confiabilidad de los datos debe ser muy alto ya que con base en ellos se tomarán decisiones que afectarán las investigaciones de GENFORES. Adicionalmente, el dispositivo que se coloque en el lugar estará expuesto a condiciones ambientales extremas, como altas temperaturas y mucha humedad, de no tomarse las medidas preventivas adecuadas, estos factores pueden afectar el funcionamiento del sistema, por lo tanto, el diseño debe tomar en consideración un aislamiento del ambiente externo o el uso de dispositivos cuyas características les permitan operar bajo estas condiciones.

También se debe mencionar que el encargado del desarrollo de este proyecto deberá trasladarse constantemente a las instalaciones del Tecnológico de Costa Rica en Santa Clara de San Carlos durante la etapa de instalación y pruebas de los equipos, debido a que estas etapas implicarán la realización de constantes pruebas de campo.

Además existen algunas restricciones en cuanto al presupuesto necesario para la compra de los equipos, por ser GENFORES una dependencia del Tecnológico de Costa Rica, sus gastos deben ajustarse a los presupuestos asignados por lo que se deben mantener los costos del sistema dentro de un margen aceptable para esta entidad.

Debido al tiempo disponible para la ejecución del proyecto, no es posible desarrollar el hardware que se adapte de la mejor manera a las necesidades del proyecto, esto en cuanto a controladores y sus tarjetas de interfaz con módulos periféricos. Se utilizaron tarjetas de desarrollo comerciales que aunque cumplen con los requerimientos básicos no son la solución de hardware más eficiente ya que algunas de sus características son

subaprovechadas. El alcance del proyecto se limita al desarrollo del software y montaje en tarjetas de desarrollo existentes para la evaluación y mejoramiento del diseño de la red de sensores CRTECMOTE.

1.4 Síntesis del problema.

No se cuenta con medidas precisas de las características ambientales en el invernadero de crianza de clones de especies forestales de las instalaciones de GENFORES en la sede de Santa Clara.

1.5 Importancia de la solución.

1.5.1 Económica.

Según el Dr. Olman Murillo, un sistema de adquisición de datos como el desarrollado en el presente proyecto, no existe en el mercado nacional por lo que lo hubieran tenido que enviar a comprar al extranjero y habría costado una suma muy alta de dinero, esto según sondeos realizados por ellos de manera extraoficial en el mercado. Además que de haber adquirido un sistema de estos, posiblemente no se adaptaría exactamente a sus necesidades tal como lo hace la red de sensores basada en la arquitectura CRTECMOTE.

Además, la implementación del sistema de medición de parámetros climáticos permitirá mejorar las condiciones de crecimiento de los clones forestales, por lo tanto su productividad y consecuentemente se incrementará el atractivo financiero del cultivo de madera, atrayendo nuevos inversionistas que inyecten capital a la actividad.

1.5.2 Social.

El poseer datos de los parámetros climáticos en los mini jardines clonales permitirá al personal de GENFORES reproducir las condiciones logradas en Santa Clara de San Carlos en las instalaciones de las demás empresas miembro del programa. Además de que los datos adquiridos mediante el sistema desarrollado serán la base de próximas investigaciones a realizarse por parte de estudiantes avanzados o en proyecto de graduación de la carrera de

Ingeniería Forestal. Por lo tanto la culminación exitosa de este proyecto abrirá las puertas a oportunidades para otros estudiantes de realizar proyectos de investigación. Además de que al reproducirse las condiciones ambientales de los invernaderos bajo estudio, será posible expandir los beneficios de la genética forestal más rápidamente a mayor cantidad de sectores.

1.5.3 Ambiental.

Mientras más árboles se cultiven, menos árboles de bosques primarios será necesario talar. Esto implica que cualquier ayuda a las investigaciones de genética forestal es directamente un aporte a las buenas prácticas ambientales que persigue Costa Rica. El proyecto al que hace referencia este informe es claramente un ejemplo de tecnología aplicada a la mejora del rendimiento de los cultivos de madera, por lo que su aporte a nivel del medio ambiente es fácilmente extrapolable.

Por otra parte, en GENFORES no se cultivan solamente árboles para la actividad comercial, además se clonan especies en peligro de extinción de varias zonas del país. Esto implica que al ayudar al mejoramiento y crecimiento científico de GENFORES se está colaborando directamente con la conservación de especies de árboles en peligro de extinción y los ecosistemas en los que estos crecen.

1.6 Meta

Caracterizar los factores ambientales principales que afectan la operación de un mini jardín clonal bajo ambiente controlado para siembra de clones de especies forestales.

1.7 Objetivos

1.7.1 Objetivo General

Cuantificar el impacto de los factores ambientales en la calidad de los clones forestales que produce Genfores en la sede del Tecnológico de Costa Rica en Santa Clara de San Carlos mediante la implementación de una red de inalámbrica de sensores que recolecte, organice y almacene dicha información.

1.7.2 Objetivos específicos

- Determinar el conjunto de sensores ambientales requeridos para caracterizar la operación de un túnel de ambiente controlado mediante una investigación comparativa de otras aplicaciones similares implementadas.
- Desarrollar un sistema de recolección y almacenamiento de la información mediante la implementación de una red inalámbrica de sensores con la plataforma CRTECMOTE.
- Validar los datos obtenidos contra un conjunto de mediciones de referencia por medio de métodos estadísticos.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1 Ambientes controlados.

Generalmente el cultivo de frutas y hortalizas se debe realizar en una época determinada del año y en regiones específicas según el tipo de cultivo que se pretende realizar. Esto porque es en estas zonas y épocas donde se dan las condiciones ambientales idóneas para el óptimo desarrollo de los cultivos lo que implica una limitante en cuanto a la máxima productividad y rendimiento de las cosechas.

Como solución a lo anterior, se han utilizado desde hace miles de años los invernaderos, estos son aposentos donde se crea un microclima controlado por diversos métodos de manera que se independiza el rendimiento de las plantaciones de las condiciones climatológicas externas. Recientemente se han dado avances tecnológicos que han contribuido a ejercer mayores controles sobre la ventilación, temperatura, cantidad de luz, riego, abonado y otros factores que intervienen en crecimiento de los cultivos. El principio básico que comparten todos los invernaderos es el de dejar pasar los rayos del sol mediante el recubrimiento de la estructura con plásticos semitransparentes o cristales y atrapar el calor producido por la radiación del sol de forma tal que se mantienen temperaturas elevadas. [3]



Figura 2.1. Ejemplo de siembra bajo ambiente controlado.

Dentro de las ventajas de la siembra en invernaderos se encuentra la menor susceptibilidad de las plantas a enfermedades y plagas, la facilidad de controlar el riego debido a que generalmente se utiliza cultivos de poca extensión y una menor intervención del hombre dentro de la siembra y cultivo de las plantas.

2.2 CRTECMOTE.

Este es un proyecto de la Escuela de Ingeniería Electrónica del Tecnológico de Costa Rica, liderado por el profesor Ing. Johan Carvajal. Su propósito es diseñar un sistema de adquisición de datos con arquitectura abierta para redes inalámbricas de sensores. Cada nodo de sensado es un sistema autónomo que cuenta con interfaces analógicas, módulos de comunicación inalámbrica y de administración de energía además de poseer capacidad de procesamiento de datos. Este sistema es desarrollado con el fin de ser aplicado a monitorización ambiental, industrial o agrícola y a largo plazo en aplicaciones médicas como el monitoreo remoto de pacientes y posibles usos en sistemas de seguridad.[4].

En cuanto a la construcción de los nodos, la unidad de procesamiento se basa en un microcontrolador PIC32, escogido por su buena relación potencia/frecuencia, instrucciones que facilitan el ahorro de energía y por contar con una plataforma de desarrollo adecuada y de fácil acceso como lo es MPLABIDE. Para la comunicación inalámbrica se utiliza el transceptor MRF24J40A, con una sensibilidad de -91 dBm, frecuencia central de 2,4 GHz e interfaz de comunicación por medio de SPI, además de que Microchip ofrece soporte de software para este dispositivo. También se cuenta con un dispositivo de comunicación de área extendida (WAN) que permite la comunicación por medio de protocolos GPRS y EDGE, su conexión al microcontrolador se realiza por medio de USB. En cuanto a la adquisición de datos, se realiza por medio de los ADC's con que cuenta el PIC, esta interfaz tiene capacidad para 10 sensores analógicos.

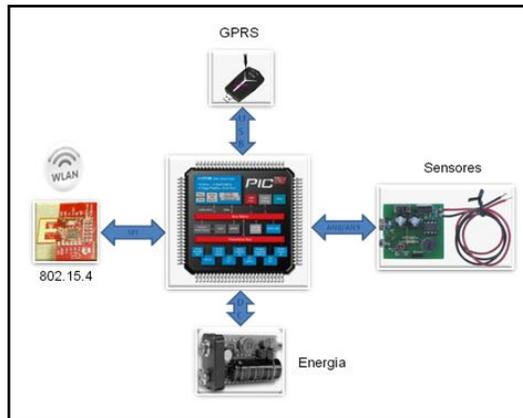


Figura 2.2. Diagrama de bloques de la arquitectura CRTECMOTE antes del proyecto. [4]

En la figura 2.2 se puede observar la arquitectura de la red inalámbrica de sensores representada mediante un diagrama de bloques general, cabe destacar que la realización del presente proyecto involucra cambios y adiciones a la estructura presentada en esta figura. De modo tal que se puede llegar a utilizar como punto de comparación.

2.3 Medición de parámetros ambientales.

Como se mencionó en el apartado 2.2 de este documento, entre las características climatológicas que se deben tomar en cuenta en los cultivos bajo ambientes controlados están la cantidad de luz (medida en Lux), la humedad relativa del aire y la temperatura del ambiente. Es por esto que se realiza una pequeña reseña acerca de los principios fundamentales de medición de estos parámetros, enfocándose principalmente en los relacionados con mediciones eléctricas.

2.3.1 Temperatura.

La temperatura es uno de los parámetros más influyentes en la naturaleza ya que interviene en todos los fenómenos físicos, por lo que su medición brinda información de gran importancia en cualquier proceso investigativo. Existe una gran variedad de métodos para la medición de temperatura, dentro de estos destacan dos grandes grupos, los que utilizan métodos mecánicos y los que se basan en propiedades eléctricas de los materiales. Los

basados en características termo-eléctricas encierran los que miden variaciones de resistencia en conductores y semiconductores junto con los que utilizan la diferencia de potencial eléctrico (voltaje) entre metales [5].

En la figura 2.3 se ilustran sensores tipo termocupla, PT100 y encapsulado (respectivamente de izquierda a derecha) de los cuales se tratará en este apartado.



Figura 2.3. Sensores comerciales de temperatura[6].

Dentro de los sensores eléctricos de temperatura más comunes se encuentra el termopar. Cuando se aplica calor a la unión de dos metales diferentes se produce una fuerza electromotriz que puede ser medida al un extremo de los conductores.

Otro tipo de sensor es el conocido como RTD (detectores de resistencia de temperatura) los cuales se caracterizan por tener un cambio lineal positivo de la resistencia eléctrica en función de la temperatura. Estos dispositivos son ampliamente usados en la industria gracias a su gran estabilidad, linealidad y baja sensibilidad.

Finalmente, se ha venido dando la construcción de sensores encapsulados que brindan una gran estabilidad, linealidad, simplicidad de implementación y de muy bajo costo. Un ejemplo de estos es el TMP35 de la empresa Analog Devices. Estos sensores son ampliamente utilizados en aplicaciones de sistemas de control ambiental, protección térmica, alarmas de incendio y manejo de temperatura en computadores.

2.3.2 Humedad Relativa.

Para la medición de humedad relativa se han utilizado una gran cantidad de métodos que van desde simples indicadores mecánicos hasta complejos y costosos sistemas analíticos. A continuación se mencionarán varios de los principales métodos para la medición este parámetro.

El primer instrumento desarrollado consistía en un cabello humano o de caballo cuya longitud variaba de acuerdo con la humedad o sequía en el aire, el cabello era sujetado por un extremo a un punto fijo y el otro a una aguja indicadora de la humedad del aire.

También existe la medición de humedad relativa mediante la técnica del cristal enfriado, esta consiste en un espejo metálico enfriado y un mecanismo de detección óptica para determinar cuándo se da la condensación en la superficie del espejo. Adicionalmente se debe conocer la temperatura a la que se da esta condensación por lo que el dispositivo debe poseer un sensor de temperatura de muy alta precisión. Este método es poco utilizado en la industria debido al alto costo que implica la construcción del dispositivo, sin embargo tiene la reputación de ser el que brinda las mediciones más precisas entre los dispositivos disponibles en el mercado. [7]

En la figura 2.4 se muestran ejemplos de los diferentes tipos de transductores de humedad relativa, de izquierda a derecha se observa un antiguo higrómetro de cabello de caballo, un psicómetro y por último un sensor capacitivo de alta tecnología encapsulado en un circuito integrado.

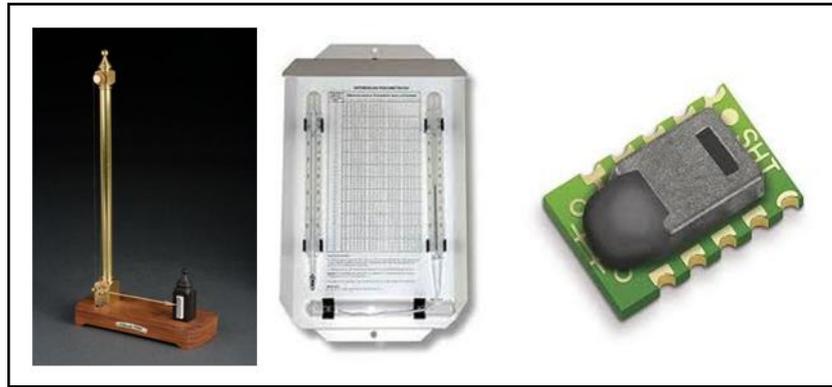


Figura 2.4. Sensores de humedad relativa [6].

Finalmente, se encuentran los sensores capacitivos, estos consisten de dos placas metálicas separadas por un material dieléctrico que varía su resistencia en función del agua presente en el ambiente. Estos son los más utilizados en aplicaciones donde se desea manipular la información por métodos electrónicos ya que la interpretación de las lecturas se realiza con circuitos sencillos que muchas veces son encapsulados en un solo circuito integrado [8].

2.3.3 Luz.

En el ámbito de la siembra bajo ambientes controlados, la luz es un factor determinante en el éxito de los cultivos ya que es gracias a esta forma de energía que se da el proceso de fotosíntesis y por lo tanto el desarrollo de las plantas. Los parámetros que determinan la calidad de la luz generalmente se definen como su calidad o color (longitud de onda), su duración e intensidad [9].

Para la detección y medición de luz existen una gran cantidad de dispositivos como los piranómetros, sensores quantum y luxómetros, todos ellos de gran complejidad. Sin embargo, su funcionamiento se basa en dispositivos de menor complejidad conocidos como detectores fotovoltaicos tales como los fotodiodos, los fototransistores y las fotorresistencias. Los fototransistores funcionan como transistores regulares pero con la salvedad de que su polarización se da en función de la cantidad de luz que incide sobre una

superficie fotosensible. Los fotodiodos también comparten muchas de sus características con los diodos regulares, siguen siendo una unión PN sin embargo para su utilización correcta debe de ser polarizado inversamente de manera que al ser excitados por la luz permiten el paso de corriente, la cual se mide para obtener valores eléctricos dependientes de la cantidad de luz presente. Por último, las fotoresistencias también conocidas como resistencias dependientes de luz (LDR por sus siglas en inglés) son elementos cuya resistencia eléctrica disminuye con el aumento de la luz incidente. [10]

En la figura 2.5 se muestran de izquierda a derecha modelos comerciales de LDRs, fotodiodos y fototransistores.

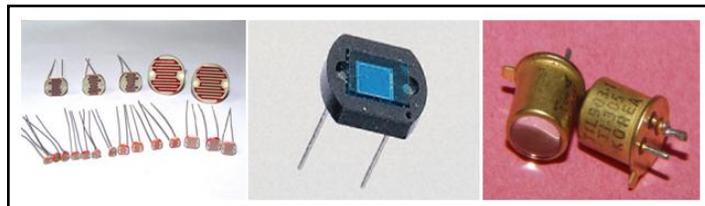


Figura 2.5. Fotodetectores comerciales [6].

Cualquiera de los dispositivos fotodetectores puede ser utilizado para la medición de luz en cualquier unidad deseada siempre y cuando se realicen los acondicionamientos de señal necesarios.

2.4 Sistemas comerciales similares al desarrollado

La idea de medir y registrar parámetros climáticos no es nueva en el mercado. Actualmente existe una gran variedad de sistemas capaces de realizar dichas tareas. La mayoría de ellos son conocidos como “Data Loggers”, estos se definen como instrumentos que recolectan, evalúan y despliegan datos tales como parámetros climáticos. Estos dispositivos son usados cuando se requiere registrar datos durante largos períodos de tiempo sin la presencia constante de personal [11]. A continuación se hará una revisión de dos módulos comerciales con el fin de conocer el estado del arte en este proyecto.

2.4.1 TmoteSky IV.

Este es un módulo que se encuentra en el mercado desde el año 2006. En la figura 2.6 se puede observar una fotografía del módulo con sus principales componentes señalados. Cuenta con las siguientes características [12]:

- Transceptor de 250kbps en la banda de 2.4GHz compatible con IEEE 802.15.4.
- Microcontrolador MSP430 de Texas Instruments (10k RAM, 48k Flash).
- ADC, DAC, control de voltaje de alimentación y controlador DMA integrados.
- Antena integrada en la tarjeta con rango de 125 metros al aire libre.
- Sensores de humedad, temperatura y luz integrados.
- Ultra bajo consumo de corriente.
- Programación por medio de USB.
- Sistema operativo TinyOS.

