



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE INGENIERÍA



Proyecto de fin de carrera
**PROTOTIPO PARA UNA
RED DE INSTRUMENTACIÓN INALÁMBRICA**
Octubre 2009

Integrantes:

- Alfonso González
- Natacha Leone
- Mauricio Murdoch

Tutores:

- Pablo Mazzara
- Julián Oreggioni

Índice

ÍNDICE	1
ÍNDICE DE FIGURAS	5
ÍNDICE DE TABLAS	7
AGRADECIMIENTOS	8
RESUMEN	9
CAPÍTULO 1	10
INTRODUCCIÓN	10
1.1. Motivación y descripción del proyecto	10
1.2. Requerimientos	13
1.3. Solución propuesta	14
1.4. Estructura del documento	14
CAPÍTULO 2	16
PLATAFORMA HARDWARE Y SOFTWARE	16
2.1. Elección de la plataforma hardware	16
2.1.1 Alimentación	17
2.1.2 Microcontrolador	17
2.1.3 Radio	18
2.1.4 Almacenamiento	19
2.1.5 Interfaces	20
2.1.6 Elección final	20
2.1.7 Mote Iris	21
2.2. Elección de la plataforma software	22
2.3. Programación para la comunicación	23
2.3.1 Collection	23
2.3.2 Dissemination	24
2.3.3 Low Power Listening (LPL)	24
CAPÍTULO 3	26
SENSORES	26

3.1. Sensor de temperatura	26
3.1.1 Elección del integrado	26
3.1.2 Integrado DS620	27
3.1.3 Circuito de medición de temperatura	27
3.1.4 Programación del Mote para integrar el sensor de temperatura	28
3.2. Sensor de pH	31
3.2.1 Definición de pH ^{[5][6]}	31
3.2.2 Electrodo de vidrio	32
3.2.3 Electrodo de estado sólido (ISFET)	35
3.2.4 Elección del electrodo	35
3.2.5 Circuito de medición de pH	37
3.2.6 Programación del Mote para integrar sensor de pH	47
CAPÍTULO 4	51
INTERFAZ CON EL USUARIO	51
4.1. Elección de la plataforma	51
4.2. Programación	51
4.2.1 Formato de los mensajes	53
4.2.2 Enviar mensajes a los nodos	53
4.2.3 Recibir mensajes de los nodos	53
4.2.4 Calibrar el sensor de pH de un nodo determinado	56
4.3. Compatibilidad con el hardware del cliente	59
CAPÍTULO 5	60
IMPLEMENTACIÓN	60
5.1. Fabricación de PCBs	60
5.1.1 Placa de temperatura	60
5.1.2 Placa de pH	61
5.1.3 Consideraciones para los diseños de los impresos	61
5.2. Montaje mecánico	62
5.2.1 Planificación	62
5.2.2 Montaje del Mote y del sensor de temperatura	62
5.2.3 Implementación final	65
CAPÍTULO 6	66
VALIDACIÓN	66
6.1. Consumo del nodo sensor	66
6.1.1 Consumo teórico	66
6.1.2 Consumo experimental	67
6.2. Características dinámicas del circuito del sensor de pH	73
6.2.1 Tiempo de encendido	73
6.2.2 Tiempo de respuesta al escalón	74
6.3. Incertidumbre en la medida de pH	76

6.3.1 Incertidumbre tipo A	76
6.3.2 Incertidumbre tipo B	76
6.3.3 Incertidumbre combinada	78
6.4. Comparación con un sensor de pH comercial	79
6.4.1 Validación del sensor de pH realizado	79
6.4.2 Validación de la electrónica realizada.	80
6.5. Pruebas en planta	81
6.5.1 Comunicación	82
6.5.2 Sensor de temperatura	82
6.5.3 Sensor de pH	83
6.5.4 Voltaje de la batería	84
CAPÍTULO 7	85
CONCLUSIONES	85
7.1. Evaluación de los objetivos	85
7.2. Principales aportes	87
7.2.1 Para el cliente	87
7.2.2 Para la Universidad	87
7.3. Principales problemas encontrados	87
7.4. Puntos a mejorar	88
ANEXO I	I-1
ELECTRODO ISFET	I-1
I.1. Generalidades	I-1
I.2. Ecuación característica	I-2
I.3. Circuito de medida para determinar el pH	I-3
I.4. Aplicación Práctica	I-4
ANEXO II	II-1
RUTINA PRINCIPAL DEL NODO SENSOR	II-1
ANEXO III	III-1
PROTOCOLO I2C	III-1
III.1. Conexión para la comunicación I2C	III-1
III.2. Funcionamiento del protocolo I2C	III-1
ANEXO IV	IV-1

COMPLEMENTOS PARA LOS SENSORES	IV-1
IV.1. Configuración integrado DS620	IV-1
IV.2. Funcionamiento del interruptor analógico	IV-2
IV.3. Funcionamiento filtro pasabajos	IV-3
IV.4. Layout de los PCBs	IV-4
ANEXO V	V-1
INTERFAZ MOTE - SENSORES	V-1
V.1. Conector de expansión de 51 pines	V-1
V.2. Conector Molex	V-3
V.3. Comunicación entre el nodo base y PC	V-3
V.4. Layout del PCB del conector de 51 pines	V-4
ANEXO VI	VI-1
MANUALES PARA EL CLIENTE	VI-1
VI.1. Manual de usuario	VI-1
VI.1.1 Calibración del sensor de pH	VI-2
VI.2. Manual de instalación	VI-5
ANEXO VII	VII-1
COSTOS	VII-1
REFERENCIAS	113

Índice de Figuras

Figura 1.1: Fulón utilizado en este proyecto	11
Figura 1.2: Método actual del cliente para medir temperatura	12
Figura 1.3: Instrumentación actual para la medición de pH	12
Figura 1.4: Esquema de alto nivel de la aplicación desarrollada	14
Figura 2.1: Mote Iris	21
Figura 2.2: Esquema interno del Mote	21
Figura 2.3: Arquitectura de red tipo árbol	24
Figura 3.1: Esquemático del PCB del sensor de temperatura	28
Figura 3.2: Diagrama de bloques de la función de encendido del sensor de temperatura	29
Figura 3.3: Diagrama de bloques de la función de lectura de dato de temperatura	30
Figura 3.4: Esquema del electrodo de combinación	32
Figura 3.5: Pendiente del electrodo ideal a 25°C	33
Figura 3.6: Modelo eléctrico de un electrodo	34
Figura 3.7: Electrodo Mettler Toledo InLab 413	37
Figura 3.8: Esquema del amplificador operacional INA333	38
Figura 3.9: Modelo para estimar el modo común	39
Figura 3.10: Circuito diseñado para la medición de pH	40
Figura 3.11: Esquema interno de un potenciómetro digital de 127 pasos	42
Figura 3.12: Esquema interno del integrado de voltaje de referencia MAX6018	44
Figura 3.13: Esquema del circuito del sensor de pH	47
Figura 3.14: Diagrama de bloques de la función de lectura del sensor de pH	48
Figura 3.15: Diagrama de bloques de la función de calibración del sensor de pH	49
Figura 4.1: Ventana principal de la aplicación	52
Figura 4.2: Diagrama de bloques de la función de llegada de mensaje	55
Figura 4.3: Ventana emergente para la calibración del sensor de pH	56
Figura 4.4: Ventana inicial de calibración del sensor de pH	56
Figura 4.5: Diagrama de bloques de la función de calibración	57
Figura 4.6: Ventana de calibración cuando se está tomando el pH de la solución buffer 7	58
Figura 4.7: Ventana final de la calibración	59
Figura 5.1: Foto del PCB de temperatura realizado	61
Figura 5.2: Foto del PCB de pH realizado	61
Figura 5.3: Caja estanca y vaina del sensor de temperatura	63
Figura 5.4: Soporte para el Mote sensor	63
Figura 5.5: Diseño de la vaina del sensor de temperatura	64
Figura 5.6: Vaina del sensor de temperatura	65
Figura 5.7: Caja estanca montada al lateral del fulón	65
Figura 6.1: Consumo promedio vs. Tiempo de muestreo	67
Figura 6.2: Captura de osciloscopio para observar el consumo del sensor de pH	68
Figura 6.3: Captura de osciloscopio para observar el consumo del sensor de temperatura	69
Figura 6.4: Consumo de la radio con un ciclo de trabajo del 50%	70
Figura 6.5: Consumo de la radio con un ciclo de trabajo del 5%	70
Figura 6.6: Consumo promedio de los sensores	72
Figura 6.7: Consumo promedio del Mote del nodo sensor (con un LPL al 8%)	72
Figura 6.8: Salida analógica, $t_{on}=12s$	73
Figura 6.9: Salida analógica, $t_{on}=45s$	74
Figura 6.10: Respuesta al escalón creciente	75
Figura 6.11: Respuesta al escalón decreciente	75
Figura 6.12: Comparación del sensor de pH de la aplicación con un sensor comercial (y su electrodo)	80
Figura 6.13: Comparación del sensor de pH de la aplicación con un sensor comercial (y su electrodo)	81
Figura 6.14: Gráfica de temperatura en el interior del fulón en función del tiempo	83
Figura 6.15: Ensayo de medida de pH en planta	83

Figura 6.16: Grafica de voltaje en la pila del nodo sensor en función del tiempo	84
Figura I.1: Transistor MOSFET (a). Electrodo ISFET (b)	I-1
Figura I.2: Modelo del electrodo ISFET	I-2
Figura I.3: Esquema de medida a corriente constante	I-3
Figura I.4: Esquema para la medición del voltaje de pH	I-4
Figura II.1: Diagrama de la rutina principal de los nodos sensores	II-1
Figura III.1: Diagrama de conexionado de una comunicación I2C	III-1
Figura III.2: Secuencias de inicio y parada del protocolo I2C	III-2
Figura III.3: Secuencia de bits al comienzo de la comunicación	III-2
Figura IV.1: Esquema del interruptor TS3A4742	IV-2
Figura IV.2: Resistencia del interruptor	IV-3
Figura IV.3: Filtro pasabajos de primer orden	IV-3
Figura IV.4: Transferencia de un filtro pasabajos de primer orden	IV-4
Figura IV.5: Layout del sensor de temperatura	IV-4
Figura IV.6: Layout del PCB de la electrónica del sensor de pH (arriba)	IV-5
Figura IV.7: Layout del PCB de la electrónica del sensor de pH (abajo)	IV-5
Figura V.1: Foto del conector de expansión	V-1
Figura V.2: Conector macho (izquierda) y conector hembra (derecha)	V-2
Figura V.3: Esquemático del conector	V-2
Figura V.4: Molex macho (izquierda) y Molex hembra (derecha)	V-3
Figura V.5: Base de programación Mib510	V-4
Figura V.6: Layout del PCB del conector de 51 pines	V-4
Figura VI.1: Ventana principal de la aplicación	VI-1
Figura VI.2: Ventana emergente para la calibración del sensor de pH	VI-2
Figura VI.3: Ventana inicial de calibración del sensor de pH	VI-2
Figura VI.4: Ventana de calibración mientras se está tomando la medida de pH 7	VI-3
Figura VI.5: Ventana de calibración al finalizar la medida de pH 7	VI-3
Figura VI.6: Ventana de calibración mientras se está tomando la medida de pH 4	VI-4
Figura VI.7: Ventana de calibración al finalizar la medida de pH 4	VI-4
Figura VI.8: Ventana de administrador de dispositivos de WinXP	VI-5

Índice de Tablas

Tabla 1.1: Resumen de requerimientos generales del sistema	13
Tabla 2.1: Componentes de plataformas hardware comparadas	16
Tabla 2.2: Comparación de los microcontroladores a partir de sus hojas de datos	18
Tabla 2.3: Comparación de las radios a partir de sus hojas de datos	19
Tabla 2.4: Características de la plataforma Iris	22
Tabla 3.1: Requerimientos principales del sensor de temperatura	27
Tabla 3.2: Características principales del integrado DS620	27
Tabla 3.3: Características del amplificador de instrumentación INA333	38
Tabla 3.4: Características del interruptor TS3A4742	46
Tabla 6.1: Consumo de los componentes de los sensores	66
Tabla 6.2: Consumos de los componentes	71
Tabla 6.3: Cálculo de incertidumbre de α	77
Tabla 6.4: Cálculo de incertidumbre de β	77
Tabla 6.5: Incertidumbres y puntos de trabajo	78
Tabla 6.6: Cálculo de incertidumbre de pH para pH = 4	78
Tabla 6.7: Cálculo de incertidumbre de pH para pH = 7	78
Tabla 7.1: Requerimientos vs. Resultados	86
Tabla IV.1: Tabla de mapeo de memoria del integrado DS620	IV-1
Tabla IV.2: Registro de configuración	IV-1
Tabla IV.3: Descripción de los bits del registro de configuración del integrado DS620	IV-2
Tabla V.1: Pines de interés del conector de expansión	V-3
Tabla VII.1: Costos del proyecto	VII-1

Agradecimientos

A los tutores, Julián y Pablo, por su ayuda durante todo este año de trabajo.

A la empresa Zenda por apostar a un proyecto de fin de carrera como inversión. En particular a, Rodolfo Chiesa, Gabriel Perdomo, Claudio Giordano, Nicolás Martínez y José Campos quienes en distintas etapas del proyecto estuvieron involucrados.

Queremos agradecer a Leonardo Steinfeld y Leonardo Barboni, docentes de facultad, que nos brindaron su ayuda.

Agradecemos también a Raúl Arbiza por su asistencia a la hora de realizar los impresos.

Resumen

Se desarrolló un prototipo de sensor inalámbrico de temperatura y pH, pudiéndose expandir para implementar una red de sensores. El sistema está optimizado para el uso en un ambiente industrial y para el proceso de curado de las pieles.

El prototipo construido consta de una base y dos nodos remotos. El sistema permite recabar lecturas de sensores colocados en el interior de fulones giratorios y transmitirlos inalámbricamente a una base remota conectada a un PC. Para las medidas de temperatura y pH se utilizaron sensores comerciales estándar. En ambos casos se desarrollaron los circuitos eléctricos y el software de bajo nivel para adaptarlas al sistema. Como plataforma de hardware se usaron motes IRIS de la empresa Crossbow. El software se implementó usando el sistema operativo abierto TinyOS 2.0 desarrollado por la Universidad de Berkeley. Se desarrolló un software de usuario que permite guardar y visualizar los datos recibidos en el PC, así como monitorear y configurar el sistema.

El prototipo fue probado en la planta industrial de la curtiembre Zenda durante una semana con resultados plenamente satisfactorios.

Las características del sistema son las siguientes:

- Sensores implementados: temperatura y pH
- Cantidad de nodos máximo de la red: 255
- Costo: Cada nodo sensor extra costará U\$S 400
- Distancia máxima: 50m (en ambiente industrial)
- Períodos de muestreo mínimo: un minuto
- Alimentación:
 - Nodo base: a través del puerto USB del PC
 - Nodo sensor: 2 pilas AA alcalinas
 - Duración estimada: 50 días
- Temperatura:
 - Rango: 10 a 70 °C
 - Incertidumbre: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$
- pH:
 - Rango: 3 a 7
 - Incertidumbre: ± 0.1

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación y descripción del proyecto

La idea del proyecto surge a partir del conocimiento, por parte de los integrantes de este proyecto, del trabajo que el Grupo de Microelectrónica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República estaba realizando en el área de transmisión de datos en bajo consumo utilizando equipos denominados Motes. Luego de discutir con algunos docentes del grupo surgió la propuesta de probar estos equipos en una aplicación industrial. Por un lado, el proyecto era interesante para el Grupo de Microelectrónica porque no se habían desarrollado hasta ese momento aplicaciones para ese ambiente. Por otro lado, resultaba de interés para los integrantes del equipo por tratarse del ambiente laboral de dos de ellos.

Se investigaron posibles aplicaciones, se analizaron distintas posibilidades y se concluyó que una de las aplicaciones con mayor potencial para un sistema de estas características sería en el tratamiento del cuero dentro de una curtiembre.

Se le planteó la idea a la curtiembre Zenda¹, (anteriormente llamada Branaá). Zenda es una empresa transnacional con plantas en varios países (Uruguay, Argentina, EEUU, Sudáfrica, Alemania y México). Se especializa en cueros para automóviles contando entre sus principales clientes a las firmas Audi, Mercedes, BMW y Toyota, entre otros. Se realizó el planteo a Zenda ya que una empresa de este tamaño tiene el capital necesario para financiar el proyecto. Desde un principio se mostraron interesados en el proyecto y luego de varias reuniones acordaron financiar y dar apoyo (logístico y de taller) para realizar el prototipo.

La producción del cuero se realiza en varias etapas, durante las cuáles es fundamental controlar las variables que afectan la calidad del mismo. Una vez que los cueros son trasladados a la curtiembre, son almacenados en el saladero hasta que llega el momento de procesarlos. El nombre de la primera es “etapa de ribera”, en la cual el cuero es preparado para ser curtido, en ella es limpiado y acondicionado asegurándole un correcto grado de humedad. Luego se ejecuta la “etapa de piquelado”, en la que se realiza la preparación química de la piel para el proceso de curtido, principalmente mediante la utilización de ácido fórmico y sulfúrico. A continuación se lleva a cabo la “etapa de curtido”, que es el proceso por el cual se estabiliza el colágeno de la piel mediante agentes curtientes minerales, principalmente sales de cromo, o vegetales, transformándola en cuero. Luego viene la “etapa de postcurtición”, con procesos mecánicos, donde se pretende dar un espesor específico y homogéneo al cuero, y procesos húmedos tendientes a modificar el colágeno para adecuarlas a artículos determinados. Por último se realiza la

¹ <http://www.zendaleather.com/zendaleather/>

“etapa de secado y terminación” en donde los cueros son desaguados y retenidos para eliminar el exceso de humedad y además son estirados y preparados para luego secarlos [1]

El objetivo del proyecto es monitorear las variables en el “proceso de pelambre” que está incluido dentro de la “etapa de ribera”. En este proceso se colocan las pieles dentro de un fulón y se disuelve el pelo utilizando cal y sulfuro de sodio. Un fulón es un recinto cilíndrico de madera de gran tamaño (el fulón utilizado es de 3 metros de diámetro por 3.5 metros de largo) como se observa en la Figura 1.1. A lo largo del proceso el fulón rota con una velocidad de 4 r.p.m. para lograr la correcta homogenización del proceso.



Figura 1.1: Fulón utilizado en este proyecto

En total en la planta de Zenda ubicada en Nuevo Paris (Montevideo), existen alrededor de 30 fulones entre todos los procesos de la misma.

La variable de mayor relevancia para este proceso es la temperatura. Adicionalmente se mide pH, para realizar esto se toma una muestra de la sustancia que se encuentra en el interior del fulón. La cantidad de muestras tomadas durante un ciclo de proceso es mucho menor a la cantidad de medidas de temperatura tomadas en el mismo ciclo. El proceso dura alrededor de 24 horas y durante este tiempo el fulón se encuentra permanentemente girando.

Actualmente para sensar temperatura y pH se detiene el proceso, se abre una puerta lateral y se toma una muestra de la sustancia del interior. En la Figura 1.2 se muestra el método empleado para medir temperatura y en la Figura 1.3 se muestran los instrumentos utilizados para medir pH. Esta manera de recabar las medidas no solo tiene el inconveniente de ser manual y de detener el proceso, sino que además al abrir el fulón el operario queda expuesto a los vapores del interior que pueden ser nocivos para la salud. Asimismo, como en cualquier proceso manual pueden existir errores humanos como anotar incorrectamente la medida u olvidar hacerla, además de requerir tener un operador permanentemente para realizarlas.



Figura 1.2: Método actual del cliente para medir temperatura



Figura 1.3: Instrumentación actual para la medición de pH

Otro método que se emplea actualmente es la utilización de “dataloguers” con sensores de temperatura colocados sueltos en el interior del fulón junto con los cueros. Estos recaban la información durante el proceso y luego de que termina el proceso se extrae el “dataloguer” de entre los cueros y se levantan los datos con un PC para analizarlos. Este proceso evita los problemas del método anterior, ya que ni es manual ni se detiene el proceso. Como contrapartida deja de ser en tiempo real, no se puede controlar el proceso que está sucediendo sólo se puede analizar el proceso que ya ha concluido. Además el cliente comenta que en ocasiones se pierden los “dataloguers” cuando sacan el cuero del fulón generando una pérdida económica y de información.

Para el cliente es muy deseable automatizar el proceso en tiempo real. Una opción es utilizar contactos deslizantes² tanto para alimentar a los sensores dentro del fulón como para enviar al exterior las medidas tomadas por los mismos. Este método requiere de un alto mantenimiento debido a que los carbones de las escobillas se gastan frecuentemente [2] y su instalación es más compleja.

² También llamados escobillas de carbón.

Otra opción podría ser mediante sensores inalámbricos con fuente de alimentación propia. Este tipo de sensado, al igual que la anterior, permite obtener medidas tan frecuentemente como se quiera en tiempo real sin necesidad de interrumpir el proceso. Además elimina la posibilidad de errores humanos al tomar o registrar la medida y minimiza los riesgos para la salud del operario. Esta es una solución muy fácilmente escalable a muy bajo costo, ya que para sensar en un fulón más, basta con realizar el nodo sensor³ y realizar cambios mínimos en el software para adaptarlo a la red. Finalmente el costo de mantenimiento es escaso, debido a que no tiene cables ni contactos que pueden ser afectados por el ambiente corrosivo al que están expuestos.

1.2. Requerimientos

El cliente impone ciertos requerimientos a partir del proceso que se quiere monitorear. El sensor de temperatura debe poder trabajar en un rango desde 15°C hasta 45°C con una precisión de $\pm 0,5^\circ\text{C}$. El rango de pH del proceso (para pelambre) está comprendido entre valores de 3 y 7 pH, lo determinan con una precisión de $\pm 0,1$ pH.

Para que la solución propuesta sea práctica, la autonomía de cada nodo sensor deberá ser de al menos dos meses utilizando pilas alcalinas y con períodos de muestreo mayores a una hora.

Requerimientos generales	
Costo	Costo total del desarrollo inferior a U\$S 1500.
Interfaz con el usuario	Sencilla y amigable. Debe mostrar los últimos datos recabados por los nodos sensores.
Registro de datos	Guardar en un archivo csv todas las medidas que le llega al nodo base.
Escalabilidad	Lograr a partir de un prototipo, aumentar el número de sensores en la red fácilmente
Requerimientos del nodo base	
Comunicación con la PC	Debe poder funcionar con Windows XP.
Tiempo de vida	Máximo posible, al menos un año.
Requerimientos del nodo sensor	
Variable temperatura	Rango: entre 15 y 45 °C, precisión: $\pm 0,5$ °C.
Variable pH	Rango: 3 y 7 pH, precisión: $\pm 0,1$ pH.
Autonomía	2 meses con 2 pilas AA alcalinas y períodos de muestreo de al menos una hora.
Portabilidad	Debe poderse desmontar del fulón.
Tiempo de vida	Máxima posible.
Período de muestreo	Debe poderse seleccionar, el período mínimo debe ser de un minuto.
Calibración de pH	Lo más sencilla posible del lado del usuario.

Tabla 1.1: Resumen de requerimientos generales del sistema

³ Nodo sensor: se refiere al conjunto de un mote y un sensor, ya sea de temperatura o pH o los dos
 Nodo base: se refiere al conjunto de un mote y la placa de programación que hace de interfaz con el PC.
 Base: se refiere al conjunto del nodo base y la PC

1.3. Solución propuesta

El objetivo general del proyecto es diseñar un prototipo de sensor de temperatura y pH inalámbrico. Este estaría diseñado para el monitoreo de esas variables en un fulón. Se realizarán pruebas del prototipo sensando temperatura en el proceso de pelambre y se estudiara la viabilidad de realizar las pruebas para el sensado de pH en planta.

Para hacer este prototipo se utilizarán los dispositivos inalámbricos llamados Motes⁴. Los Motes son dispositivos electrónicos capaces de recibir información a través de sus interfaces, procesarla y transmitirla inalámbricamente hacia otro Mote o hacia una PC. Un Mote consiste en un microcontrolador y una radio para comunicarse.

También se realizará una aplicación (a correr en el PC del cliente) capaz de mostrar y registrar los datos recabados por los sensores.

El cliente será el encargado de la implementación del montaje mecánico del prototipo en planta.

En la Figura 1.4 se observa un esquema de alto nivel de la aplicación desarrollada.

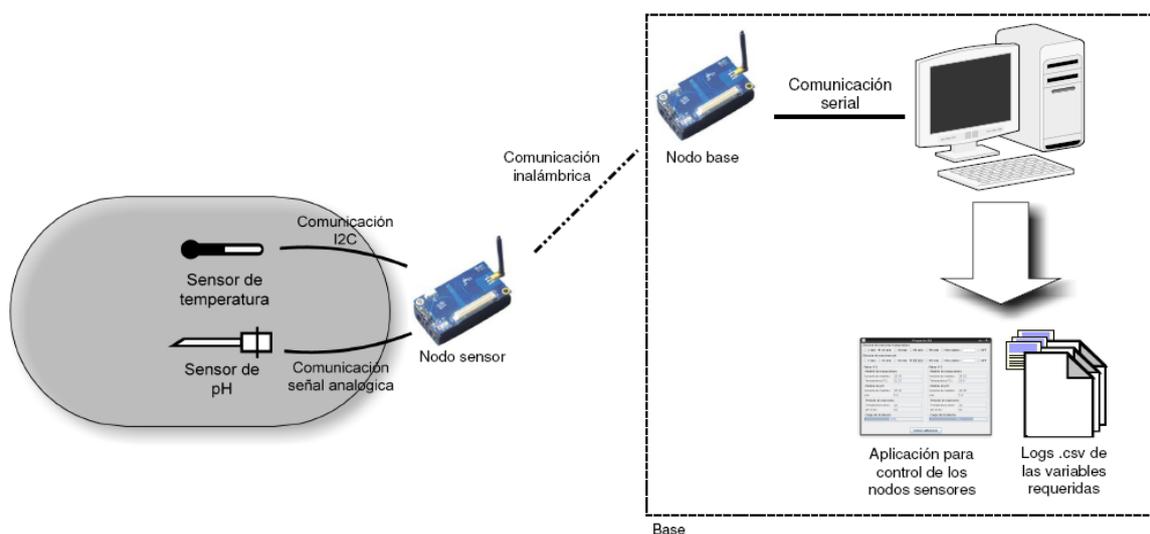


Figura 1.4: Esquema de alto nivel de la aplicación desarrollada

1.4. Estructura del documento

La presente documentación está formada por 7 capítulos y 7 anexos.

En el segundo capítulo se presentan las plataformas hardware y software

⁴ La palabra Mote proviene del inglés y significa pequeña partícula, el nombre intenta destacar la ligereza y el tamaño reducido del dispositivo.

consideradas para este proyecto, cuáles de ellas se eligieron y los motivos que llevaron a hacerlo. Se explica también las bases para la realización de la programación de la plataforma.

En el capítulo tres se exponen los sensores de temperatura y de pH. Se explican las distintas tecnologías que se estudiaron, cuales fueron las elegidas y los motivos. También se explica como se realizó el diseño de la adaptación de los sensores con las plataformas elegidas en el capítulo dos.

El capítulo cuatro se refiere a la interfaz con el usuario, es decir a la aplicación desarrolla en el PC para que el usuario interactúe con el sistema.

En el quinto capítulo se detalla como fueron realizados los distintos dispositivos requeridos en el proyecto. Asimismo, se expone cómo se realizó el montaje de los componentes en la planta del cliente.

El capítulo seis muestra los ensayos realizados en laboratorio y en planta con el fin de validar el sistema creado.

El último capítulo refiere a las conclusiones que se obtuvieron durante el desarrollo del proyecto. En particular se destacarán cuáles objetivos se alcanzaron, que resultados se obtuvieron, cuáles fueron los principales aportes y los principales inconvenientes del proyecto. También se mencionan cuáles son los puntos a mejorar por posibles futuros proyectos.

En el anexo I se hace una pequeña introducción a los electrodos ISFETs explicando su principio de funcionamiento y la circuitería necesaria para poder medir. En el anexo II se muestra el diagrama de la rutina principal que se encuentra corriendo en los motes de los nodos sensores. El anexo III se explica brevemente el conexionado y el funcionamiento del protocolo de comunicación serial I2C. El anexo IV complementa al capítulo 3 explicando más detalladamente algunos puntos. En el anexo V se detalla como se realizó físicamente la conexión entre el mote del nodo sensor y los sensores y entre el mote del nodo base y el PC. En el anexo VI se encuentran los manuales realizados para el cliente, el manual de usuario de la aplicación de monitoreo y el manual de instalación de los drivers necesarios para correr la misma. En último, anexo VII, se detallan los costos del presente proyecto.

Capítulo 2

Plataforma hardware y software

En este capítulo se mostrarán las distintas opciones que se tuvieron a la hora de elegir las plataformas hardware y software. La plataforma hardware se refiere al Mote en sí, es decir que se elegirá cuál fabricante y modelo se utilizará. Luego, se decidirá, a partir de las opciones que ofrezca el Mote seleccionado, con cuál plataforma de software (Sistema Operativo) se desarrollará la aplicación.

2.1. Elección de la plataforma hardware

Un Mote está compuesto por cinco grandes partes:

- Radio
- Microcontrolador
- Memoria externa
- Interfaces
- Alimentación

En la Tabla 2.1 se muestran distintas plataformas encontradas y sus respectivas características.

Nombre	Microcontrolador	Radio	Interfaces
BTnode	Atmel ATmega 128L	Chipcon CC1000	UART, SPI, I2C, GPIO, ADC 12bit
Iris	Atmel ATmega 1281	Atmel AT86RF230	UART, SPI, I2C, GPIO, ADC 10bit
MicaZ	Atmel ATmega 128L	Chipcon CC2420	UART, SPI, I2C, GPIO, ADC 10bit
TelosB	Texas Instruments MSP430	Chipcon CC2420	UART, SPI, I2C, GPIO, ADC 12bit
TinyNode	Texas Instruments MSP430	Xemics XE 1205	UART, SPI, GPIO, ADC 12bit

Nombre	Memoria de programación y RAM	Memoria externa	Plataforma software soportada
BTnode	128k, 4k RAM	---	BTnut y TinyOS
Iris	128k, 8k RAM	512k Flash	Moteworks y TinyOS
MicaZ	128k, 4k RAM	512k Flash	Moteworks y TinyOS
TelosB	48k, 10k RAM	1024k Flash	Contiki, TinyOS y Mantis
TinyNode	48k, 10k RAM	512k Flash	TinyOS

Tabla 2.1: Componentes de plataformas hardware comparadas

En todas las plataformas de hardware encontradas la alimentación de los Motes se tiene a través de dos pilas AA.

Cuando se tuvo que elegir la plataforma hardware se enfrentó el problema de que cada proveedor entregaba una hoja de datos con distinta información. Fue por esto que se decidió comparar los componentes de cada plataforma por separado ya que sobre estos sí se contaba con la información suficiente.

2.1.1 Alimentación

En todas las plataformas de hardware encontradas la alimentación de los Motes se tiene a través de dos pilas AA. Entonces, el voltaje nominal de la alimentación será de 3V, pudiendo inicialmente ser mayor a este valor, e irá decayendo con el tiempo. Del análisis de la hoja de datos de una pila AA se estima que el sistema podría permanecer operativo hasta 1.8V [3]. Es por esto que es tan importante elegir un Mote que pueda trabajar con el menor requerimiento de tensión posible.

En el caso del Mote del nodo base es importante que pueda tener alimentación externa.

En este aspecto la plataforma de hardware TelosB tiene una importante ventaja ya que tiene el puerto USB integrado al Mote. Esto permite usar la misma plataforma tanto para los nodos sensores como para el nodo base.

La línea de plataforma de hardware Mica (Iris y MicaZ) tiene interfaces para conectar a los Motes con un PC, llamadas placas de programación. Esta interfaz se puede usar tanto para programar como para comunicar entre el Mote y el PC. La conexión entre el Mote y la placa de programación se realiza a través del puerto de 51 pines. La conexión entre la placa y PC puede ser tanto por USB, serial (RS232) o ethernet, dependiendo del modelo de placa elegido.

2.1.2 Microcontrolador

El microcontrolador es el componente que interpreta los datos que le llegan por sus interfaces y los procesa para su transmisión a otro nodo o a un PC.

En la Tabla 2.2 se muestran las características más importantes de los microcontroladores de las plataformas de hardware consideradas.

El microcontrolador ATmega 128L no cumple con el requerimiento del proyecto de operar con un voltaje de alimentación entre 1.8V y 3.6V.

A grandes rasgos, puede verse que el consumo del microcontrolador ATmega 128L es superior al de los otros dos restantes. Un punto clave en el diseño y funcionamiento de los Motes es la posibilidad que tienen sus componentes (radio y microcontrolador) de trabajar en distintos modos de operación. Dependiendo del modo de operación de estos será el consumo obtenido. Por lo que, para ver el consumo de los componentes se debe analizar el consumo y el tiempo que se utiliza cada uno de sus modos de operación. Esta comparación involucra temas más allá

del alcance de este proyecto. Sin embargo, la comparación de consumos en modos activo y dormido nos da una primera aproximación a la realidad.

	Atmel ATmega 128L	Atmel ATmega 1281	Texas Instruments MSP430
Voltaje de alimentación	2.7...5.5V	1.8...5.5V	1.8...3.6V
Consumo en modo activo	5 mA @ 4MHz, 3.0V	3.2 mA @ 4MHz, 3.0V	0.33 mA @ 1MHz, 3.0V
Consumo modo inactivo (idle)	2.0 mA @ 4MHz, 3.0V	0.7 mA @ 4MHz, 3.0V	--
Consumo en modo dormido	15 μ A @ 3.0V	5 μ A @ 3.0V	0.1 μ A @ 3.0V ⁵

Tabla 2.2: Comparación de los microcontroladores a partir de sus hojas de datos

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente podemos descartar las plataformas de hardware MicaZ y BTnode ya que tienen el microcontrolador ATmega 128L que tiene consumos más grandes.

Otro punto importante en la elección del microcontrolador son los espacios de memoria que ofrece. Ya sea memoria no volátil, para cargar la aplicación a correr, como la memoria RAM para usar en tiempo de ejecución. En estos casos los 3 microcontroladores analizados cumplen con los requisitos mínimos.

2.1.3 Radio

La radio permite enviar y recibir datos para comunicarse con otros dispositivos dentro de su rango de transmisión.

Todos los Motes utilizan la banda ISM (llamada así por las siglas en inglés de Industrial, Scientific and Medical). Esta banda es reservada internacionalmente, no necesitándose licencia para utilizarla pero teniendo que respetar ciertos niveles de potencia transmitida.

Las radios están formadas básicamente por un transceiver que es un dispositivo capaz de transmitir y de recibir señales electromagnéticas. Existen cuatro estados de operación: transmisión, recepción, inactivo y apagado. En estos sistemas, la radio se encuentra la mayor parte del tiempo apagada, despertándose de a intervalos, para escuchar el canal a la espera de paquetes o para transmitirlos.

En la Tabla 2.3 se muestran las características más importantes de las radios de las plataformas comparadas.

En principio cabe acotar que la comparación con la radio CC1000 no es posible ya que esta es obsoleta frente a las restantes, pero aún así es considerada ya que sigue siendo usada por algunas plataformas hardware (en particular BTnode).

⁵ El MSP430 tiene 5 modos de bajo consumo, elegimos para la comparación con el modo sleep del resto de los microcontroladores, el LPM4. Este modo de funcionamiento del MSP430 es el que menor consumo tiene.

	Chipcon CC1000	Atmel AT86RF230	Chipcon CC2420	Xemics XE 1205
Voltaje de alimentación	2.1...3.6V	1.8...3.6V	2.1...3.6V	2.4...3.6V
Consumo modo inactivo (idle)	0.2 μ A	0.1 μ A	426 μ A	0.2 μ A
Consumo al recibir	9.6 mA	16 mA	18.8 mA	14 mA
Consumo al transmitir	25.4 mA @ 5dBm	17 mA @ 3dBm	17.4 mA @ 0dBm	33 mA @ 5dBm
Throughput	1.2-500Kbps	250Kbps	250Kbps	---
Frecuencias	315/433/915 MHz	2.4 GHz	2.4 GHz	---

Tabla 2.3: Comparación de las radios a partir de sus hojas de datos

Una característica importante de todos los componentes del sistema es el rango de alimentación, ya que esto definirá hasta que nivel de tensión de pilas podrá funcionar el Mote. Como requerimiento de este proyecto se impuso que el Mote debe poder trabajar hasta con una alimentación de 1.8 V. La única radio que cumple este requerimiento es la AT86RF230.

El tiempo en que servirán las pilas dependerá tanto de la tensión mínima que necesita el componente para funcionar como del consumo del mismo. Si alguna de las radios consumiese mucho menos que la AT86RF230 podría ser también una opción a considerar.

Para hacer un análisis del consumo de la radio se necesitan tener en cuenta varios aspectos, algunos de estos se encuentran en la Tabla 2.3. El consumo al transmitir depende de la potencia de la radio y el tiempo necesario para transmitir un paquete. Para calcular esto último se requiere saber la velocidad de transmisión y el tamaño de paquetes a transmitir. Estimar esto no es trivial e involucra un análisis de capa MAC de la aplicación que ejecuta el Mote. Para estimar el consumo de recepción se debe tener en cuenta otros factores aparte del consumo de la radio al recibir. En estos casos, haciendo un análisis muy superficial no se notan grandes diferencias entre los consumos de las radios.

Al igual que en la sección anterior, un análisis exhaustivo no está comprendido dentro del alcance del proyecto. Asimismo, para poder hacer una elección, se compararon algunos datos de las radios para obtener una primera aproximación.

Tomando en consideración lo anteriormente mencionado se observa que la AT86RF230 tiene el rango de alimentación más bajo y consumos ligeramente menores.

2.1.4 Almacenamiento

Los Motes tienen memorias integrada en el chip del microcontrolador y una memoria flash externa.

La memoria flash es usada debido a su bajo costo y a su gran capacidad de

almacenamiento. Es una memoria EEPROM que permite que múltiples posiciones de memoria sean escritas o borradas en una misma operación de programación, es de bajo consumo y de carácter no volátil. En este tipo de plataforma se usa para registrar datos que no son enviados por la red, por ejemplo, datos de configuración de la red o datos de medidas (en caso de usarlo como datalogger).

En el microcontrolador se encuentran 2 tipos de memoria, una no volátil para cargar la aplicación y una memoria RAM, usada en tiempo de ejecución.

En la Tabla 2.1 se encuentran los tamaños de memoria tanto de programación, RAM y memoria externa, para las distintas plataformas hardware.

Para esta aplicación los tamaños de memorias de todas las plataformas resultan suficientes. Esto se debe a que las rutinas de configuración de los Motes son relativamente pequeñas, no se guardarán localmente medidas adquiridas en cada nodo y se guardarán pocos parámetros de configuración de los nodos sensores en la memoria flash.

2.1.5 Interfaces

Todos los Motes tienen las interfaces UART, SPI, I2C, entradas y salidas de propósito general. Para este proyecto se utilizará la interfaz de comunicación serial I2C para la comunicación con el sensor de temperatura. También se utilizarán dos entradas analógicas y una salida digital.

Los Motes se diferencian en la cantidad de bits que tienen sus conversores analógicos digitales, son de 10 o de 12 bits.

Con respecto a las interfaces cualquiera de los Motes comparados servirían para esta aplicación.

2.1.6 Elección final

De las comparaciones de los componentes de cada Mote concluimos que las plataformas de hardware que mejor se adecuan a nuestros requerimientos son TelosB e Iris, ambas de la marca Crossbow. Para elegir entre estas dos plataformas se realizó una comparación cualitativa de las mismas.

TelosB es una plataforma que ya tiene varios años con lo que existe una gran cantidad de información sobre la misma. Además, es la plataforma que está utilizando el Grupo de Microelectrónica del Instituto de Ingeniería Eléctrica, por lo que se puede tener un mayor soporte por parte de los docentes.

TelosB es un desarrollo de UC Berkeley comprado por Crossbow que no brinda soporte sobre la plataforma. Iris es uno de los desarrollos más nuevos de Crossbow para la que se brinda soporte, pero al ser una plataforma comercial no se ofrece información sobre la estructura interna de la misma.

Iris es el modelo más nuevo de la firma Crossbow y no ha sido probado por el grupo de Microelectrónica por lo sería una nueva experiencia la utilización de este

modelo.

En un balance de los argumentos anteriores se decidió por el modelo Iris.

2.1.7 Mote Iris

El modelo Iris es la última plataforma diseñada por Crossbow. En la Figura 2.1 se muestra una foto del mismo.



Figura 2.1: Mote Iris

En la Figura 2.2 se observa un diagrama interno del Mote. En este se ven sus principales componentes, como son la radio, la memoria de datos, los leds y el conector de expansión de 51 pines. El conector de expansión está íntegramente conectado al microcontrolador del Mote, salvo la alimentación que está conectada directamente a la pila. Cabe destacar que no todas las señales del microcontrolador están accesibles a través del conector.

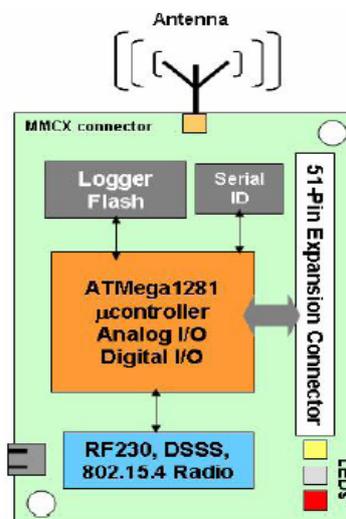


Figura 2.2: Esquema interno del Mote

En la Tabla 2.4 se muestran las principales características de la plataforma

seleccionada. Estos datos fueron obtenidos a partir de la hoja de datos extraída en la página oficial de Crossbow⁶.

Performance del procesador	
Memoria flash para programa	128 kB
RAM	8 kB
Memoria flash externa	512kB
Comunicación serial	UART
Conversor A/D	10 bit ADC
Otras interfaces	E/S digital, I2C, SPI
Consumo en modo activo	8 mA
Consumo en modo dormido	8 μ A
Transceiver de RF	
Banda de frecuencia	2405 a 2480 MHz
Velocidad de transmisión	250 kbps
Potencia de RF	3 dBm (típica)
Sensibilidad al recibir	101 dBm (típica)
Rango de cobertura en exterior	> 300 m
Rango de cobertura en interior	> 50 m
Consumo al transmitir	10 mA @ -17 dBm 17 mA @ 3 dBm
Consumo al recibir	16 mA
Electromecánico	
Pilas	2 pilas AA
Tamaño	58 x 32 x 7 (sin el porta pila)
Peso	18 g (sin pilas)
Conector de expansión	51-pin

Tabla 2.4: Características de la plataforma Iris

Si se comparan los valores de consumo del microcontrolador de la Tabla 2.4 con los de la Tabla 2.2 se ve que los mismos no coinciden. Esto puede deberse a que en ninguno de los casos las hojas de datos explicitan bajo que condiciones fueron obtenidos esos resultados.

2.2. Elección de la plataforma software

Dado que elegimos la plataforma hardware Iris tenemos dos plataformas software posibles: TinyOS 2.0 y MoteWorks.

TinyOS es un sistema operativo de código abierto específico para redes de bajo consumo. Proporciona módulos y funciones que permiten armar las aplicaciones de los nodos. Estas son escritas en nesC que es un lenguaje de programación basado en C diseñado para optimizar la programación de TinyOS [4].

Moteworks 2.0 es una aplicación propietaria de Crossbow basada en TinyOS 1.1. Provee un ambiente de desarrollo completo para realizar las aplicaciones. Para

⁶ <http://www.xbow.com>

hacer las aplicaciones se utilizan las librerías de TinyOS así como también librerías propias de Moteworks.

Se decidió utilizar TinyOS principalmente por dos motivos:

- MoteWorks tiene una política de derechos de autor más restrictiva que TinyOS. Si bien por una parte establece que puede ser utilizado en proyectos con fines académicos, también establece que no puede ser utilizado libremente para productos comerciales.
- TinyOS es la plataforma utilizada por el Grupo de Microelectrónica del Instituto de Ingeniería Eléctrica lo que permite un mayor asesoramiento por parte de ellos.

2.3. Programación para la comunicación

Para implementar la comunicación entre los nodos sensores y el nodo base se programó una aplicación basada en dos protocolos de comunicación de TinyOS.

La identificación en la red de los Motes se hace a través de un ID (de 8 bits) que se encuentra guardado en una constante del sistema llamada TOS_NODE_ID. Esta es fijada en la compilación y la carga del programa al Mote. Esta limitación da la cantidad máxima de nodos en la red (256 total, 1 nodo base y 255 nodos sensores).

2.3.1 Collection

Este protocolo se utiliza para comunicar los datos recabados por los nodos sensores. Se arma una arquitectura de red de tipo árbol, donde en las puntas del mismo se encuentran los nodos sensores y en la base el nodo base. De esta forma los paquetes son encaminados al nodo base a través del árbol.

El protocolo es de tipo multi-hop, best-effort. Que sea best-effort quiere decir que no asegura la llegada de paquetes a la base. Esto es uno de los puntos claves de la aplicación desarrollada ya que la misma necesita de una baja tasa de pérdida de paquetes.

De igual manera el protocolo implementa la retransmisión de paquetes hacia otros nodos, que al ser multi-hop mejora sensiblemente la tasa de pérdida de paquetes. Cada Mote examina la calidad del enlace con todos los nodos que tiene en su alcance y rutea paquetes (de él mismo o de otros) a través del mejor enlace que halló. Esta tabla de calidades de enlaces es modificada dinámicamente de forma que la red se adapta a cambios.

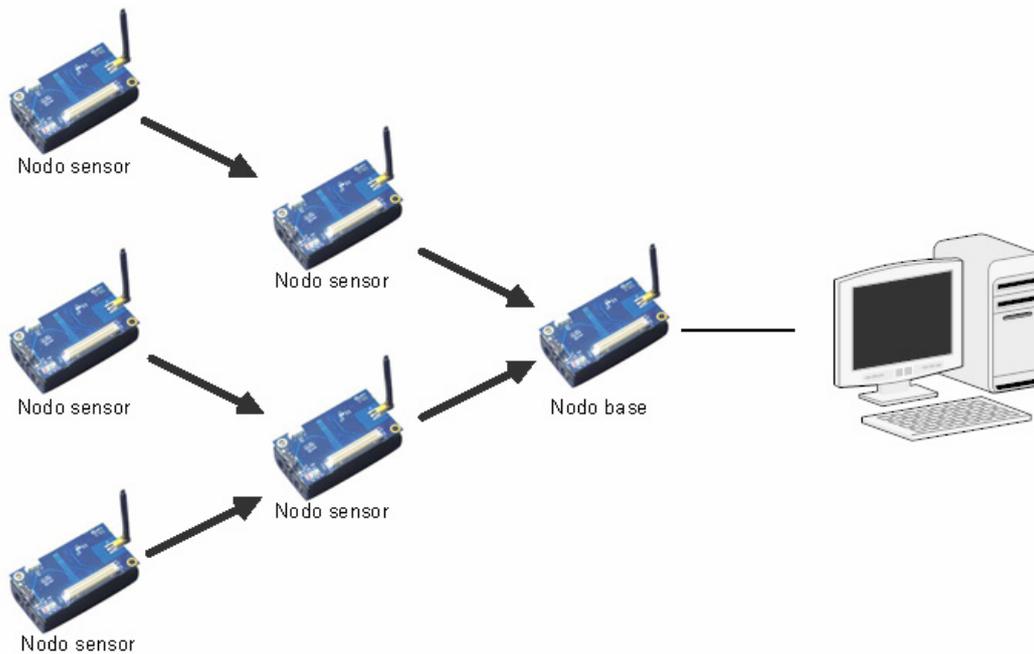


Figura 2.3: Arquitectura de red tipo árbol

2.3.2 Dissemination

Este protocolo se utiliza para enviar los cambios solicitados por el usuario, estos pueden ser un cambio en el período de los sensores de temperatura o pH o también para informar a un determinado nodo que se lo quiere calibrar.

En este protocolo todos los nodos de la red tienen, en régimen, el mismo valor en todas las variables. Cuando el usuario ingresa un cambio el nodo base se lo comunica a todos los nodos sensores y estos actualizan sus variables para reflejar dicho cambio. El protocolo no asegura un tiempo de espera máximo para que todos los nodos reflejen el cambio pero el algoritmo usado sí tiende a unificar rápidamente el valor.

Existen dos implementaciones, Drip y Dip. La diferencia entre las dos radica en que están optimizadas para aplicaciones distintas, la primera es más eficiente para pocos datos y una red de algunos pocos puntos mientras que la implementación Dip esta optimizada para paquetes de datos de centenas de bytes.

Se utilizará la implementación Drip debido a que se requieren enviar pocos datos a los nodos sensores ya que el protocolo se utilizará para sincronizar parámetros de los sensores según lo requiera el usuario

2.3.3 Low Power Listening (LPL)

La radio es el componente hardware de mayor consumo y por tanto su uso eficiente va a tener fuerte incidencia en la autonomía de los nodos.

Debido a esto se utilizo LPL, protocolo de capa MAC asíncrono, ahorra

energía disminuyendo el tiempo en que la radio esta prendida. Para recibir la radio se enciende durante períodos cortos de tiempo (parámetro duty cycle). Si en este período detecta un preámbulo (señal de que un paquete va a ser enviado) en la portadora entonces permanece encendida hasta recibir el paquete. De no detectar actividad la radio se apaga.

Esto ahorra energía pero trae otros inconvenientes. El preámbulo antes de enviar los paquetes tiene que ser lo suficientemente grande para que este coincida con un período de encendido de la radio. Esto trae como consecuencia consumos grandes en sistemas con muchos saltos de mensajes antes de llegar hasta la base (multihop). También aumenta la tasa de perdida de paquetes al nodo sensor. Aún así se logra enviar datos a los nodos sensores debido a la implementación del protocolo Dissemination.

En la sección 6.1.2 se analizan los ensayos de consumo variando el ciclo de trabajo.

Capítulo 3

Sensores

En este capítulo se explicarán los sensores de temperatura y de pH de la aplicación. Se describirá el proceso realizado para el diseño y la integración de cada uno de estos al Mote del nodo sensor.

3.1. Sensor de temperatura

Se eligió utilizar un sensor de estado sólido para medir la temperatura debido a que cumplen los requerimientos básicos de alimentación, rango de medida y precisión; y además cumplen una serie de criterios complementarios que son interesantes para la aplicación. En primer lugar son de fácil integración (el Mote posee interfaces seriales SPI e I2C⁷), poseen buena inmunidad al ruido (la comunicación de datos es digital) y son de bajo consumo (estos dispositivos permiten modos de trabajo donde se encuentran la mayor parte del tiempo inactivo).

3.1.1 Elección del integrado

El sensor de temperatura deberá cumplir con requerimientos impuestos por el cliente y por el Mote. El cliente requiere poder medir temperatura con una precisión de ± 0.5 °C en un rango de temperatura de 15 a 45 °C. Por otro lado, es deseable que el sensor de temperatura pueda trabajar mientras lo hace el Mote, por lo que deberá de funcionar en al menos un rango de 1.8 a 3 V. Además, puesto que toda la instrumentación deberá ser de bajo consumo, el integrado de temperatura también deberá serlo.

Las características principales que debe cumplir el integrado de temperatura son:

- Rango de alimentación: Entre 1.8 y 3.0 V.
- Rango de temperatura a medir: Entre 15 y 45 °C.
- Precisión: ± 0.5 °C, resolución: 0.25 °C.
- Interfaz Serial: SPI o I2C.
- Bajo consumo.

A partir de los requisitos anteriores se preseleccionaron integrados que cumplieran con ellos para luego realizar una comparación más profunda de los mismos. En la Tabla 3.1 se muestran las características más relevantes de los integrados considerados.

⁷ Por más información sobre el protocolo de comunicaciones I2C ver anexo II

	DS620 Maxim	DS7505 Maxim	LM95071 National Semiconductor
Rango de entrada	1.7 – 3.5 V	1.7 – 3.7 V	2.4 – 5.5 V
Precisión en el rango de operación ⁸	± 0.5 °C	± 0.5 °C	± 1.0 °C
Interfaz de comunicación	I2C	I2C	SPI
Consumo en modo activo	800 µA	750 µA	520 µA
Consumo en modo inactivo (idle)	2 µA	2 µA	28 µA
Tiempo de conversión de temperatura	25 ms @ 0.5°C de res.	25 ms @ 0.5°C de res.	130 ms @ 1.0°C de res.

Tabla 3.1: Requerimientos principales del sensor de temperatura

De la Tabla 3.1 se ve que el LM90571 tiene una precisión menor que la de los demás integrados, por otra parte no llega a funcionar con 1.8V de alimentación como es requerido. Los otros dos integrados, DS620 y DS7505, son muy similares por lo que servirían cualquiera de ellos. Se optó por el integrado DS620.

3.1.2 Integrado DS620

Las características del integrado elegido se muestran en la Tabla 3.2.

Rango de voltaje de entrada	1,7 ... 3,5 V
Rango de operación	-55 ...125 °C
Precisión	± 0.5 °C @ 0.....70 °C
Resolución	10, 11, 12, 13 bits (0,5; 0,25; 0,125 y 0,0625 °C)
Velocidades de conversión	25, 50, 100 y 200 ms (10, 11, 12, 13 bits)
Interfaz	Serial I2C
Consumo modo idle	2 µA
Consumo en conversión	800 µA

Tabla 3.2: Características principales del integrado DS620

El integrado tiene 3 patas para fijar su ID. Con este cada dispositivo es diferenciado en el bus I2C. Para dirección I2C los primeros 4 bits son fijados por el fabricante (1001) y los restantes tres (A2, A1 y A0) corresponden al valor colocado en las patas A2, A1 y A0 respectivamente. En este caso se tienen las tres a tierra por lo que la dirección I2C del integrado es 1001000.

Para el funcionamiento el DS620 cuenta con 2 modos de operación, “1-shot mode” (conversión única) y conversiones continuas. En el modo “1-shot” la conversión solo se inicia con comando externo (por I2C) y luego de ésta el dispositivo pasa de nuevo a modo idle. Además permite seleccionar como arranca el dispositivo, convirtiendo o esperando.

3.1.3 Circuito de medición de temperatura

A partir de las especificaciones de la hoja de datos y las notas de aplicación

⁸ Rango de operación de 15 a 45 °C

se realizó el diseño del PCB. En la Figura 3.1 se observa un esquemático del circuito diseñado y el layout del PCB puede verse en el Anexo IV.4.

En el esquemático de la Figura 3.1 se aprecia el integrado de temperatura DS620 con resistencias de pull-up en sus patas de comunicación I2C y un condensador entre fuente y tierra.

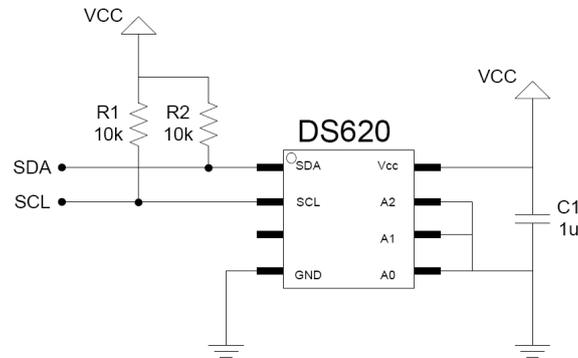


Figura 3.1: Esquemático del PCB del sensor de temperatura

3.1.4 Programación del Mote para integrar el sensor de temperatura

Para obtener la medida del sensor de temperatura se utilizó uno de los componentes implementados por TinyOS (Atm128I2CMasterC) que tiene las funciones necesarias para la comunicación I2C entre el micro y el dispositivo. Éste ofrece 2 interfaces: *Resource* y *I2CPacket*.

Además se programó un componente específico del dispositivo para acceder desde la aplicación principal⁹. Este cuenta con 2 interfaces: *SplitControl* (para manejar el encendido y apagado) y *Read* (que devuelve la medida). Este componente cuenta con la información necesaria para configurarlo y tiene implementadas las rutinas necesarias para su uso (encendido y lectura).

La interfaz *Resource* maneja el pedido del recurso, debido a que el bus I2C puede ser compartido por varios componentes corriendo en la misma aplicación. Por lo que antes de utilizar cualquiera de las funciones de la interfaz *I2CPacket* primero se debe pedir y esperar confirmación de que el recurso fue cedido.

Encendido

En el inicio de la aplicación principal existe una llamada a la función de encendido del componente del sensor de temperatura. Esta rutina configura el dispositivo escribiendo en una dirección específica de memoria (volátil). Esto implica que es necesario volver a realizar el procedimiento con cada encendido del nodo sensor.

Los parámetros de configuración son los siguientes:

- Resolución de temperatura: 0,25 °C

⁹ Ver Anexo II

- Modo: “one-shot”.

El resto de los parámetros de configuración con que cuenta el dispositivo no son de importancia porque son para funcionalidades que no se usan.

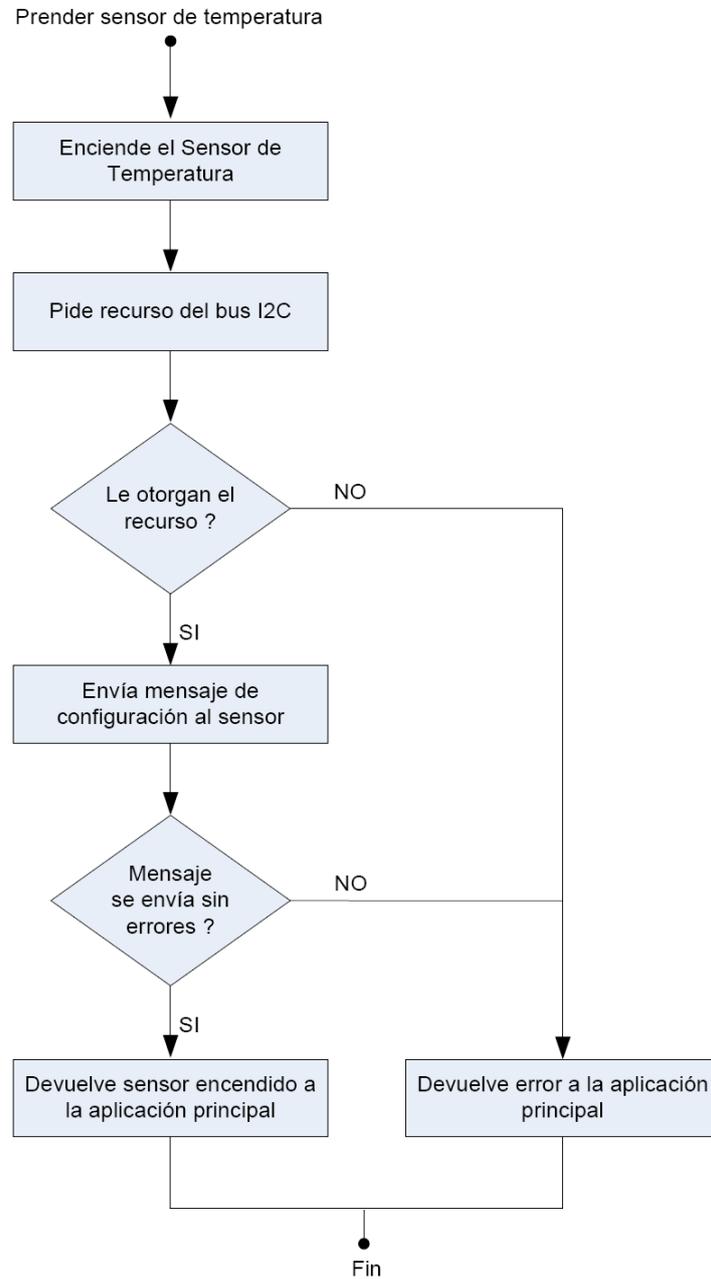


Figura 3.2: Diagrama de bloques de la función de encendido del sensor de temperatura

Lectura

En la Figura 3.3 se muestra un diagrama de flujo de la función de lectura del sensor de temperatura.