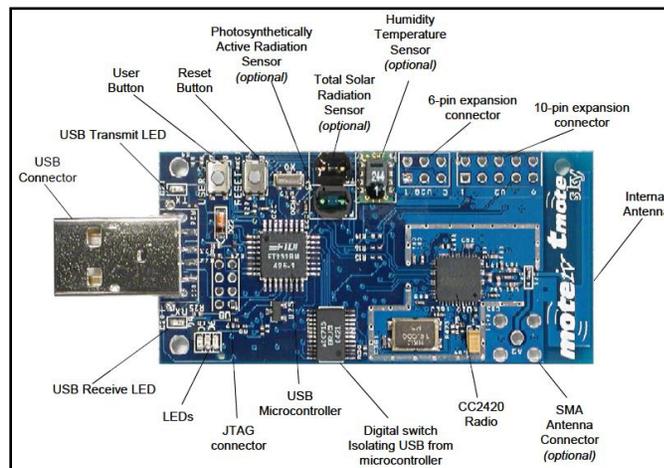


Figura 2.6. Fotografía de Sistema TmoteSky IV [12].

2.4.2 MICAz.

Este es un módulo que permite habilitar redes de sensores de bajo consumo de potencia fabricado por la compañía estadounidense Crossbow Technology INC. En la figura 2.7 se muestra una fotografía del módulo y a continuación sus principales características [13]:

- Compatible con protocolo IEEE 810.15.4 en la banda de 2.4 GHz.
- Velocidad de datos de 250 kbps.
- Conector de expansión de 51 pines para soportar entradas analógicas y digitales, I2C, SPI y UART.
- Microcontrolador Atmel ATmega128L con 128 KB de memoria Flash y EEPROM de 4K.
- Memoria Flash de 512 KB serial para almacenar más de 100000 mediciones.
- Conexión integrada que soporta sensores de temperatura, luz, RH, presión barométrica, aceleración, acústica y parámetros magnéticos.
- Programación mediante USB.
- Sistema operativo TinyOS.



Figura 2.7. Fotografía de sistema MICAz [13].

2.5 PIC32 Ethernet Kit.

La empresa Microchip posee dentro de sus productos el PIC32 Ethernet Kit, esta es una herramienta de diseño de sistemas embebidos de bajo costo y gran versatilidad. Dentro de sus principales características se encuentran el poseer un microcontrolador PIC32MX795F512L de 32 bits, conectividad USB para programación y debugueo, botones y leds para la realización de pruebas. Esta es una plataforma de desarrollo pensada para el desarrollo de aplicaciones Ethernet y USB por lo que cuenta con gran cantidad de material de apoyo gratuito disponible en línea.

El microcontrolador PIC32MX795F512L es uno de los más poderosos comercializados por Microchip. La unidad de control posee una arquitectura MIPS32 M4K tipo RISC de 32 bits con Pipeline de 5 estados, buses de datos y direcciones de 32 bits, ALU monociclo, entre muchas otras características. Por otra parte, este microcontrolador posee memorias no volátiles tipo FLASH y volátiles tipo SRAM. Dentro de los principales periféricos disponibles al usuario se encuentran puertos de entrada/salida, puerto paralelo maestro, temporizadores, módulos PWM, ADCs, módulos de comunicación serial (SPI, I2C, UART), módulo de reloj de tiempo real (RTCC), módulos comparadores, entre varios más.[14]

Para efectos de mayor comprensión de la arquitectura del microcontrolador y herramienta de desarrollo empleadas se adjunta la figura 2.8 donde se muestran diagramas de bloques del Ethernet Kit a la izquierda y el PIC32 a la derecha.

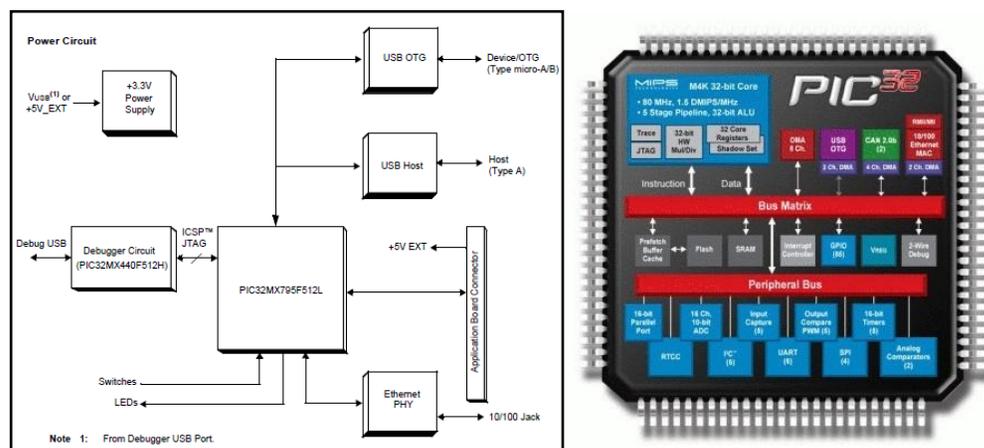


Figura 2.8. Diagrama de bloques del PIC32 Ethernet Starter Kit y del del PIC32. [14]

2.6 SIWA-RTOS.

El término Sistema Operativo de tiempo real se refiere a un tipo de procesamiento donde el éxito de una operación no depende únicamente de su resultado, si no del momento en el que se obtenga. Para lograr esto se utilizan técnicas para ordenar las tareas que se deben ejecutar en función de las prioridades asignadas a ellas. La organización de las tareas se lleva

a cabo gracias a una serie de módulos dentro del sistema, como el planificador de procesos, el despachador y el manejador de recursos.

Free-RTOS constituye un micro kernel con propósito multitarea para lo cual utiliza un método de planificación llamado Round Robin en el cual cada proceso posee un tiempo determinado para su ejecución de manera que se garantiza que se dé un uso eficiente del procesador. Cada una de las tareas definidas puede encontrarse en 1 de 4 estados a la vez: bloqueada, suspendida, lista y en ejecución. Estos estados permiten al calendarizador del sistema operativo definir cuál de las tareas debe ejecutarse al final de cada momento y evitar que la tarea de mayor prioridad se apropie del procesador. Además de la creación de tareas, este sistema operativo permite crear colas para la transferencia de entre tareas, semáforos para acciones de sincronización ya sea entre tareas o con eventos externos mediante el uso de interrupciones. [15]

Finalmente, SIWA-RTOS consiste en una reducción de FREE-RTOS donde se busca una mayor eficiencia en el consumo de energía del hardware sobre el que funcione el sistema operativo. Es un sistema desarrollado dentro del proyecto CRTECMOTE de la Escuela de Ingeniería Electrónica. SIWA-RTOS está pensado para aplicaciones de monitorización remota donde los sistemas deban funcionar con alimentación por baterías y/o celdas solares de manera que fueron eliminadas todas las funciones de FREE-RTOS que no son necesarias para este tipo de aplicaciones, además se modificó el módulo de calendarización para reducir la cantidad de pulsos de reloj necesarios para la ejecución de cada tarea de forma que se reduce aún más el consumo de potencia. Se incluyó una tarea de prioridad mínima que se ejecuta cuando no hay ningún otro proceso en ejecución, esta tarea se llama Idle_Task y hace que el microcontrolador entre en estado de bajo consumo de potencia. [16]

2.7 Protocolo de comunicación I²C.

El protocolo I²C o IIC (Inter Integrated Circuit) fue desarrollado a principios de la década de los 80 por Phillips Semiconductor (actualmente NXP semiconductor). La interfaz física

consiste de dos líneas bidireccionales, una de reloj (SCL) y una de datos (SDA). Su utilización provee una manera fácil de interconectar circuitos como por ejemplo EEPROMs, LCDs, puertos remotos de entrada/salida, RAM, sensores, entre muchos otros.

Debido a la variedad de tecnologías de fabricación de los componentes que utilizan I²C (CMOS, NMOS, bipolares), los niveles de los "1" y "0" lógicos no están especificados, si no que dependen del voltaje de alimentación de los dispositivos (VDD), se necesita que el "0" lógico sea de $0,3 \cdot VDD$ y el "1" lógico sea $0,7 \cdot VDD$.

Cada esclavo en el bus debe tener una dirección única, tradicionalmente de 7 bits aunque actualmente hay dispositivos que pueden manejar direcciones de 10 bits. Las transferencias de datos deben seguir un formato que comienza con un Start bit (S), seguido por los 7 bits de la dirección del esclavo con el que se desea establecer la comunicación, el octavo bit está reservado para determinar si se trata de una operación de lectura del esclavo o escritura en el esclavo (R/W). El esclavo debe de sostener en "0" la línea SDA durante el noveno pulso de SCL para indicar el reconocimiento de la dirección. Seguido se transfieren los datos de 1 byte seguidos de su respectivo ACK. Para finalizar, se da el pulso de Stop (S), el cual indica la finalización de la comunicación y ambas líneas quedarán en estado alto o "1" lógico. La secuencia anterior se puede visualizar en la figura 2.9.

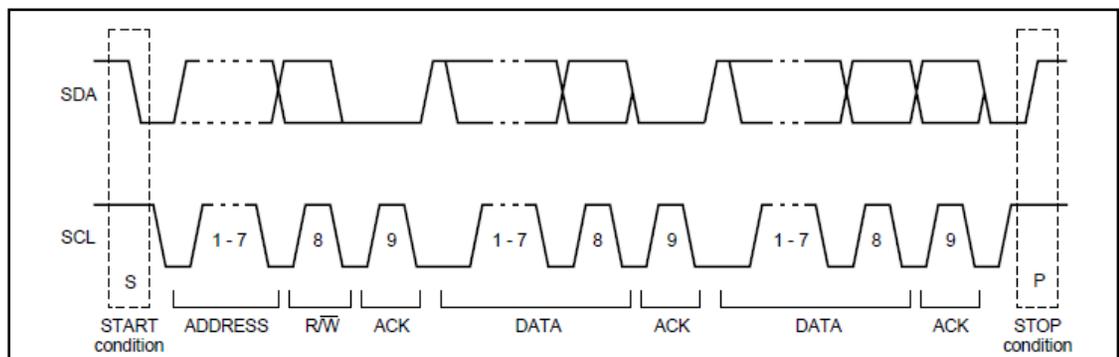


Figura 2.9. Trama de una comunicación I2C. [17]

2.8 Sistema de archivos en dispositivos de almacenamiento masivo USB

Para aplicaciones donde se necesita almacenar grandes cantidades de datos durante largos períodos de tiempo es de mucha utilidad la implementación de sistemas de archivos en memorias no volátiles. Para el caso de este proyecto se estudió el sistema de archivos FAT16 sobre una tarjeta SD. El fabricante del microcontrolador a utilizar cuenta con una librería de código que permite implementar esta función en las tarjetas de desarrollo a utilizar en el proyecto [18].

Las funciones de la librería se manipulan mediante una serie de funciones (APIs), entre las que destacan las siguientes:

- FSInit: Inicializa la tarjeta.
- FSfclose: Actualiza la información de los archivos y libera espacio en la memoria.
- FSfopen: Permite abrir un archivo desde la tarjeta de memoria ya sea para su lectura o escritura. Si no existe el archivo, lo creará con el nombre especificado.
- FSfread: Lee información desde un archivo abierto y la coloca en un buffer.
- FSfwrite: Escribe información desde un buffer a un archivo en la tarjeta.
- FSfremove: Busca un archivo y lo elimina de la memoria SD.
- FSchdir: Cambia el directorio de trabajo actual.
- FSfprintf: Escribe una cadena de caracteres a un archivo especificado.

A partir de las funciones anteriores y otras no listadas es posible la implementación de rutinas que manipulen archivos donde se pueda almacenar y extraer información para cualquier aplicación que así lo necesite.

2.9 TCP/IP

TCP/IP se refiere a los dos protocolos de mayor relevancia que soportan la transmisión de datos entre computadoras por internet, Protocolo de Control de Transmisión (TCP) y Protocolo de Internet (IP). Además de estos protocolos existen muchos otros como FTP,

HTTP, SMTP, POP y Telnet. Sin embargo fueron los protocolos TCP/IP los primeros en definirse y en los que se basan todos los demás [19].

La empresa Microchip pone a disposición de sus clientes un conjunto de librerías para implementar estos protocolos, conocidas como Microchip TCP/IP Stack. Este Stack es de descarga gratuita y viene acompañado con documentación suficiente para comprender su funcionamiento. Estas librerías siguen el modelo de capas conocido como “TCP/IP Reference Model” en el cual se divide el código en múltiples capas donde cada capa puede acceder a los servicios de las que se encuentran debajo de ella [20]. En la figura 2.10 se presenta una figura simplificada del modelo de capas seguido por este código.

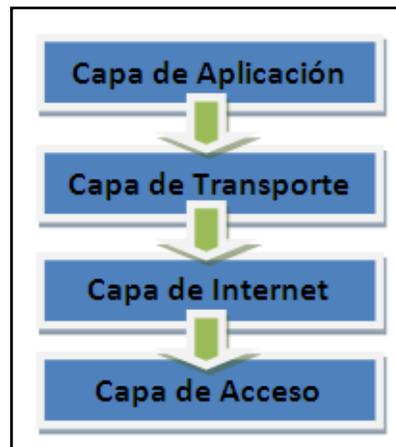


Figura 2.10 Modelo de capas de TCP/IP.

Capítulo 3. Procedimiento Metodológico

3.1 Metodología utilizada.

3.1.1 Inducción al proyecto.

El proyecto inició con una inducción a los aspectos técnicos básicos del proyecto CRTECMOTE por parte de estudiantes que realizaron su proyecto de graduación durante el primer semestre del año 2010. Los proyectos de graduación de estos estudiantes les permitieron adquirir la experiencia necesaria para brindar la inducción y facilitar el proceso de aprendizaje de aspectos como el sistema operativo y generalidades de los microcontroladores PIC32 y sus diferentes Kits de desarrollo.

3.1.2 Estudio de FreeRTOS.

Con el fin de fortalecer los conocimientos adquiridos en el entrenamiento inicial, se estudió con detenimiento el manual de FreeRTOS [14]. De su estudio se logró comprender a profundidad el funcionamiento y alcance de este sistema operativo en un sistema como el que se desarrolló en este proyecto, además se realizó un resumen de los métodos disponibles al usuario del sistema operativo con el fin de agilizar el proceso de programación de las tareas necesarias para el proyecto.

3.1.3 Definición de variables a medir.

Cuando se tuvo una idea de los alcances de las herramientas disponibles, se realizó una reunión con el personal de GENFORES, específicamente con el Dr. Olman Murillo y la Ing. Yorleny Badilla. Junto con ellos se definió las variables climáticas que se medirían y las sensibilidades requeridas, además de la cantidad de sensores de cada variable que se colocaría en cada “mini jardín” y cuántos de ellos se deseaba instrumentar. También se determinó la frecuencia de toma de muestras y la forma en que desean visualizar la información.

Con esta información se podía proceder a realizar una investigación exhaustiva de las mejores formas de medir los parámetros requeridos, luz, temperatura y humedad relativa, tal como se ha mencionado en reiteradas ocasiones.

3.1.4 Estudio de sensores.

Se tomaron en cuenta diferentes tipos de sensores antes de decidir acerca de los que se utilizarían, para tomar esta decisión se estudiaron las hojas de datos de varios sensores para cada parámetro y se realizaron algunas pruebas rápidas con los que fuera posible conseguir rápidamente. Esta investigación y experimentación arrojó datos que permitieron tomar las decisiones finales acerca de los sensores a seleccionar.

3.1.5 Compra de equipo.

Con los alcances proyecto definidos y toda la información recopilada, se procedió a levantar una lista de materiales requeridos para que el personal de la Escuela de Ing. Forestal realizara la orden de compra con el departamento de Aprovisionamiento del Tecnológico de Costa Rica. Esta actividad fue de gran prioridad debido a la ya conocida problemática que implican las compras por medio de instituciones públicas, las cuales sufren constantes atrasos y problemas burocráticos.

3.1.6 Gira a Tecnológico en Santa Clara de San Carlos.

Se programó una gira al Tecnológico de San Carlos en la cual se evacuaría cualquier duda con respecto al proyecto con el personal tanto de planta en el lugar como los encargados del proyecto GENFORES. En esta gira se conoció la ubicación específica donde se requerían las mediciones, además de las condiciones reales a las cuales estaría expuesto el equipo a diseñar.

3.1.7 Definición de arquitectura de red y ubicación de sensores.

Con el conocimiento de las dimensiones de cada “mini jardín” se procedió a realizar diagramas de la ubicación final de cada sensor, esto permitió calcular requerimientos de materiales adicionales como cable para conectar los sensores al nodo de medición.

Por otra parte, se definió la arquitectura que se desea para la red de sensores a nivel general, para lo cual también se realizaron diagramas que mostraran lo que se desea construir.

3.1.8 Programación del microcontrolador.

En este punto ya se conocía toda la información necesaria para comenzar la programación del microcontrolador PIC32, las principales funciones que se debieron implementar fueron las de lecturas de ADCs (2 canales), comunicación I²C en modo maestro, configuración de los módulos RTCC, USB, TCP/IP y uso de las librerías de comunicación inalámbrica MIWI implementadas en un proyecto anterior, sin dejar aparte la sincronización de tareas del sistema operativo en general.

3.1.9 Montaje del hardware.

Para el montaje del hardware del sistema fue necesaria la adquisición de diversos materiales que permitieran el aislamiento de los equipos de las condiciones climatológicas típicas de un invernadero, altas temperaturas y alta humedad relativa. Estos materiales son principalmente cajas plásticas con protecciones de hule para la salida y entrada de cableado, se utilizaron tres tamaños de cajas, una grande para contener al nodo central, unas medianas para contener los microcontroladores de los nodos de toma de datos y varias pequeñas para aislar las bifurcaciones del cableado. Además se utilizó cable UPT especial para uso en exteriores y protecciones de hule que sirvan para aislar la circuitería de cada sensor en el lugar de la toma de muestras.