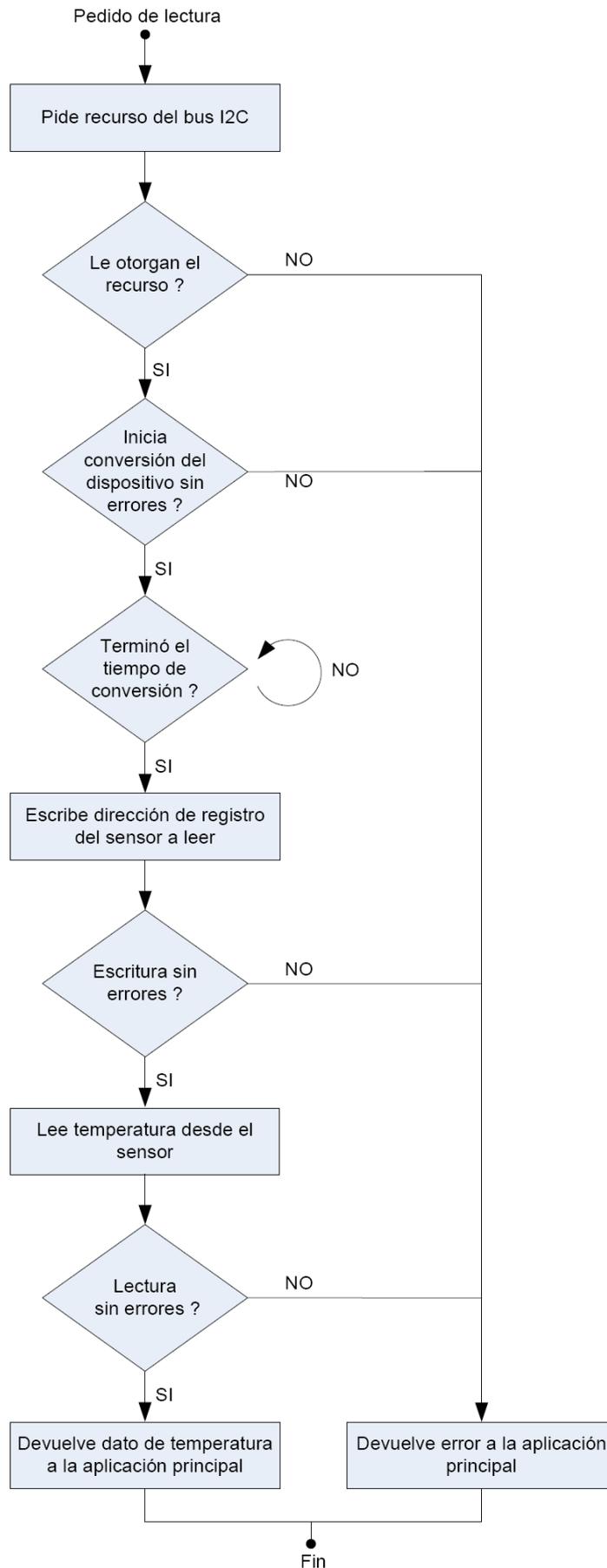


Figura 3.3: Diagrama de bloques de la función de lectura de dato de temperatura

La lectura de temperatura se realiza en tres pasos. Cada uno de estos consume un mensaje I2C entre el Mote y el integrado. En el primer paso se envía una escritura al dispositivo con el comando de empezar la conversión. Es necesario realizar este paso debido a que se eligió el modo de operación “one-shot”. A continuación se envía una petición de lectura con la dirección de memoria de la cual se quiere leer. Esta es la dirección de memoria donde el integrado guarda la medida de temperatura que sensó. Como tercer y último paso se realiza un pedido de lectura y se espera el mensaje que enviará el integrado con el valor de temperatura sensado que se encuentra en la dirección de memoria proporcionada en el segundo paso.

Si cualquiera de estas peticiones da error entonces el componente devuelve a la aplicación principal un mensaje de error.

3.2. Sensor de pH

En este capítulo se explicará que es pH y el principio de funcionamiento de la tecnología utilizada. En el Anexo I se explica el principio de funcionamiento de otra tecnología considerada para medir pH. También se detalla porque se eligió dicha tecnología y dentro de la misma que modelo se decidió utilizar. Por último se explica el circuito de adaptación del electrodo al Mote y los componentes seleccionados.

A lo largo de la documentación se hablará de electrodo para referirse al dispositivo comprado y que otorga un voltaje, a través de un conector BNC, proporcional del pH en el que se encuentra inmerso. Se hablará de electrónica del sensor de pH a la placa hecha en este proyecto y por sensor de pH se referirá al conjunto (placa más electrodo).

3.2.1 Definición de pH [5] [6]

El pH se define como el logaritmo negativo de la actividad de los iones de hidrógeno en una sustancia:

$$pH = -\log(a_{H^+}) \quad (3.1)$$

Si la solución a medir es una solución básica o ácida no demasiado diluida (por encima de 0.001M) la actividad de los iones de hidrógeno se puede aproximar por la concentración de los mismos. En ese caso se tiene que:

$$pH = -\log[H]^+ \quad (3.2)$$

El valor de pH de una sustancia está relacionado con las concentraciones de iones de hidrógeno $[H^+]$ y con las de los iones de hidroxilos $[OH^-]$. Si hay mayor concentración de iones de hidrógeno que de hidroxilos la sustancia es ácida, tiene iones de hidrógeno libres y su pH es menor que 7. Si se encuentran en equilibrio la sustancia es neutra y el pH es igual a 7. Por último si hay una mayor concentración de iones de hidroxilos que de hidrógeno la sustancia es básica, tiene iones de

hidroxilos libres y su pH es mayor a 7.

3.2.2 Electrodo de vidrio

Para la medición de pH, el método convencional en el laboratorio y en la industria es a través del electrodo de vidrio. El principio de funcionamiento de este electrodo puede explicarse mediante el modelo de la celda galvánica [7].

Constructivamente el sensor consta de dos electrodos, uno de medida, que provee un potencial proporcional al logaritmo de la actividad del ion de hidrógeno en la muestra; y otro de referencia, que provee un potencial constante y estable, independiente de la actividad de la muestra. Estos electrodos pueden estar en cápsulas independientes o en una misma cápsula, en este último caso se lo denomina electrodo de combinación (es el utilizado en este proyecto). En la Figura 3.4 se muestra un esquema del electrodo de combinación.

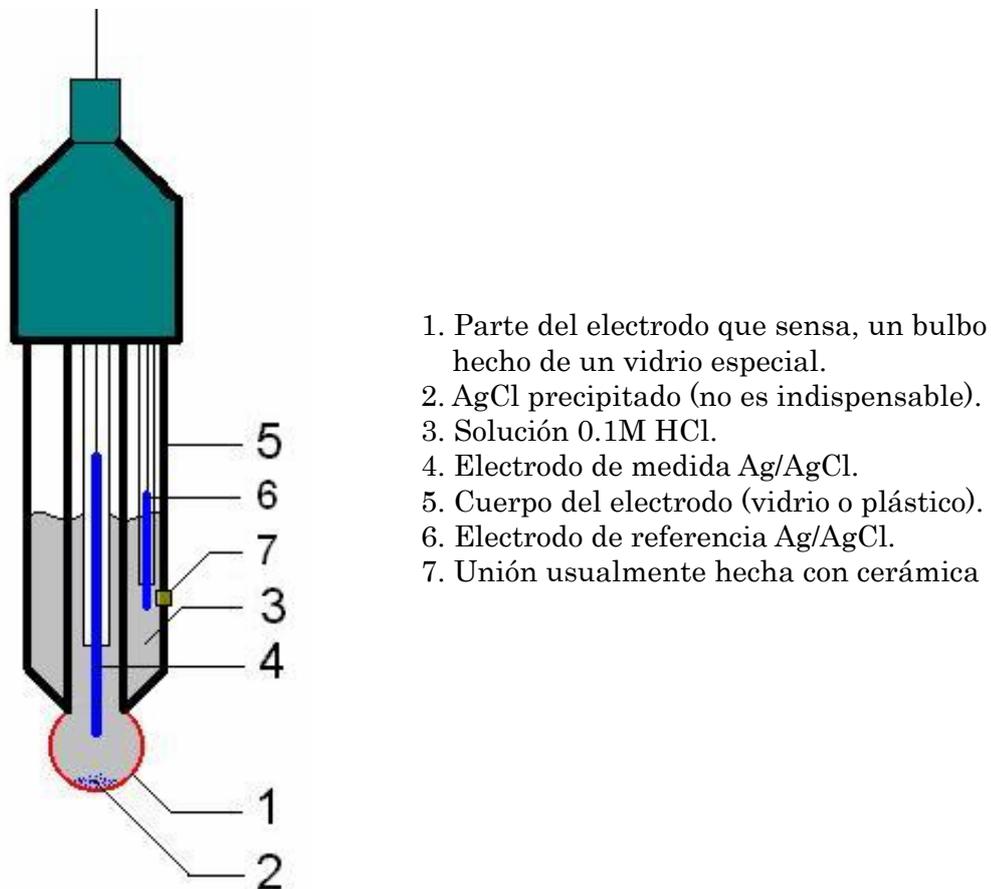


Figura 3.4: Esquema del electrodo de combinación ¹⁰

Relación Voltaje - pH

El vínculo entre el potencial que se desarrolla en bornes del electrodo y el pH de la solución está determinado por la ecuación de Nernst [5]:

¹⁰ Imagen extraída de http://en.wikipedia.org/wiki/Glass_electrode

$$E = E_0 + \frac{\ln(10) \cdot R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \log(a_h) \quad (3.3)$$

- E: potencial eléctrico del electrodo de medida
 E₀: potencial del electrodo de referencia, se define que a pH=7 el potencial sea 0.
 $R = 8.31439 \text{ J/mol.K}$
 R: Constante de los gases,
 T: Temperatura en K
 n: Valencia iónica (valencia del hidrógeno n=1)
 $F = 96493.1 \text{ C/mol}$
 F: Constante de Faraday,

Para un electrodo ideal, la diferencia de potencial entre los electrodos de medida y referencia es de 0 mV para pH = 7, con lo que reescribiendo la ecuación de Nernst se obtiene [8]:

$$\Delta E = -0.1984 \cdot T \cdot (pH - 7) \quad (3.4)$$

$$\Delta E = -59.16 \cdot (pH - 7) @ 25^\circ\text{C} \quad (3.5)$$

En la práctica, la respuesta ideal de Nernst no corresponde con la real. Si el electrodo es nuevo y bajo ciertas consideraciones de limpieza y uso la respuesta se aproxima bastante a la ideal. Es por ese motivo que es necesaria la calibración periódica del mismo. Durante la calibración el sensor de pH se determina la pendiente actual y el punto de asimetría, con lo que obtiene una caracterización de la curva que se ve en la Figura 3.5.

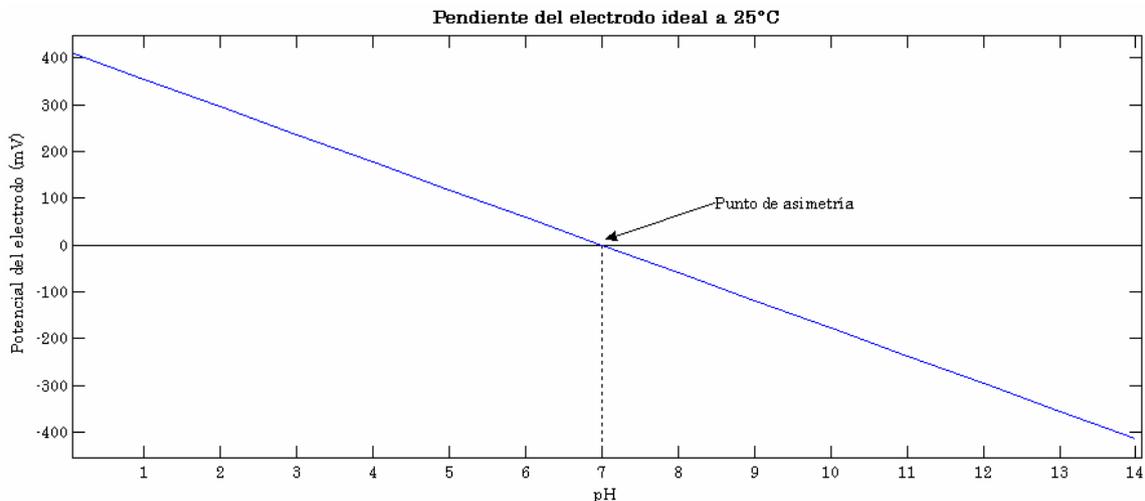


Figura 3.5: Pendiente del electrodo ideal a 25°C

En la curva real se observa una desviación de algunos mV a pH=7, esta desviación es una medida de performance del electrodo de referencia. Otra característica que se presenta con el uso del electrodo, es la caída en la pendiente con respecto a la teórica de -59.16 mV/pH, para un correcto funcionamiento, puede variar entre -55 y -60 mV/pH que se corresponde con un 95 y 102% de la teórica a 25°C.

Modelo eléctrico

El modelo eléctrico de un sensor de pH basado en electrodo de vidrio consiste en una fuente de voltaje continuo (proporcional al pH de la sustancia en la cual está inmerso) y una resistencia del orden de los cientos de $M\Omega$ (Figura 3.6).

El potencial (E) lo modela la ecuación de Nernst, la resistencia (R_{out}) modela muchas resistencias [8], pero la preponderante se produce en el bulbo donde está la transferencia de iones de hidrógeno (resistencia de 1 en la Figura 3.4).

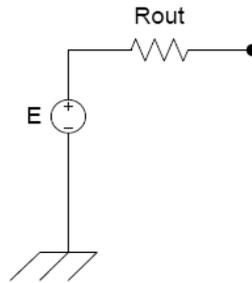


Figura 3.6: Modelo eléctrico de un electrodo

Una característica de la resistencia R_{out} es que aumenta al disminuir la temperatura, esto tiene un efecto en el tiempo de respuesta del electrodo. Sin embargo para las temperaturas de trabajo de este proyecto esto no es apreciable. Otras propiedades de la membrana también afectan la resistencia, como el espesor, el material utilizado, la forma, etc.

Calibración

Una solución buffer es una solución de pH conocido, comercialmente se venden con los valores 4, 7 y 10 de pH e incertidumbre del orden ± 0.02 pH. Dependiendo de la cantidad de soluciones buffer que se disponga, se tienen dos métodos para la calibración del sensor.

El primer método se llama “calibración de un punto”, utiliza una solución buffer de $pH=7$, con la cual se determina la deriva del electrodo respecto a los 0 mV. Luego, se calculan los demás valores de pH utilizando la pendiente teórica, que depende de ecuación de Nernst y de la temperatura (ecuación 3.4).

El segundo método se llama “calibración de dos puntos” y será el utilizado en este proyecto. Para realizarlo se necesitan dos soluciones buffers, una de ellos debe ser $pH=7$ y la otra $pH=4$ o $pH=10$, según las sustancias a medir. Como en este proyecto se miden soluciones en el rango de 3 a 7 pH se calibrará con soluciones buffers de 4 y 7. Este método permite, a partir de los dos puntos medidos (en soluciones buffer 4 y 7) hallar la pendiente y el punto de asimetría de la curva de pH.

Reescribiendo la ecuación de Nernst (ecuación 3.3) se obtiene:

$$pH = \frac{\alpha}{T} V_{pH} + \frac{\beta}{T} \quad (3.6)$$

Cuando se realiza la “calibración de dos puntos” lo que se halla son los

parámetros α y β (constantes de calibración). Entonces para obtener una medida de pH alcanzará con tener la medida de temperatura y el voltaje a la salida de la electrónica del sensor de pH. Las constantes de calibración se hallan tomando las medidas de temperatura y pH en las soluciones buffers 7 y 4 como se ve en las ecuaciones 3.7 y 3.8.

$$\alpha = \frac{pH_7 \cdot T_7 - pH_4 \cdot T_4}{V_{out7} - V_{out4}} \quad (3.7)$$

$$\beta = \frac{-pH_7 \cdot T_7 \cdot V_{out4} + pH_4 \cdot T_4 \cdot V_{out7}}{V_{out7} - V_{out4}} \quad (3.8)$$

3.2.3 Electrodo de estado sólido (ISFET)

El electrodo ISFET¹¹ se utiliza para medir la concentración de iones en una solución, particularmente se puede utilizar para medir la concentración de iones de hidrógeno, y por tanto medir el pH de la solución. Este electrodo es muy similar en construcción y funcionamiento a los transistores MOSFET. Cuando la concentración de iones cambia en la solución, la corriente a través del transistor cambia de forma acorde. (Por más información sobre los electrodos ISFETs ver Anexo D).

3.2.4 Elección del electrodo

Elección de la tecnología

Para la aplicación es deseable que el electrodo de pH cumpla con las siguientes características:

- Bajo consumo: si bien se prenderá el circuito de sensado de pH solo cuando sea necesario es deseable que el electrodo consuma lo menos posible cuando esté energizado. El consumo de un electrodo depende principalmente de la tecnología del mismo.
- Medida rápida y confiable: el bajo consumo depende tanto de la corriente como del tiempo que se tiene energizado al circuito: cuanto más rápido se tome la medida, mejor. Asimismo, la medida debe ser confiable.
- Soportar las sustancias que se encuentran dentro del fulón: las sustancias dentro del fulón son altamente corrosivas y el electrodo estará en contacto con las mismas durante todo el proceso.
- Adaptable al Mote: deberá tener una salida que pueda ser inyectada en una de las entradas analógicas que tiene el Mote.
- Bajo costo de mantenimiento: deberá de tener un costo de

¹¹ ISFET denominado por sus siglas en inglés Ion Sensitive Field Effect Transistor

mantenimiento lo suficientemente bajo para que sea redituable utilizar el mismo.

Las opciones que se consideraron fueron dos: electrodos de vidrio y electrodos ISFET.

Las principales ventajas de los electrodos ISFET son su rapidez al tomar medidas y su bajo costo de mantenimiento debido a que no necesitan calibración y limpieza como sí lo requieren los electrodos de vidrio. [9]

Por otro lado, los electrodos ISFETs no ofrecen la misma estabilidad y precisión que los electrodos de vidrio. Debe evitarse su uso en sustancias abrasivas y evitando ciertas sustancias químicas. También deben evitarse descargas eléctricas de cualquier tipo, en especial las provenientes de electricidad estática, ya que el electrodo se puede dañar. También tiene un consumo mayor al electrodo de vidrio debido a su principio de funcionamiento, ya que requiere que se le suministre corriente para poder funcionar. Aunque, como contrapartida, le toma menos tiempo tener una medida con una precisión dada [9].

A pesar de que los electrodos ISFETs fueron desarrollados en la década de los 70s, su aplicación comercial recién está progresando en los últimos años. Es por esto que se encuentran mucho menos desarrollados que los electrodos de vidrio, los cuales son considerados un estándar en el ámbito industrial. Además otra desventaja del electrodo ISFET es su costo, que es considerablemente superior al de los electrodos de vidrio.

Finalmente, se decidió utilizar un electrodo de vidrio debido a su menor costo y a su amplio desarrollo en el ámbito industrial.

Elección del modelo del electrodo

Para la elección del electrodo, se consultó al cliente qué electrodos utilizaban ellos realizar sus mediciones, suponiendo que los mismos serían los más adecuados para las sustancias a relevar. El cliente informó que utilizan dos marcas, Oakton y Mettler-Toledo y dentro de estas utilizan electrodos de laboratorio (Ag/AgCl) para realizar sus medidas manuales. Debido a que los mismos son de laboratorio no sería posible montarlos en los fulones porque son electrodos direccionales que no permiten medir en cualquier orientación (solo vertical). Además los electrodos de laboratorio no presentan rosca como para fijarlos en los fulones.

Para ahorrar tiempo se decidió utilizar un electrodo prestado por el cliente para luego adquirir uno industrial¹² de características similares que si pueda ser montado al fulón. El modelo de electrodo suministrado por el cliente fue el InLab 413 de la marca Mettler Toledo. En la Figura 3.7 se muestra una foto este electrodo.

¹² Un modelo posible de electrodo industrial PHE-5316-10 de la marca Omega que tiene características muy similares al de laboratorio utilizado.



Figura 3.7: Electrodo Mettler Toledo InLab 413

3.2.5 Circuito de medición de pH

El rango dinámico de las soluciones a medir se encuentra entre 0 y 360mV, que corresponden a un pH entre 8 y 2 respectivamente¹³. Es necesario amplificar la señal eléctrica para aprovechar al máximo el rango de entrada del conversor A/D logrando aumentar la resolución y disminuir el error en la medida.

En esta sección se explicará la elección de los componentes para el circuito de medición de pH

Amplificador de instrumentación

Para la etapa amplificadora se optó utilizar un amplificador de instrumentación (AI). Este debía cumplir los siguientes requerimientos:

- *Bajo consumo.*
- *Alimentación:* como el Mote funciona en el rango 1,8...3,6V, es necesario que todos los circuitos integrados que se utilicen trabajen en ese rango. La alimentación deberá ser asimétrica porque la entrada ADC del Mote no trabaja con valores de tensión negativos.
- *Muy alta impedancia de entrada:* debido a la alta impedancia de salida del electrodo de pH, del orden de los cientos M Ω , es necesario que la impedancia de entrada del amplificador de instrumentación sea mucho mayor a ese valor.
- *Ganancia:* para obtener la mejor resolución posible, con el menor error en la medida, la ganancia óptima es de 5 V/V. Esto se debe a que el máximo valor a la entrada será 300mV (correspondiente a un pH de 2) y el mínimo valor a la salida debe ser 1800mV (correspondiente al mínimo valor aceptado por el conversor A/D para la mínima fuente de alimentación posible).

Una vez establecidos los requerimientos para el AI, se buscó entre los fabricantes de integrados para ver cuál era el que mejor se adaptaba, optándose por el INA333 de Texas Instruments (TI), a pesar que habían otras opciones (por ejemplo: AD627 de Analog Devices, MAX4174 de Maxim) el que funcionaba a menor tensión de alimentación era este.

¹³ Esto se desprende de sustituir pH por 7 y 2 en la ecuación 3.5

Rango de alimentación	1.8 ... 5.5 V
Impedancia de entrada	100 GΩ
Ganancia	1 ... 1000 V/V
Encapsulado	MSOP-8
Consumo	50μA

Tabla 3.3: Características del amplificador de instrumentación INA333

También se podría haber implementado el amplificador por medio de Amplificadores Operacionales (AO) individuales, logrando reducir un poco el consumo y aumentar la impedancia de entrada, pero con la complejidad adicional de tener que balancear las resistencias para lograr el máximo rechazo al modo común.

Consideraciones para la integración del AI

En la Figura 3.8 podemos ver cómo está realizado el AI y cuáles son las condiciones necesarias para que funcione correctamente, esto implica respetar los rangos de entrada en modo común para no saturar ninguno de los AO internos del mismo.

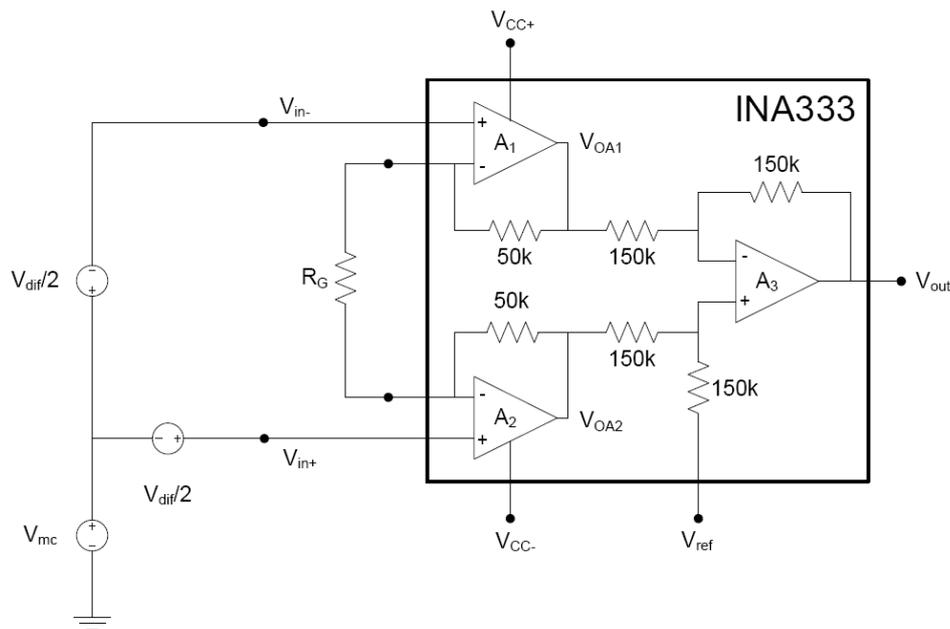


Figura 3.8: Esquema del amplificador operacional INA333

A continuación se muestran las tensiones de puntos claves del circuito

$$V_{in+} = V_{mc} + \frac{V_{dif}}{2} \quad \text{y} \quad V_{in-} = V_{mc} - \frac{V_{dif}}{2} \quad (3.9)$$

$$V_{OA1} = V_{mc} - \frac{V_{dif}}{2} \cdot \left(1 + \frac{100k}{R_G}\right) \quad \text{y} \quad V_{OA2} = V_{mc} + \frac{V_{dif}}{2} \cdot \left(1 + \frac{100k}{R_G}\right) \quad (3.10)$$

$$V_{out} = V_{ref} + G \cdot V_{dif} = V_{ref} + (V_{in+} - V_{in-}) \cdot \left(1 + \frac{100k}{R_G}\right) \quad (3.11)$$

Para no saturar los amplificadores A1 y A2 es necesario:

$$0 < V_{OA1} < V_{CC} \quad \text{y} \quad 0 < V_{OA2} < V_{CC} \quad (3.12)$$

$$0 < V_{cm} - G \cdot \frac{V_{dif}}{2} < V_{CC} \quad \text{y} \quad 0 < V_{cm} + G \cdot \frac{V_{dif}}{2} < V_{CC} \quad (3.13)$$

Sustituyendo y dejando las condiciones restrictivas:

$$(I) \quad 0 < V_{cm} - \frac{V_{out}}{2} \quad \text{y} \quad (II) \quad V_{cm} + \frac{V_{out}}{2} < V_{CC_{min}} \quad \text{considerando } V_{ref} = 0 \quad (3.14)$$

Entonces, para estimar el modo común necesario para no saturar, podemos aproximar:

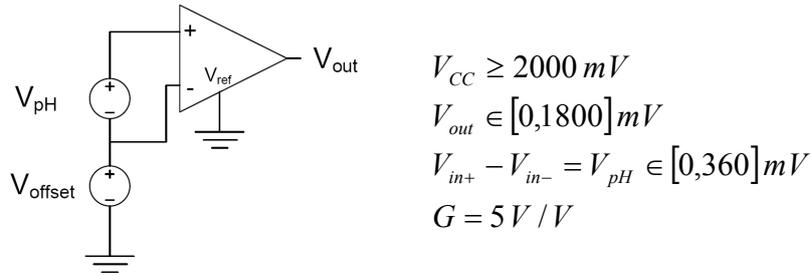


Figura 3.9: Modelo para estimar el modo común

Del esquema de la Figura 3.9 se deduce:

$$V_{mc} = V_{offset} + \frac{V_{pH}}{2} \quad (3.15)$$

Con las ecuaciones anteriores es posible determinar el Voffset para que el amplificador funcione correctamente. El rango de la pila lo determina el rango de funcionamiento del Mote y está indicado por Vcc. Como el AI está alimentado por Vcc que varía con la carga de la pila, se decidió amplificar un poco por debajo del Vcc mínimo (1800 mV). Para lograr la ganancia de 5 en el AI, se colocó un potenciómetro analógico de 100 kΩ, para poder poner 25 kΩ en Rg.

Para obtener el voltaje de offset mínimo se sustituye la ecuación 3.15 en la ecuación 3.14-I. Análogamente se sustituye la ecuación 3.15 en la ecuación 3.14-II para obtener el voltaje de offset máximo.

$$\left. \begin{array}{l} V_{pH} = 360mV \\ V_{out} = 1800mV \end{array} \right\} \Rightarrow V_{offset} > 720mV \quad (3.16)$$

$$\left. \begin{array}{l} V_{pH} = 360mV \\ V_{out} = 1800mV \\ V_{cc} = 2000mV \end{array} \right\} \Rightarrow V_{offset} < 920mV \quad (3.17)$$

A partir del rango de variación del offset, se obtuvieron los valores de los componentes del circuito (Figura 3.10)

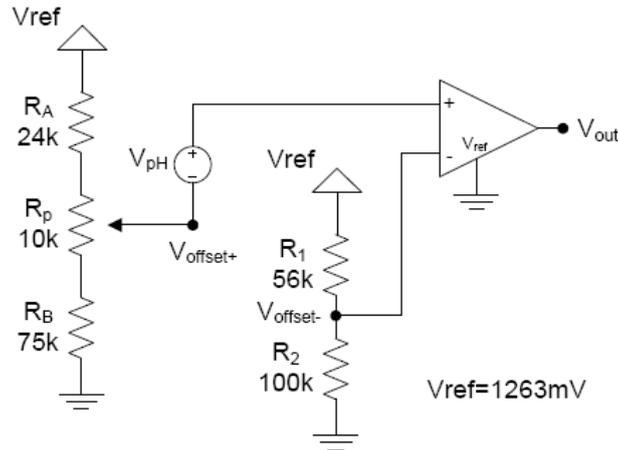


Figura 3.10: Circuito diseñado para la medición de pH

Divisor resistivo para $V_{offset-}$:

El nivel de tensión en V_{in-} ($V_{offset-}$), se impone a través del divisor resistivo y de la referencia de voltaje (impuesta por el integrado MAX6018 de tensión 1263mV). Este nivel se calcula para que el modo común quede en el rango de trabajo (en particular para un $V_{offset-} = 800mV$). Debido a que la resistencia vista hacia el amplificador es del orden de los $G\Omega$, puede considerarse que este no toma corriente, entonces con los valores de la Figura 3.10, se obtiene:

$$V_{offset-} = 810mV \quad \text{y} \quad \text{Consumo} = 8\mu A$$

Divisor resistivo para $V_{offset+}$:

El nivel de tensión en $V_{offset+}$ tiene dos propósitos, el primero es elevar el modo común del amplificador hasta un nivel adecuado, para que ningún amplificador operacional sature (ecuación 3.11). El segundo es compensar la deriva temporal del electrodo de medida de pH, como con el uso, el electrodo disminuye el potencial que entrega a $pH=7$, se decidió utilizar un potenciómetro digital (MCP4652 de Microchip), de modo de modificar el offset, para compensar la deriva a medida que sea necesario.

Como el circuito no puede manejar niveles negativos de tensiones y como $V_{pH} \leq 0$ para $pH \geq 7$, hay que garantizar que $V_{in+} \geq V_{in-}$. Es por este motivo que se impone un $V_{offset+} \geq 850mV$, para asegurar no inyectarle nunca una entrada diferencial negativa al amplificador.

Resolviendo el divisor resistivo se tiene:

$$V_{offset+} \in [869,985]mV \quad y \quad Consumo = 11\mu A$$

Donde los límites de $V_{offset+}$ se dan en los extremos del potenciómetro digital.

Otra propiedad del amplificador que también influyó a la hora de colocar “offsets” en los pines de entrada es que, por requerimiento del mismo, es necesario que ambas patas de entrada del amplificador tengan una tensión de por lo menos 100 mV.

Como se puede ver de los valores anteriores, hay una leve diferencia entre los potenciales de “offsets”. Este pequeño desbalance permite tener un tiempo de vida útil del electrodo mayor a medida que la deriva del mismo aumenta. Cuando la deriva aumenta el $V_{offset+}$ baja, pero el amplificador operacional no puede trabajar con valores negativos a la salida, con lo que si fueran iguales el circuito necesitaría ser calibrado constantemente (durante la calibración se halla un nuevo $V_{offset+}$ que asegura el correcto funcionamiento del circuito). Además debido a que se está alimentando al amplificador en modo “single-supply” para que funcione correctamente se necesita que a la salida del mismo sea de al menos 50mV, como se detalla en la hoja de datos de éste.

Verificación de las restricciones impuestas:

A partir de las tensiones de offset se puede calcular las tensiones de entrada del amplificador, obteniéndose:

$$V_{in-} = 810mV \quad y \quad V_{in+} \in [870,1170]mV$$

$$V_{mc} \in [840,990]mV$$

Considerando que la ganancia del amplificador es 5V/V, se deduce que:

$$V_{out} \in [300,1800]mV$$

A continuación se verifican las inecuaciones de 3.14:

$$\begin{aligned} 0 < 840mV - 150mV = 690mV \\ y \\ 990mV + 900mV = 1890mV < 2000mV \end{aligned} \quad (3.18)$$

Estimación del uso máximo del electrodo:

La vida útil máxima del electrodo depende de: el electrodo en sí, las sustancias a las que se lo expone, el proceso y el cuidado que se le de al mismo. En este punto se tratará de verificar que la electrónica del sensor funcionará al menos mientras lo haga el electrodo, es decir que la vida útil del electrodo no dependa de la electrónica realizada.

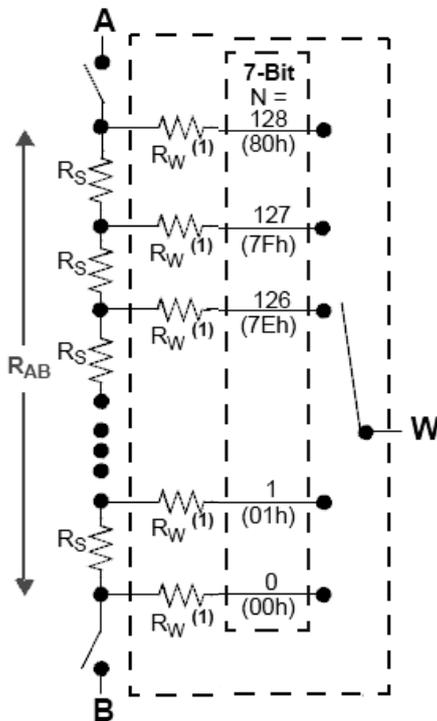
Al tener 175 mV máximos de diferencia entre los offsets de las patas positiva y negativa, la electrónica del sensor podrá funcionar hasta que el electrodo tenga un corrimiento respecto a cero a pH 7 de 175 mV. Para dar una idea del

tiempo de vida de un electrodo los fabricantes indican el corrimiento máximo respecto a cero a pH 7. Algunos como en el caso de la marca Jenway [10], informan un corrimiento máximo de 30mV para una medida aceptable. Otro como YSI [11] indica un corrimiento de 90mV. Para el electrodo utilizado no se pudo obtener dicha información, pero viendo el rango de otros electrodos como los mencionados anteriormente, se puede concluir que la electrónica seguirá funcionando mucho tiempo después de que lo haya dejado de hacer el electrodo.

Potenciómetro digital

Como se explicó en la sección 3.2.2 anteriormente, los electrodos de vidrio para la medida de pH presentan una deriva en función del tiempo de uso. Esta deriva se traduce en una disminución del potencial del electrodo a un pH=7, lo que genera un potencial negativo para ese valor de pH. La entrada analógica del Mote no permite medir valores negativos, porque la alimentación es asimétrica. Para compensar esta caída de tensión, se hace necesario tener una manera automática de aumentar la referencia del electrodo de pH.

Para resolver este problema se decidió utilizar un potenciómetro digital. Este consiste en un “array” de resistencias, cuyo conexionado se puede configurar digitalmente, como se puede ver en la Figura 3.11. Dependiendo de donde se cierra el circuito (en que punto del array se coloca el interruptor de W) es el valor de resistencia que se obtiene.



R_{AB} es la resistencia total del potenciómetro (para el modelo elegido $R_{AB} = 10k$).

W es la pata del medio por donde se obtiene las resistencias variables.

$$R_S = \frac{R_{AB}}{127}$$

$$R_{WB} = \frac{R_{AB}N}{128} + R_W \text{ siendo } N \text{ un entero entre } 0 \text{ y } 128$$

R_W es la resistencia del “Wiper” y depende de muchos factores incluyendo el nivel de alimentación, la tensión en los terminales y la temperatura.

Figura 3.11: Esquema interno de un potenciómetro digital de 127 pasos ¹⁴

Los requerimientos que debe cumplir el potenciómetro digital para poder adaptarse al circuito son los siguientes:

¹⁴ Esquemático extraído de hoja de datos MCP4652

- Bajo consumo
- Alimentación en el rango de 1.8 a 3.0 V
- RAB suficientemente grande como para tener bajo consumo a través de ella.
- Configurable a través del protocolo I2C ya que este protocolo ya se encuentra implementado para la medida de temperatura

Luego de determinados los requerimientos, se seleccionó el integrado que mejor cumple con ellos: MCP4652 de la firma Microchip. De la cantidad de variantes del mismo se seleccionó un potenciómetro de $R_{AB}=10k\Omega$.

El AD5246 de Analog Devices fue otro integrado evaluado, el inconveniente de éste fue el rango de la alimentación, que era de $V_{cc} = 2.7$. El integrado de Maxim, Max5417 también presenta el mismo problema en el rango de alimentación.

El consumo varía según haya comunicación serial o no:

Con comunicación: $I=650\mu A$ (cuando se está configurando).

Sin comunicación: $I=5\mu A$.

Como la comunicación serial se da solamente en la calibración y durante menos de medio milisegundo, se observa que la mayor parte del tiempo el consumo es despreciable.

Como se mencionó en esta sección bajo el título de Consideraciones para la integración del AI, para obtener un modo común que permita el correcto funcionamiento del amplificador de instrumentación es necesario colocar resistencias adicionales al potenciómetro digital. Colocando las resistencias RA y RB de la Figura 3.10, se obtiene el rango (mostrado en la ecuación 3.16) en el cual se puede variar el $V_{offset+}$.

$$V_{offset+} \in [869,985]mV \quad y \quad I = 11.4\mu A \quad (3.19)$$

Voltaje de referencia

La tensión de alimentación del circuito disminuye con el tiempo debido a que está alimentado por pilas. Tanto el amplificador como el electrodo necesitan un potencial de offset constante (que no dependa de la caída de voltaje de la pila por el uso de la misma). Por esto se hizo necesario obtener un potencial de referencia constante.

La primer alternativa analizada fue en base a integrados comerciales. Los requerimientos para estos integrados fueron:

- Configurables a través del puerto I2C
- Rango de alimentación entre 1.8 y 3.0 V
- Bajo consumo
- Salida en el rango de los offsets requeridos por el amplificador.

Si se hubiera encontrado un integrado con estas características se hubiera

podido prescindir del potenciómetro digital y el divisor resistivo. Pero ninguno de los integrados encontrados las cumplían (por ejemplo el X60250 de la firma Intersil funciona con una alimentación mínima de 2.7V)

La segunda alternativa considerada fue utilizar un integrado que otorgara un voltaje de referencia lo suficientemente exacto, para luego con un divisor resistivo generar los offsets necesarios. Éste fue el método utilizado ya que se pudieron encontrar integrados adaptables al circuito.

Para este diseño se utilizó el integrado MAX6018 de la firma Maxim. En la Figura 3.12 se muestra el esquema interno del mismo.

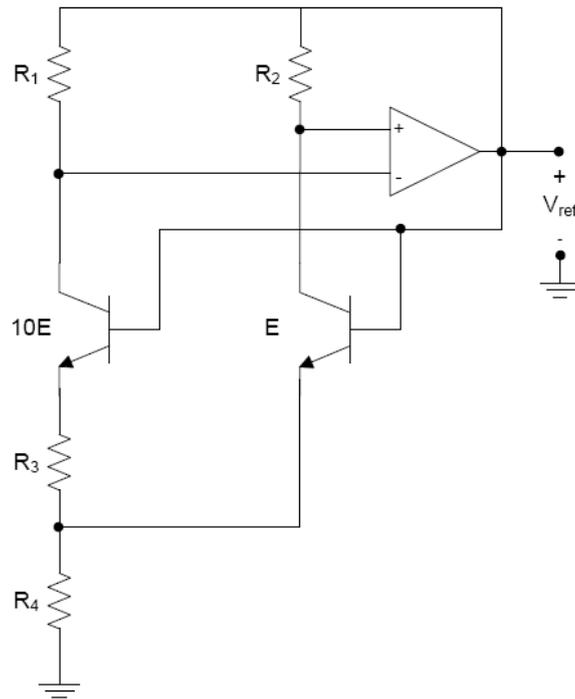


Figura 3.12: Esquema interno del integrado de voltaje de referencia MAX6018

En la Figura 3.14 se observa el esquema de la referencia de Bandgap. Consiste en que si dos transistores iguales son atravesados por corrientes distintas, en sus colectores aparece una tensión que sólo depende de la relación entre las densidades de corriente que los atraviesan.

El integrado de voltaje de referencia entrega $1.263V \pm 160\mu V$, con un consumo cercano a los $5\mu A$, logrando una corriente máxima de salida de 1mA, muy superior a la requerida para el diseño.

Además, el Mote no tiene una referencia fija para el fondo de escala de su entrada analógica por lo que el valor obtenido por el convertor variará según lo haga la pila. Teniendo un voltaje de referencia estable (y conocido) es posible independizarse de la pila como se explica a continuación.

Como el Mote tiene un convertor A/D de 10 bits para medir señales analógicas, es posible describir su funcionamiento a partir de la siguiente ecuación:

$$V_{in} = \frac{N_{in} \cdot V_{FS}}{N_{FS}} \quad (3.20)$$

V_{in} : Señal analógica a medir.

N_{in} : Valor cuantificado de V_{in} .

V_{FS} : Valor del potencial de referencia del convertor (FS: fondo de escala).

N_{FS} : Valor cuantificado del fondo de escala, $N_{FS}=2^{10}=1024$.

Aplicando lo anterior, para $V_{in} = V_{ref} = 1.263V$ y un fondo de escala basado en la pila, se obtiene la siguiente relación:

$$V_{ref} = \frac{N_{ref} \cdot V_{bat}}{N_{bat}} \quad (3.21)$$

Este valor de N_{ref} se obtiene midiendo el canal 1 de la entrada analógica del Mote.

Suponiendo ahora un valor de entrada genérico V , para un valor de cuantificación N (medido en el canal 0 del Mote), se llega a:

$$V = \frac{N \cdot V_{bat}}{N_{bat}} \quad (3.22)$$

Combinando las ecuaciones de ambos canales se logra independizarse del voltaje de la pila, como se muestra a continuación:

$$V = \frac{N \cdot V_{ref}}{N_{ref}} \quad (3.23)$$

Otra forma de independizarse del voltaje de la pila podría ser utilizando el voltaje de Bandgap del Mote, que entrega un potencial constante. Este tiene como inconveniente que el fabricante garantiza que su valor estará entre 1.0 y 1.2V, y esta incertidumbre resulta demasiado grande para compensar la variación en la lectura del convertor A/D. En cambio, esta incertidumbre es aceptable para calcular el voltaje en la pila que se mostrará al usuario a través del software de monitoreo (sección 4.2).

Interruptor analógico

Por la necesidad de consumir la menor corriente de las pilas posible y como la aplicación no requiere una medida continua de pH, se optó por implementar un mecanismo de apagado del circuito de medida de pH.

Para apagar la electrónica del sensor de pH la mejor opción que se encontró fue a través de un interruptor analógico con transistores MOS, que corte la alimentación de todo el circuito de medida. Al igual que con los demás dispositivos, se buscó un integrado comercial que cumpla con los requerimientos de consumo y de alimentación.

La gran mayoría de los fabricantes cuentan con interruptores digitales de prestaciones muy parecidas. Entre ellos se compararon los integrados: TS3A4742, ADG701, MAX4993 y se vio que eran muy similares. Se decidió utilizar el TS3A4742 de Texas Instruments porque fue el que se consiguió más rápido. El integrado cuenta con dos interruptores analógicos independientes normalmente abiertos (NA) de los cuales solamente se utiliza uno.

En la Tabla 3.4 se muestran las principales características del integrado elegido.

Rango de alimentación	1.8 ... 3.6 V
Consumo	0.5 μ A
R _{ON} máxima	1.5 Ω
I _{out} máxima	100 mA
On time	14ns
Off time	9 ns
Encapsulado	MSOP-8

Tabla 3.4: Características del interruptor TS3A4742

Filtro pasabajos de salida

Como la señal de pH es una señal continua, de baja amplitud, se hace necesario filtrar todo lo que sea señal en frecuencia, principalmente el ruido de la línea de 220V a 50 Hz. Debido a que el conversor A/D del Mote es de 10 bits, se obtiene un paso aproximado de 3.0mV cuando las pilas son nuevas, por lo que puede tenerse errores de cuantización de por lo menos 1.5mV. Esto es despreciable frente al ruido que pudo apreciarse en el osciloscopio cuando se probó la electrónica del sensor en el laboratorio. En dicho caso este era del orden de los 100mV antes de pasar por el filtro. Se observó también que el ruido provenía de interferencias de la red y que se metían al circuito principalmente a través del cable coaxial del osciloscopio. Para minimizar este ruido se podría cortar el cable o disponerlo de forma tal que el efecto antena del mismo sea mínimo. Se decidió por la segunda opción ya que el electrodo pertenece al cliente con lo que no podía cortarse. Para minimizar el efecto antena se arrolló y comprimió el cable para que el área de aire en el interior del enrollado fuera mínima.

Para el diseño del filtro se eligió un filtro pasabajos RC de primer orden. Se diseñó el filtro con $R = 10 \text{ k}\Omega$ y $C = 4 \text{ }\mu\text{F}$, con lo que el polo está en $f = 4.0 \text{ Hz}$. (Por más información ver Anexo IV.3)

Diseño final del circuito para medir pH

Una vez estudiados y seleccionados todos los integrados que componen el circuito de adaptación de la señal de pH se obtiene el esquemático que se presenta en la Figura 3.13 y el layout puede verse en la sección IV.4.

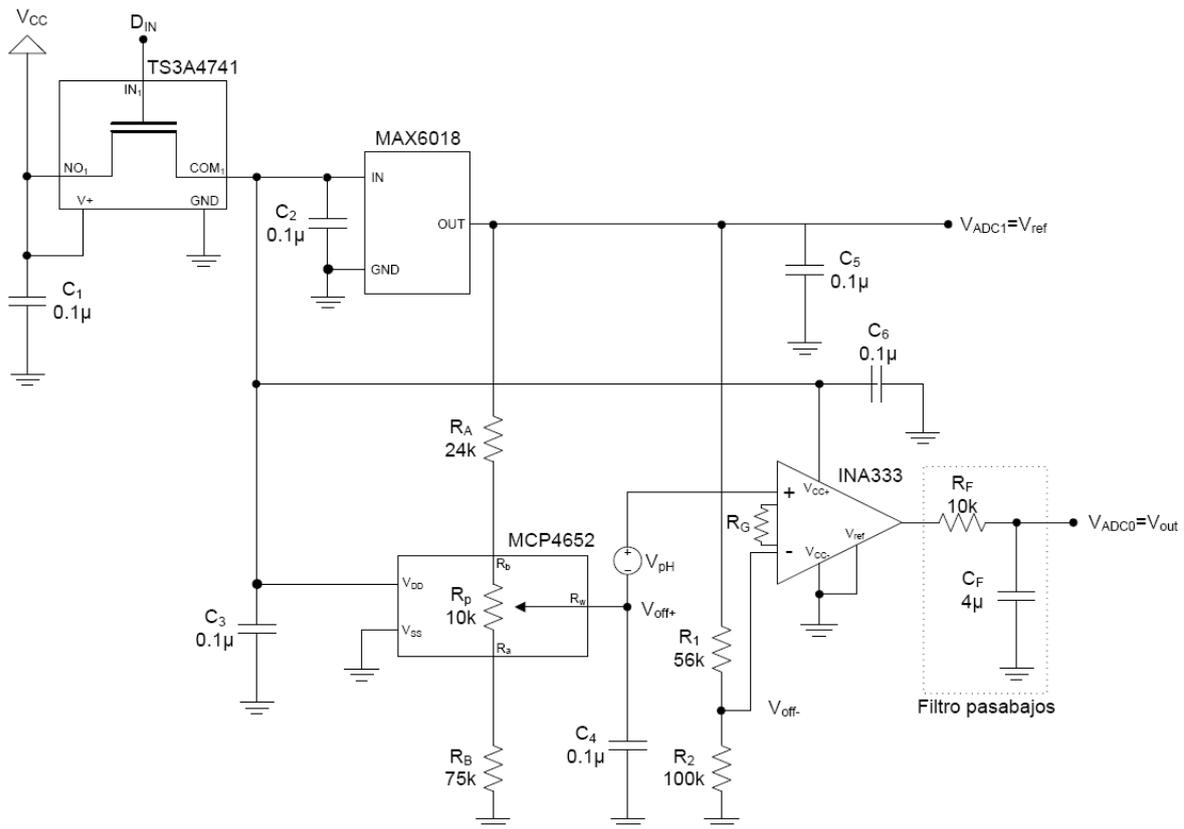


Figura 3.13: Esquema del circuito del sensor de pH

3.2.6 Programación del Mote para integrar sensor de pH

Se implementa un componente *PhimetroC* que provee a la rutina principal¹⁵ de 3 interfaces: *Read*, *StdControl* y *SplitControl*. A través de éstas, la aplicación principal puede manejar las funcionalidades del sensor de pH.

- *StdControl*: Implementa las funciones para el encendido y el apagado del componente *PhimetroC* y todos los subcomponentes.
- *SplitControl*: Implementa las funciones para el ajuste del potenciómetro digital durante la calibración.
- *Read*: Implementa la lectura de la medida de pH, devuelve el voltaje en la entrada del conversor A/D en mV.

Encendido

En el encendido el Mote configura la salida digital y lee de la memoria flash la posición de potenciómetro digital. De esta forma no se pierde la información guardada en el último proceso de calibración.

La electrónica del sensor de pH no se enciende al iniciar el mote sino que

¹⁵ Ver Anexo II

esto ocurre con cada lectura. Es por esto que el potenciómetro digital debe de ser ajustado en cada lectura de pH.

Lectura

En la Figura 3.14 se muestra un diagrama de bloques de la función de lectura del sensor de pH

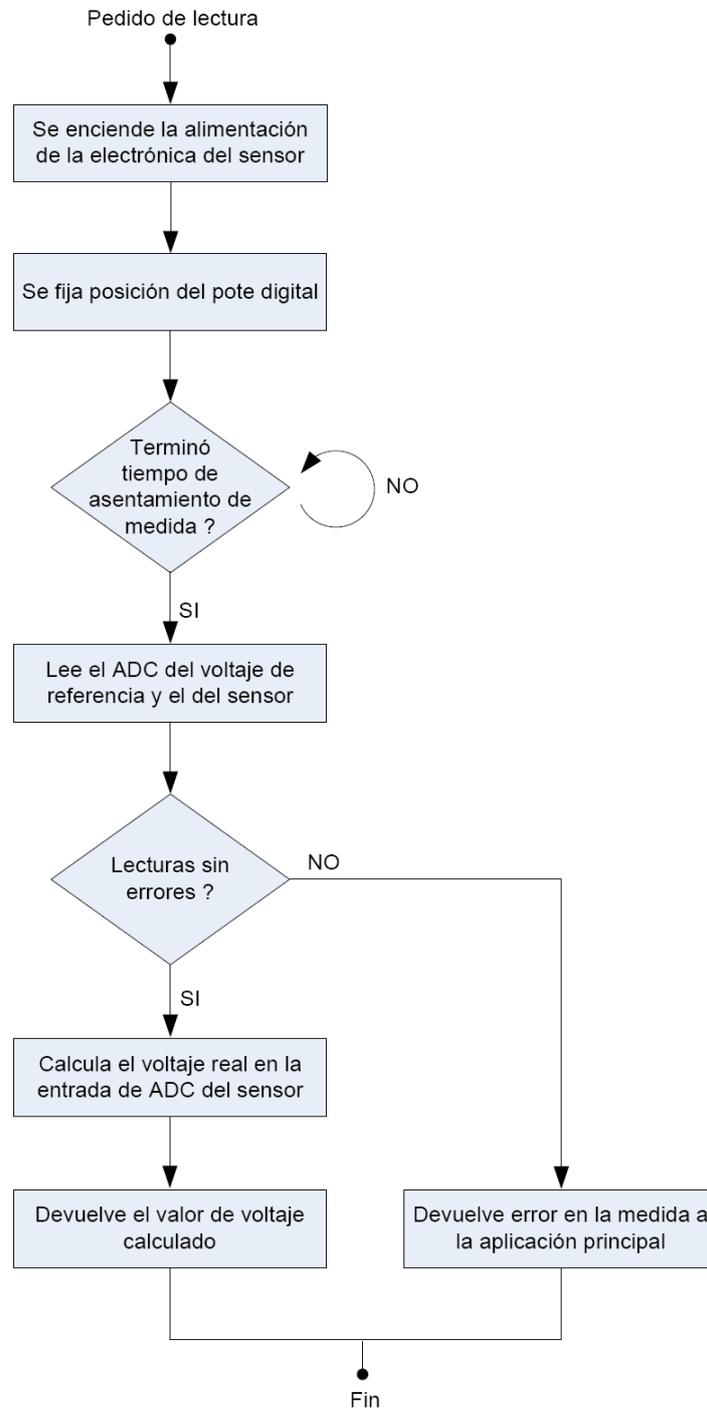


Figura 3.14: Diagrama de bloques de la función de lectura del sensor de pH

El proceso de lectura se inicia encendiendo la electrónica del sensor de pH.

Esto se realiza cambiando el estado de la salida digital conectada al interruptor analógico. Luego se envía una escritura, por el bus I2C, al potenciómetro digital para fijar el offset que se suma a la caída en el electrodo. Se espera un tiempo de asentamiento de la lectura de pH, este es el tiempo que le lleva al circuito del sensor de pH entregar una medida estable cuando es energizado. Dicho parámetro se determina experimentalmente en la sección 6.2.1.

Se leen las medidas de los convertor A/D conectados a la referencia de tensión y a la salida del amplificador de instrumentación. Si no hubo errores en las lecturas, con estas 2 medidas se calcula el valor real de voltaje en la salida del amplificador de instrumentación. El cálculo es explicado en la sección 3.2.5 Voltaje de referencia. Esta medida es la que devuelve la función *Read()*.

Calibración

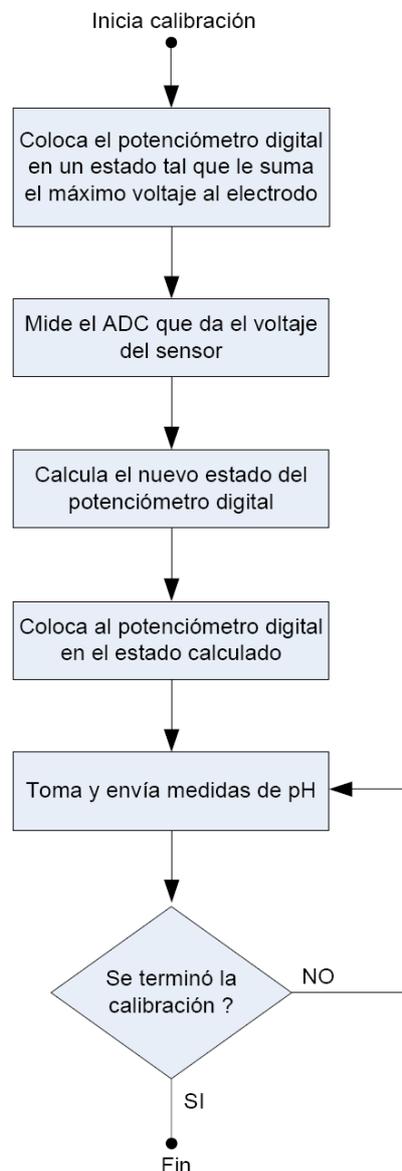


Figura 3.15: Diagrama de bloques de la función de calibración del sensor de pH

En la calibración del sensor de pH el nodo sensor fija la posición del potenciómetro digital, le informa al nodo base que terminó y luego se mantiene enviando al nodo base medidas de pH con un período fijo de un minuto. El proceso de ajuste del potenciómetro se debe de realizar cuando el electrodo esta en solución buffer 7, este debe de ser el primer punto para la calibración (como se explica en la sección 4.2.4).

En primera instancia se envía una escritura, por el bus I2C, al potenciómetro digital para fijar el offset a sumar al electrodo en el valor máximo. Con esto se asegura que la medida a tomar va a estar en el rango de trabajo del amplificador de instrumentación. Se realiza una lectura de pH obteniendo una medida de voltaje real. Con esta medida y el offset sumado se calcula el corrimiento del voltaje que el electrodo tiene a pH 7 (corrimiento del 0 Vdc).

Con este resultado se puede calcular el offset a sumar, para ajustar el rango de salida de la electrónica del sensor de pH. Se envía otra escritura al potenciómetro digital con la nueva posición del mismo, a partir del cálculo.

Para finalizar se continúan mandando medidas de pH, tensión en mV a la salida del amplificador instrumentación, hasta que desde la aplicación del PC se le comunica que terminó la calibración.

En la sección 4.2.4 se explica como se realiza el proceso de calibración.

Capítulo 4

Interfaz con el usuario

En esta sección se mostrará como se implementó la interfaz con el usuario y se explicarán los programas realizados para la integración de nodo sensor a la base.

4.1. Elección de la plataforma

La interfaz con el usuario fue desarrollada en Java. Esto se debe en primera instancia a que existe una biblioteca de TinyOS en Java que permite un manejo sencillo de los mensajes que llegan por el puerto USB desde el nodo base y los que se envían al mismo.

Por otro lado Java es una plataforma muy interesante para este desarrollo ya que la aplicación puede ser ejecutada desde distintos sistemas operativos sin tener que realizar ningún tipo de cambio en el código de la misma.

4.2. Programación

Al ejecutar la aplicación se abre una ventana como la que se muestra en la Figura 4.1. En esta ventana se despliega el último estado de las variables que le llega al nodo base desde los nodos sensores, con lo que se puede monitorear el funcionamiento del sistema en tiempo real. Es también a través de ella que se puede seleccionar la frecuencia con la que se quieren obtener mediciones o ingresar al panel de calibración de pH.

La ventana principal se divide en tres grandes secciones. En la sección superior se puede seleccionar el período de muestreo de temperatura y de pH de los nodos sensores (todos tendrán el mismo período de muestreo para cada variable).

En la sección central se encuentran los paneles de cada uno de los fulones donde haya un nodo sensor. En la Figura 4.1 se muestra la ventana en el caso de que se tengan dos nodos sensores. Si hubiera un nodo más la ventana sería idéntica al de la figura pero con un panel de nodo sensor extra correspondiente al tercer nodo. En estos paneles se muestran los últimos valores de las variables recabadas por cada uno de los sensores y la hora en que se obtuvieron. Además se muestran los períodos de muestreo de temperatura y de pH enviados por los nodos sensores, que si no existen inconvenientes en la comunicación deberán coincidir con el período seleccionado por el usuario. Si se tuvieran tantos nodos sensores que este diseño no permitiera ver las variables de forma clara, se puede cambiar un poco la ventana sin necesidad de mucho cambio en la programación. Esto se podría realizar colocando botones con los números de los fulones en lugar de los paneles con las variables, y que cuando estos fueran presionados se abrieran sus

respectivos paneles.

Por último en la sección inferior se tiene un botón para iniciar la calibración de pH de un nodo sensor.

Además de mostrarse en pantalla los valores actuales de las variables temperatura y pH, se guardan las mismas en un archivo.

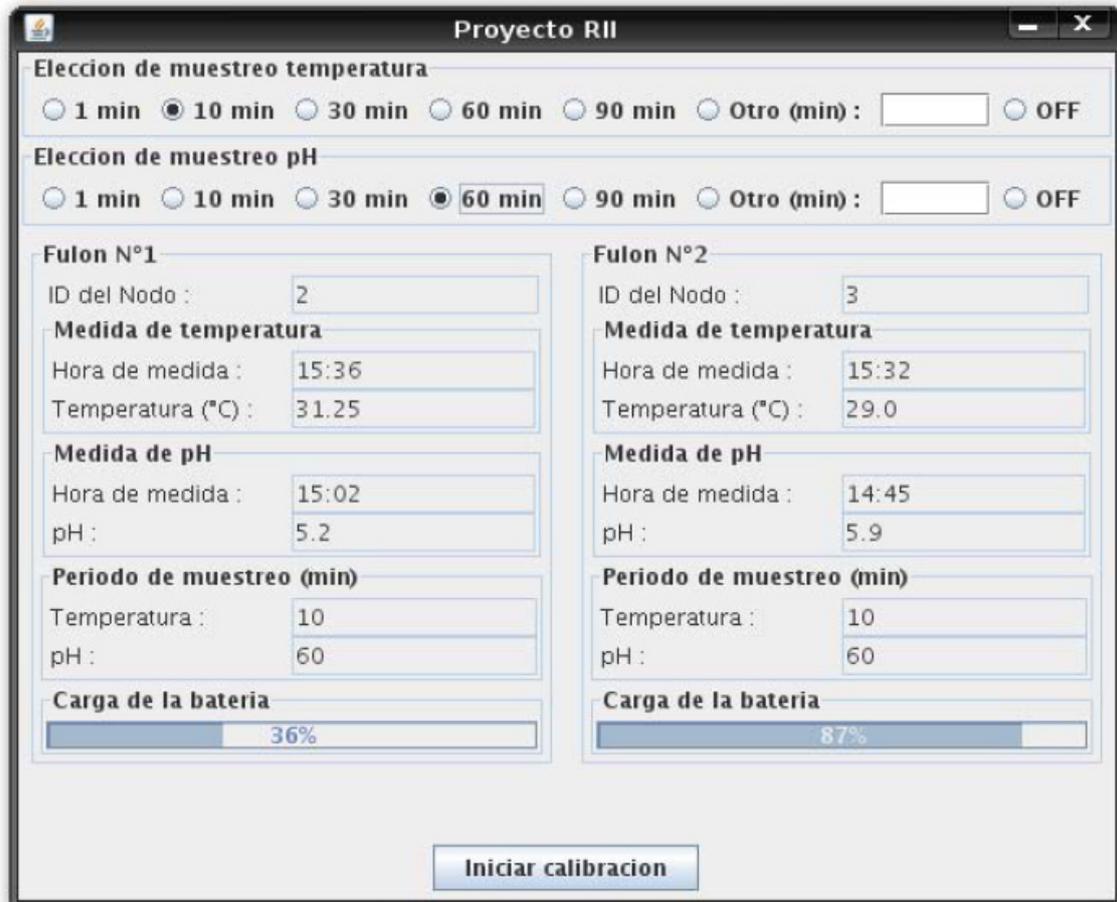


Figura 4.1: Ventana principal de la aplicación

La aplicación se divide en tres grandes partes

- *Enviar mensajes a los nodos sensores:* permite al usuario cambiar los períodos de muestreo de los sensores. Además es utilizado por la sección de calibración para avisarle a la red que se está calibrando un sensor determinado.
- *Procesar mensajes recibidos de los nodos sensores:* procesa los mensajes que le llegan al PC desde el nodo base a través del puerto serial, mensajes que a su vez le llegan al nodo base por aire desde los nodos sensores.
- *Realizar la calibración de pH:* permite al usuario llevar a cabo la calibración de un nodo específico que el usuario deberá seleccionar.