3.1.10 Prueba del sistema.

Este constituyó el último paso en el proyecto. Se realizó en el lugar final donde quedó operando el sistema, en los invernaderos de GENFORES en la sede del Tecnológico de Costa Rica en Santa Clara de San Carlos. A partir de instrumentos de referencia para la medición de temperatura, humedad relativa y cantidad de luz se corroboró que los datos tomados fueran precisos. Además que todas las conexiones con los sensores estuvieran bien hechas de manera que no entrara humedad a las partes del sistema que son susceptibles a corrosión. También se comprobó que las funciones de internet estuvieran listas para su conexión a la red del Tecnológico.

3.2 Descripción del Hardware.

3.2.1 Aspectos Generales.

Para formar una visión general de la solución implementada es necesario iniciar con una explicación de la topología de red a seguir para la implementación del sistema.

En la figura 3.1 se puede observar un diagrama de la topología implementada. En esta figura se muestra un nodo central o FFD que se comunica con tres nodos secundarios o RFDs por medio del estándar IEEE 802.15.4, específicamente el protocolo MIWI de comunicación inalámbrica. Cada RFD está conectado a dos grupos de sensores, el primer grupo son los que miden humedad relativa y temperatura que se comunican por medio del protocolo serial I2C y el segundo grupo son sensores analógicos de luz que se leen por medio del ADC de cada nodo.

En la parte superior de la figura se observa el enlace entre el FFD y una PC, este se realiza por medio de Ethernet.

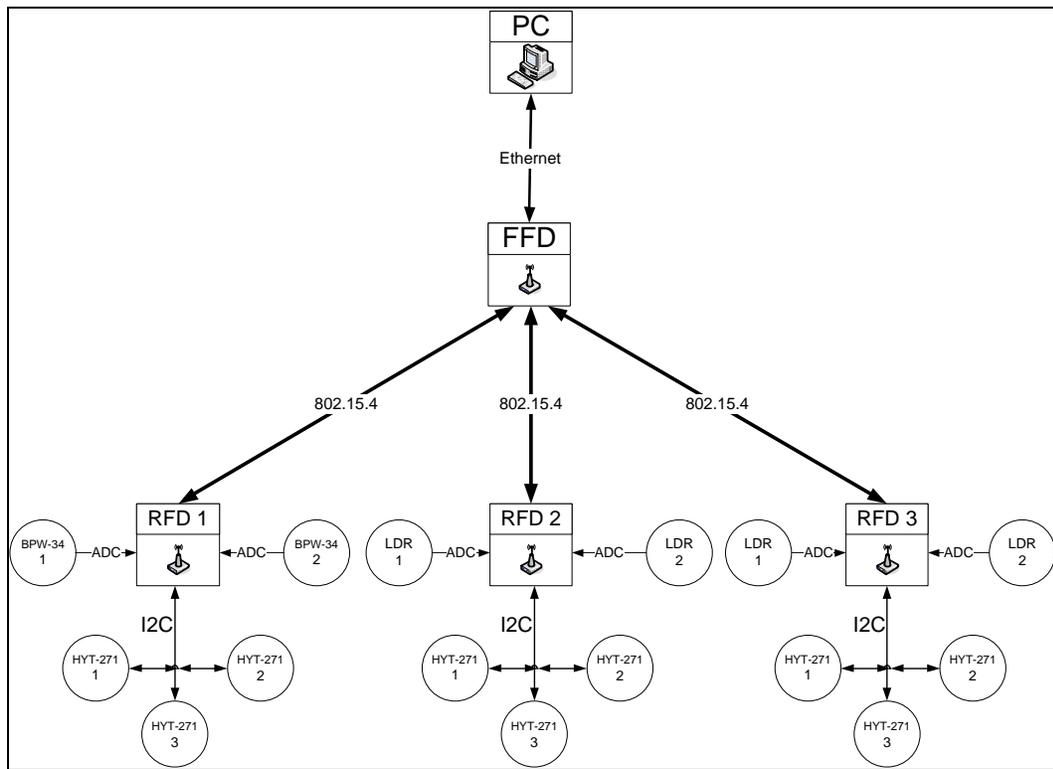


Figura 3.1. Topología de la red implementada.

3.2.2 Montaje físico de los nodos RFD.

En el apartado 2.5 de este informe se describió el PIC32 Ethernet Kit de Microchip como el hardware a ser utilizado en este proyecto, sin embargo para la implementación de los nodos RFD mostrados en la figura 3.1 se utilizaron tarjetas de desarrollo PIC32 Starter Kits. Estas tarjetas son prácticamente iguales al PIC32 Ethernet Kit pero con funciones reducidas, por ejemplo no poseen las facilidades para desarrollar aplicaciones USB ni Ethernet y cuentan con un microcontrolador PIC32MX360F512L. Estas tarjetas de desarrollo cumplen a cabalidad con los requerimientos de hardware de los nodos RFD.

Para la interfaz del kit con los sensores y demás dispositivos se utilizaron las tarjetas de expansión PIC32 I/O Expansion Boards también del fabricante Microchip. Estas tarjetas permiten acceder a los diferentes puertos del microcontrolador así como conectar otras tarjetas de desarrollo, en el caso de este proyecto se utilizaron las tarjetas MRF24J40MA las

cuales son módulos que permiten la comunicación inalámbrica mediante el standard 802.15.4. Por otro lado, a las I/O Expansion Boards se conectaron los sensores de temperatura y humedad relativa mediante comunicación serial I2C y los sensores de luz por medio de dos canales del ADC, más adelante en este apartado se tratará con más detalle la conexión utilizada para los sensores. En la figura 3.2 se muestra un diagrama general del montaje físico de los nodos RFD.

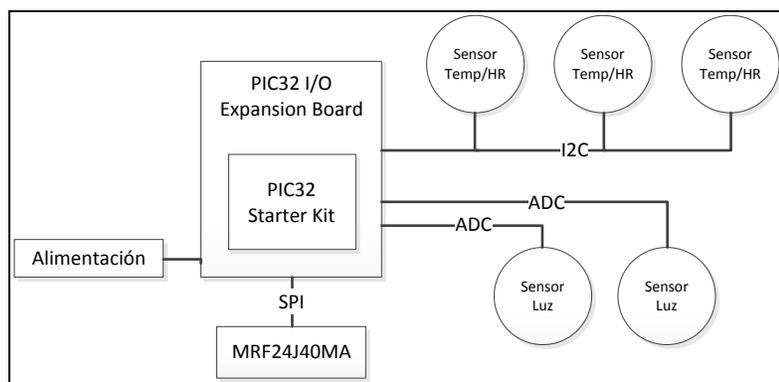


Figura 3.2. Diagrama general nodos RFD.

Los sensores seleccionados para este proyecto fueron los HYT-271 comercializados por la empresa Hygrosens Instruments, de origen estadounidense. Sus principales características se listan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Resumen de características sensor HYT-271

Característica	Valor
Rango de medición %HR	0% - 100%
Rango de medición de temperatura	-40°C – 125°C
Precisión HR	±1.8 % HR
Precisión de temperatura	±0.2 °C
Resistente a químicos	Sí
Resistente a condensación	Si
Voltaje de operación	2.7V – 5V
Comunicación	I2C

La conexión eléctrica de los dispositivos al bus I²C debe incluir resistencias de Pull Up en cada una de las líneas SCL y SDA para asegurar que cuando no se está realizando ninguna transferencia se mantengan las líneas en alto (“1” lógico). La longitud máxima de un bus I²C

depende de la capacitancia de la línea aunque existen maneras de alargarlas, mediante buffers especializados. En la figura 3.3 se puede observar un ejemplo de conexión de dispositivos a un bus I²C. En el caso particular de este proyecto se comprobó experimentalmente que no sería necesaria la utilización de los buffers para la extensión del bus, las resistencias de pull up utilizadas fueron de 2.4 k Ω tal como lo sugiere el fabricante [14] y se colocó un par de ellas para cada sensor utilizado.

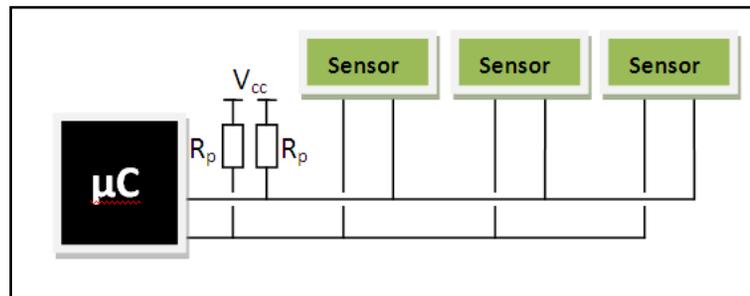


Figura 3.3. Conexiones eléctricas de bus I2C.[21]

Ahora con respecto a los sensores de luz utilizados, se optó por fotodiodos de silicón BPW34 ya que como lo muestra la figura 3.4 son sensibles a la luz visible, ubicada entre 400 y 700 nm, además son pequeños, baratos y de fácil implementación. La lectura de estos se realizó por medio del ADC del microcontrolador, de manera que se midiera el voltaje sobre una resistencia de 10 k Ω conectada en serie al fotodiodo.

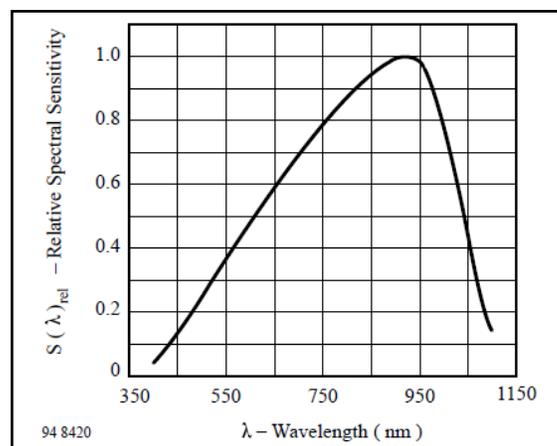


Figura 3.4. Sensibilidad del fotodiodo BPW43.[21]

Para la obtención de la respuesta del sensor a la luz se realizó un experimento donde se expuso al fotodiodo a diferentes intensidades lumínicas, aplicadas variando la distancia entre una lámpara de alta intensidad y el circuito de prueba, así se midió el voltaje sobre la resistencia. Se utilizó como referencia las mediciones de un luxómetro expuesto a la misma cantidad de luz en el mismo momento que el circuito de prueba. Como resultado de este experimento se obtuvo la gráfica de la figura 3.5 de la cual se deriva la ecuación que se utilizó posteriormente para la interpretación de los datos de voltaje leídos por el ADC, esta ecuación polinómica también se observa en la figura 3.5, en la parte superior.

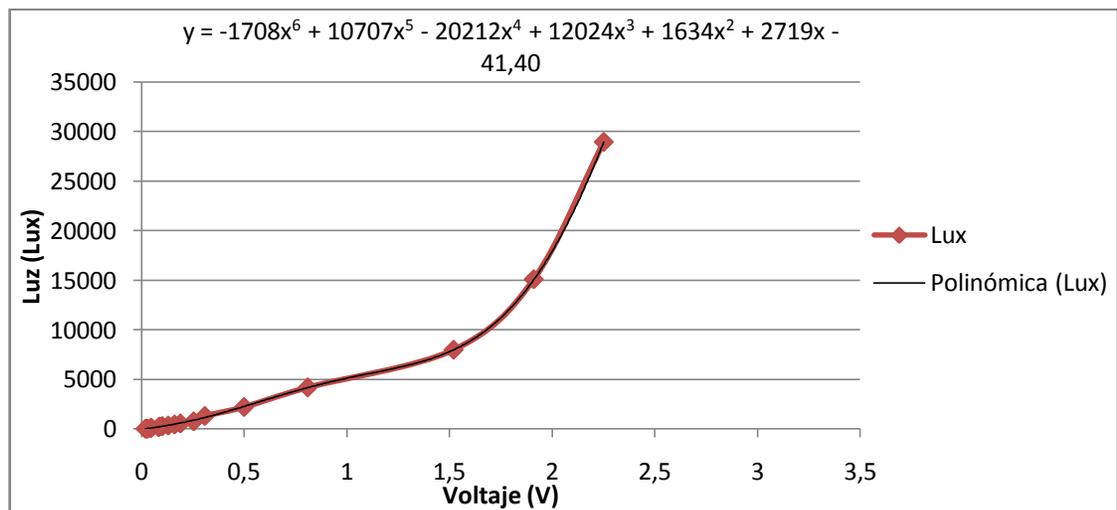


Figura 3.5. Respuesta del circuito de medición de luz.[21]

3.2.3 Montaje físico del nodo FFD.

El nodo FFD constituye el núcleo del sistema, es este el encargado de solicitar los datos a los nodos RFD en el momento justo, administrar la red inalámbrica, almacenar la información recopilada en memoria no volátil, almacenar y soportar la página web desde la cual se accede a los datos, en fin es el nodo maestro y de mayor importancia en el sistema. Por todo lo anterior, la plataforma de hardware seleccionada para este nodo es el PIC32 Ethernet Kit de Microchip, la herramienta más completa que se adapta a todas las necesidades del proyecto y brinda soporte para todas las funciones que se debieron implementar. Se debe mencionar que al igual que en los nodos RFD se utilizó la PIC32 I/O Expansion Board para

tener acceso a funciones del kit de desarrollo como por ejemplo el poder alimentar el sistema por medio de una fuente diferente al USB y conectar el transceptor en el módulo MRF24J40MA.

Gracias a que el kit de desarrollo utilizado cuenta con todas las interfaces de hardware necesarias, la implementación del hardware de este nodo se limitó a realizar las conexiones mostradas en la figura 3.6, todas en la misma tarjeta. El dispositivo de memoria utilizado fue una llave maya de 2GB de capacidad, de dimensiones físicas muy reducidas con el fin de que el nodo completo cupiera dentro de la caja que lo aísla de las condiciones ambientales del exterior.

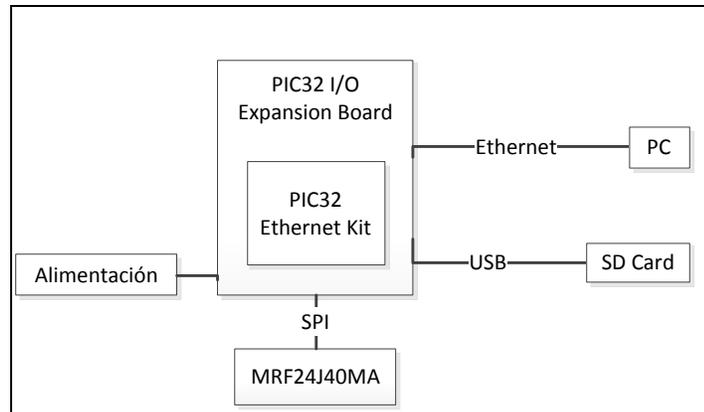


Figura 3.6. Diagrama general nodo FFD.

3.3 Descripción del Software.

3.3.1 Aspectos Generales.

El software de este proyecto fue desarrollado en el lenguaje C, utilizando el ensamblador ASM32, el compilador C32 y el enlazador LINK32. Estas herramientas se organizan por medio del ambiente de programación MPLAB IDE v8.56, todos los anteriores distribuidos por la compañía Microchip mediante descargas gratuitas desde su página web.

Todas las rutinas de software implementadas en este proyecto se debieron diseñar para ser ejecutadas en el sistema operativo de tiempo real SIWA-RTOS [4], del cual se discutió en el apartado 2.6 de este documento. La escritura del código para correr sobre este sistema

operativo implicó la creación de tareas que son ejecutadas según los algoritmos de calendarización, que garantizan un uso compartido del procesador por cada tarea. Seguidamente se hará una descripción de las rutinas o tareas que se implementaron en cada nodo, tanto en los RFD como en el FFD.

La rutina principal de los nodos es bastante simple, nada más debe inicializar el hardware necesario para cada aplicación, crear las tareas correspondientes y finalmente iniciar el calendarizador. La inicialización del calendarizador implica que el sistema nunca saldrá de esa rutina a no ser que se dé un problema de que no existe suficiente memoria en la pila para soportar esta rutina. En la figura 3.7 se muestra un diagrama donde se aprecia con claridad las acciones realizadas en la rutina principal.

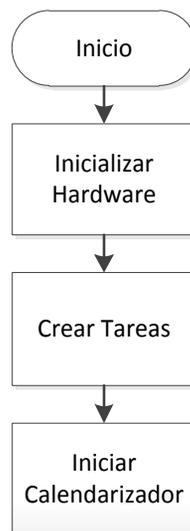


Figura 3.7. Main del software de los nodos.

3.3.2 Software de los nodos RFD.

a. *taskMIWI*

Esta se puede decir que es la tarea principal de los nodos RFD, en ella se hace el manejo de la comunicación con el nodo central, se interpretan las instrucciones de este y se coordina la toma de datos y envío de los mismos.

Esta tarea es prácticamente igual en cada nodo RFD con la salvedad de las variables que identifican a cada nodo como NODO 1, NODO 2 o NODO 3. En el siguiente diagrama se presenta el detalle del algoritmo seguido por esta tarea.