4.2.1 Formato de los mensajes

Dentro de la librería que posee TinyOS en Java se encuentra una clase llamada *MoteIF*. Esta clase provee una interfaz para recibir mensajes desde y enviarlos a los Motes a través del puerto serial (o de cualquier otra forma de comunicación que se tenga).

La estructura de los mensajes que utilizan los Motes se especifica en un archivo de extensión .h. A partir de este archivo es posible, al momento de compilar la aplicación en TinyOS, crear clases automáticas para cada tipo de mensajes que se tenga. Estas clases proveen funciones que permiten la lectura o la modificación de cada uno de los campos del mensaje. Cuando se quiere leer un campo de un mensaje que llega se utiliza la función *get_<nombre del campo>* y cuando se quiere escribir en uno se utiliza *set_<nombre del campo>*.

4.2.2 Enviar mensajes a los nodos

Los mensajes enviados por la base hacia los nodos contienen los siguientes campos:

- *Periodo_temp*: es un entero (P_T) que se utiliza para seleccionar el período de muestreo de la temperatura. El período se obtiene de multiplicar P_T por un contador que tienen los Motes sensores. El tamaño de este contador es lo que fija el período más pequeño que se puede utilizar. En esta aplicación el contador dispara cada un minuto.
- *Periodo_pH*: es análogo al de temperatura.
- *N_mote*: este campo se utiliza para identificar al nodo que se está calibrando. Si el valor de este campo es 0 quiere decir que no se está calibrando ningún nodo. Al comenzar a calibrar en el valor de este campo se coloca en número de identificador (ID) del nodo a calibrar. Al terminar la calibración este campo vuelve a ser 0.

La función de enviar mensajes se encuentra en un loop permanente. Cuando el usuario elige un nuevo período de muestreo, ya sea de temperatura o de pH, se envía un mensaje de configuración con todos los parámetros, hayan cambiado ó no.

Además, cuando se inicia la calibración el usuario debe indicar cuál es el nodo a calibrar (como se explicará más adelante). También en este caso se envía un mensaje con todos los parámetros.

4.2.3 Recibir mensajes de los nodos

Los mensajes que recibe la base provenientes de los nodos sensores tienen los siguientes campos:

- *ID*: en el número de identificación del nodo sensor que generó el mensaje. Esta es la forma que se tiene para saber a quién

corresponde el mensaje que llega.

- *Temp*: en este campo se encuentra la medida de temperatura enviada por el nodo sensor en hexadecimal. Es el mismo valor que el integrado de temperatura le envía, por medio del bus I2C, al nodo sensor.
- *pH*: es el voltaje que se utiliza, junto con la temperatura, para calcular el pH de la sustancia medida por el nodo sensor. El nodo sensor obtiene este valor luego de aplicar la ecuación 3.23 con las lecturas de los dos conversores A/D del Mote.
- *Periodo_temp*: este campo se refiere a lo mismo que el campo de igual nombre que se encuentra en los mensajes enviados desde la base. Debido a que el protocolo de transmisión es de “best-effort” se necesita de alguna forma saber si a los nodos sensores le llegó el cambio realizado por el nodo base. Es por esto que los nodos sensores envían los períodos que tienen hacia el nodo base.
- *Periodo_pH*: es análogo al de temperatura.
- *Voltaje_bat*: es un valor obtenido por el Mote que representa el voltaje de las pilas. Para obtener el voltaje real a partir de este campo hay que aplicar la ecuación 4.1.

$$V_{bat}^{real} = \frac{1100 \cdot 1024}{Voltaje_bat} \quad (4.1)$$

Al recibir un mensaje por el puerto serial, la aplicación procesa el mismo como se muestra en el diagrama de la Figura 4.2.

Cuando le llega un mensaje primero se ve si corresponde a un nodo que se esté calibrando y en caso de que sea así se ejecuta la calibración. Si esto no es así se procesa el mismo desplegando en el panel correspondiente los valores de las variables del mensaje. Además se guardan las medidas tomadas en archivos .csv (valores separados por coma). Por cada nodo y por cada variable sensada hay un archivo. Para que no se genere un archivo extremadamente largo, se decidió crear un archivo distinto por cada mes del año.

Como se ve en el diagrama de la Figura 4.2 cuando llega un mensaje válido con muestras tomadas por el nodo sensor existen dos posibilidades. La primera es que solo llegue la medida de temperatura y en ese caso se procesa la misma sin tomar en cuenta el pH. En el caso del pH la situación cambia, ya que para calcular el mismo es necesario conocer la temperatura a la que se encuentra la sustancia. Por lo que por cada medida que se quiera obtener de pH se obtiene también una de temperatura. Esta medida se decidió desplegarla en pantalla y loguearla porque no tiene sentido no utilizar un valor válido de sensado si ya se obtuvo, independientemente de que se haya solicitado o no.

Se definen ciertas palabras para que el nodo sensor le envíe al nodo base para identificar situaciones especiales. Estos códigos son solamente para que la aplicación de Java pueda identificar las distintas situaciones y tomar las acciones

correspondientes según la situación. Para el usuario que utiliza la aplicación esto es transparente. Un primer código, “SinMed”, se define para que el nodo base coloque esta palabra en el campo de temperatura o pH en un mensaje si no ha sensado las mismas. Esto se debe a que por el protocolo de transmisión, en cada mensaje enviado por un nodo sensor se encuentran todas las variables, se haya obtenido una medida de la misma o no. Se define otro código, “ErrCom”, para indicar que hubo un error en la comunicación I2C entre el Mote sensor y el sensor de temperatura.

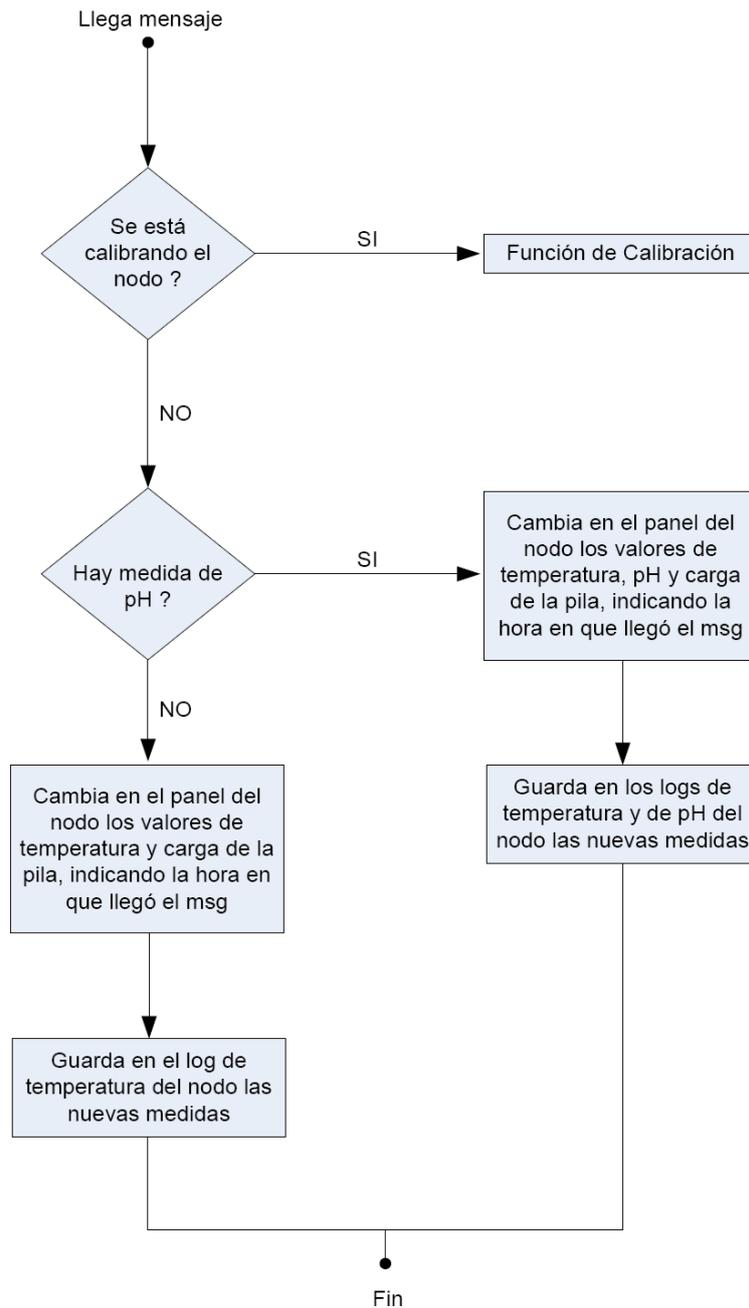


Figura 4.2: Diagrama de bloques de la función de llegada de mensaje

4.2.4 Calibrar el sensor de pH de un nodo determinado

Para la calibración se necesita que el usuario coloque el electrodo en soluciones buffers. Es por esto que se deberá desmontar el electrodo de pH del fulón y por tanto también el nodo sensor.

Al apretar el botón “Iniciar calibración” del panel principal, se le pregunta al usuario mediante una ventana emergente cuál es el nodo que quiere calibrar, como se ve en la Figura 4.3.

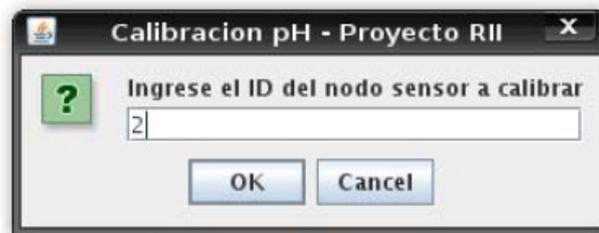


Figura 4.3: Ventana emergente para la calibración del sensor de pH

Luego que éste elige el nodo a calibrar se abre otro panel que lo guiará en el proceso de calibración del sensor de pH (Figura 4.4). A partir de que el usuario selecciona el Mote a calibrar ya no se loguearán ni mostrarán en pantalla las medidas que lleguen del mismo hasta que se salga de la calibración.



Figura 4.4: Ventana inicial de calibración del sensor de pH

La calibración del sensor se realiza como lo muestra el diagrama de la Figura 4.5.

Para que el nodo sensor inicie la calibración, la base envía en los mensajes a los nodos sensores un campo con el número ID del Mote que se está calibrando, como se vio en la sección 4.2.2. Cuando el nodo sensor a calibrar reciba el mensaje se dará cuenta que lo están calibrando, entonces cambia el período de muestreo de datos a un minuto y comienza a realizar las tareas necesarias para la calibración, como se explicó en la sección 3.2.6. Luego que el nodo sensor termina, avisa a la

aplicación del nodo base que está pronto para enviar medidas para la calibración ingresando el código “EmpCal” en el campo de medida de pH.

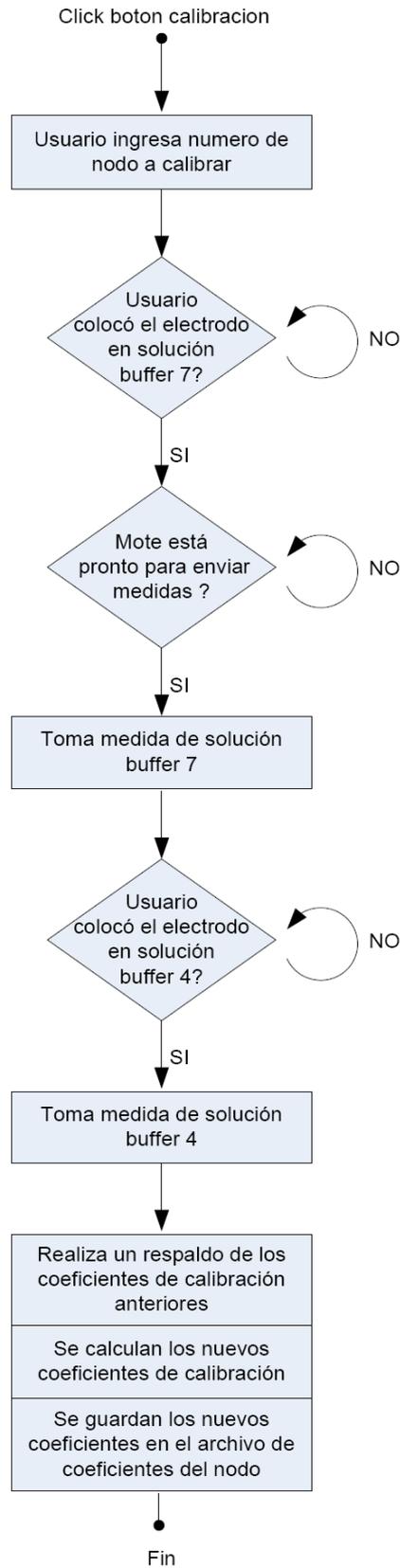


Figura 4.5: Diagrama de bloques de la función de calibración

A continuación, se le pide al usuario que coloque el electrodo en solución buffer 7. El orden con que se utilizan las sustancias buffers es importante. Primero debe tomarse la medida de la solución buffer 7 y luego en 4, ya que la solución 7 tiene una menor concentración de iones de hidrógeno y por tanto no contaminará a la otra. Cuando el usuario coloca el electrodo en la solución buffer 7 avisa que está pronto apretando el botón “Calibrar pH = 7”.



Figura 4.6: Ventana de calibración cuando se está tomando el pH de la solución buffer 7

Una vez cumplidas las dos condiciones anteriores: el nodo sensor avisó que está pronto para enviar medidas de calibración y el usuario avisó que el electrodo ya se encuentra en solución buffer 7, el nodo base comienza a procesar las medidas. El mensaje que se usará para hallar los parámetros de calibración será el primer mensaje válido, es decir el primer mensaje que le llegue por el puerto serial al PC con valores de temperatura y pH. Durante el sensado de esta medida se deberá agitar constantemente la solución, el tiempo que se demora en tomar la medida es como máximo de un minuto. En la Figura 4.6 se muestra la pantalla que ve el usuario mientras se está tomando la medida de pH de la muestra.

Luego de tomar las medidas para la solución buffer 7, se le pide al usuario que coloque el electrodo en la solución buffer 4 e ingrese cuando esté pronto. A partir de que el usuario aprieta el botón “Calibrar pH = 4” la función de calibración espera al primer mensaje válido del nodo sensor de igual forma que lo hizo con la solución buffer 7. Por su parte, el panel sigue manteniendo la misma estructura.

Luego de cada uno de los puntos de pH relevados, se muestra en la ventana de calibración el valor de pH que se obtiene utilizando los parámetros de calibración anterior a la que se está desarrollando y el voltaje obtenido por el conversor A/D. Esto sirve para que el usuario pueda evaluar el desgaste del electrodo y corregir la frecuencia de calibración del mismo.

Al finalizar la ventana de calibración queda como el de la Figura 4.7.



Figura 4.7: Ventana final de la calibración

Cuando se obtienen medidas válidas para los dos puntos de calibración se hallan los parámetros α y β de acuerdo a lo visto en la sección 3.2.2 Calibración. Al hacer esto, primero se guarda en un archivo de backup los valores de la calibración anterior y luego se guardan los nuevos en el archivo de los parámetros de calibración del nodo correspondiente. Estos son archivos de texto plano, en donde la primera línea corresponde al coeficiente α y la segunda al β .

4.3. Compatibilidad con el hardware del cliente

Si bien Java permite correr el código compilado en un sistema operativo diferente al cual fue compilado, no significa que no sea necesario realizar algunos pasos previos de configuración de la PC en la cual se va a ejecutar la aplicación. Incluso esto también debe hacerse si se utiliza el mismo sistema operativo con que se compiló la aplicación.

Dado que se trabajó en una distribución de Linux (específicamente Ubuntu) y la curtiembre dispone en planta de una PC con Windows XP, se debió buscar el software necesario para correr la aplicación en Windows XP.

Luego de obtener las librerías de Java y los drivers necesarios se realizó un CD con el software requerido y un manual de instalación para que la misma pueda ser llevada a cabo por parte del cliente (por más información ver Anexo VI.2).

Capítulo 5

Implementación

En esta parte se mostrará como se implementaron los distintos circuitos de integración de sensores, que condiciones puso el fabricante para realizarlos y como se resolvió el montaje mecánico del nodo sensor al fulón.

5.1. Fabricación de PCBs

Todos los PCBs fueron fabricados y ensamblados por la firma PCBCOM. Se le entregó el diseño de las placas realizado en el programa de diseño Eagle de Cadsoft, así como los componentes necesarios.

Para minimizar el tamaño de los PCBs se utilizaron componentes de montaje superficial disponibles en la plaza uruguaya: resistencias de encapsulado 1206 y capacitores de 0805.

El resto de los componentes, como son el conector de 51 pines, el conector BNC y los integrados fueron comprados a través de Internet y enviados a la empresa MiamiBox que se dedica a importar productos comprados por Internet en Estados Unidos.

Los Motes y los gateways fueron comprados e importados por el cliente. Se habló con gente de atención comercial de Crossbow y luego de tener seleccionado los productos se le comunicó al cliente con quién contactarse para comprarlos.

5.1.1 Placa de temperatura

Un objetivo de diseño de este PCB fue la minimización de área. Una de las principales razones para hacerlo así, es que éste no se encontrará en contacto directo con la sustancia a medir, sino que estará dentro de una vaina metálica empotrada al fulón. Por lo tanto es necesario disminuir al máximo posible el volumen de aire entre la sustancia a medir y el sensor y con esto obtener una adecuada transferencia de calor.

El diseño construido se basó en el esquema de la Figura 3.1 y el PCB construido y ensamblado se muestra en la Figura 5.1

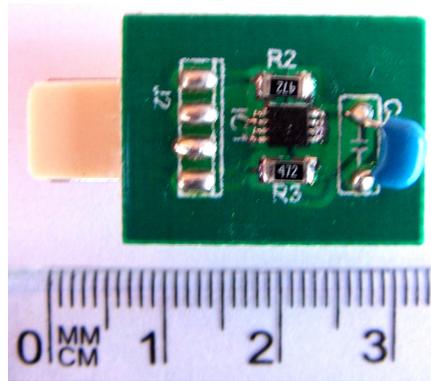


Figura 5.1: Foto del PCB de temperatura realizado

5.1.2 Placa de pH

A partir del esquema de la Figura 3.13, se fabricó y ensambló el PCB que se muestra en la Figura 5.2.

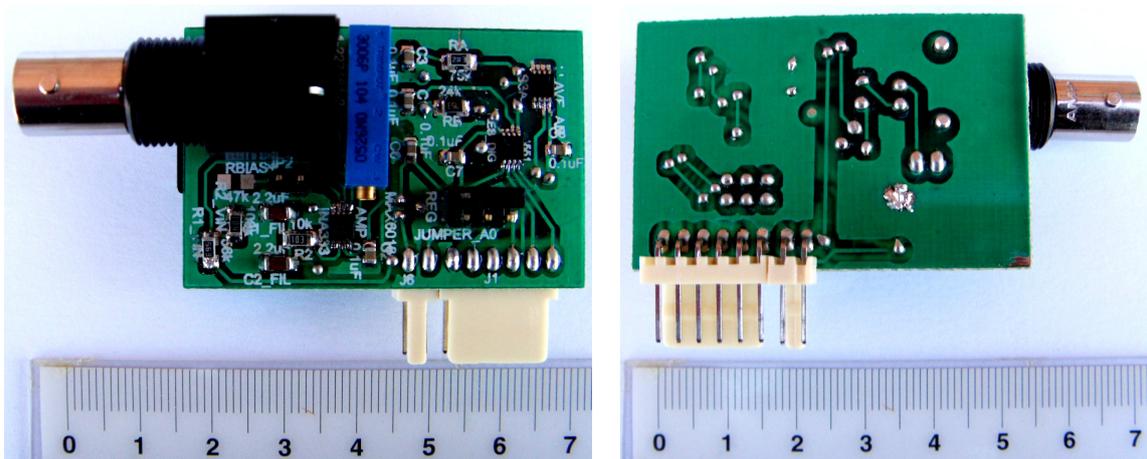


Figura 5.2: Foto del PCB de pH realizado

Como se puede observar en la Figura 5.2 este diseño es mucho más complejo que el diseño de temperatura. Para cumplir con el objetivo de tener un tamaño reducido fue necesaria la utilización de dos capas de cobre para el ruteo.

5.1.3 Consideraciones para los diseños de los impresos

A la hora de diseñar el circuito el fabricante del PCB impuso algunas restricciones que se detallan a continuación:

- Las curvas de las pistas no deben ser en ángulo recto. Esta condición la impone el percloruro de hierro que disuelve al cobre entre pistas y si estos son rectos el percloruro no trabaja óptimamente.
- Realizar la menor cantidad posible de vías (circuitos que unen las pistas entre la capa superior y la inferior). Esto se debe a que el

fabricante no posee la tecnología para realizarla en forma automatizada y por tanto deben hacerse manualmente (encareciendo así el costo de la placa).

- Respetar ciertos anchos mínimos de pistas y separación a los valles de tierra.

Fue necesario iterar varios diseños antes de que el fabricante estuviera en condiciones de realizar el circuito impreso.

5.2. Montaje mecánico

5.2.1 Planificación

El montaje en planta fue planeado para realizarlo en dos etapas. El objetivo para la primera etapa era sensar temperatura dentro del fulón en funcionamiento, recabando los datos en la PC que tiene el cliente en el sitio. Para la segunda etapa el objetivo era adicionar la medida de pH dentro del fulón en funcionamiento.

Desde un comienzo se acordó con el cliente de que fuera éste quien se encargaría de la implementación del montaje mecánico en planta. Esto se debió principalmente a que son ellos quienes tienen más conocimientos y recursos para hacerlo. Cabe destacar que el cliente siempre mostró buena disposición para realizarlo.

La primera etapa se desarrolló sin inconvenientes, se pudo montar tanto el Mote como el sensor de temperatura (ver detalles en la sección 5.2.2). El sistema quedó funcionando y se realizaron pruebas sobre el mismo, como se detallan en la sección 6.5.2.

La segunda etapa de montaje del sensor de pH no pudo llevarse a cabo por razones que se explicarán en las secciones 7.3 y 7.4. A pesar de no poder montar el sensor de pH al fulón se realizaron pruebas en planta como se detallan en la sección 6.5.3.

5.2.2 Montaje del Mote y del sensor de temperatura

Para la fabricación y montaje del encapsulado del nodo sensor de temperatura fue necesario tener en cuenta varios factores.

El Mote se colocará en caja estanca IP 66 de 15x15 cm (Figura 5.3) atornillada al lateral del fulón, apta para soportar los vapores corrosivos del recinto. El Mote debe poder ser desmontado del fulón con facilidad ya que habrá que hacer esto cada vez que se deba cambiarle las pilas o se quiera calibrar el sensor de pH. Por lo tanto la caja estanca tendrá una tapa con tornillos y dentro de la caja el Mote queda fijo por medio del soporte que se muestra en la Figura 5.4.

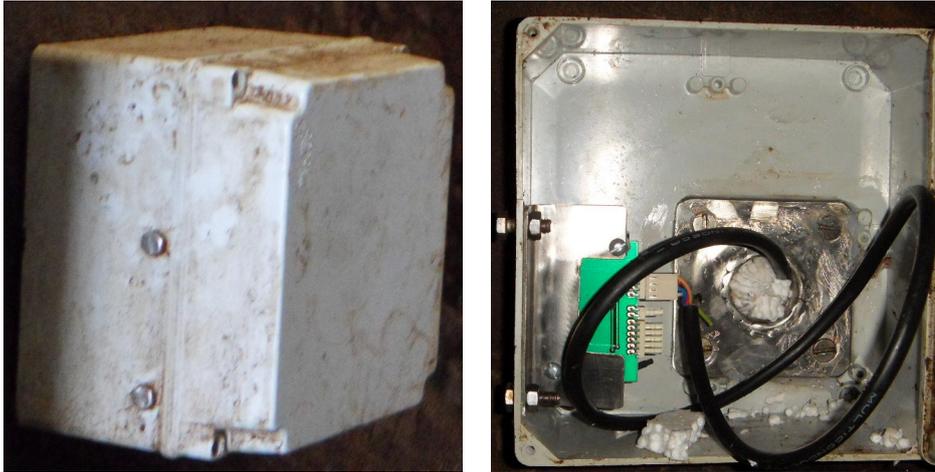


Figura 5.3: Caja estanca y vaina del sensor de temperatura

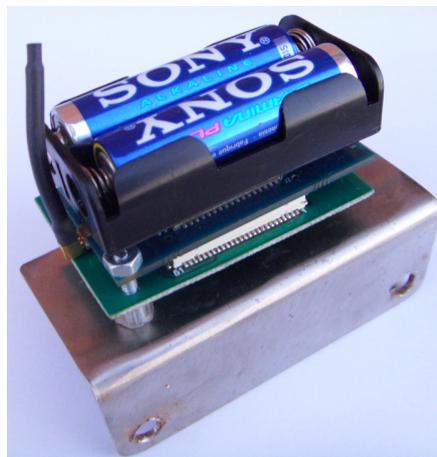


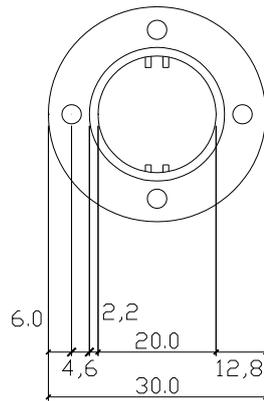
Figura 5.4: Soporte para el Mote sensor

Vaina de temperatura

La vaina de temperatura se diseñó en base a tres factores. El primero de ellos, es que debe ser lo suficientemente robusta para soportar las sustancias altamente corrosivas que se encuentran dentro del fulón, así como para soportar los eventuales golpes que pueda efectuarle el cuero cuando gira dentro del fulón. El segundo factor considerado fue que debe ser lo más pequeña posible, para tener una buena transferencia de calor entre el integrado que sensa la temperatura y la sustancia que a medir. Finalmente, la vaina debe tener el tamaño suficiente como para alojar al sensor de temperatura construido.

La Figura 5.5 muestra un plano del diseño final de la vaina de temperatura. Para la realización de este diseño se contó con la colaboración del cliente, quien especificó ciertos puntos del diseño como el grosor de la vaina y el material a utilizar (acero inoxidable 316).

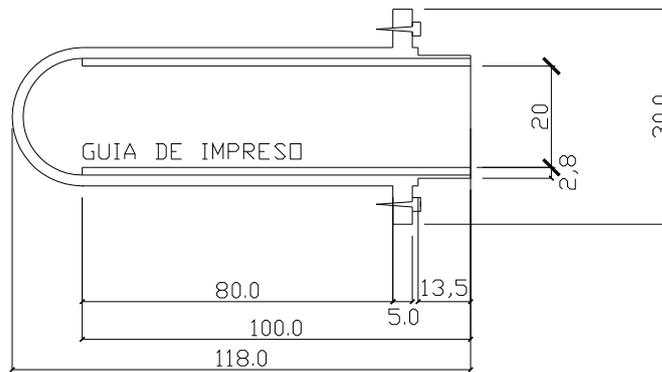
Corte BB trasero (Con rosca)



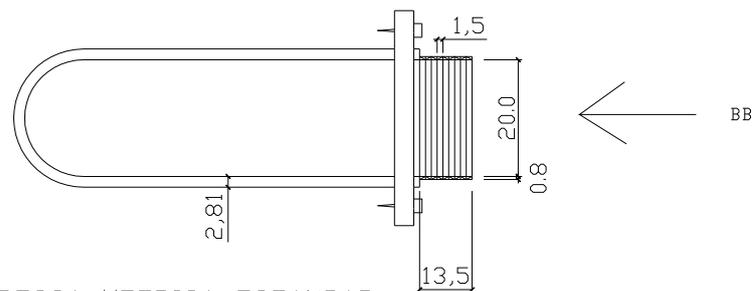
NOTA: UNIDADES MILIMETROS

↖: TORNILLO PARA FULÓN

Corte transversal (interior)



Vista Transversal (Exterior)



ROSCA METRICA ESTANDAR
M32 x 1,5

Figura 5.5: Diseño de la vaina del sensor de temperatura

La vaina se encuentra directamente conectada con la caja estanca donde se encuentra el Mote, como se aprecia en la Figura 5.3. La vaina de metal debe estar en contacto con la solución, por lo que se debe agujerear el fulón para colocar la misma. Para sellar el fulón se utiliza silicona.

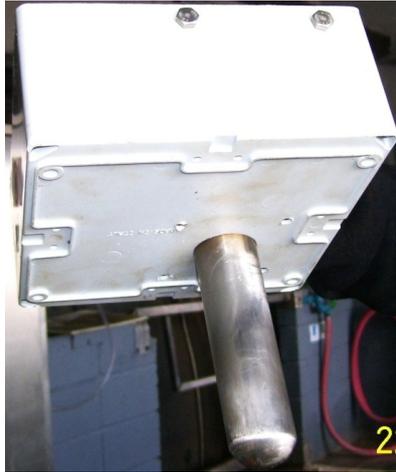


Figura 5.6: Vaina del sensor de temperatura

El integrado de temperatura se coloca lo más sobre la punta de la vaina posible, para que se encuentre lo más al interior posible del fulón. Para aislar térmicamente el recinto donde se encuentra el sensor del resto de la caja estanca, se rellenó la vaina con espuma plast, como se puede ver en la Figura 5.3.

5.2.3 Implementación final

La implementación final estuvo a cargo del cliente. Fue el cliente quién consiguió la caja estanca y el soporte del Mote; y montó todo el sistema en el fulón. En la Figura 5.7 se muestra una foto del sistema funcionando.



Figura 5.7: Caja estanca montada al lateral del fulón

Capítulo 6

Validación

6.1. Consumo del nodo sensor

Se encontraron varios problemas que hicieron difícil estimar el tiempo funcionamiento del sistema antes de que se agoten las pilas. A pesar de que se contaban con todos los datos necesarios (consumos de todos los dispositivos por separado) fue imposible determinar con certeza el ciclo de trabajo de algunos de sus componentes, por ejemplo, la radio y el microcontrolador. Estos dos dispositivos tienen un ciclo de trabajo que está determinado por la aplicación que está corriendo en el Mote.

Dado estas limitaciones se optó por elegir dos métodos distintos para estimar consumo. Para los sensores de temperatura y pH se realizó un cálculo teórico, los valores para este cálculo fueron extraídos de las hojas de datos de los componentes. Por otro lado para estimar el consumo del Mote se utilizó un método experimental, durante el cual se verificó, además, que los cálculos teóricos realizados para los sensores fueran coherentes con los obtenidos en la práctica.

6.1.1 Consumo teórico

Integrados	Componente	Corriente en activo (μA)	Corriente en inactivo (μA)
pH	Amplificador de Instrumentación	75	0
	Interruptor Analógico	0.75	0.75
	Referencia de Voltaje	5	0
	Potenciómetro digital	5	0
	Divisor resistivo: Voffset-	8.1	0
	Divisor resistivo: Voffset+	11.6	0
Temperatura	DS620	800	2
	Comunicación I2C	600	0

Tabla 6.1: Consumo de los componentes de los sensores

La Tabla 6.1 muestra los consumos de componentes que se utilizaron para los sensores de pH y temperatura. La electrónica del sensor de pH tiene dos modos de funcionamiento: apagado y activo. En el primero el interruptor es el único elemento que consume corriente. El modo activo es en el que se realizan las medidas de pH. El sensor de temperatura siempre está activo pero mientras no se está realizando una conversión (temperatura a digital) o una escritura/lectura su consumo es muy bajo (se encuentra en el modo idle).

Para realizar la comparación hay que tomar en cuenta el tiempo que

necesita estar activo cada sensor para obtener una medida. En el caso del sensor de pH este tiempo es de 15s (en la sección 6.2.1 se explica cómo se llegó a ese tiempo). En el caso del sensor de temperatura el tiempo que necesita estar activo para obtener una medida es de 50ms.

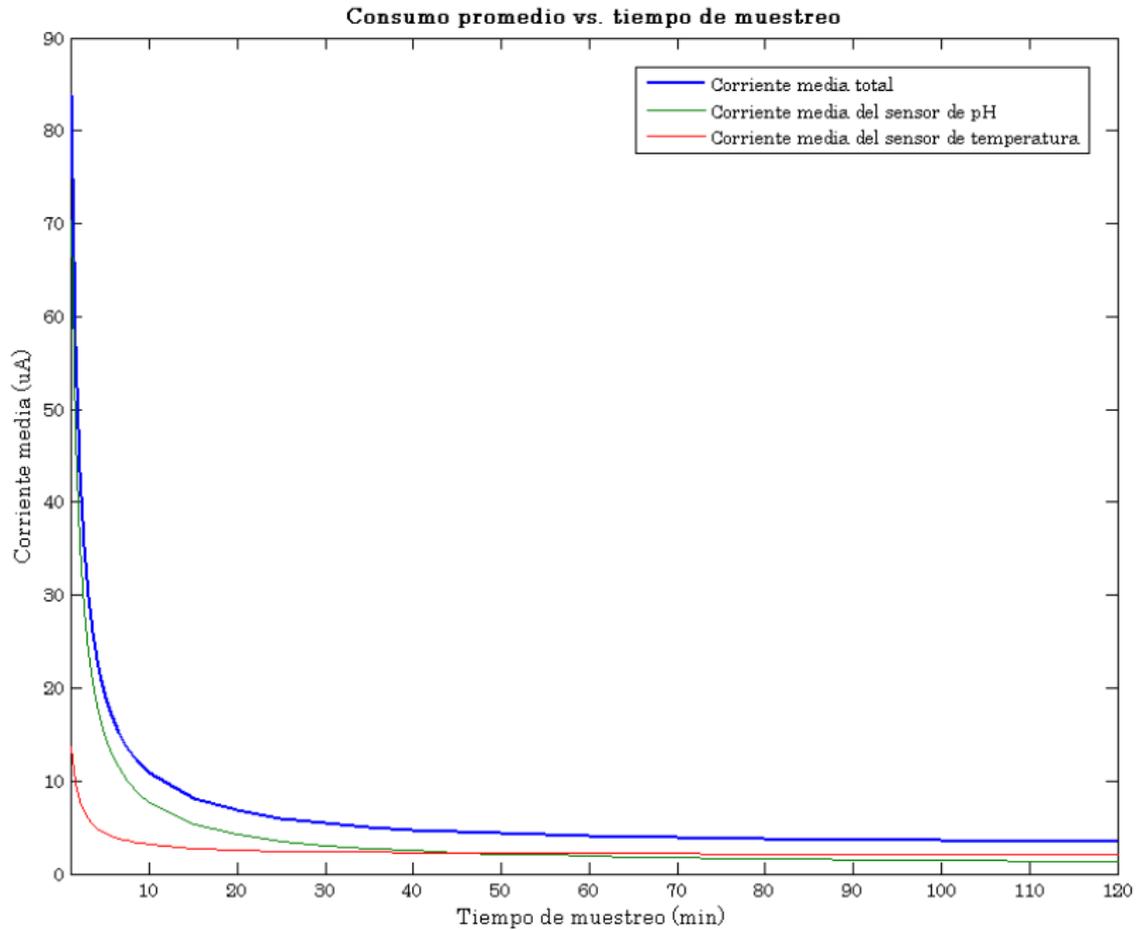


Figura 6.1: Consumo promedio vs. Tiempo de muestreo

En la Figura 6.1 se obtiene la curva de consumo de los sensores en función del período de muestreo.

Cabe destacar que a pesar de que para este análisis se tomaron en cuenta los dos sensores por separado, al medir pH también se necesita medir temperatura. Es por esto que el consumo necesario para medir pH es la suma de los consumos de ambos sensores.

6.1.2 Consumo experimental

Todos los ensayos realizados, tanto para observar el consumo del sistema como para verificar el correcto funcionamiento del mismo, se hicieron colocando una resistencia (de 1Ω al 1%) en serie con las pilas. Con el osciloscopio se midió en los distintos casos la caída de potencial en los bornes la resistencia.

Consumo de la electrónica del sensor de pH

Se verificó la estimación teórica del consumo para de la electrónica del sensor de pH. Para esto se obtuvo una captura de una imagen en el osciloscopio. El disparo fue dado por la señal en el interruptor analógico que habilita la electrónica del sensor.

En el canal 1 se encuentra la resistencia que se usa para medir consumo mientras que en el canal 2 se observa el interruptor analógico. El interruptor analógico es NC por lo que se esta observando el apagado del circuito. El consumo observado de 17mA es la radio enviando un paquete con el nuevo dato.

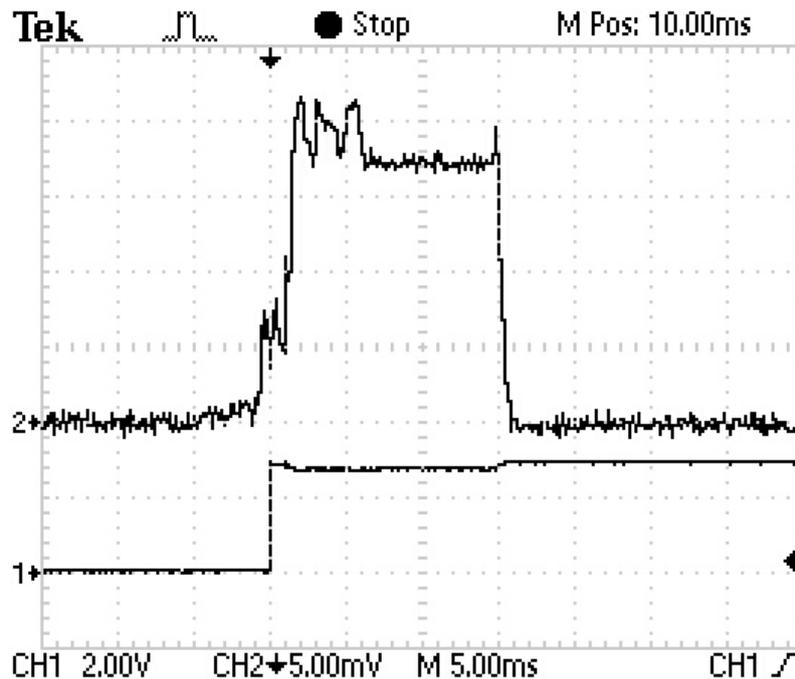


Figura 6.2: Captura de osciloscopio para observar el consumo del sensor de pH

Se observa que no existe un cambio sustancial en el consumo cuando la electrónica del sensor de pH esta activo, lo cual coincide con la estimación realizada.

Consumo del sensor de temperatura

El sensor de temperatura tiene dos modos de operación: activo e idle. Para verificar el consumo del sensor se capturó una imagen en el osciloscopio cuando el sensor realizaba una conversión y la comunicaba por el bus I2C.

En la Figura 6.3 se muestra una captura del osciloscopio Al inicio se ve cuando se le envía (por I2C) el comando de empezar a convertir. El tiempo que demora convirtiendo (50ms), en el cual el consumo es constante y sobre el final (antes de enviar el dato por la radio) se aprecian los mensajes I2C necesarios para la lectura de la medida.

Existe una diferencia importante con la estimación teórica en el consumo. Se observa que el consumo promedio, durante los 50ms que dura el proceso de medir

temperatura, es de 3mA, esta diferencia se piensa que se debe a que el microcontrolador del Mote está en modo activo en el intervalo en que el integrado está tomando una nueva medida. La rutina de lectura de una medida de temperatura pide el recurso del bus I2C pero en la espera de la conversión del dispositivo no lo devuelve por lo que es de esperar que el microcontrolador no pase a modo inactivo durante ese tiempo.

Además el integrado de temperatura no informa del consumo cuando está comunicando datos a través de I2C. Para este análisis se usará los 3mA como estimativo del consumo de temperatura.

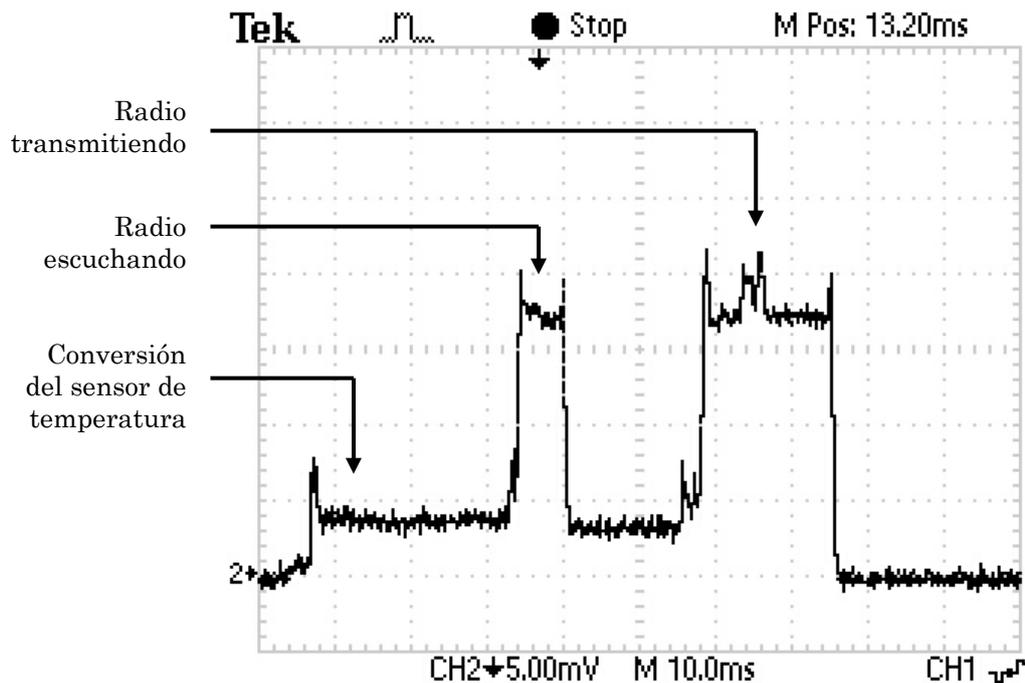


Figura 6.3: Captura de osciloscopio para observar el consumo del sensor de temperatura

Mote

Según los datos del fabricante los consumos de micro y la radio son los siguientes:

- Microcontrolador activo 3,2 mA @ 4 MHz, 3 Vcc
- Radio recibiendo 16 mA
- Radio transmitiendo 17 mA

Además se tiene alimentación de una pila de 2400 mAh. Este valor es hasta una tensión en la pila de 0,8 V. Los sensores están diseñados para trabajar entre 1.8 y 3 V por lo que aproximadamente cada pila va a ser utilizable hasta una tensión de 1 V (con dos pilas se alimenta cada Mote). De la curva de descarga de una pila alcalina estándar [3] se extrae que la capacidad de una pila hasta 1 V es de 2000 mAh.

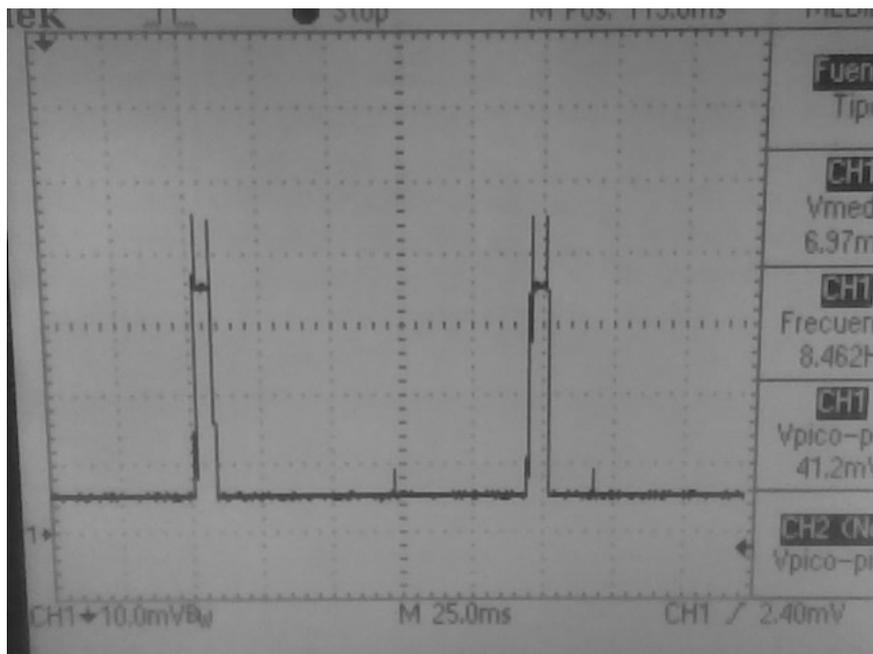
Según estos cálculos si la radio y el microcontrolador estuviesen activos el

100% del tiempo el tiempo de vida de las pilas serian de 104 horas (4 días). Es por esta razón que utilizó LPL como protocolo de capa MAC, para mejorar la autonomía.

Inicialmente se tomó un ciclo de trabajo del 50%, o sea la mitad del tiempo del ciclo definido en que el LPL está escuchando, como se puede ver en la Figura 6.4.



La performance de la red no empeoraba comparándola con un ciclo de trabajo del 100%. Pero a pesar de disminuir el consumo promedio a la mitad respecto a la radio encendida permanentemente, este seguía siendo elevado.



Se decidió bajar el ciclo de trabajo al 5%, como se observa en la Figura 6.5 y nuevamente se procedió a probar el desempeño del sistema. En este caso se notaron ciertos problemas de comunicación.

Entonces, para encontrar una solución de compromiso entre consumo y desempeño, se decidió utilizar un ciclo de trabajo del 8 %.

A pesar de contar con el ciclo de trabajo de la radio, no es posible determinar exactamente el consumo promedio de la misma. Existen otras fuentes de consumo para las cuales es difícil asociar un consumo promedio, por ejemplo:

- *Colisiones:* en este caso se necesita retransmisión aumentando el consumo debido al envío de un paquete.
- *Escucha de paquetes destinados a otros nodos:* esto aumenta el tiempo que la radio esta encendida.
- *Paquetes de control:* debido a los protocolos utilizados (no envían).
- *Multihop:* debido a esta funcionalidad del protocolo Collection los nodos reenvían paquetes que no son destinados para ellos.

Consumo total nodo sensor

Con los experimentos realizados se llega a recabar una serie de datos que permiten acercarse a una medida de consumo promedio.

Cabe destacar que el consumo del Mote no puede ser estimado correctamente con el método utilizado. El valor obtenido es un mínimo ya que faltaría agregar varias fuentes de encendido de la radio, algunas de las cuales están detalladas en esta sección bajo el título Mote.

Sensor de pH	Consumo midiendo (uA)	105
	Tiempo activo por medida (s)	15
	Consumo sin medir (uA)	0.75
Sensor de temperatura	Consumo midiendo (uA)	3000
	Tiempo activo por medida (s)	0.05
	Consumo sin medir (uA)	2
Mote (micro + radio)	Consumo promedio con LPL al 8% (mA)	1.28
	Consumo enviando datos (mA)	17
	Tiempo envío de datos (s)	0.018

Tabla 6.2: Consumos de los componentes

De la Figura 6.6 y de la Figura 6.7 se observa que el consumo medio no varía drásticamente con el tiempo entre muestras (que es manejado por el usuario). Sino que la componente predominante es el consumo de la radio y el microcontrolador. Además se observa que el consumo de los sensores en el consumo total es despreciable. Con un consumo promedio de 1.3mA y una batería que entrega 2000mAh se obtiene una autonomía de 77 días.

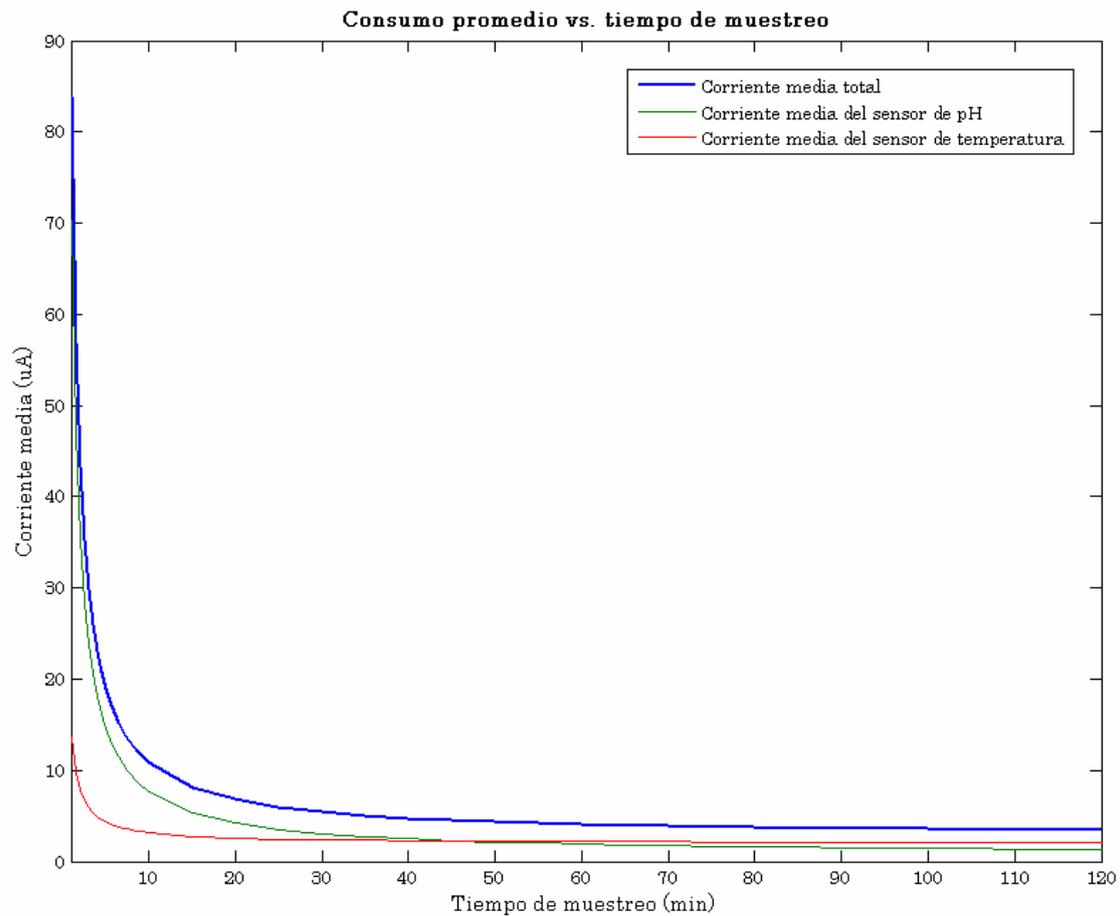


Figura 6.6: Consumo promedio de los sensores

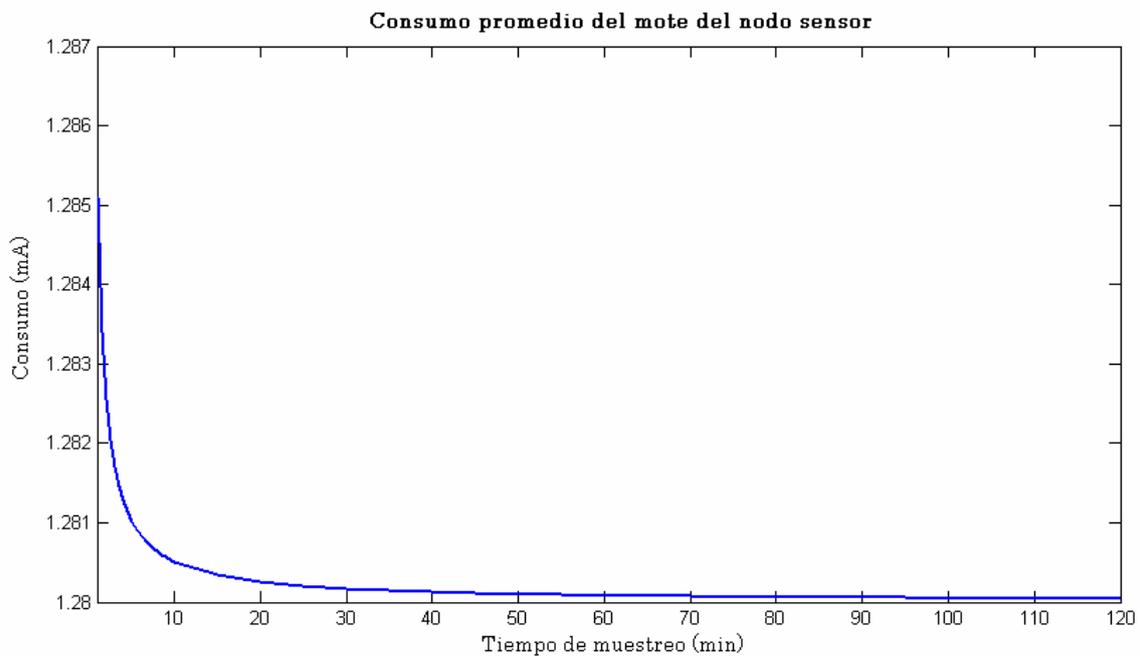


Figura 6.7: Consumo promedio del Mote del nodo sensor (con un LPL al 8%)

En vista de estos resultados, en la sección 7.4 se discute a que áreas del prototipo hay que apuntar para mejorar el consumo.

6.2. Características dinámicas del circuito del sensor de pH

6.2.1 Tiempo de encendido

La electrónica del sensor de pH está apagado la mayor parte del tiempo y al encenderse tiene un tiempo de respuesta mínimo (hasta que la señal es lo suficientemente constante).

Se colocó el electrodo en una solución con pH constante y se comenzó a tomar medidas luego del tiempo necesario para que el voltaje de salida del electrodo esté estable. Progresivamente se fue aumentando el tiempo que la electrónica del sensor permanecía encendido, al mismo tiempo se observaba la tensión a la salida del circuito, para ver como variaba la misma.

En la Figura 6.8 se observa el comportamiento de la salida, desde el encendido hasta el apagado del circuito. Este tiempo empezó siendo de 12s. Claramente la salida todavía no se había estabilizado al momento del apagado del circuito, generando una lectura incorrecta en el Mote.

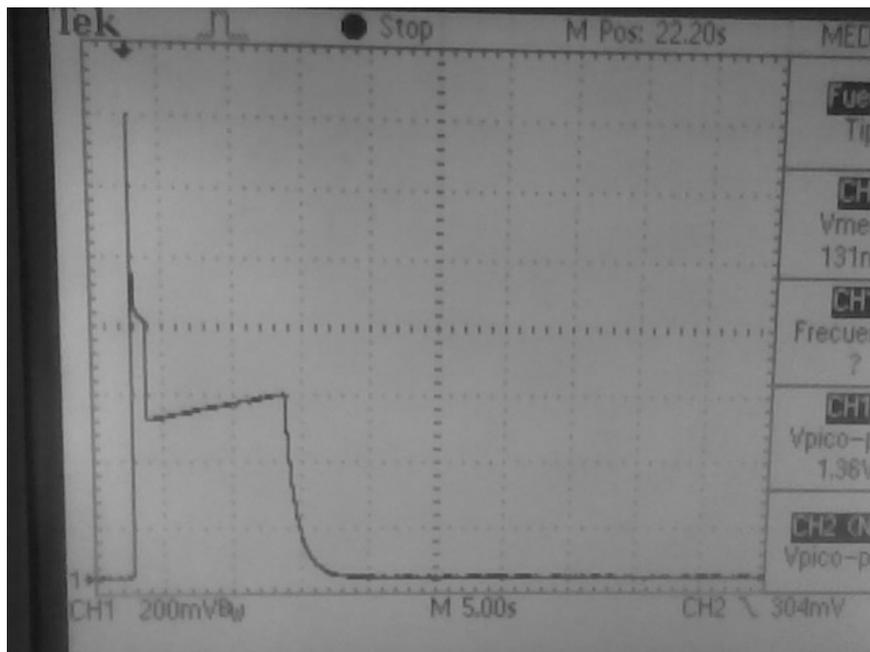


Figura 6.8: Salida analógica, $t_{on}=12s$

Después de varias pruebas para obtener el tiempo óptimo, se decidió por colocar el mayor tiempo en que fuera posible observarlo en el osciloscopio, este tiempo máximo de visión es de 50s, por ende se utilizó un período de 45s, como se observa en la Figura 6.9, en la misma se ve como en los últimos 6 segundos la medida está estable en su valor final, otorgándonos una medida confiable.

En la Figura 6.9 se observa que el 95% del valor final se obtiene a los 15s. Para el encendido de la electrónica del sensor es un tiempo muy grande y el porque de esto se discutirá en las conclusiones (sección 7.3). Pero se terminó optando por este valor ya que como fue comprobado anteriormente el consumo del sensor tenía

un peso muy bajo frente a de los restantes componentes del nodo sensor y el aumento del tiempo que el sensor se mantenía prendido para dar una medida no afecta en nada la autonomía del sistema.

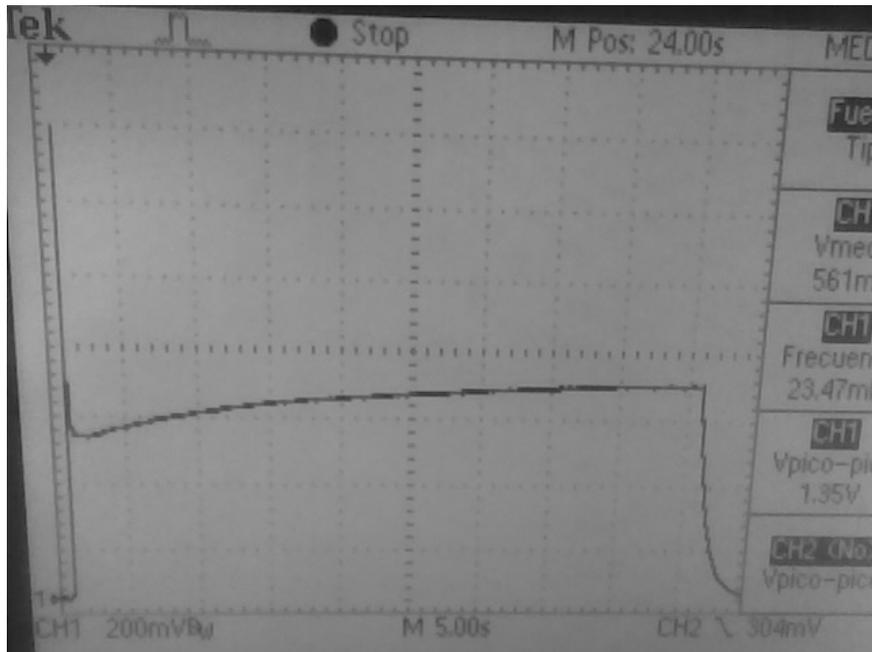


Figura 6.9: Salida analógica, $t_{on}=45s$

6.2.2 Tiempo de respuesta al escalón

El tiempo de respuesta al escalón da una idea de cuanto se debe esperar luego de colocar el sensor en la solución para que el circuito de medida de una respuesta estable. Para la calibración, el tiempo que se espera antes de tomar una muestra, es el hallado en esta sección.

Para estos experimentos se colocó el nodo sensor a tomar medidas de pH en intervalos muy cortos (0,5 segundos) y sin apagar el circuito del sensor, de forma que se podían observar cambios rápidos en el valor de pH sentido.

En primera instancia se colocó el sensor de pH en solución buffer 7. Luego de dejar estabilizar la medida se cambió a solución buffer 4.

En la Figura 6.10 se ve la entrada del convertor A/D del Mote cuando se pasa el electrodo de la solución buffer 7 a la 4. Se observa que a la entrada del convertor se tiene un escalón de 800mV y que la medida llega al 95% de su valor final luego de aproximadamente 5 segundos.

El caso inverso, es decir cuando se pasa de medir una solución buffer 4 a una 7, se muestra en la Figura 6.11. En este caso se notan ciertas medidas erróneas al principio. Esto se debe a que en este cambio el electrodo necesita ser limpiado lo que ocasiona que no pueda transferirse de una solución a otra de forma instantánea, obteniéndose así valores de medidas que no corresponden a ninguna sustancia sino al momento que se estaba limpiando el electrodo.