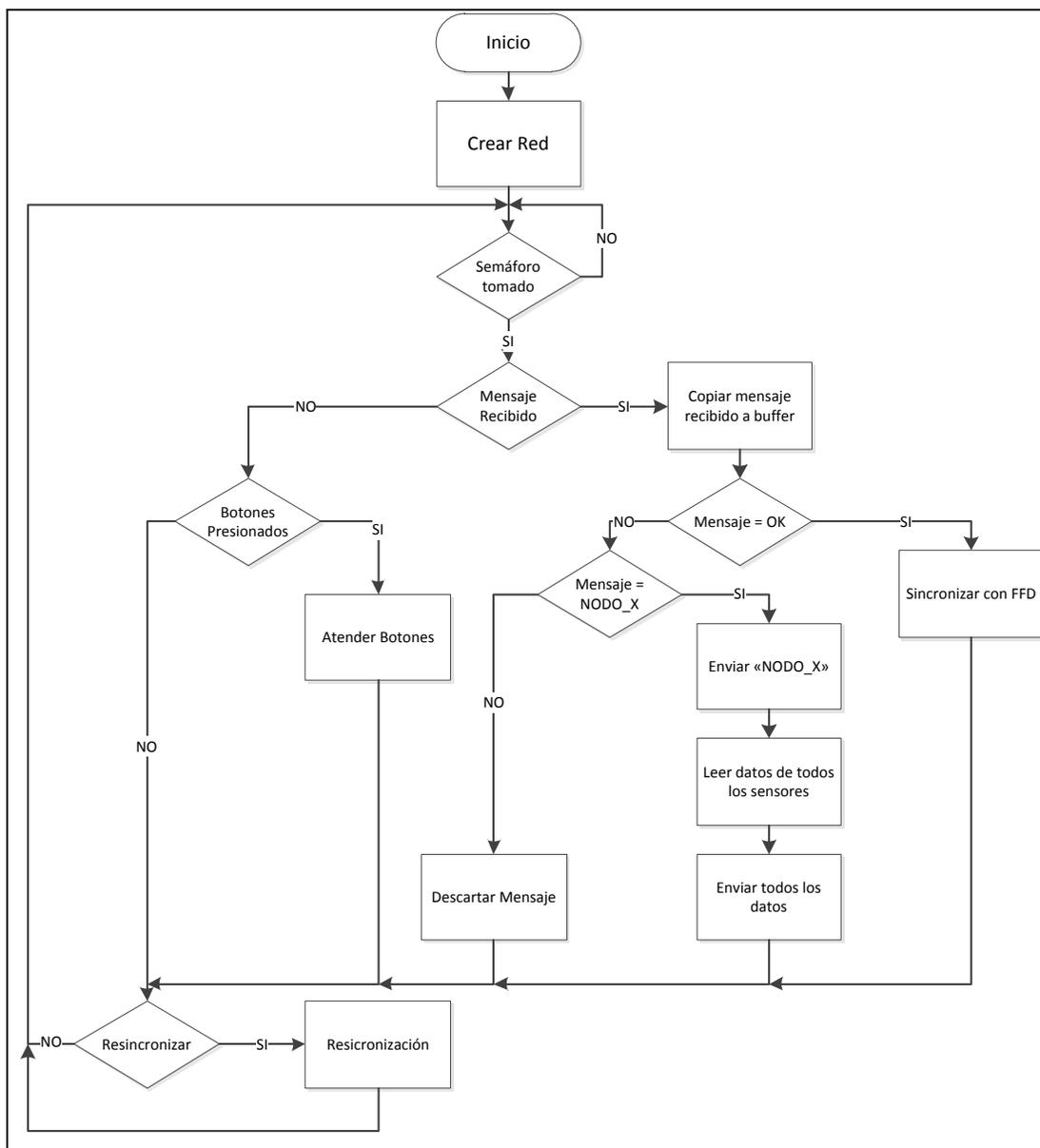


Figura 3.8. Diagrama de flujo de tarea *taskMIWI* en nodos RFD.

b. I²C

En el diagrama de flujo de la tarea *taskMIWI* se observa que cuando llega un mensaje con el nombre asignado al nodo receptor se responde inmediatamente con el mismo nombre emulando un reconocimiento del mensaje, luego se leen los datos de todos los sensores.

La lectura de estos datos se refiere a la ejecución de la rutina de manejo del bus I²C para extraer los datos de los sensores de humedad relativa y temperatura, además de la lectura de los canales del ADC donde se encuentran conectados los sensores de luz. De la lectura de los ADC se hablará en el siguiente punto de este apartado, por ahora se tratarán los detalles de la implementación de las rutinas de manejo del protocolo I²C.

Se partió de un ejemplo de código brindado por Microchip denominado “I2C Peripheral Library Example” [22]. De este ejemplo se toman 3 funciones y además se diseñan otras 4. Los métodos creados son *MeasurementRequest*, *DataFetch*, *Read_One* y *Real_All*. *MeasurementRequest* y *DataFetch* fueron diseñadas siguiendo los lineamientos establecidos por el fabricante en la hoja de datos [23] y permiten solicitar al sensor que inicie su ciclo de medición y extraer las mediciones. *Read_One* y *Real_All* fueron creadas para funcionar como APIs y así darle mayor facilidad al usuario en la interacción con los sensores, solo estas dos funciones son llamadas desde la tarea *taskMIWI*.

En las siguientes páginas se describirán todas las funciones necesarias para interactuar con los sensores HYT-271, comenzando por las más básicas y terminando en las que poseen mayor grado de abstracción.

- Función *StartTransfer*.

Función de tipo Booleano la cual comienza una transferencia hacia o desde el esclavo manteniéndose enclavada mientras espera de que se complete la condición de inicio, en otras palabras, envía el bit de inicio (S). Devuelve TRUE en caso de que se haya tenido éxito y FALSE en caso de que se haya dado una colisión durante el inicio de la transferencia. También

puede ser usada para un reinicio de transferencia. Su funcionamiento es tal como lo describe el diagrama de la figura 3.9.

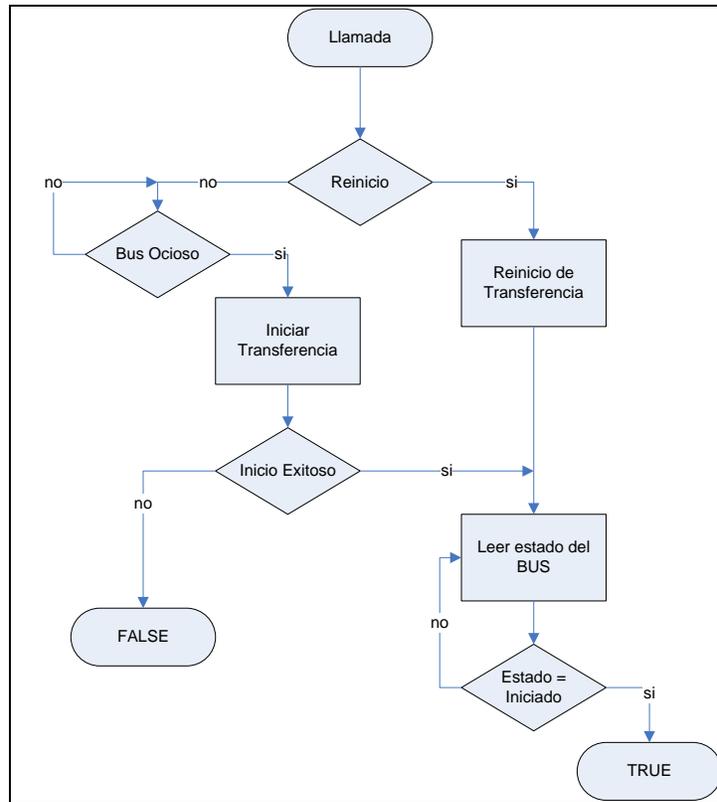


Figura 3.9. Diagrama de flujo función *StartTransfer*.

- Función *TransmitOneByte*:

Función de tipo booleano que envía un byte al esclavo y reporta errores en caso de que se den. Recibe el byte de información que se desea enviar y devuelve TRUE en caso de que el byte se haya enviado exitosamente y FALSE en caso de que haya ocurrido algún error. Su diagrama de flujo se presenta en la figura 3.10.

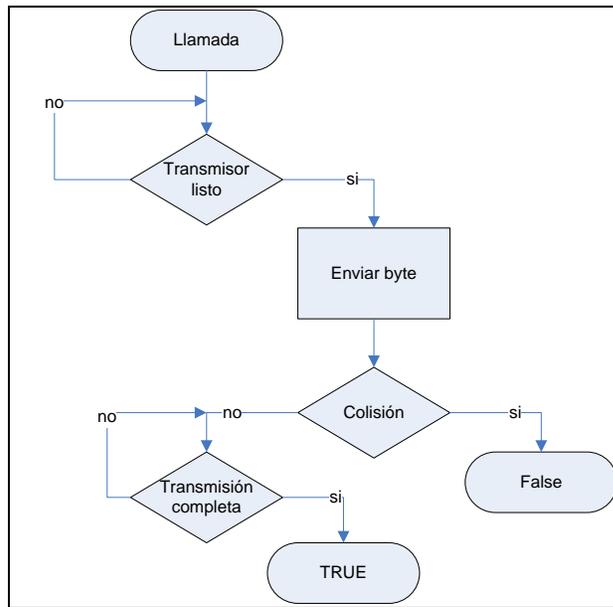


Figura 3.10. Diagrama de flujo función *TransmitOneByte*.

- Función *StopTransfer*.

Del tipo vacío, se encarga de enviar el bit de parada (P) y espera a que la operación haya terminado. No devuelve nada. Su diagrama de flujo es bastante sencillo, sin embargo se muestra en la figura 3.11.

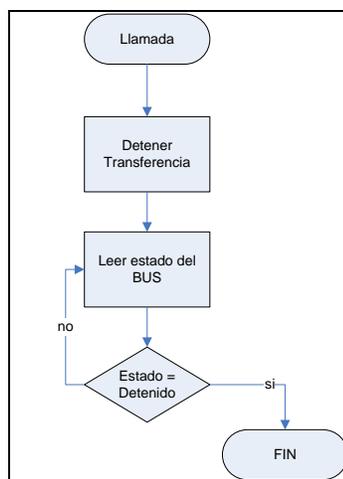


Figura 3.11. Diagrama de flujo de función *StopTransfer*.

- Función *MeasurementRequest*.

Recibe la dirección del sensor con el que se está comunicando y se utiliza para solicitar el inicio del proceso de medición de temperatura y humedad relativa. El comando enviado consiste en la dirección del sensor con el último bit en 0 para indicar una operación de escritura [23]. Esta rutina hace uso de las descritas anteriormente y su diagrama de flujo se observa en la figura 3.12. La trama deseada se muestra en la figura 3.13.

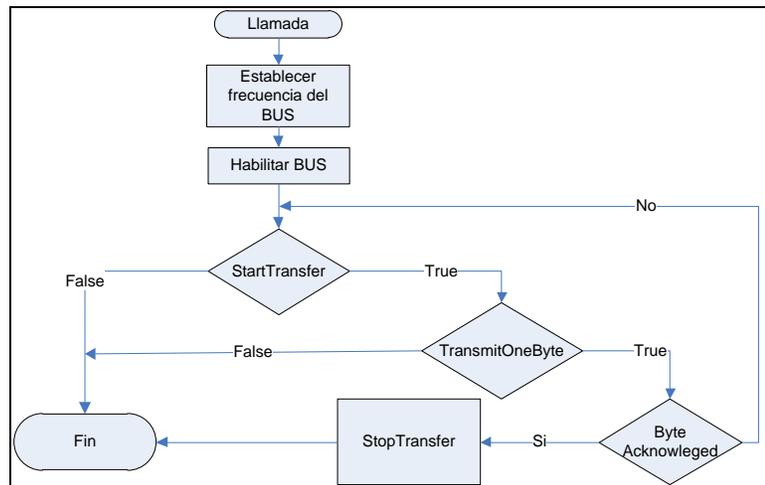


Figura 3.12. Diagrama de flujo de la función *MeasurementRequest*.

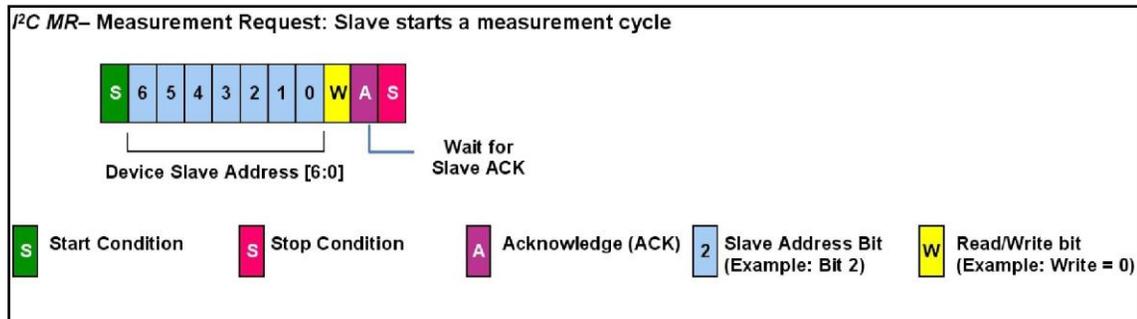


Figura 3.13. Trama requerida para inicio de medición.[23]

- Función *DataFetch*.

Al igual que la anterior recibe la dirección del sensor con el cual se desea interactuar. Se utiliza para extraer los datos de los valores de temperatura y humedad relativa obtenidos por el sensor. Esta operación implica direccionar al sensor y especificar una operación de

lectura, al recibir esto, el sensor enviará en 4 bytes los valores de los parámetros medidos, 2 para cada uno de ellos [23], dos posibles secuencias de datos enviadas por el sensor se muestran en la figura 3.14. Para el diseño de esta función se toman en cuenta los estados de espera de cada byte y posibles errores que puedan ocurrir durante la transferencia. Se hace uso de las tres primeras funciones descritas y su diagrama de flujo se puede observar en la figura 3.15.

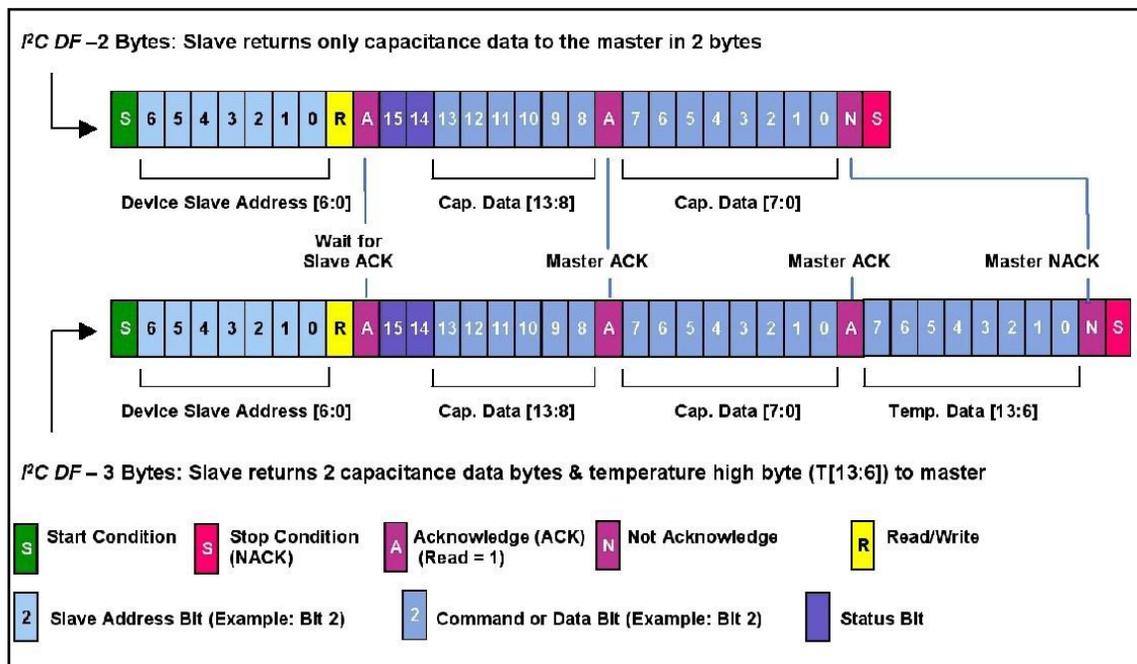


Figura 3.14. Posibles tramas de datos en el bus I²C. [23]

Las tramas mostradas en la figura anterior suponen que no se desea medir el valor de temperatura (trama superior) o que se desea la temperatura con una menor resolución, para lo que se desprecian los 5 LSB del dato. En el caso de la aplicación realizada, es necesario medir tanto la humedad como la temperatura con la mejor resolución posible por lo que la trama constará de 4 bytes de información.

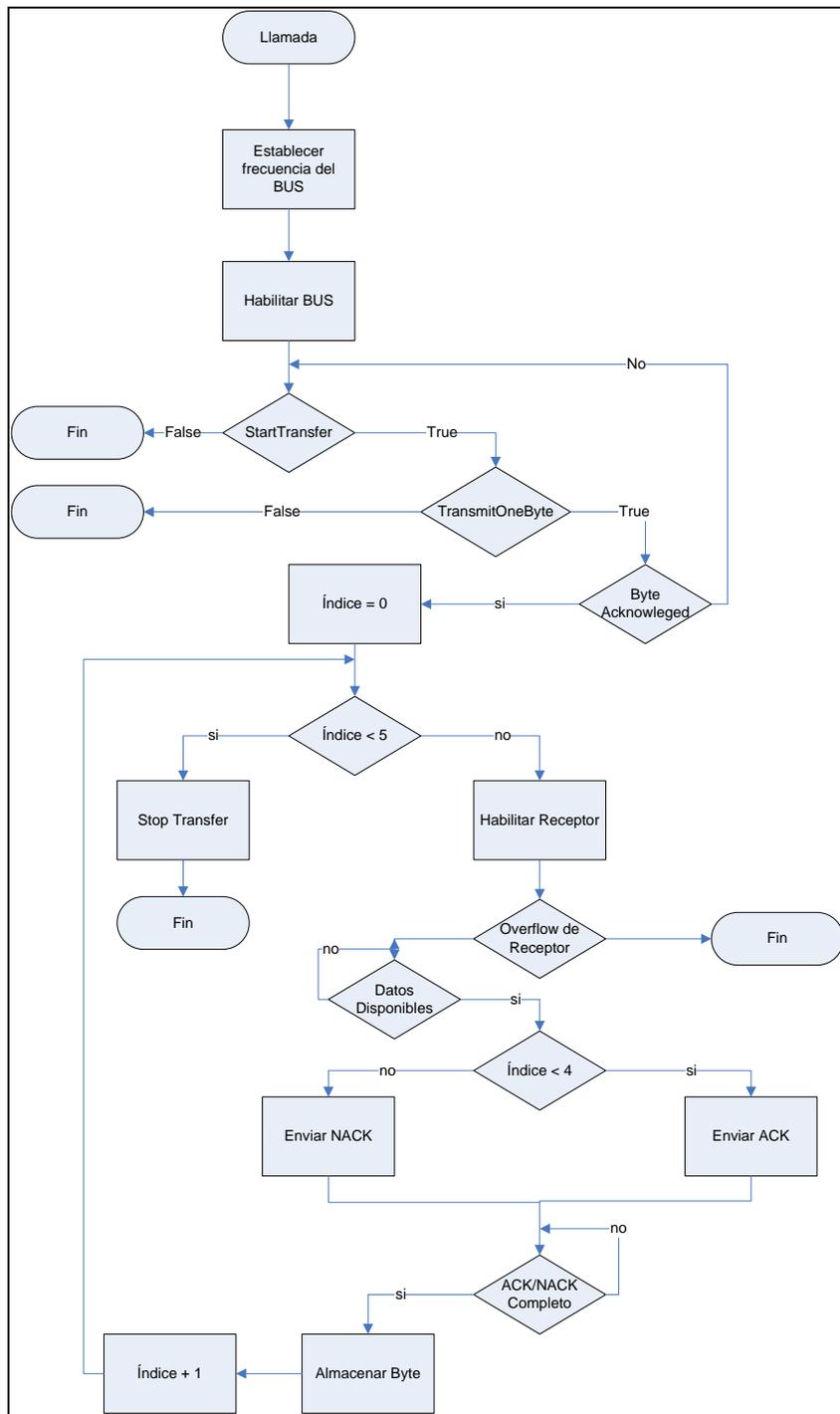


Figura 3.15. Diagrama de flujo de función *DataFetch*.

- *Read_One*:

Esta función constituye una de las dos APIs disponibles al usuario. Recibe un número de sensor (1, 2 ó 3) el cual manipula para convertirlo en la respectiva dirección, claramente se deduce que esta función está hecha para ser usada con sensores cuyas direcciones son consecutivas tal como es el caso de este proyecto, los sensores adquiridos tienen las direcciones 0x30, 0x32 y 0x34.

Al tener la dirección del sensor que se desea manipular, simplemente hace uso de los métodos *MeasurementRequest* y *DataFetch* consecutivamente, separados por un retardo de 100 ms, introducido para permitir al sensor obtener los datos. Finalmente se toman los datos recopilados y se colocan en un buffer directamente relacionado con el número de sensor leído. En la figura 3.16 se muestra un diagrama de esta función.

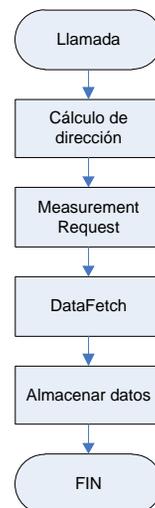


Figura 3.16. Diagrama de flujo de función *Read_One*.

- *Read_All*:

Esta es la última función creada para la utilización con los sensores y posee el mayor grado de abstracción, no recibe ningún parámetro y simplemente llama tres veces consecutivas a *Read_One* (una por cada sensor) dejando al final los datos recopilados de cada

sensor en su respectivo buffer. No se muestra un diagrama de esta función ya que no se considera necesario debido a su simplicidad.

c. ADC

Las rutinas implementadas para el manejo del ADC fueron tres, una de inicialización del módulo que es llamada desde el main y dos de lectura ya sea de un sensor específico o de los dos disponibles. Estas rutinas fueron llamadas *vStartADC*, *READ_LIGHT_ALL* y *READ_LIGHT* y son descritas a continuación.

- *vStartADC*.

Esta función se limita a hacer el llamado de tres funciones de la librería de periféricos de Microchip, inicialmente llama a la función *CloseADC* la cual deshabilita el módulo para poder realizar su configuración, esta se hace por medio de la función *OpenADC* la cual recibe una serie de parámetros que ajustan el módulo a las necesidades de la aplicación. Finalmente se hace un llamado a la función *EnableADC* la cual habilita el ADC para su funcionamiento.

Los parámetros pasados a la función *OpenADC* configuran al modulo para obtener una para obtener las siguientes características.

- Salida de datos como enteros de 16 bits.
- Conversión inicia automáticamente cuando se le solicita.
- Las referencias positiva y negativa como Vcc y tierra respectivamente.
- Sin calibración de offset.
- Escaneo de los canales deshabilitado.
- Muestrear 1 vez por interrupción.
- Tiempo de muestreo de 15 veces el tiempo de adquisición.
- Canales 0 y 1 como analógicos.

- *READ_LIGHT_ALL*.

Esta es la función que se llama desde la tarea *taskMIWI* para obtener los datos de cantidad de luz de los sensores analógicos se encarga tanto de leer los valores analógicos como de colocarlos en el respectivo buffer para su envío al nodo central. Se parte del hecho que el módulo ya fue configurado con la llamada a la función *vStartADC* desde el *main* del sistema. En el siguiente diagrama de flujo se resume claramente esta función.

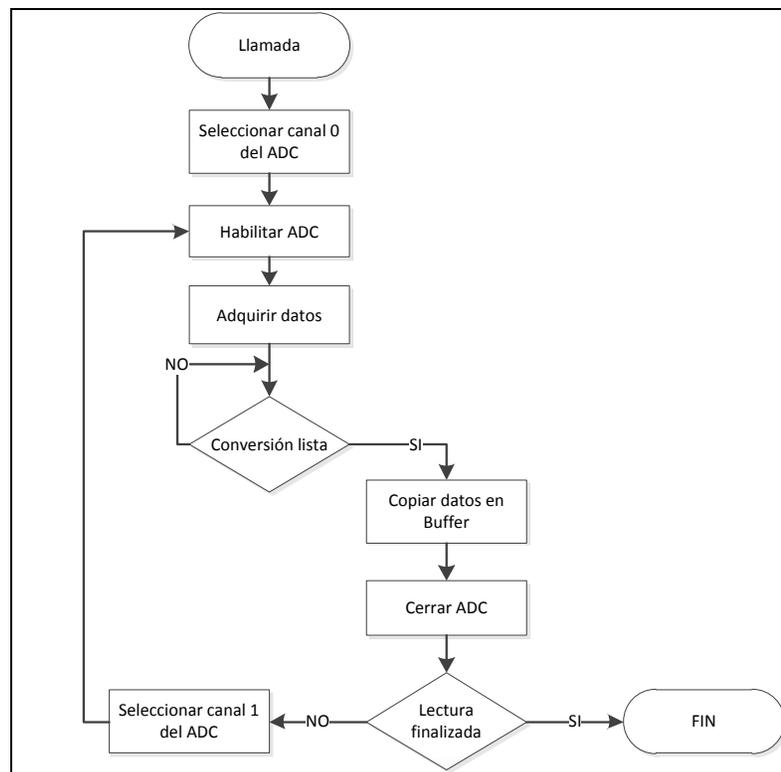


Figura 3.17. Diagrama de flujo de función *READ_LIGHT_ALL*.

- *READ_LIGHT*.

Esta función fue creada para efectos de comprobación de los datos y experimentación, no es utilizada por el programa principal. Permite leer un sensor en específico y su funcionamiento es igual que la función anteriormente explicada, con la obvia modificación de que solo realiza un ciclo de lectura para un canal específico del convertidor ADC el cual se le pasa como parámetro.

3.3.3 Software del nodo FFD.

a. *taskMIWI*

Al igual que para los nodos RFD, la tarea *taskMIWI* es la de mayor importancia en el nodo central, es en esta donde se crea y mantiene la red inalámbrica, desde la que se hacen las solicitudes de datos y se sincroniza la operación de las demás tareas.

Para mayor claridad en la explicación de la implementación de esta tarea se puede observar el diagrama de su flujo mostrado en la figura 3.18. Este diagrama muestra información básica acerca de la secuencia de actividades realizadas, no así los detalles de su implementación. Detalles acerca de cómo se realizan las acciones citadas en este diagrama podrán ser encontradas más adelante en esta misma sección de este informe.

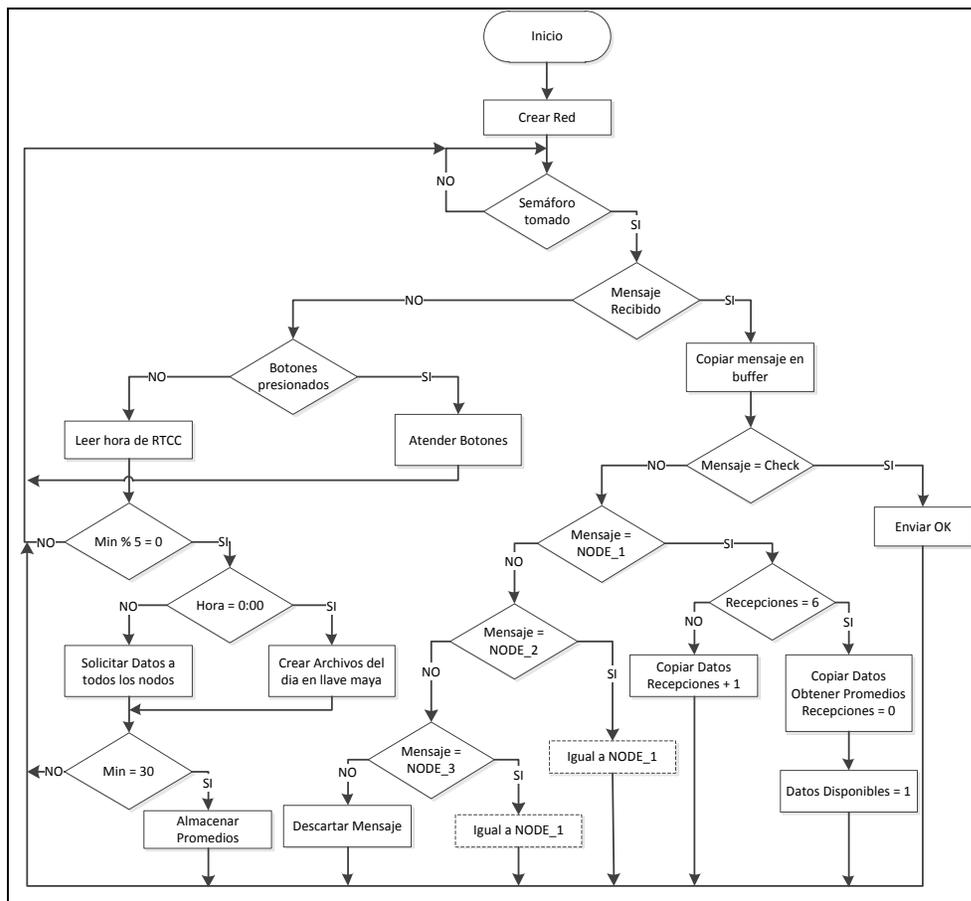


Figura 3.18. Diagrama de flujo de la tarea *taskMIWI*.

Hay varios aspectos que destacar del diagrama anterior. El primero es cuando se recibe un mensaje "CHECK", esta es una modificación en la comunicación entre el nodo central y los nodos periféricos que debió ser agregada ya que cuando se desconectaba uno de los nodos RFD el nodo central este no lo registraba de manera tal que al resincronizarse el nodo perdido, se interpretaba como una conexión nueva lo que eventualmente llenaba la tabla de conexiones existentes y deshabilitaba la comunicación. Como solución al problema anterior se implementó una función en los nodos RFD que envía un código interpretado como "CHECK", al recibirse este código se responde con el código "OK". Si no se recibe el "CHECK" se interpreta que el nodo está perdido y realizando labores de resincronización.

Otro aspecto de gran importancia es que cada 5 minutos se realizará una solicitud de los datos recopilados por los nodos RFD. Las labores de temporización se realizan gracias al módulo RTCC (Reloj de tiempo real y calendario) del cual se discutirá más adelante. Al enviar la petición de datos, esta dispara la lectura de los sensores de cada nodo y el consecuente envío de la información departe de cada RFD, el mensaje entrante al nodo central está encabezado por el código "NODE_X" (siendo X el número de nodo) y dependiendo de este encabezado se ejecutará la rutina indicada para cada nodo.

Seguidamente de cada recepción se llama al método *Copy_Data* el cual recibe como parámetros el número de solicitud y el nodo que está realizando la llamada, esta función se encarga de copiar los datos desde el buffer de entrada a buffers dedicados para cada nodo, conforme van copiando los datos se realizan las operaciones matemáticas necesarias para convertir la información a las unidades requeridas, ya sea grados centígrados para temperatura, porcentaje de humedad relativa y lux para la cantidad de luz. Los datos convertidos se almacenan en variables del tipo flotante, al pasar 30 minutos se tendrá un total de 6 valores en este arreglo y se llamará además de la función *Copy_Data* (para almacenar el sexto valor) a la función Promedios, esta calcula los valores promedio de cada sensor para un nodo en específico y almacena estos promedios en un nuevo arreglo de datos.

b. *Storage*

Dentro de las funciones más destacadas llevadas a cabo en *Storage* se encuentran la llamada a la función que configura el RTCC, la lectura de datos desde la llave maya para ser desplegados en la página web, la creación de directorios y archivos en la llave maya y el almacenamiento de información cada vez que se requiere por la tarea *taskMIWI*.

A continuación se presenta el diagrama de flujo general de esta tarea y seguidamente la descripción detallada de las principales acciones realizadas en ella.

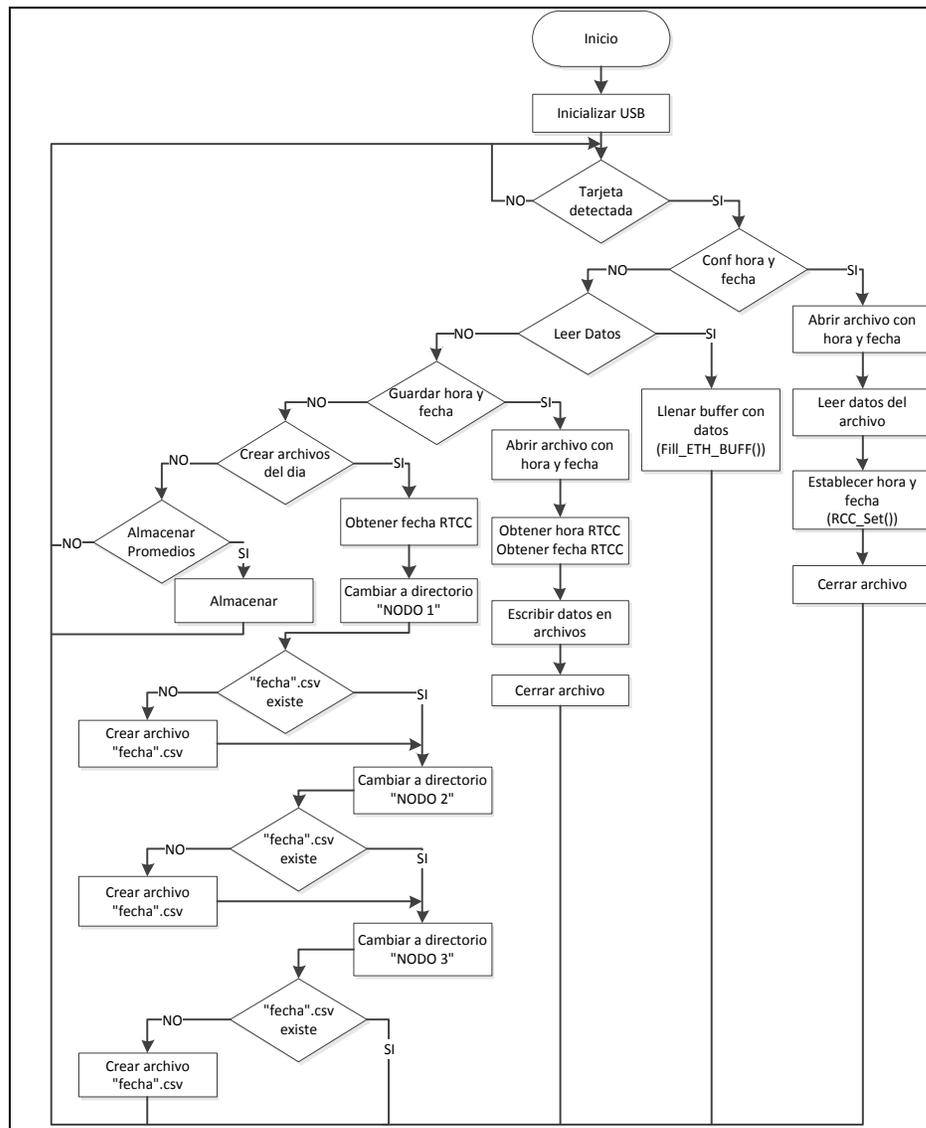


Figura 3.19. Diagrama de flujo de la tarea *Storage*.

- Configurar hora y fecha.

Esta tarea se realiza al inicio de la ejecución del programa y sólo se lleva a cabo 1 vez. Su función es leer la hora y fecha almacenadas en un archivo en la llave maya y configurar el RTCC con esta información. Se creó dada la necesidad de que el sistema pudiera arrancar por sí mismo en caso de una falla de energía o desconexión voluntaria. Utiliza tanto funciones de la librería de USB como de la de RTOS incluidas en las librerías de Microchip. Durante su creación se debieron cuidar detalles como el formato de los datos ya que cuando se lee de la llave maya lo que se obtiene es información como caracteres ASCII, estos deben ser pasados a valores BCD para ser finalmente asignados al RTCC ya que así lo requiere este módulo.

- Pasar datos de la llave maya a la página web.

Esta función se lleva a cabo bajo petición directa del usuario final por medio un botón de la página web de visualización de los datos. Al obtenerse la bandera se llama a la función *FILL_ETH_BUFF* que recibe como parámetros el número de nodo requerido y la fecha en la que fueron tomadas las mediciones. Su ejecución sigue la lógica mostrada en el siguiente diagrama de flujo.