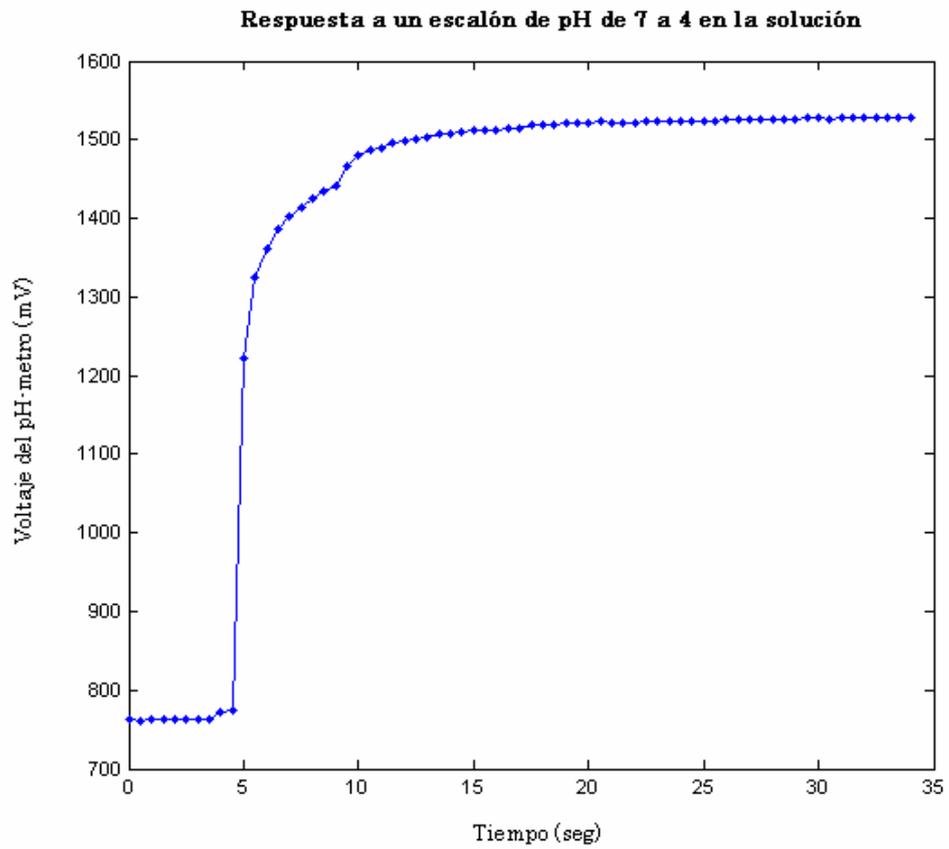


Figura 6.10: Respuesta al escalón creciente

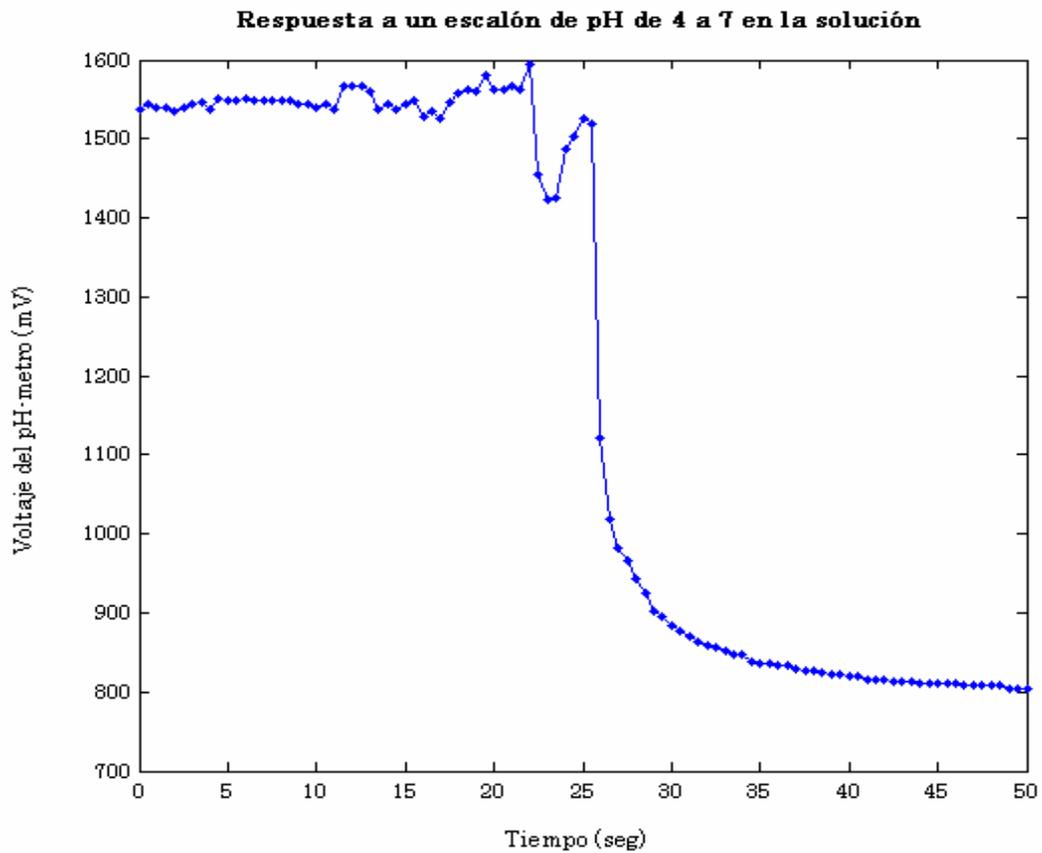


Figura 6.11: Respuesta al escalón decreciente

En la Figura 6.11 también se observa una caída de 800mV. El tiempo en el cual la medida llega a 95% de su valor final es de alrededor 8 segundos.

De esta forma se tiene una estimación de la velocidad de respuesta a un cambio máximo en el pH de la solución, que tiene el sistema. De lo anterior se ve que se deduce que se puede llegar a un valor de velocidad: 2.33 seg/pH.

6.3. Incertidumbre en la medida de pH

6.3.1 Incertidumbre tipo A

La incertidumbre tipo A se calcula mediante la desviación estándar de la media de los resultados que se obtuvieron al medir repetidas veces el mismo mesurando.

Para el cálculo de las incertidumbres tipo A, tanto para pH = 4 como para pH =7, se tomaron n = 32 muestras del pH medido para cada una de las soluciones buffers.

La desviación estándar de los n resultados se calcula a partir:

$$\sigma_{pH} = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (pH_i - \overline{pH})^2} \quad \text{donde} \quad \overline{pH} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n pH_i \quad (6.1)$$

Luego, la desviación estándar de la media de los n resultados es:

$$\sigma_{\overline{pH}} = \frac{\sigma_{pH}}{\sqrt{n}} \quad (6.2)$$

A partir de lo anterior se calcula la incertidumbre tipo A de los valores relevados:

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_{pH_A} &= 0.004 && \text{para } pH = 4 \\ \hat{\sigma}_{pH_A} &= 0.002 && \text{para } pH = 7 \end{aligned}$$

6.3.2 Incertidumbre tipo B

De la ecuación de Nernst (vista en la sección 3.2.2) se obtiene una relación entre el voltaje medido por el electrodo y el pH de la solución. Dado a que todos los términos de la ecuación de Nernst son constantes, a excepción de la temperatura, la relación se puede escribir como:

$$pH = \frac{\alpha}{T} \cdot V_{out} + \frac{\beta}{T} \quad (6.3)$$

La incertidumbre asociada se expresa como:

$$\partial pH^2 = \left(\frac{V_{out}}{T}\right)^2 \cdot \partial \alpha^2 + \left(\frac{1}{T}\right)^2 \cdot \partial \beta^2 + \left(\frac{\alpha}{T}\right)^2 \cdot \partial V_{out}^2 + \left(\frac{\alpha \cdot V_{out} + \beta}{T^2}\right)^2 \cdot \partial T^2 \quad (6.4)$$

α y β son constantes que se obtienen por medio de la calibración. A partir de dos soluciones con pH conocidos (solución buffer), midiendo el voltaje del electrodo en cada caso y la temperatura a la que se encuentra cada una de las soluciones, se obtienen los valores de α y β con sus incertidumbres asociados. A continuación se muestran las ecuaciones de α y β y de sus respectivas incertidumbres. En este caso se utilizarán soluciones buffers 7 y 4.

$$\alpha = \frac{pH_7 \cdot T_7 - pH_4 \cdot T_4}{V_{out7} - V_{out4}} \quad y \quad \beta = \frac{-pH_7 \cdot T_7 \cdot V_{out4} + pH_4 \cdot T_4 \cdot V_{out7}}{V_{out7} - V_{out4}} \quad (6.5)$$

$$\begin{aligned} \partial \alpha^2 = & \left(\frac{pH_7 + pH_4}{V_{out7} - V_{out4}}\right)^2 \cdot \partial T^2 + \left(\frac{T_7 + T_4}{V_{out7} - V_{out4}}\right)^2 \cdot \partial pH_{buffer}^2 \\ & + \left(2 \cdot \frac{pH_7 \cdot T_7 + pH_4 \cdot T_4}{(V_{out7} - V_{out4})^2}\right)^2 \cdot \partial V_{out}^2 \end{aligned} \quad (6.6)$$

$$\begin{aligned} \partial \beta^2 = & \left(\frac{pH_7 \cdot V_{out4} + pH_4 \cdot V_{out7}}{V_{out7} - V_{out4}}\right)^2 \cdot \partial T^2 + \left(\frac{T_7 \cdot V_{out4} + T_4 \cdot V_{out7}}{V_{out7} - V_{out4}}\right)^2 \cdot \partial pH_{buffer}^2 \\ & + \left(\frac{(pH_7 \cdot T_7 - pH_4 \cdot T_4)(V_{out7} + V_{out4})}{(V_{out7} - V_{out4})^2}\right)^2 \cdot \partial V_{out}^2 \end{aligned} \quad (6.7)$$

Fuente	Valor	Distribución	Incertidumbre	Coficiente	Aporte (°C/mV)
T (exact)	0.50 °C	Rectangular	0.29 °C	0.0073 mV ⁻¹	2.1e-3
T (res)	0.25 °C	Rectangular	0.14 °C	0.0073 mV ⁻¹	1.0e-3
pH	0.020	Rectangular	0.012	0.40 °C/mV	4.8e-3
Vout	6.25 mV	Rectangular	3.61 mV	7.95e-4 °C/mV ²	2.87e-3
Total (δα)					6.0e-3

Tabla 6.3: Cálculo de incertidumbre de α

Fuente	Valor	Distribución	Incertidumbre	Coficiente	Aporte (°C)
T (exact)	0.50 °C	Rectangular	0.29 °C	9.2 mV ⁻¹	2.7
T (res)	0.25 °C	Rectangular	0.14 °C	9.2 mV ⁻¹	1.3
pH	0.020	Rectangular	0.012	417 °C/mV	5.0
Vout	6.25 mV	Rectangular	3.61 mV	0.83 °C/mV ²	3.0
Total(δβ)					6.6

Tabla 6.4: Cálculo de incertidumbre de β

En la Tabla 6.3 y en la Tabla 6.4 se observan los cálculos de incertidumbre

para los α y β (parámetros hallados durante la calibración). Los valores usados para hallar los coeficientes de ponderación son los mismos que para el cálculo de la incertidumbre de pH (Tabla 6.5). En la Tabla 6.5 se muestra el valor de las incertidumbres de los parámetros de medición y de las incertidumbres relevadas.

$V_{out7} = 300 \text{ mV}$	$\partial V_{out} = 2.3200/1024 \text{ mV}$
$V_{out4} = 1800 \text{ mV}$	$\partial V_{out} = 6.25 \text{ mV}$
$T_7 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	$\partial T \text{ (res)} = 0.25 \text{ }^\circ\text{C}$
$T_4 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	$\partial T \text{ (exact)} = 0.50 \text{ }^\circ\text{C}$
$\text{pH}_7 = 7 \text{ pH}$	$\partial \text{pH}_{\text{buffer}} = 0.02 \text{ pH}$
$\text{pH}_4 = 4 \text{ pH}$	
$\alpha = -0.5963 \text{ }^\circ\text{C/mV}$	$\partial \alpha = 0.006 \text{ }^\circ\text{C/mV}$
$\beta = 2265.9 \text{ }^\circ\text{C}$	$\partial \beta = 6.6 \text{ }^\circ\text{C}$

Tabla 6.5: Incertidumbres y puntos de trabajo

Con los valores hallados se procede a hallar la incertidumbre en el pH, con los coeficientes de la ecuación 6.4.

Fuente	Valor	Distribución	Incertidumbre	Coefficiente	Aporte
T (exact)	0.50 $^\circ\text{C}$	Rectangular	0.29 $^\circ\text{C}$	0.0134 $^\circ\text{C}^{-1}$	3.9e-3
T (res)	0.25 $^\circ\text{C}$	Rectangular	0.14 $^\circ\text{C}$	0.0134 $^\circ\text{C}^{-1}$	1.9e-3
Vout	6.25 mV	Rectangular	3.61 mV	0.0020 mV^{-1}	7.2e-3
$\partial \alpha$	---	Normal	6.0e-3 $^\circ\text{C/mV}$	6.0 $\text{mV}/^\circ\text{C}$	36e-3
$\partial \beta$	---	Normal	6.6 $^\circ\text{C}$	0.0034 $^\circ\text{C}^{-1}$	22e-3
Total					43e-3

Tabla 6.6: Cálculo de incertidumbre de pH para pH = 4

Fuente	Valor	Distribución	Incertidumbre	Coefficiente	Aporte
T (exact)	0.50 $^\circ\text{C}$	Rectangular	0.29 $^\circ\text{C}$	0.0235 $^\circ\text{C}^{-1}$	6.8e-3
T (res)	0.25 $^\circ\text{C}$	Rectangular	0.14 $^\circ\text{C}$	0.0235 $^\circ\text{C}^{-1}$	3.3e-3
Vout	6.25 mV	Rectangular	3.61 mV	0.0020 mV^{-1}	7.2e-3
$\partial \alpha$	---	Normal	6.0e-3 $^\circ\text{C/mV}$	1.0 $\text{mV}/^\circ\text{C}$	6.0e-3
$\partial \beta$	---	Normal	6.6 $^\circ\text{C}$	0.0034 $^\circ\text{C}^{-1}$	22e-3
Total					25e-3

Tabla 6.7: Cálculo de incertidumbre de pH para pH = 7

6.3.3 Incertidumbre combinada

A partir de las incertidumbres tipo A y B se obtiene la incertidumbre combinada como:

$$\partial \text{pH} = \sqrt{\partial \text{pH}_A^2 + \partial \text{pH}_B^2} \quad (6.8)$$

Con esto se tienen las incertidumbres para pH = 4 y para pH = 7:

$$\begin{array}{ll} \partial pH = 0.043 \text{ pH} & \text{para } pH = 4 \\ \partial pH = 0.025 \text{ pH} & \text{para } pH = 7 \end{array}$$

Utilizando un factor de cobertura $K = 2$ para obtener las incertidumbres con un nivel de confianza del 95%, se obtiene:

$$\begin{array}{ll} \partial pH = 0.086 \text{ pH} & \text{para } pH = 4 \\ \partial pH = 0.050 \text{ pH} & \text{para } pH = 7 \end{array}$$

Teniendo en cuenta el peor caso posible, cuando el pH es más bajo, se llega a la conclusión que la incertidumbre asociada a la medida de pH del dispositivo construido es:

$$\partial pH = 0.1 \text{ pH}$$

6.4. Comparación con un sensor de pH comercial

Se realizaron pruebas para comparar la performance del sensor de pH desarrollado en esta aplicación contra un sensor comercial.

El sensor de pH comercial utilizado fue el modelo EcoSense pH100 de la marca YSI Environmental. Este sensor tiene una precisión de $\pm 0.1\%$, ± 2 lsb y una resolución de 0.01pH. El rango de medida es de -2.00 a 16.00 pH, lo que hace que el instrumento tenga una precisión de 0.036 pH.

Para las pruebas de pH se dejaron ambos sensores siempre energizados con el fin de probar los dos sistemas bajo las mismas condiciones.

6.4.1 Validación del sensor de pH realizado

Para esta prueba se utilizaron dos electrodos diferentes. Para la aplicación desarrollada por el presente proyecto se utilizó el electrodo InLab413 suministrado por el cliente; y para el sensor comercial EcoSense pH100 el electrodo utilizado fue el que venía incluido con el sensor.

Para realizar el ensayo primero se calibraron ambos sensores. Para esto se pusieron los dos electrodos juntos en el recipiente con la solución buffer 7 y se dejó que tomaran la medida. Luego de que ambos completaran esta etapa, se pasaron a solución buffer 4 y se procedió de la misma forma.

El ensayo se realizó colocando ambos sensores en el mismo recipiente con solución buffer 7. Se dejó que se estabilizaran las medidas y se relevó lo obtenido por ellos. Luego a la solución buffer 7 se le comenzó a mezclar de a poco solución buffer 4, se esperó a que se homogeneizara la solución y que se estabilizara las medidas de pH antes de relevarlas. Por último se cambió a solución buffer 4 y se realizó el mismo procedimiento.

En la gráfica de la Figura 6.12 se muestran los resultados obtenidos con sus correspondientes incertidumbres.

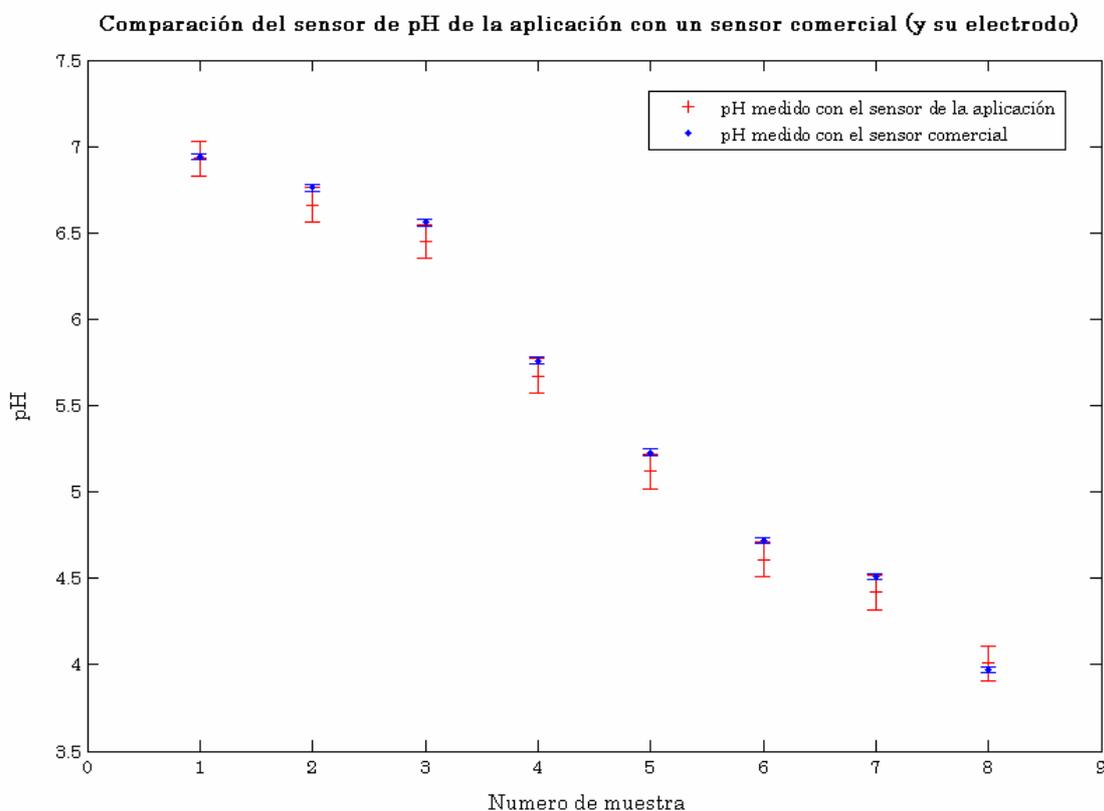


Figura 6.12: Comparación del sensor de pH de la aplicación con un sensor comercial (y su electrodo)

Como se observa en la gráfica las medidas del sensor comercial con su intervalo de confianza se solapan con las medidas relevadas por el sensor de este proyecto, aunque en algunos casos este solapamiento es mínimo. Para descartar si las diferencias son debido a la electrónica realizada o al electrodo utilizado se hizo otro ensayo utilizando un mismo electrodo, como se explicará en esta sección 6.4.2.

6.4.2 Validación de la electrónica realizada.

Para este ensayo se utilizó el mismo electrodo para los dos sensores. El procedimiento fue análogo al de la sección 6.4.1, con la diferencia que en vez de tomar la medida al mismo tiempo se espera a tomar una medida con un instrumento y luego cambiar el conector BNC de sensor, sin sacar el electrodo de la solución a medir.

Un detalle a considerar fue que el electrodo de pH InLab413 tiene un conector de temperatura que no calza en el sensor comercial que se tenía. Para medir la temperatura lo que se hizo fue conectar el sensor de temperatura que venía con el electrodo YSI para relevar con este la temperatura ambiente. Esta temperatura puede considerarse que es la misma que la medida por el sensor de este proyecto ya que ambos se encontraban en contacto con el mismo ambiente.

La grafica de la Figura 6.13 muestra los resultados obtenidos.

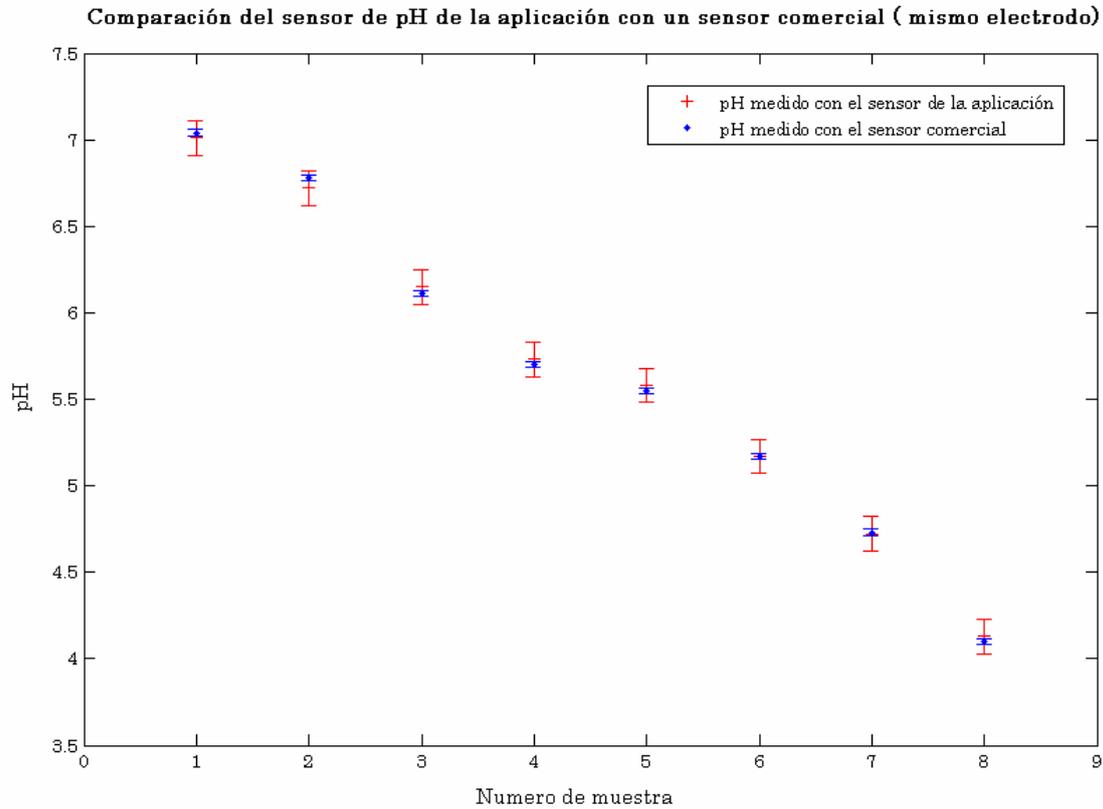


Figura 6.13: Comparación del sensor de pH de la aplicación con un sensor comercial (y su electrodo)

En este experimento se observa que los valores se encuentran solapados en su totalidad, (la distancia máxima entre dos medidas de pH es de 0.06.)

6.5. Pruebas en planta

El prototipo fue probado en el proceso de pelambre (ribera) dentro la curtiembre. Existieron dos períodos de prueba independientes. El primero fue llevado a cabo en el mes de julio durante dos días y la segunda instancia se realizó en el mes de octubre en un lapso de una semana.

En la primera prueba se instaló el sistema midiendo temperatura en uno de los fulones. En ese punto del proyecto el prototipo contaba únicamente con sensor de temperatura. La interfaz con el usuario estaba operativa lo que permitió registrar los datos.

Al comenzar las pruebas de julio se tuvieron problemas de montaje, la conexión entre el Mote y el sensor era débil, por lo que los movimientos del fulón provocaron un falso contacto entre los conectores. Esto ocasionó que al cabo de unas horas de funcionamiento se dejaron de obtener medidas de temperatura. Luego de encontrado el problema se fijó la conexión de forma de que esto no ocurriese y se

repitió la prueba unos días después, con una duración de 42 horas.

En las pruebas de octubre, y luego de haber implementado el sensor de pH, se realizó una nueva prueba de mayor duración. Debido a razones que serán explicadas en la sección 7.4 no se montó el sensor de pH en el fulón, sino que se realizó un ensayo en planta que consistió en una calibración del instrumento y la medición de una muestra tomada del proceso. En este caso, para la temperatura, el período de prueba fue de 108 horas de continuo.

6.5.1 Comunicación

En el análisis de los datos de la primera prueba se observa una alta tasa de pérdida de paquetes, de 37,40%. Observando en detalle los datos se vio que existían intervalos de horas en las cuales no se registraban datos. Una explicación para este problema es el apagado involuntario tanto del muestreo de datos como de la aplicación (por apagar el PC o cerrar la aplicación), lo que imposibilita el registro de datos.

Para tener un mayor conocimiento de lo que ocurre con el sistema, en la segunda prueba se registró continuamente el estado (encendido, apagado y período seleccionado) de la aplicación. De forma tal de poder realizar un análisis de los datos más preciso.

Utilizando los datos de la segunda prueba, y contando con la información del estado de la aplicación, se obtuvo un nuevo cálculo de la tasa de pérdidas de paquetes. Este nuevo análisis arrojó una tasa de pérdidas de 12,82%. Este valor es razonable para esta aplicación, y que se encuentra en un ambiente donde las interferencias electromagnéticas son considerables.

En ambos experimentos se ensayo con el prototipo montado en el fulón y el nodo base junto a un PC que utilizan los operarios. La distancia entre ambos es de 5 metros pero como el fulón esta girando, aproximadamente 15% del tiempo no hay línea de vista entre los 2 nodos. Como ya fue mencionado anteriormente el fulón es de madera y el armario donde se encuentra el PC (y el nodo base) es también. La caja estanca donde se encuentra el mote es plástica.

La configuración de la comunicación (frecuencia, potencia, etc.) fue la implementada por defecto por los componentes de TinyOS.

6.5.2 Sensor de temperatura

En la gráfica de la Figura 6.14 se muestra la temperatura del proceso de pelambre durante 40 horas. Consultando con el cliente sobre el comportamiento de la gráfica de la Figura 6.14, este consideró razonable lo obtenido. Identificó que durante las primeras 10 horas se estaba en la parte final del proceso de pelambre. Y luego se dejó enfriar el fulón a temperatura ambiente durante unas 20 horas. El último tramo es el comienzo de otro proceso, en donde se ponen los cueros en frío para su conservación. Cabe aclarar que en los requisitos se solicitó una temperatura mínima de 15 °C, aunque el sensor de temperatura puede medir igual hasta los 10 °C que se deja a enfriar el fulón.

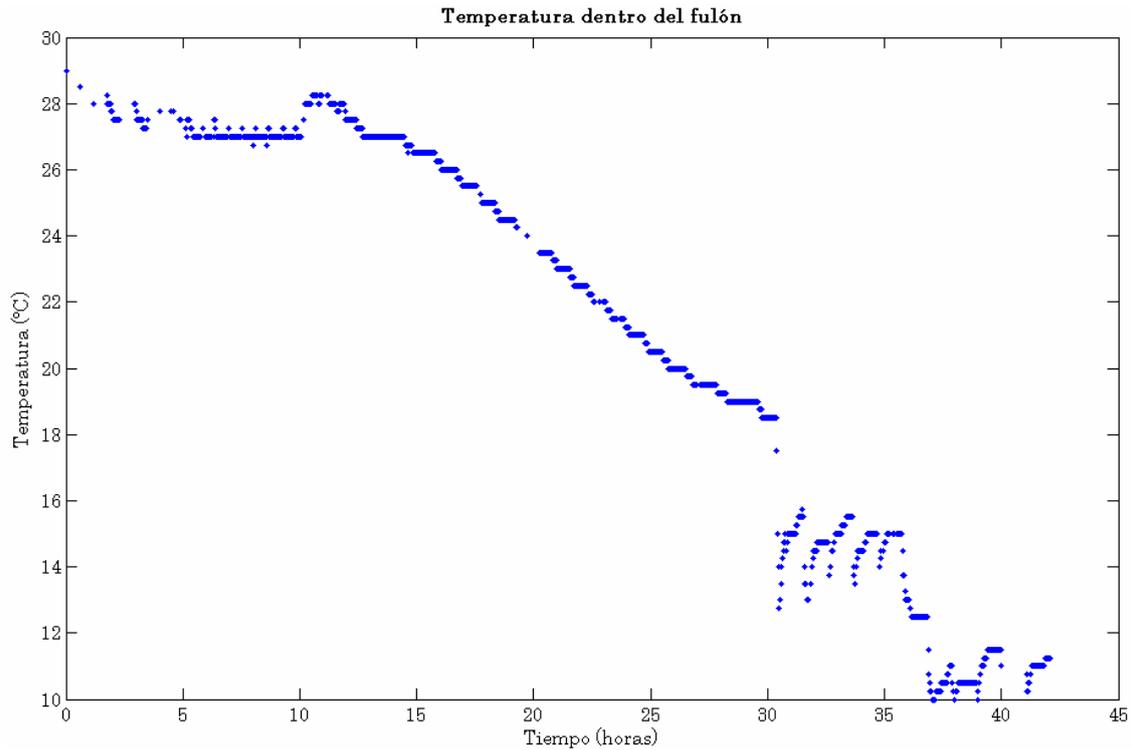


Figura 6.14: Gráfica de temperatura en el interior del fulón en función del tiempo

Un análisis de este tipo es una de las principales motivaciones por las que el cliente decidió financiar el proyecto. Poder tener una trazabilidad del proceso es uno de los principales intereses sobre la aplicación que tiene el cliente.

6.5.3 Sensor de pH

Para obtener las medidas de pH el cliente actualmente toma una muestra de la solución dentro del fulón para luego enviarla al laboratorio. Para poder probar el nodo sensor con el sensor de pH se realizó una calibración en planta y luego se procedió a medir la muestra que era tomada del fulón y compararla con lo que se obtiene con los instrumentos del cliente. En la se muestra el ensayo realizado. El sensor de pH utilizado por el cliente fue el modelo pH 300 de la marca Oakton, con una incertidumbre en la medida de pH de ± 0.01 [12]. Se obtuvo un resultado satisfactorio de esta prueba teniendo en cuenta las incertidumbres asociadas a cada medida.