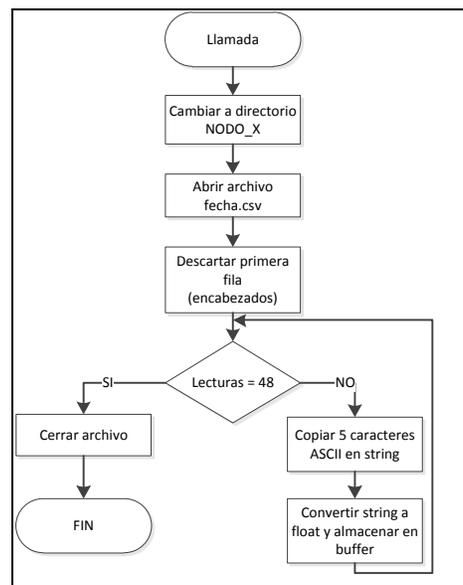


Figura 3.20. Diagrama de flujo de la función *FILL_ETH_BUFF*.

- Almacenar hora y fecha.

Esta parte del código se encarga de almacenar en la llave maya la hora actual cada 5 minutos, si llegara a darse un reinicio del nodo central, se utilizarían estos datos para reconfigurar el módulo de reloj de tiempo real del microcontrolador. Además, si el usuario detecta que la hora y fecha configurados en el nodo FFD no son los verdaderos, se puede realizar un ajuste de estos parámetros extrayendo la llave maya del sistema y escribiendo en el archivo los valores actuales para después volver a insertar la memoria en el sistema y al reiniciarlo este se configurará con la hora y fecha recién almacenados.

- Crear archivos de cada día.

Esta acción se lleva a cabo una vez por día, cuando el reloj indica que son las cero horas con cero minutos y cero segundos o cada vez que se reinicia el sistema. Hace uso de las APIs disponibles en las librerías de manejo de la memoria USB. Inicia con obtener la fecha actual del módulo RTCC, intenta abrir un archivo en cada carpeta con el nombre de la fecha, si lo encuentra simplemente lo cierra y termina su operación, en caso contrario lo crea y escribe los encabezados de cada columna en el archivo, finalmente cierra este archivo creado y repite la acción en cada carpeta de manera que exista un archivo por día por cada nodo.

- Almacenar promedios

Esta última función es una de las más importantes llevadas a cabo en esta tarea, se ejecuta independientemente cada vez que existen datos disponibles en cada nodo así si se llegara a dar la falla de uno de los nodos FRD se seguirán guardando los datos de los otros dos. Se hace uso de la función *StoreData* que recibe como parámetro el número de nodo para el cual se desea almacenar la información en la llave maya, este parámetro permite tanto seleccionar la carpeta donde se almacenará la información como el buffer del cual se tomará la misma. Como se mencionó anteriormente, los datos están almacenados en buffers como valores en punto flotante, por lo tanto en este método se traducen los valores a

cadenas de caracteres ASCII con el formato deseado para su visualización en los archivos almacenados en la llave maya.

c. TCPIP

Esta es la tarea que soporta las funciones del protocolo TCPIP en la tarjeta de desarrollo. Para su implementación se utilizó el conjunto de librerías facilitadas por Microchip denominado TCPIP_Stack y un ejemplo de uso de esta librería. Se modificó una página web incluida en el ejemplo para que se ajustara a las necesidades del proyecto y el código en C que permite al programa principal interactuar con esta página. Las principales funciones de esta tarea se visualizan a partir de las interfaces gráficas de las distintas páginas creadas, estas son la página principal, la página de visualización de la tabla de valores del día para cada sensor, la página de visualización de la gráfica de valores de los parámetros por día, la página de envío de correo electrónico y una última que permite el cambio de la contraseña de ingreso a la página. A continuación se hará una breve descripción de cada una de estas páginas.

- Página principal.

Esta es la que recibe al usuario luego de introducir el usuario y contraseña correctos, su apariencia es como la mostrada en la figura 3.21 y permite ver la ubicación espacial de cada sensor a lo largo del túnel mediante indicadores de diferentes colores, también muestra los valores mínimo, máximo y el promedio de cada día para el sensor seleccionado. Para ver los datos se debe antes haberlos cargado desde la página de visualización de la tabla histórica.



Figura 3.21. Interfaz gráfica de la página principal.

- Visualización de tabla de valores.

Es en esta página donde se brinda la información de los datos recopilados para cada sensor en una fecha especificada por el usuario. Los datos se cargan en la página mediante la introducción de la fecha requerida en los campos destinados para este fin, además se debe haber marcado el túnel del cual se desea visualizar la información. Ya con los primeros datos cargados que están predefinidos para ser los del sensor de temperatura 1, se puede cambiar la selección de sensor para ver los datos de los demás sensores. Un muestra de cómo se ve esta página se encuentra en la figura 3.22. En esta se puede observar claramente que se están visualizando los datos del sensor de luz 1 colocado en el túnel 1 para la fecha del 6 de abril del 2011.

Al presionar el botón “Seleccionar” se levanta la bandera que permite a la tarea Storage pasar los datos de la llave maya a la página web, también se obtienen los parámetros requeridos por la función *FILL_ETH_BUFF* en esta interfaz tal como se mencionó anteriormente.



Figura 3.22. Interfaz gráfica de la página de visualización de datos.

Capítulo 4. Resultados

4.1 Selección de sensores

Debido a que las primeras etapas de este proyecto se concentraron en la selección de los parámetros a medir y las mejores formas de capturar los datos, es lógico comenzar la exposición de los resultados del proyecto mediante una revisión de los sensores seleccionados para ser utilizados.

La definición de variables a medir se logró gracias a los aportes directos del personal de GENFORES y a la investigación realizada. Se determinó que contar con datos de temperatura del aire, humedad relativa e intensidad lumínica sería suficiente en una primera etapa de caracterización de las condiciones bajo las cuales se desarrollan los clones forestales, dejando de lado otras posibles variables como pH del suelo, oxigenación, temperatura y humedad del suelo debido a la necesidad de delimitar los alcances del proyecto con base al tiempo y recursos disponibles. Además, la selección de estos parámetros tomó en cuenta las diversas opciones de transductores disponibles en el mercado para cada una de ellas, revisando aspectos como la facilidad de conseguir cada uno de estos sensores, su precio y la facilidad de acople con los sistemas existentes de captura de datos (arquitectura de CRTecMote).

Luego de la definición de las variables climáticas a tomar en cuenta en este proyecto se dio el proceso de selección de sensores, se llevó a cabo un proceso de experimentación con sensores analógicos de temperatura, humedad relativa y luz que no arrojaron los resultados requeridos debido principalmente a las altas incertidumbres en los datos adquiridos por medio de ellos. Fue así como se consiguieron los sensores de humedad relativa y temperatura integrados con salida de datos digitales HYT-271, estos llenaron todas las expectativas de incertidumbres máximas, facilidad de implementación y costo esperados. Los sensores de luz utilizados finalmente fueron del tipo de fotodiodos en vez de los que se

pensaron en un inicio del tipo fotoresistencia debido al mayor rango de medición y linealidad logradas con los fotodiodos.

4.2 Configuración del sistema

La configuración del sistema encierra todo lo relacionado con la puesta en marcha del proyecto desde el punto de vista técnico. Entre los primeros pasos estuvo la selección del hardware a utilizar, los componentes principales fueron los microcontroladores. Aunque desde un inicio se tuvo claro que se utilizarían controladores de la familia PIC32 del fabricante Microchip, se debía seleccionar el tipo de controlador ya que esta familia dispone de una amplia gama de productos para diferentes aplicaciones. Analizando las capacidades de varios PIC32 se llegó a la conclusión de utilizar los más básicos para el montaje de los nodos de medición y del más completo para el montaje del nodo central. Los utilizados en los nodos de medición fueron los contenidos en el kit de desarrollo PIC32 Starter Kit y el más completo es el PIC32 Ethernet Kit. Este último dispone de módulos USB y Ethernet que permiten la implementación relativamente sencilla de aplicaciones de este tipo.

Dentro del proceso de diseño de los nodos periféricos el primer paso que se tomó llevó al diseño de la interfaz para interactuar con los sensores, el protocolo I2C. El diseño de esta interfaz de comunicación serial necesitó de un estudio inicial de los requerimientos, como por ejemplo velocidad de transmisión, interfaz de conexión física, formato del mensaje a transmitir o recibir y métodos de validación de los datos intercambiados.

La utilización de las APIs para comunicación del protocolo MIWI fue de gran ayuda en el proyecto ya que no se debió diseñar esta parte del software, sin embargo, la correcta utilización de estas funciones estuvo apegada a la comprensión del código existente y las formas correctas de utilizarlo. Uno de los problemas encontrados en las rutinas de comunicación fue que si se desconectaba el nodo central los nodos periféricos quedaban en un estado de falsa conexión entre ellos, evitando que se descincronizaran y ejecutaran la rutina de búsqueda del nodo central para restablecer la comunicación de manera tal que al

volver a conectar el nodo central, los periféricos no se conectaban a él. Esto se resolvió mediante un cambio en las rutinas de comunicación donde cada nodo fue identificado con un código específico el cual se le enviaba al nodo central y luego de esto se comenzaba un intercambio de mensajes cada segundo, si se daban más de dos fallas consecutivas en la entrega y reconocimiento de los mensajes, se consideraba el nodo como descincronizado y se comenzaba el proceso de reconexión pero al reconectarse se volvería a enviar el código de identificación del nodo periférico de manera que el nodo central supiera que ese nodo en específico ya había establecido comunicación previamente. Esta pequeña modificación permitió resolver varios de los problemas encontrados a lo largo de las pruebas del sistema.

En el nodo central (FFD) se implementaron las funciones de USB en modo Host para poder interactuar con el dispositivo de almacenamiento masivo. Uno de los grandes retos de esta parte del diseño fue la incorporación de las librerías del Stack USB de Microchip a las tareas del sistema operativo SIWA-RTOS ya que se debieron cuidar aspectos como la inclusión de los archivos necesarios en cada segmento del código para poder utilizar funciones de SIWA en los métodos de USB y viceversa. Además, una mala llamada a alguna función mientras se ejecutan las tareas de USB causaría que el sistema falle provocando una excepción de software, lo que a su vez provocaría un reinicio del sistema. Esto no es deseado ya que se podrían interrumpir procesos de lectura o escritura de la memoria externa provocando corrupciones de los archivos almacenados en ella. Dentro de las funciones del sistema operativo que se determinó no era indicado hacer llamadas en las tareas de USB están las que implican retardos de las tareas o funciones del debugger.

Finalmente, se agregaron al sistema las funciones de Ethernet mediante el uso del Stack TCPIP de Microchip, este también debió ser acoplado al código existente sin que afectara las demás funciones. El código utilizado para TCPIP es muy profundo en el sentido de que se necesitan muchos archivos para su implementación y cada uno de estos archivos puede poseer más de 1000 líneas de código, por lo tanto el estudio de las librerías de TCPIP se limitó a las funciones necesarias para la interacción del sistema con la página web visible al usuario.

Dado que la implementación fue basada en uno de los ejemplos ofrecidos por Microchip, se intentó mantener las funciones al mínimo para cumplir con los requerimientos, dejando posibles mejoras de esta interfaz para las siguientes etapas del proyecto.

Desde el punto de vista del sistema operativo SIWA, este fue de gran utilidad principalmente en el nodo sumidero ya que permitió la ejecución de tres tareas primordiales, la tarea MIWI, la tarea de manejo de USB y la tarea de manejo de Ethernet. Gracias a que el sistema operativo SIWA-RTOS permite el uso compartido del procesador por varias tareas se pudo acoplar de manera relativamente sencilla cada una de las funciones necesarias para cumplir los requerimientos del proyecto.

En cuanto al montaje físico de la red de sensores, se utilizaron cables UTP categoría 5E con protección para ser usados en ambientes exteriores. Estos cables contienen entre sus líneas un gel que reacciona ante la humedad endureciéndose para evitar la entrada de agua al cobre y la consecuente degradación de las propiedades eléctricas que terminaría en interrumpir la comunicación entre los controladores y los sensores. Además se realizaron los empalmes entre los cables dentro de cajas plásticas herméticas y mediante conectores plásticos donde se atornillan los cables que se desean empalmar. Este montaje asegura rigidez en las conexiones y protección ante las condiciones climáticas extremas a las que está expuesta la red de sensores. Adicionalmente, cada sensor fue sellado con silicón frío comercial y solo se expone al ambiente el elemento de medición de temperatura y humedad relativa, además se colocó un cedazo metálico sobre cada sensor para brindar mayor protección contra posibles golpes directos a los sensores. La fotografía mostrada en la figura 4.1 muestra el interior de una de las cajas donde se realizan las conexiones entre cables, la hermeticidad de estas cajas fue reforzada aplicando silicón frío en las posibles entradas de humedad descubiertas. En la figura 4.2 se muestra una fotografía de los sensores instalados junto con todas sus protecciones físicas implementadas.

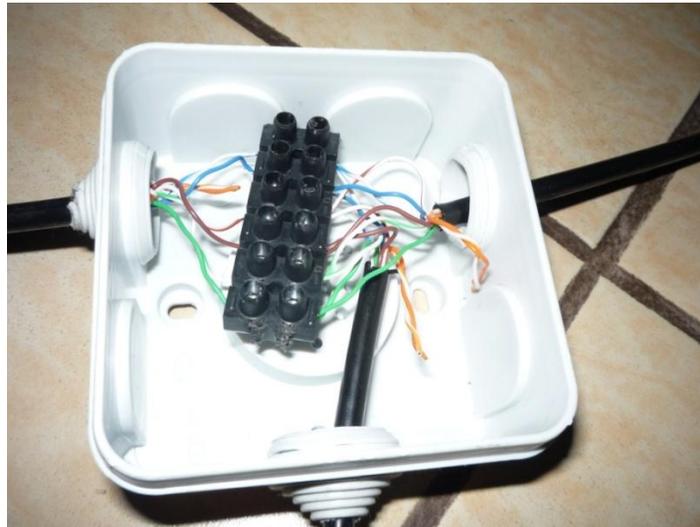


Figura 4.1. Empalme de cables que conectan los sensores con el controlador.



Figura 4.2. Sensor de humedad relativa y temperatura con protecciones físicas.

Finalmente, cada controlador de cada nodo es contenido dentro de una caja plástica hermética que ayuda a proteger el controlador y sus periféricos, brindando a la vez una apariencia estéticamente agradable. En la figura 4.3 se muestra una de las cajas plásticas sin su tapa, con el controlador dentro de ella instalada en el invernadero de GENFORES en Santa Clara de San Carlos.

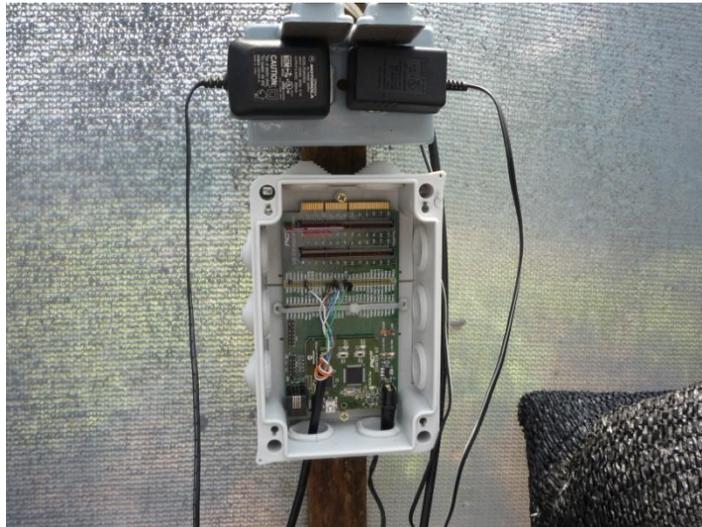


Figura 4.3. Interfaz gráfica de la página de visualización de datos.

4.3 Validación de las mediciones.

Por ser el sistema diseñado una herramienta para tomar muestras de parámetros climáticos, es de esperarse que los datos recolectados sean validados para garantizar que se están obteniendo valores reales de las variables medidas. Para la validación de las mediciones de humedad relativa y temperatura se llevó a cabo un experimento en la ubicación final del sistema, en la sede del Tecnológico en Santa Clara de San Carlos.

El experimento llevado a cabo consistió en tomar una serie de 30 mediciones con un intervalo de 5 minutos entre ellas en un sensor de cada uno de los 3 nodos instalados, tanto para temperatura como para humedad relativa. Para efectos de comparación, se tomaron mediciones en las mismas locaciones y al mismo tiempo con un instrumento comercial de medición de humedad relativa y temperatura. En las tablas 4.1, 4.2 y 4.3 se presentan los resultados obtenidos junto con los valores de las diferencias entre el sistema CRTecMote diseñado y el sistema de referencia.

Tabla 4.1. Datos experimentales obtenidos para el nodo 1.

NODO 1						
	Temperatura			Humedad Relativa		
Muestra	Referencia	CRTecMote	Delta Temp	Referencia	CRTecMote	Delta HR
1	27.6	32.9	5.3	86	90	4
2	27.9	33.42	5.52	84	92	8
3	28.9	34.02	5.12	86	82	4
4	30.2	31.4	1.2	82	81	1
5	30.7	30.94	0.24	77	74	3
6	31	31.15	0.15	75	83	8
7	31.3	31.2	0.1	75	73	2
8	31.5	31.31	0.19	76	70	6
9	31.6	31.8	0.2	78	71	7
10	31.9	31.81	0.09	76	68	8
11	32.8	32.97	0.17	77	77	0
12	33.1	33.61	0.51	79	82	3
13	33.4	33.53	0.13	77	73	4
14	32.5	32.2	0.3	69	61	8
15	31.9	32	0.1	76	79	3
16	31.9	32.03	0.13	78	79	1
17	31.9	32.02	0.12	79	82	3
18	32.2	32.06	0.14	79	85	6
19	31.9	31.87	0.03	78	78	0
20	31.6	31.77	0.17	80	84	4
21	31.9	31.9	0	80	86	6
22	31.2	32.18	0.98	80	82	2
23	32.8	32.49	0.31	79	81	2
24	32.5	32.29	0.21	79	80	1
25	32.2	32.06	0.14	79	82	3
26	32.2	32.03	0.17	78	85	7
27	33.3	33.44	0.14	81	80	1
28	34.6	34.98	0.38	79	74	5
29	35.2	36.09	0.89	78	73	5
30	35.3	36.46	1.16	73	68	5

Tabla 4.2. Datos experimentales obtenidos para el nodo 2.

NODO 2						
	Temperatura			Humedad Relativa		
Muestra	Referencia	CR TecMote	Delta Temp	Referencia	CR TecMote	Delta HR
1	29	30.93	1.93	63	71	8
2	29.4	31.37	1.97	63	68	5
3	30.6	33.6	3	63	61	2
4	31.9	32.3	0.4	62	65	3
5	32.2	33.11	0.91	62	61	1
6	32.5	33	0.5	61	57	4
7	32.7	34.38	1.68	61	56	5
8	32.8	34.74	1.94	61	54	7
9	33.3	35.11	1.81	59	54	5
10	33.5	35.52	2.02	54	50	4
11	34.5	36.55	2.05	41	48	7
12	35.4	37.39	1.99	37	42	5
13	35.3	39.12	3.82	38	43	5
14	34.6	36.84	2.24	38	43	5
15	34.3	38.19	3.89	39.2	44	4.8
16	34.5	37.76	3.26	42	46	4
17	34.5	37.35	2.85	44	48	4
18	34.5	37.21	2.71	48.85	50	1.15
19	34.7	36.69	1.99	50	52	2
20	34.3	36.41	2.11	52	51	1
21	34.22	36.71	2.49	54	51	3
22	34.6	37.28	2.68	53	49	4
23	35	37.23	2.23	51	49	2
24	34.7	37.12	2.42	53	51	2
25	34.5	36.82	2.32	53	51	2
26	34.4	36.96	2.56	53	50	3
27	35.2	39.29	4.09	52	45	7
28	36.7	41.08	4.38	48	38	10
29	38	42.77	4.77	46	37	9
30	39.1	44.17	5.07	45	34	11

Tabla 4.3. Datos experimentales obtenidos para el nodo 3.

NODO 3						
Muestra	Temperatura			Humedad Relativa		
	Referencia	CR TecMote	Delta Temp	Referencia	CR TecMote	Delta HR
1	30.1	29.85	0.25	61.4	69	7.6
2	29.5	29.88	0.38	60	69	9
3	29	30.7	1.7	61.2	66	4.8
4	30.7	32.34	1.64	60.5	61	0.5
5	31.4	33.12	1.72	61.1	58	3.1
6	31.8	33.76	1.96	61	55	6
7	31.9	34.3	2.4	61	54	7
8	32.3	34.7	2.4	59.8	52	7.8
9	33.11	35.19	2.08	58	51	7
10	33.4	35.57	2.17	53	49	4
11	35.1	36.53	1.43	43	45	2
12	35.5	37.44	1.94	35	37	2
13	35.2	37.22	2.02	35	37	2
14	34.8	36.83	2.03	33.7	36	2.3
15	34.4	35	0.6	34.85	37	2.15
16	34.7	36.31	1.61	38	39	1
17	34.2	36.08	1.88	43.5	46	2.5
18	34.3	36.01	1.71	44.8	47	2.2
19	35	35.69	0.69	48	50	2
20	34.15	35.55	1.4	51	48	3
21	35.23	35.75	0.52	52	49	3
22	34.4	36.15	1.75	51	46	5
23	34.6	36.21	1.61	47	45	2
24	34.8	35.94	1.14	50	48	2
25	34.85	35.82	0.97	50	48	2
26	34.72	35.82	1.1	49	47	2
27	35.4	37.48	2.08	49.7	42	7.7
28	36.8	38.96	2.16	45	37	8
29	42.5	40.42	2.08	41	34	7
30	41.5	41.69	0.19	39	32	7

Finalmente se obtuvieron valores de los sensores de luz, se debe recordar que los dispositivos utilizados fueron fotodiodos que junto con una resistencia en serie brindan una salida analógica proporcional a la cantidad de luz, esta salida del circuito de medición fue leída con dos de los canales de ADC de cada nodo e interpretada por medio de una ecuación polinomial de sexto grado en el nodo sumidero. Dicha ecuación es la mostrada en la figura 3.5 de este informe. Los datos leídos del ADC tuvieron que ser convertidos a valores de voltaje para poder utilizar la ecuación que brinda datos en unidades de Lux, esta conversión se realizó a partir del principio de que los voltajes de referencia del ADC son 3.3 V el positivo y 0 V el negativo, además que la resolución del módulo ADC es de 10 bits, por lo tanto bastó con multiplicar los valores de salida del ADC por 3.3 y dividir el resultado entre 1024 (2^{10}).

Debido a que todo el proceso de diseño y prueba del sistema fue realizado bajo techo y en una habitación cerrada, no fue posible probar la reacción de los sensores a la luz solar directa durante todo un día. Sin embargo se comprobó que los valores de voltaje leídos por los fotodiodos se convertían a cantidades en lux tal como la ecuación lo permite. En la tabla 4.4 se muestran las mediciones con los sensores de luz expuestos a una fuente de iluminación artificial y variando la cercanía de la fuente con el sensor.

Cabe destacar acerca de la tabla 4.4 que el valor mínimo leído por el ADC fue de 0,16 voltios, esto implica una iluminación de 472,73 lux. Esta medición mínima fue tomada exponiendo el sensor a total oscuridad durante 5 minutos, según las especificaciones del fabricante del fotodiodo, la corriente máxima que circula por el dispositivo cuando se encuentra en oscuridad total es de 30 nA, la resistencia que se utilizó en serie fue de 10 k Ω por lo que el voltaje esperado debía encontrarse en el orden de los microvoltios (0,3 mV exactamente). Esto implica que con el circuito implementado no será posible obtener mediciones de valores bajos de iluminación.

Tabla 4.4. Valores de voltaje e iluminación obtenidos con los sensores de luz.

Votaje	Lux
2.91	65307.90
2.70	56091.94
2.43	39389.41
2.30	31734.15
1.85	13483.24
1.64	9419.99
1.49	7728.12
1.04	5300.32
0.93	4797.22
0.69	3472.37
0.48	2149.54
0.19	593.09
0.16	472.73

Capítulo 5. Análisis de resultados

5.1 Puesta en marcha del sistema.

Finalizado el proceso de la puesta en marcha del sistema, se comprobó que estuviera capaz de inicializar todas las rutinas de software necesarias para la correcta operación de la red de sensores junto con todas sus funciones periféricas, como las de Ethernet y USB. Mediante el ingreso a la página web residente en la tarjeta de desarrollo se comprobó que las funcionalidades explicadas en el capítulo 3 de este documento funcionaron correctamente, también se comprobó que la información estaba siendo almacenada en la memoria externa USB.

En cuanto a la red inalámbrica, se comprobó que presenta cierta inestabilidad debido a que los nodos RFD se descincronizan frecuentemente y aunque se vuelven a conectar a la red rápidamente, en los lapsos que se mantienen incomunicados es muy probable que se dé una solicitud de datos de parte del nodo central, de ser así, esa solicitud nunca sería recibida y los datos se perdería, restándole confiabilidad a las mediciones capturadas por la red de sensores.

La interfaz con el usuario que se implementó por medio de la página web, demostró ser muy sencilla de usar gracias a que todas sus funciones son visibles desde la pantalla de inicio de la página web. Aunque esta interfaz permite visualizar los datos reales almacenados en el sistema, presenta ciertas debilidades como no permitir al usuario la descarga de archivos completos para su posterior análisis por el personal de GENFORES. Además, al finalizar este proyecto no fue posible hacer accesible la página desde internet, solamente desde una red local por medio de un router inalámbrico instalado en el invernadero.

5.2 Validación de las mediciones.

Los datos presentados en las tablas 4.1, 4.2 y 4.3 del capítulo anterior de este informe fueron analizados por medio de herramientas de software para obtener de ellos datos reales que permitan cuantificar el desempeño del sistema CRTecMote implementado y la calidad del mismo. Los resultados del análisis de se muestran en las tablas 5.1, 5.2 y 5.3 y en ellas se muestran los valores máximos, mínimos y promedio de cada serie de mediciones recolectada.

Tabla 5.1. Diferencia entre valores de referencia y experimentales para el Nodo 1.

Delta de Temperatura			Delta de Humedad Relativa		
Min	Max	Promedio	Min	Max	Promedio
0	5.52	0.809	0	8	3.533

En la tabla 5.1 se presenta el resumen de los datos de la tabla 4.1, se puede apreciar muy claramente que hay una amplia diferencia entre el valor mínimo y el máximo de las diferencias entre los datos de referencia y los tomados por el sistema CRTecMote construido. Al observar en la tabla 4.1, se encuentra que los valores máximos de diferencia en las mediciones se dan en los primeros 4 datos tomados. Esto implica que durante los primeros 20 minutos de funcionamiento del sistema existen varios factores que alteran los resultados del experimento llevado a cabo, por ejemplo el tiempo de establecimiento de los sensores que pasan de un ambiente extremadamente seco como lo es una caja de almacenamiento a un ambiente de condiciones de humedad muy altas, en el invernadero. Ante este cambio abrupto de condiciones se debe de dar un tiempo prudencial para que los sensores comiencen a tomar las mediciones con las incertidumbres establecidas por el fabricante. Por otro lado, el sistema de referencia empleado en el experimento también debe de tener algún tiempo de establecimiento (no indicado por su fabricante) para que comience a tomar mediciones correctas en un ambiente específico. Ante esta situación, es aceptable eliminar las mediciones de los primeros 20 minutos aproximadamente de los análisis de los resultados, para no afectar la cuantificación del resultado del proyecto con valores que se sales de la distribución normal de resultados obtenidos.

Ahora, al ver que el valor promedio de la diferencia para la temperatura es de menos de 1 °C, aún cuando los primeros valores tomados son muy altos, se puede decir que en general y después de un tiempo prudencial de establecimiento del sistema, los valores de temperatura adquiridos son muy similares a los capturados por el sistema de referencia. En cuanto a los valores de humedad relativa mostrados en la tabla 5.1, se aprecia que el promedio de las diferencia de los datos tomados es aproximadamente 3.5 % HR, este valor es bastante elevado en comparación con la incertidumbre de los sensores especificada en la tabla 3.1 donde según el fabricante indica que los sensores tienen una incertidumbre de ± 1.8 % HR. La alta inestabilidad puede tener diversas causas que van desde sensores mal calibrados hasta que el sistema de referencia no tiene la precisión suficiente para considerar que sus mediciones sean mejores que las brindadas por la red de sensores diseñada.

Para brindar una mejor comprensión de los datos tomados y la manera en la que se comparan los valores medidos con ambos sistemas, se configuraron gráficos por cada tabla de valores tomados. Estos gráficos se muestran en las figuras 5.1, 5.3 y 5.5 para temperatura en cada nodo y 5.2, 5.4 y 5.6 para la humedad relativa según el nodo donde se midió.

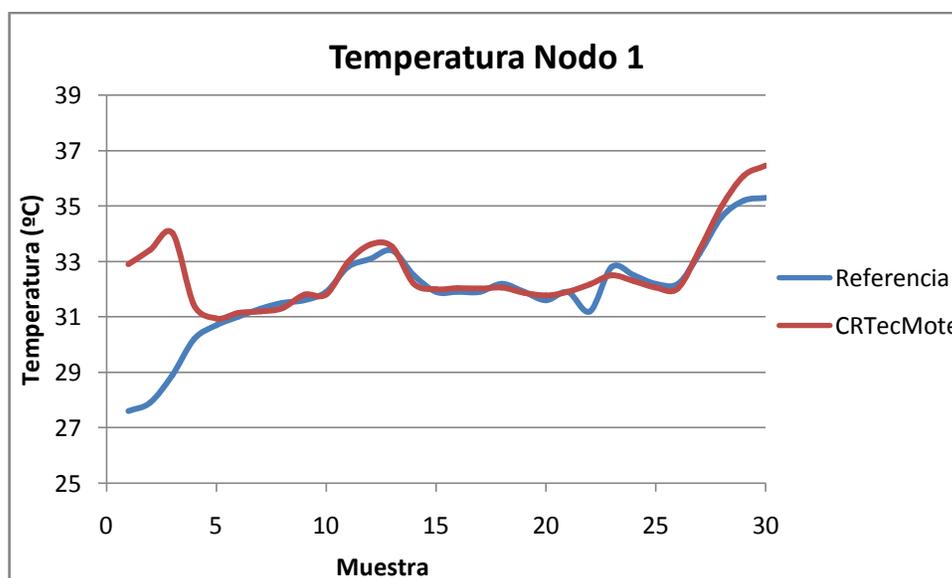


Figura 5.1. Muestras de temperatura tomadas para el nodo 1.

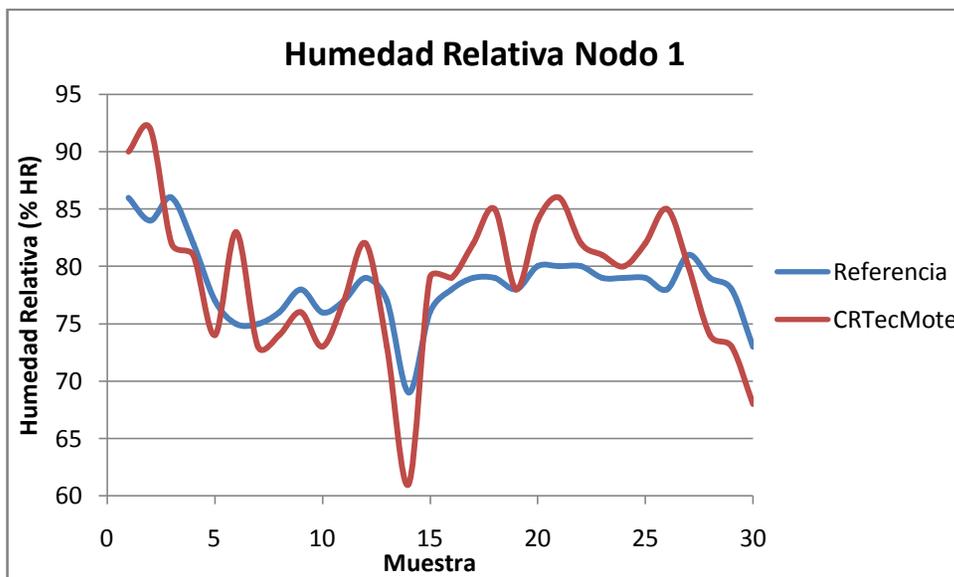


Figura 5.2. Muestras de humedad relativa tomadas para el nodo 1.

Los valores experimentales obtenidos de los nodos 2 y 3 presentan comportamientos bastante similares a los encontrados en el nodo 1. Las tablas 5.2 y 5.3 muestran valores promedio de las diferencias entre valores medidos con ambos sistemas aun mayores a los presentados en la tabla 5.1, una causa de este comportamiento puede ser que se utilizó un sistema de referencia diferente al empleado para las comparaciones del nodo 1, aunque ambos eran termohigrómetros digitales comerciales, sus modelos eran diferentes y por lo tanto sus incertidumbres también deben de ser diferentes aunque estas no estaban especificadas en la poca documentación disponible para estos instrumentos. Por otro lado, en el caso de los nodos 2 y 3 se utilizó el mismo dispositivo, cambiándolo de ubicación cada vez que se tomaba una medición por lo que probablemente no se respetaba el tiempo prudencial de establecimiento de las muestras tomadas, brindando así valores menos precisos.

En las gráficas mostradas en las figuras 5.3 a 5.6 se aprecia que aunque los valores son numéricamente diferentes, siempre se sigue la misma tendencia en los gráficos, lo que indica que ambos sistemas pueden ser representativos de las condiciones climáticas aunque su nivel de confiabilidad no pueda ser determinado precisamente en el experimento realizado.

Tabla 5.2. Diferencia entre valores de referencia y experimentales para el Nodo 2.

Delta de Temperatura			Delta de Humedad Relativa		
Min	Max	Promedio	Min	Max	Promedio
0.4	5.07	2.536	1	11	4.531

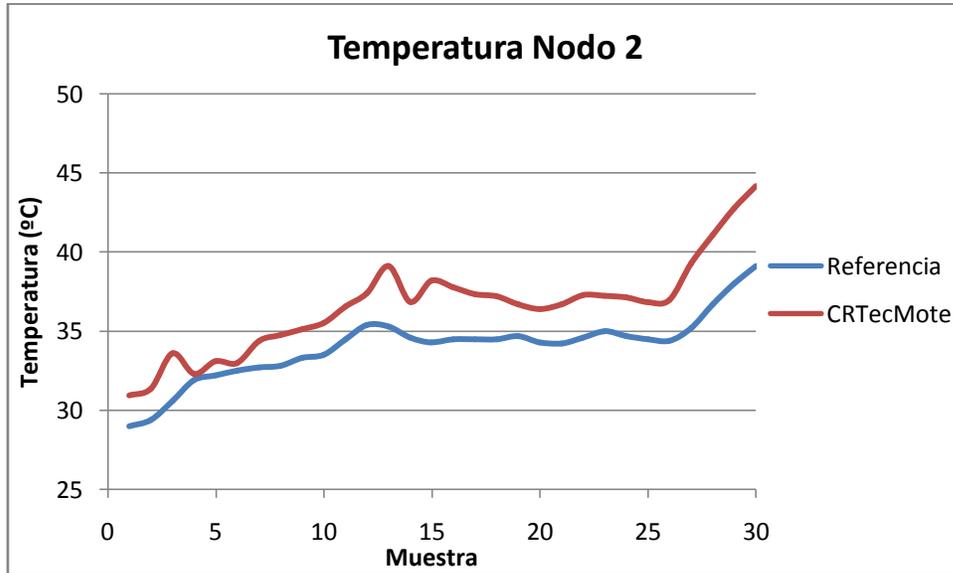


Figura 5.3. Muestras de temperatura tomadas para el nodo 2.

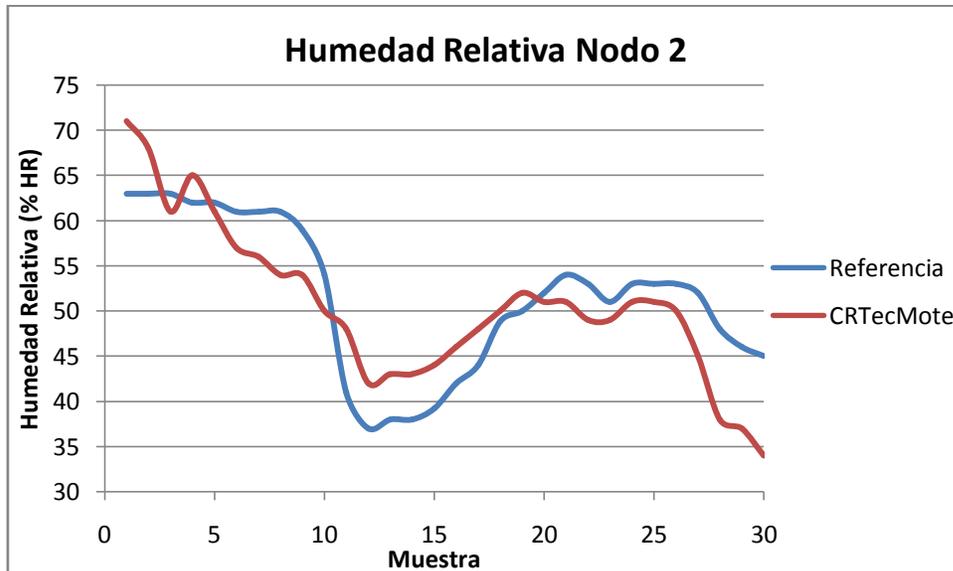


Figura 5.4. Muestras de humedad relativa tomadas para el nodo 2.

Tabla 5.3. Diferencia entre valores de referencia y experimentales para el Nodo 3.

Delta de Temperatura			Delta de Humedad Relativa		
Min	Max	Promedio	Min	Max	Promedio
0.19	2.4	1.520	0.5	9	4.121

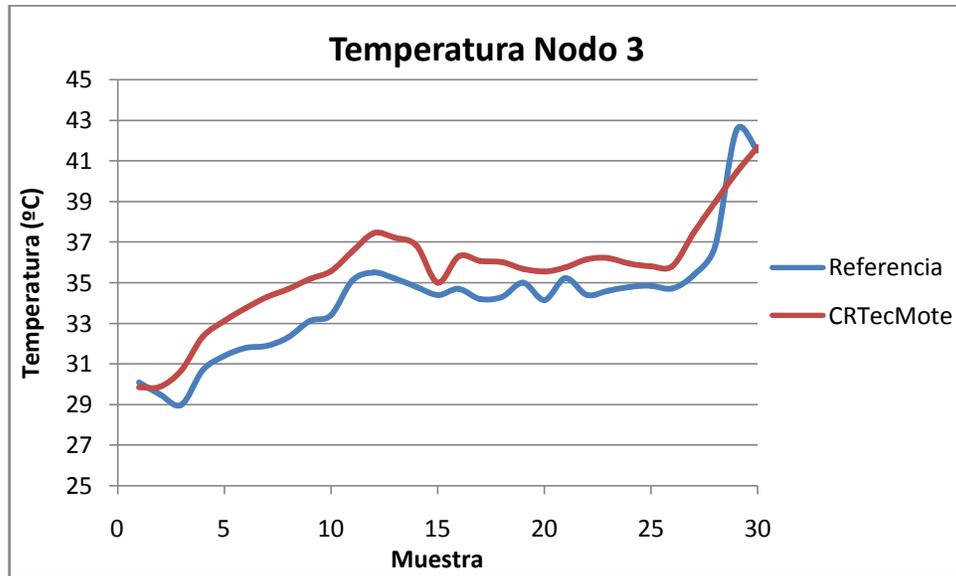


Figura 5.5. Muestras de temperatura tomadas para el nodo 3.

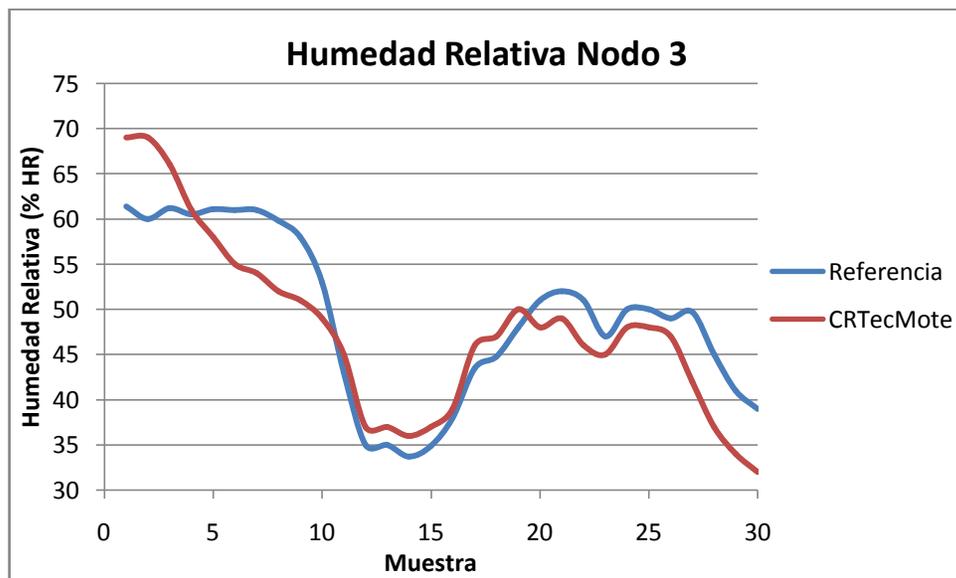


Figura 5.6. Muestras de humedad relativa tomadas para el nodo 3.

Finalmente se realizó un análisis estadístico de las muestras tomadas para determinar los coeficientes de correlación obtenidos de las series de datos, en la tabla 5.4 se muestran los resultados obtenidos. En esta tabla se ve que los valores son muy próximos a la unidad en los tres casos de los datos de temperatura y que para todas las mediciones de humedad relativa se obtienen valores más lejanos a la unidad, esto demuestra que las lecturas de temperatura presentan mayor similitud entre sistema de referencia y la red CRTecMote que las de humedad relativa lo que es de esperarse debido la mayor incertidumbre de los sensores que se especifica en la tabla 3.1.

Tabla 5.4. Valores de correlación para los datos experimentales obtenidos.

	Temp	Humedad
Nodo 1	0.94442606	0.61410138
Nodo 2	0.94665145	0.56355885
Nodo 3	0.89132094	0.80197422

Para finalizar el análisis de los resultados, se procederá a revisar los resultados expuestos en la tabla 4.4, que muestra mediciones realizadas con los sensores lumínicos implementados. En esta tabla se muestra la imposibilidad del sistema de realizar mediciones correctas en el margen inferior de medición de los sensores analógicos de luz, esto se puede deber a problemas de la interfaz con el microcontrolador, la resistencia de los cables de conexión, la resistencia de los conectores, ruido presente en las señales y otras limitantes físicas que provocan que la dificultad de medir valores muy bajos con exactitud sea muy alta.

Por otro lado, la validación de los valores en unidades de lux obtenidos mediante este sistema deberá llevarse a cabo con instrumentos especializados como luxómetros ya que durante la etapa final de implementación y prueba no se contaba con este instrumento. Por lo tanto la validación de estos resultados estará sujeta a las mediciones posteriores que se realicen.

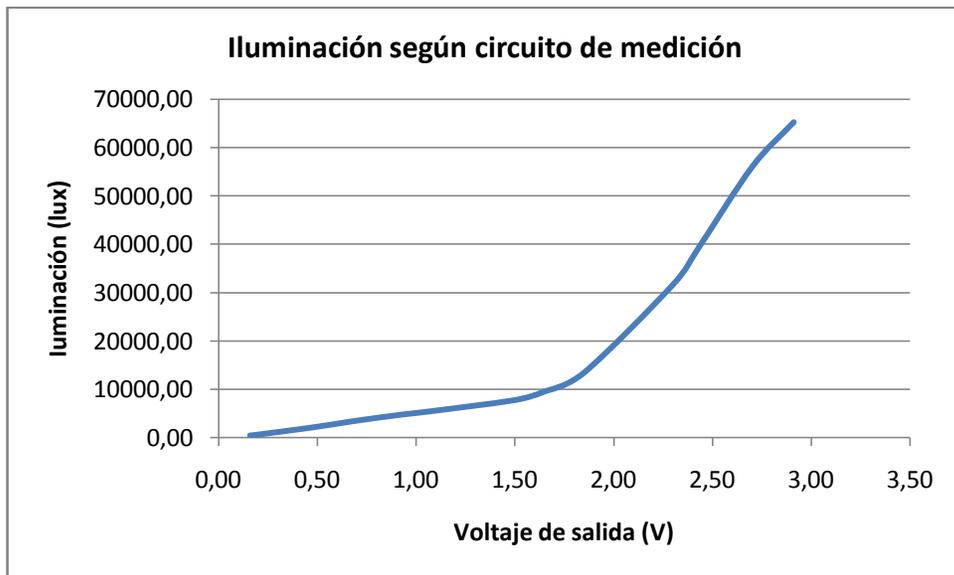


Figura 5.7. Iluminación obtenida a partir de mediciones de voltaje.

Las limitantes anteriormente mencionadas llevan a limitar el uso del sistema en cuanto a la medición de luz a valores mayores a los 500 lux, ya que para mediciones inferiores a este número no se garantiza la confiabilidad del sistema.

Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

- 1- Los sensores de humedad relativa y temperatura digitales disponibles en el mercado brindan mejores prestaciones en cuanto a exactitud que los sensores analógicos comerciales.
- 2- La arquitectura de red CRTecMote soporta la implementación de una red de sensores inalámbrica con tres nodos periféricos.
- 3- La arquitectura de red CRTecMote puede extender su funcionalidad al incluir dispositivos de almacenamiento masivo USB y funciones de red mediante Ethernet.
- 4- Las mediciones de temperatura realizadas con la arquitectura CRTecMote son de mayor confiabilidad que las de humedad relativa.
- 5- Se debe respetar un tiempo de establecimiento de al menos 20 minutos para considerar que las mediciones realizadas con la red de sensores CRTecMote son reales.
- 6- Los sensores analógicos de luz están limitados en su margen de medición inferior por consideraciones físicas del circuito de conexión al microcontrolador por lo que el sistema no se considera indicado para medir cantidades menores a 500 lux.

6.2 Recomendaciones

- 1- Es necesario someter la interfaz de visualización de los datos a la opinión de los funcionarios de GENFORES para que brinden realimentación en cuanto a las formas en las que desean interactuar con el sistema.
- 2- La sustitución de los sensores analógicos de luz por sensores digitales con interfaces seriales podría ayudar a aumentar el rango de medición de luz, de forma que sea posible realizar mediciones de baja iluminación.
- 3- Para efectos de ahorro económico, se debe buscar la forma de desarrollar una tarjeta de circuito impresa que permita acoplar los componentes de los nodos CRTecMote entre ellos y con futuros componentes, de forma que se independice el sistema de los kit de desarrollo comerciales y se aprovechen al máximo las prestaciones del hardware utilizado.
- 4- Se debe buscar una base para conectar los sensores a las líneas de datos que cumplan tanto con los requerimientos técnicos y de seguridad como con los principios básicos de la estética.
- 5- Sustituir los sensores actualmente instalados por unos con mejores características para soportar ambientes de humedad extrema y de construcción más robusta para evitar la constante sustitución por mal funcionamiento.

Capítulo 7. Bibliografía

- [1] O. Murillo, G. Obando, Y. Badilla and M. Azofeifa. (2009, Mayo). **Creación de GENFORES, una cooperativa de mejoramiento genético forestal en costa rica**. . [En línea]. Disponible en: http://www.una.ac.cr/inisefor/index.php?option=com_remository&Itemid=0&func=startdown&id=39.
- [2] C. Garita. (2006, Octubre). **Empresas forestales se apropiaron de tecnología para producir clones de árboles**. *InformaTec* [En línea]. Disponible en: <http://www.tec.cr/prensa/Informatec/2006/Setiembre/n3.htm>.
- [3] A. Alpi, *Cultivo En Invernadero*. Mundi-Presna Libros, 1991.
- [4] J. Carvajal. (2009, Julio). **Diseño de un nodo con arquitectura abierta para redes inalámbricas de sensado: CRTECMOTE**. .
- [5] L. Michalski, K. Eckersdorf and J. McGhee. (2001, Abril). *Temperature Measurement* (Segunda ed.) [En línea]. Disponible en: <http://books.google.co.cr/books?id=pP28yxRZ7i8C&lpg=PP1&ots=pl3fMMPE-C&dq=temperature%20measurement%20Michalski&pg=PR4#v=onepage&q&f=false>.
- [6] Anonymous (2011), **Imágenes de Google**. [En línea]. Disponible en: <http://www.google.es/imghp?hl=es&tab=wj>.
- [7] J. Nolasco, A. Perdigones, I. Peralta, Y. Pascual and M. Muñoz. (2004, Marzo). **Sensores para el control climático en invernadero**. *Horticultura Global* [En línea]. (179), pp. 44. Disponible en: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/dcart?info=link&codigo=941253&orden=0>.
- [8] ChipSensors. (2009, Marzo). **High accuracy humidity measurement using the CS114 or CS124**. . [En línea]. Disponible en: <http://www.chipsensors.com/documents/AN002-HighAccuracyRelativeHumidity.pdf>.
- [9] A. Torrez and R. López. (2010, Mayo). **Medición de luz diaria integrada en invernaderos**. [En línea]. Disponible en: <http://www.extension.purdue.edu/extmedia/HO/HO-238-SW.pdf>.
- [10] P. Hariharan. (2007, *Basics of Interferometry* (Segunda ed.).
- [11] **DATA LOGGER PATENT**, A. BISCHOF and B. Rudolf. (2010, Octubre). 2010/0257287 A1 [En línea]. Disponible en: <http://www.google.com/patents?id=LkfXAAAAEBAJ&zoom=4&dq=datalogger%20&pg=PA1#v=onepage&q&f=false>.

- [12] Moteiv Corporation. (2006, Julio). **Tmote sky datasheet**. [En línea]. Disponible en: <http://www.eecs.harvard.edu/~konrad/projects/shimmer/references/tmote-sky-datasheet.pdf>.
- [13] Crossbow Technology. (2007, Abril). **MICAz datasheet**. [En línea]. Disponible en: http://www.openautomation.net/uploadsproductos/micaz_datasheet.pdf.
- [14] Microchip. (2009, Noviembre). **PIC32 family reference manual book** . [En línea]. Disponible en: [http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/PIC32%20Family%20Reference%20Manual%20\(All%20Sections\).zip](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/PIC32%20Family%20Reference%20Manual%20(All%20Sections).zip).
- [15] R. Barry. (2009, Febrero). *Using the FreeRTOS Real Time Kernel: A Practical Guide*.
- [16] N. Leiva, "Sistema de administración en tiempo real de los recursos de hardware y software de un nodo de sensado. ," Diciembre, 2009.
- [17] P. Semiconductor. (2007, Junio). **The I2C-bus specification and user manual. rev 03** . [En línea]. Disponible en: http://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10204.pdf.
- [18] P. Reen and N. Mohanswamy. (2008, Mayo, 2008). **Implementing file I/O functions using microchip's memory disk drive file system library**. [En línea]. Disponible en: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01045a.pdf>.
- [19] W. R. Stevens and G. R. Wright. (1995), *TCP/IP Illustrated: The Implementation 2*.
- [20] N. Rajbharti. (2002, Mayo, 2003). **The microchip TCP/IP stack**. [En línea]. Disponible en: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00833b.pdf>.
- [21] S. Bowling and R. L. Fischer. (2000, 9 de Julio). **An I2C network protocol for environmental monitoring** . [En línea]. Disponible en: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00736a.pdf>.
- [22] A. Rafiq. (2009, Julio). **I2C peripheral library example** . [En línea]. Disponible en: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/i2c_peripheral_library.zip.
- [23] C. Friedrich and Servoflo Corporation. (2010, Junio). **DIGITAL HUMIDITY SENSOR HYT-271 (datasheet)** . [En línea]. Disponible en: <http://www.servoflo.com/downloads/HYT-271-PRELIM.pdf>.

Hoja de información del proyecto

Información del estudiante:

Nombre: Jose Pablo Fallas Zúñiga

Cédula: 1-1231-0671. **Carné ITCR:** 200327338.

Email: josepablofallas@gmail.com

Información del proyecto:

Nombre del Proyecto: Sistema de caracterización de parámetros climáticos en mini jardines clonales forestales bajo ambiente controlado.

Área del Proyecto: Estructura de Microprocesadores, Diseño de Sistemas Digitales, Análisis y diseño de algoritmos, Manipulación de sensores electrónicos, Sistemas Embebidos.

Información de la Empresa:

Nombre: Instituto Tecnológico de Costa Rica **Zona:** Los Ángeles, Cartago.

Dirección: 300 metros al este de la Escuela Sony.

Actividad Principal: Formación Académica.

Información del encargado en la Institución:

Nombre: Olman Murillo Gamboa.

Puesto que ocupa: Profesor Ing. Forestal

Departamento: Escuela Forestal

Profesión: Ingeniero Forestal

Grado académico: Doctorado

Teléfono: 2550-2511

Email: olmuga@yahoo.es

Información del asesor en la empresa:

Nombre: Johan Carvajal Godínez

Puesto que ocupa: Profesor Ing. Electrónica

Departamento: Escuela Electrónica

Profesión: Ingeniero Electrónico

Grado académico: Maestría

Teléfono: 2550-9171

Email: johcarvajal@itcr.ac.cr