Figura 6.15: Ensayo de medida de pH en planta

6.5.4 Voltaje de la batería

Con los datos recabados en la segunda prueba se realiza una verificación parcial de la estimación de consumo.

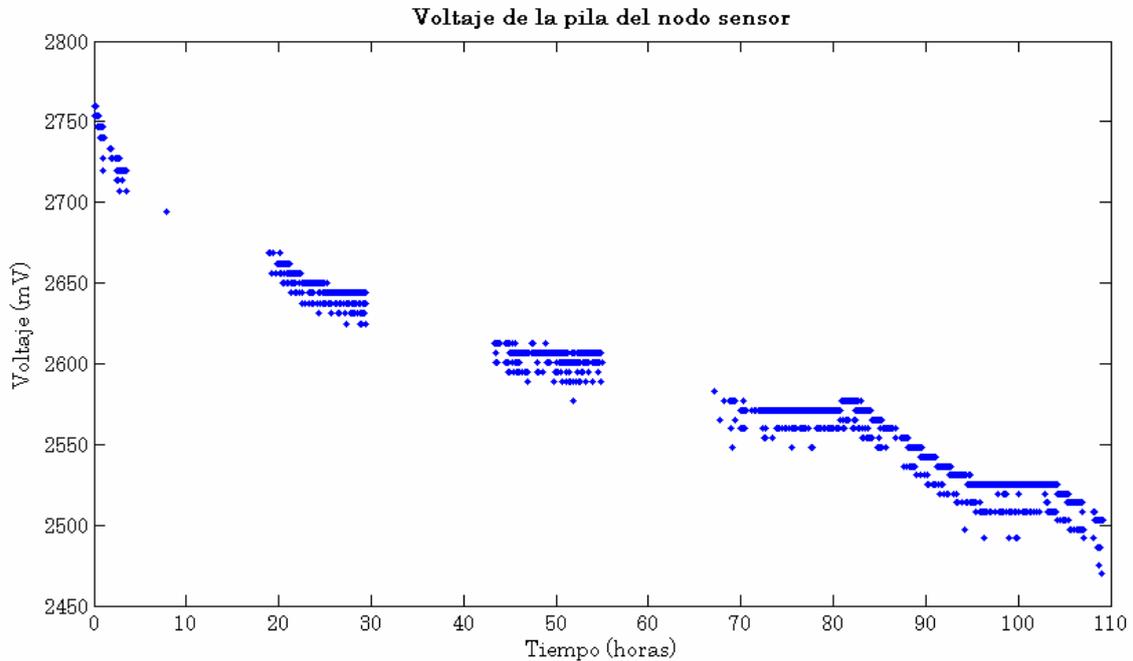


Figura 6.16: Grafica de voltaje en la pila del nodo sensor en función del tiempo

Se observa en el período total de las 108 horas el voltaje de la batería cayó desde los 2754 mV a 2503 mV. Pero no es posible verificar el tiempo de vida estimado.

La caída de tensión en la pila no es lineal con el tiempo y la cantidad de datos recabados no es suficiente para ajustar la curva de descarga de la pila.

En la gráfica de la Figura 6.16 se ven intervalos en donde no aparecen valores de voltaje de la pila. Observando el log del estado del programa se ve que durante estos intervalos de tiempo la aplicación de usuario estaba apagada. Esto quiere decir que no se registraron los valores enviados por el nodo sensor. Cabe aclarar que el nodo sensor estuvo permanentemente midiendo cada dos minutos incluso en los intervalos de tiempo en que la aplicación de usuario estaba apagada.

Para observar hasta que voltaje era capaz de funcionar el nodo sensor se realizó una prueba dejándolo encendido, midiendo temperatura y pH, y guardando los datos que llegaban al nodo base (esta prueba no fue hecha en planta) A partir de la última medida registrada, observando el voltaje en las pilas que se tenía en la misma, se pudo ver que el nodo sensor era capaz de funcionar hasta los 1.9 V. En este caso fue el mote del nodo sensor quién dejó de trabajar con una tensión de alimentación de 1.9V por lo que se cumple el requisito de que sea el mote (y no los sensores) quien limite la tensión mínima de alimentación del sistema.

Capítulo 7

Conclusiones

En este capítulo se expondrán los objetivos cumplidos y aquellos que no pudieron realizarse. También se comentarán y evaluarán los resultados obtenidos durante el proyecto. Además se presentarán los principales problemas encontrados, como fueron resueltos o porque no pudieron serlo y por último se expondrán algunas ideas de posibles mejoras para futuro.

7.1. Evaluación de los objetivos

El principal objetivo del presente proyecto era lograr obtener un prototipo, que fuese capaz de medir temperatura y pH dentro de un ambiente industrial.

Se logró un sistema para medir temperatura y pH inalámbrico. Esto permite su instalación en una aplicación que requiere de las medidas sin tener que cablearse los sensores.

En el laboratorio se probó el sistema en su conjunto, es decir se logró obtener remotamente en la pantalla de un PC la temperatura y el pH medidos por el nodo sensor. Se obtuvieron resultados aceptables tanto en la comunicación de la red como en las medidas relevadas por los sensores, particularmente del sensor de pH (sección 6.4). Se lograron ajustar a través de pruebas realizadas en el laboratorio los parámetros del sistema (sección 6.2). Todo esto permitió pasar a la siguiente etapa de pruebas en planta.

En la planta industrial, se probó durante una semana el sistema de transmisión inalámbrica junto con la medida de temperatura, cumpliéndose los requerimientos tanto en la tasa de paquetes perdidos, como en la precisión de la medida de temperatura. Luego de estos ensayos se recibieron las opiniones del cliente, el cual estuvo conforme con el desempeño del sistema y expresando su deseo de extender las pruebas para agregar mas nodos sensores al sistema.

El sensor de pH se probó en planta pero no midiendo en el proceso. Se realizó una calibración y se tomaron medidas de muestras extraídas del fulón. El sensor de pH no fue montado en el fulón debido a que después de consultar con el cliente la viabilidad de un sensor de pH en el fulón, se llegó a la conclusión de que el costo-beneficio era demasiado alto, debido al mantenimiento requerido por el mismo.

El costo del prototipo realizado se aproxima a los U\$S 1000 en materiales. Esto contrasta con el costo de seguir agregando nodos, que ronda los U\$S 400 por nodo (dependiendo del electrodo utilizado para el sensor de pH). Además la escalabilidad del mismo, permite que el costo de horas hombre para el aumento de

nodos sea mucho menor, porque el desarrollo para un nodo sensor es extensible a los demás.

Para los resultados conseguidos, se tomo en cuenta, tanto los requerimientos que impuso el cliente, como los propios para hacer el proyecto viable, en la Tabla 7.1 se observan los mismos.

Sistema de transmisión confiable	
Tasa de pérdidas de paquetes menores 15%	13%
Operación del sistema	
Modificación de parámetros en línea	OK
Visualización	OK
Registro de medidas	OK
Medidas	
Rango de pH: $3 \leq \text{pH} \leq 7$	$2.5 \leq \text{pH} \leq 8$
Incertidumbre de pH: $\text{pH} \leq \pm 0.1$	± 0.1 pH (resolución = 0.1)
Rango de temperatura: $15 \leq T \leq 45$ °C	$0 \leq T \leq 70$ °C
Incertidumbre de temperatura: $\leq \pm 0.5$ °C	$\leq \pm 0.5$ °C (resolución = 0.25)
Autonomía	
Autonomía del nodo sensor: 2 meses	Estimación mayor a 2 meses (comprobación experimental parcial)
Pruebas en planta	
Temperatura	5 días ininterrumpidos
PH	Calibración y toma de medidas de muestras del proceso
Escalabilidad	
Fácil aumento en la cantidad de nodos	OK
Costo	
Costo del prototipo ≤ 1500 U\$S	Inferior a U\$S 1000

Tabla 7.1: Requerimientos vs. Resultados

Las medidas se muestran en un PC que también guarda los datos para su posterior procesamiento. Además posibilita modificar parámetros del sistema (tiempos de muestreo de pH y de temperatura, y calibración de pH). Las medidas de temperatura y pH pueden ser tomadas en intervalos definidos por el usuario y pueden ser cambiados según los requerimientos del momento.

El nodo sensor comunica las medidas inalámbricamente. La cantidad máxima de nodos sensores esta limitado en 255 (limitado por el protocolo de transmisión), trabajando todos con el mismo programa (la única diferencia se encuentra en la identificación del Mote).

Las incertidumbres en las medidas están en los rangos requeridos para la aplicación.

7.2. Principales aportes

7.2.1 Para el cliente

Se logró obtener un sistema para medir temperatura del proceso de tratamiento de las pieles sin detener el proceso. Esto permite tener información en tiempo real de las variables importantes del proceso. Además se mejora la trazabilidad del proceso y el control de la operativa del mismo.

Asimismo, este sistema permite cambiar el procedimiento con que relevan las medidas que consistía en detener el proceso y tomar una muestra.

El sistema en su conjunto ayuda a automatizar una parte del proceso, mejorándolo y eliminando así posibles errores de operación. Además automatiza el proceso de registro de datos para su posterior análisis.

7.2.2 Para la Universidad

La integración de las medidas de pH y temperatura a los Motes. Logrando su utilización en una mayor variedad de aplicaciones.

Se logro aumentar el tiempo de vida de un electrodo implementando una compensación automática de la deriva.

Prueba del sistema en un ambiente industrial. Análisis de los datos en una aplicación que no se había probado antes.

Prueba de una nueva plataforma hardware. Del modelo de Mote (IRIS) usado en este proyecto no había experiencia en facultad.

7.3. Principales problemas encontrados

El primer problema encontrado fue que se estimaron mal los tiempos para la importación de los componentes. En principio ese trabajo iba a ser efectuado por el cliente, pero debido al poco conocimiento que tenía sobre los componentes y equipos que eran pedidos se terminó involucrando el grupo de proyecto mucho más de lo esperado. También hubo muchos tiempos muertos debido a que las importaciones llevaron considerablemente más tiempo de lo estimado, se llegó al punto de tener que esperar por importaciones para poder seguir avanzando. Este inconveniente se solucionó parcialmente reordenando las tareas, ya que se trató de seguir con otras partes del proyecto que no necesitaban esos materiales. Este problema fue mayor en la importación de los Motes (al inicio del proyecto) ya que se tuvo el agregado de tener que efectuar las compras a través del cliente. Para otros materiales, más económicos, las compras se efectuaron directamente.

La plataforma hardware utilizada (IRIS) era un desarrollo nuevo de Crossbow, por esta razón no se encontraba información de aplicaciones implementadas por otras organizaciones o personas. Además debido al carácter

comercial de la misma Crossbow no brindaba información sobre esquemáticos del PCB.

Debido a que TinyOS es un sistema operativo en constante desarrollo y se estaba usando una plataforma hardware nueva (desarrollo de Crossbow del año 2007) existieron algunos problemas en la programación. A pesar de que no se encontraron errores en el código de los módulos y funciones dados por TinyOS si existían errores u omisiones en la documentación de estos.

En el diseño del circuito de pH existieron varios problemas por lo que hubo que fabricar dos prototipos. El primer prototipo de PCB no cumplía con los requerimientos de modo común en la entrada del amplificador de instrumentación. Además el prototipo era muy sensible a interferencias electromagnéticas. Para esto se colocaron capacitores de filtrado y un filtro a la salida del circuito. Para el diseño final estos aspectos quedaron solucionados. A pesar de no eliminar completamente el ruido se logró bajar lo suficiente para que fuera del mismo orden que el error de resolución de la entrada del ADC.

7.4. Puntos a mejorar

Se estimó un tiempo de vida de más de 2 meses. Como fue presentado en el capítulo de validación, el componente que más afectaba al consumo era la radio (y en menor medida el microcontrolador). El apagado de la misma durante más tiempo disminuía el consumo pero también la performance de la red.

Desarrollando protocolos de comunicación específicos para la aplicación, se podría tratar de disminuir el tiempo de encendido de la radio.

Otra forma de disminuir el tiempo de encendido de la radio es eliminando la comunicación del nodo base al nodo sensor. Es decir, que la configuración de los nodos (inicio de calibración y periodo de muestreo) se hagan por hardware, botón y dip switches. Para el caso del comando de inicio de calibración esto sería realmente útil ya que el operador necesita sacar el nodo sensor del fulón. Pero para el periodo de muestreo esto podría ser inconveniente de necesitarse variar el periodo con frecuencia.

La electrónica del sensor de pH sigue siendo sensible a interferencias electromagnéticas. Durante la etapa de pruebas se comprobó que estas eran inducidas en el circuito a través del cable del electrodo de pH. Acortando el cable se puede disminuir la incidencia del ruido en el sensor de pH. Cabe aclarar que esto no se realizó debido a que el electrodo utilizado fue prestado por el cliente. Para mitigar los efectos de las interferencias electromagnéticas se colocaron filtros en ciertos puntos del circuito de medida de pH. Esto hizo que el encendido se enlenteciera, aunque para los tiempos de la aplicación aún siguen siendo muy bajos. De conseguirse mejores inmunidades frente al ruido entonces alguno de estos filtros podrían eliminarse disminuyendo el tiempo de encendido.

El sensor de pH implementa una compensación de la caída en la deriva del electrodo, de forma de usar el máximo rango posible a la salida del mismo. Además

existe una pequeña variación en la pendiente de la curva de voltaje (pH) lo hace que al cabo de un tiempo prolongado el rango de salida del sensor sea menor. De querer resoluciones mayores y tiempos de vida aún más grandes se necesitaría implementar una compensación de la caída de esta pendiente. En un circuito similar al de esta aplicación, esto se podría realizar colocando un potenciómetro digital en la resistencia que ajusta la ganancia del operacional de instrumentación.

No se logró probar el sensor de pH en el proceso, como si se probó el sensor de temperatura. Luego de consultar al cliente sobre la operativa del proceso se llegó a la conclusión que un sensor de pH (con electrodo de vidrio) inserto en el fulón iba a traer más complicaciones que mejoras. Esto se debe sobre todo a los cuidados que necesita tanto de calibración como de mantenimiento y la imposibilidad de realizarlos con el sensor montado. Una posible solución a esto sería un electrodo de pH ISFET. Como es mencionado en el anexo no necesita calibración y habría que estudiar el mantenimiento del mismo para las sustancias que hay dentro del fulón.

Anexo I

Electrodo ISFET

Las referencias [13] y [14] se utilizaron a lo largo de esta sección

I.1. Generalidades

Los electrodos ISFET miden, por medio de transistores, la perturbación que sufre el campo eléctrico como consecuencia de la presencia de determinados iones en la sustancia a medir. Esta tecnología es similar a la del transistor MOSFET (del inglés Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor). Esto se muestra esquemáticamente en la Figura I.1.

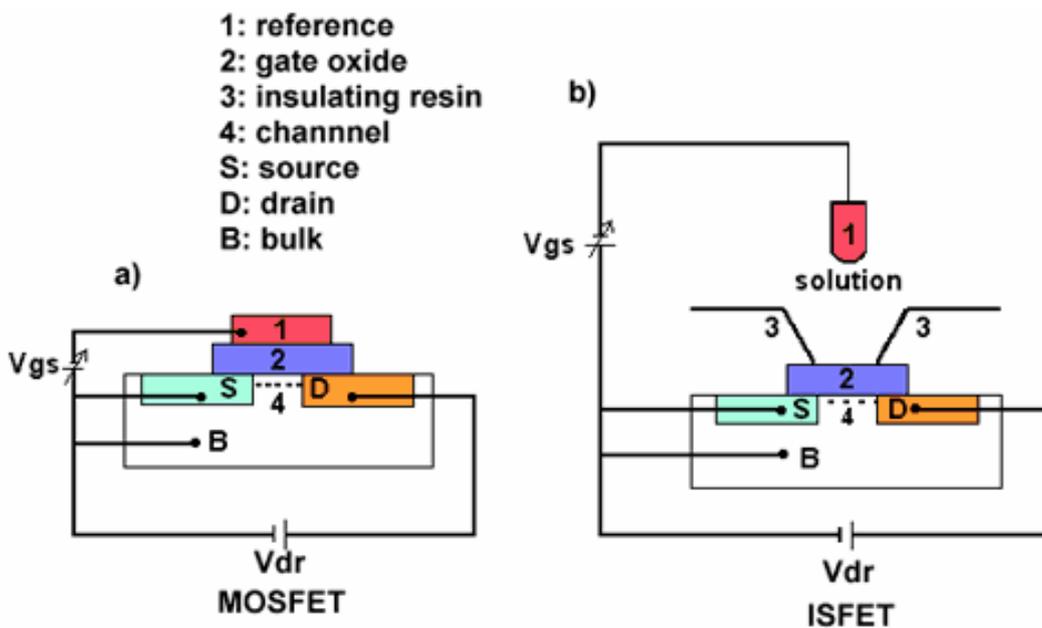


Figura I.1: Transistor MOSFET (a). Electrodo ISFET (b) ¹⁶

En el electrodo ISFET se ha sustituido el metal del gate por la solución a analizar. Además el óxido de la compuerta ya no es de SiO_2 sino que es un óxido de Si_3Na_4 , porque tiene mejor sensibilidad al pH y peor sensibilidad a iones de Na^+ y K^+ . La sensibilidad de estos dispositivos es del entorno de 55 mV/pH.

¹⁶ Figura extraída de <http://csrg.ch.pw.edu.pl/tutorials/isfet/>

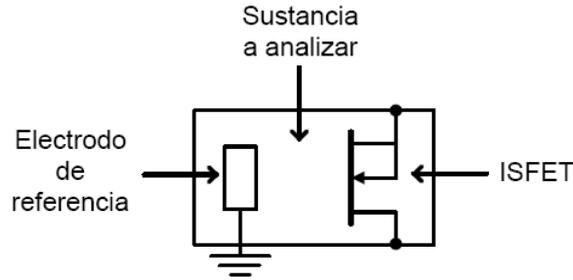


Figura I.2: Modelo del electrodo ISFET

I.2. Ecuación característica

Del transistor MOSFET se obtiene la ecuación de la corriente de canal en modo triodo:

$$I_d = \frac{\mu \cdot C_{ox} \cdot W}{L} \cdot \left((v_{gs} - V_t) \cdot v_{ds} - \frac{v_{ds}^2}{2} \right) \quad \text{si } v_{ds} < v_{gs} - V_t \quad (I.1)$$

μ , C_{ox} , W y L : Constantes características del transistor.

v_{gs} : Diferencia de potencial entre gate y source.

v_{ds} : Diferencia de potencial entre drain y source.

V_t : Voltaje umbral

El voltaje umbral V_t es el valor de V_{gs} en el cual un número suficiente de electrones móviles se acumula en la región del canal para formar un canal conductor. Este parámetro es sumamente importante porque es el que tiene la sensibilidad en función del pH para un electrodo del tipo ISFET.

De la teoría de centros activos se observa que el voltaje umbral puede escribirse como:

$$V_t = E_{ref} + \psi_0 - \chi^{sol} + \Phi_{Si} + \frac{Q_{ox} + Q_{SS}}{C_{ox}} + \frac{Q_B}{C_{ox}} - 2\psi_B \quad (I.2)$$

Los términos anteriores, de la ecuación del voltaje de umbral son, a excepción de ψ_0 , todos constantes dependientes de la solución en que se está inmerso y de la composición del ISFET. La relación de ψ_0 con el pH se encuentra en la siguiente ecuación:

$$\psi_0 = 2.303 \cdot \frac{k \cdot T}{q} \cdot \frac{\beta}{\beta + 1} \cdot (pH_{pzc} - pH) \quad (I.3)$$

pH_{pzc} : constante en la que el pH en el punto en el que la carga neta debido a la carga neta de los centros activos en la superficie es nula

β : constante que depende de la capacidad de reacción de los centros activos del óxido.

q: carga del electrón.
k: constante de Boltzman
T: temperatura en Kelvin.

Con las ecuaciones anteriores, calibrando el sistema con muestras buffer, se puede empíricamente determinar el valor de las constantes, a priori desconocidas, para lograr tener un dispositivo de medida basado en ISFET.

I.3. Circuito de medida para determinar el pH

El método que se utiliza es llamado método de medidas a corriente constante. Este consiste en realizar medidas del potencial de puerta V_{gs} , manteniendo constante la corriente I_d y el potencial V_{ds} .

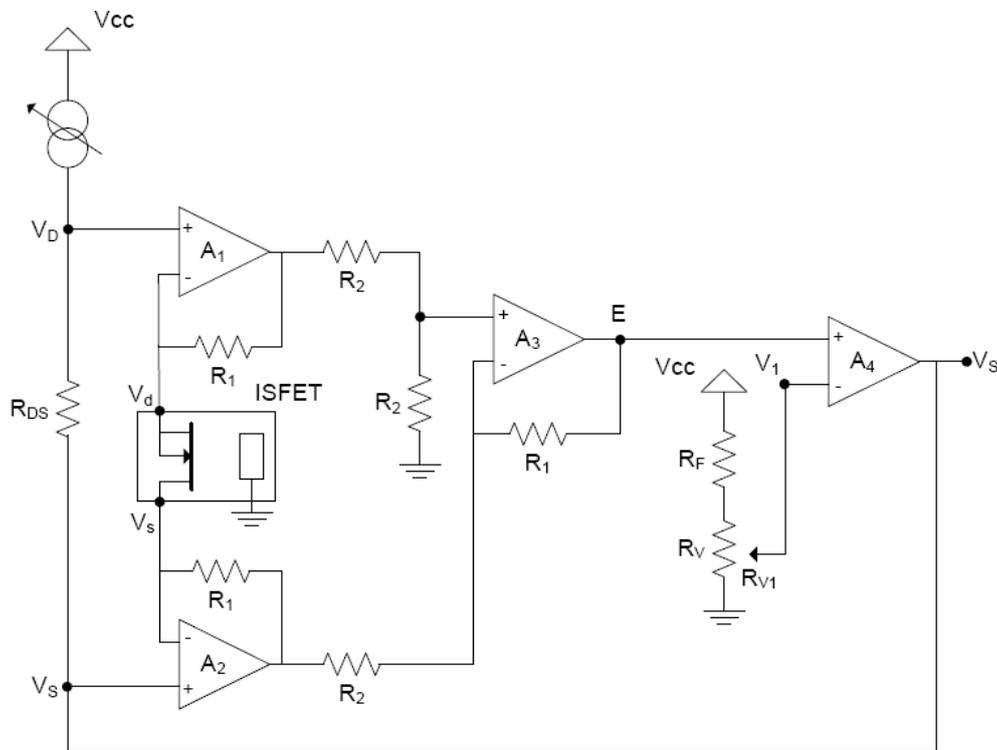


Figura I.3: Esquema de medida a corriente constante

La curva de sensibilidad es:

$$S = \frac{\partial V_{gs}}{\partial pH} = \frac{\partial V_t}{\partial pH} = \frac{\partial \psi_0}{\partial pH} \quad (I.4)$$

De la ecuación anterior se aprecia que la sensibilidad viene dada directamente por una tensión.

I.4. Aplicación Práctica

Con el diseño de la Figura I.4 es posible determinar el voltaje de pH.

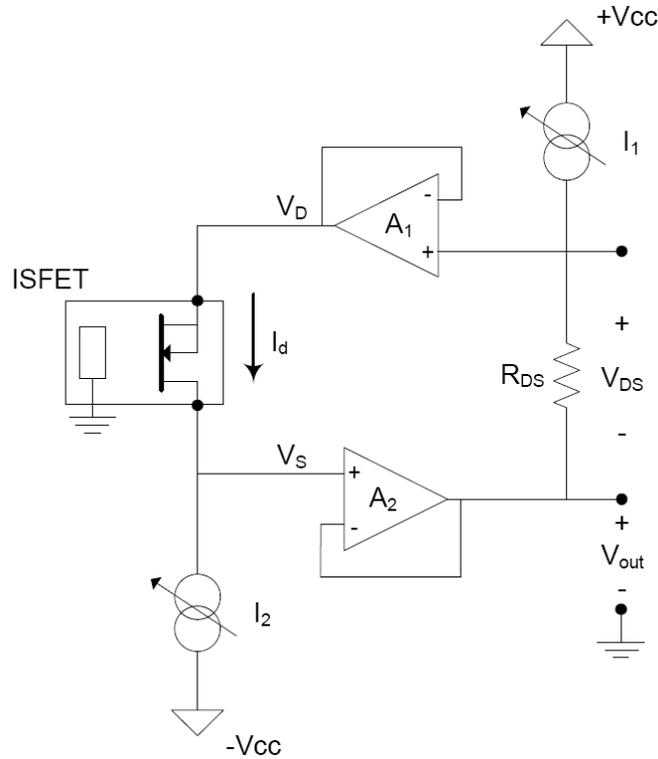


Figura I.4: Esquema para la medición del voltaje de pH

Donde los valores de $I_2 = 100\mu\text{A}$, $V_{DS} = 500\text{mV}$ y $R_{DS} = 5\text{k}\Omega$.

$$I_d = \beta \cdot \left((v_{gs} - V_t) \cdot v_{ds} - \frac{v_{ds}^2}{2} \right) \quad (\text{I.5})$$

$$v_{gs} = -v_S = -V_{out} \quad (\text{I.6})$$

$$V_{out} = -\frac{V_t}{\beta} - \frac{1}{\beta} \cdot \left(\frac{I_d}{v_{ds}} + \frac{v_{ds}}{2} \right) \quad (\text{I.7})$$

$$V_{out} = -\frac{V_t}{\beta} - \frac{1}{\beta} \cdot \left(\frac{I_2}{I_1 R_{DS}} + \frac{I_1 R_{DS}}{2} \right) \quad (\text{I.8})$$

De la ecuación anterior se puede decir que la tensión de salida es directamente proporcional a la tensión de umbral y por ende al pH, cuando los ISFET trabajan en zona lineal, puesto que los demás parámetros son constantes.

Anexo II

Rutina principal del nodo sensor

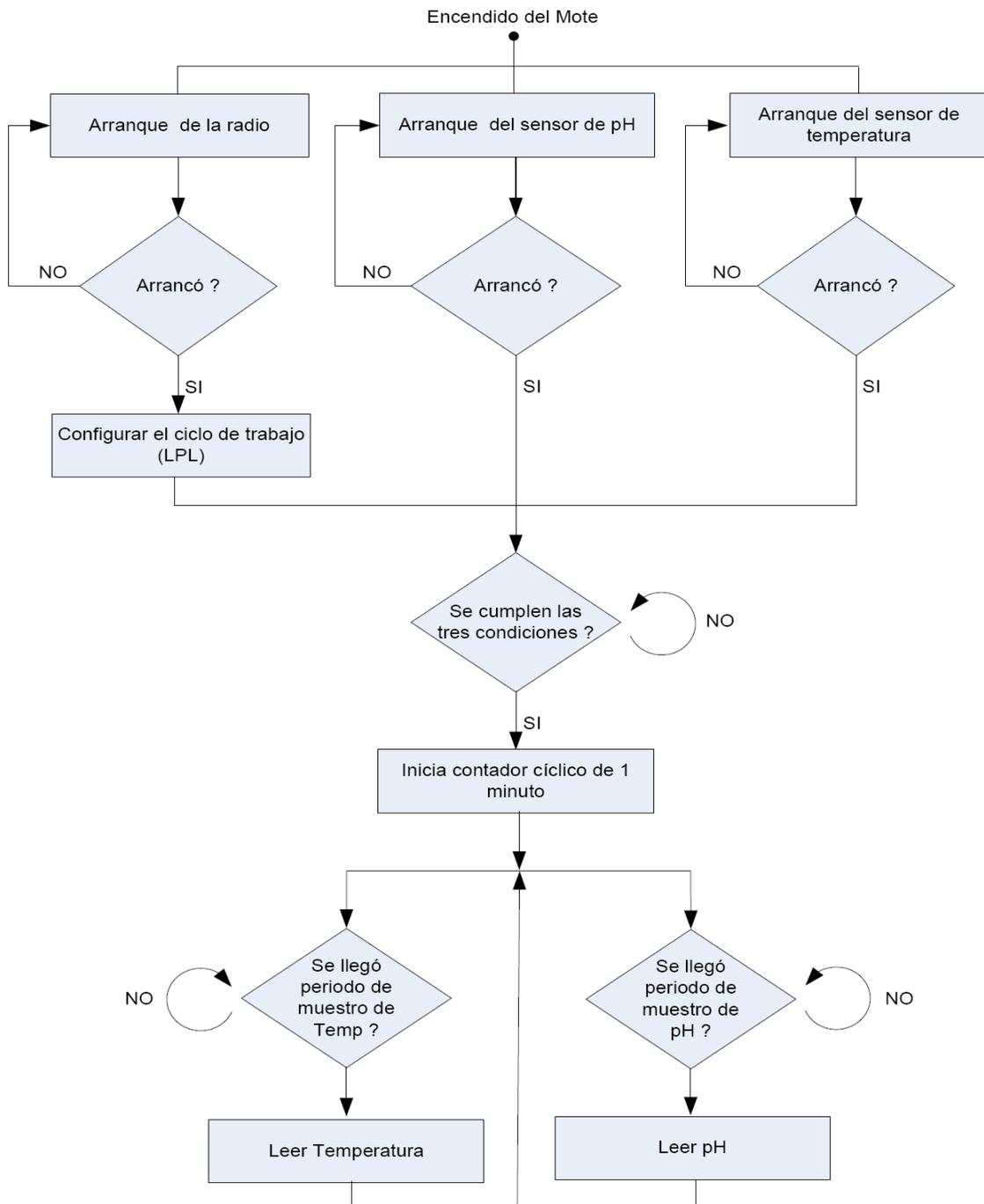


Figura II.1: Diagrama de la rutina principal de los nodos sensores

Anexo III

Protocolo I2C

La referencia [15] se utilizó a lo largo de esta sección

El bus I2C es un protocolo maestro-esclavo diseñado por Philips para facilitar la comunicación entre microprocesadores y sus periféricos. En el bus I2C todos los dispositivos comparten el canal de comunicaciones.

El bus I2C utiliza dos líneas para una comunicación establecer bidireccional half-duplex y una tercera línea que utiliza como referencia. La comunicación de datos del bus I2C es en serial y sincrónica. Una de las señales del bus marca el tiempo que sincronizan al sistema (SCL) y la otra se utiliza para intercambiar datos (SDA).

III.1. Conexionado para la comunicación I2C

En la Figura III.1 se muestra un esquema del bus I2C. Las líneas SDA y SCL son del tipo “open-drain” por lo que se deben colocar resistencias de “pull-up”. Esto permite conectar al bus en paralelo múltiples dispositivos. La cantidad máxima de dispositivos que se puede poner en el bus es de 128 debido a la cantidad de bits utilizados para la dirección del dispositivo (7 bits). También existe un protocolo I2C con direccionamiento de 10 bits que es ínter operable con el anterior, pero que no se encuentra actualmente ampliamente utilizado.

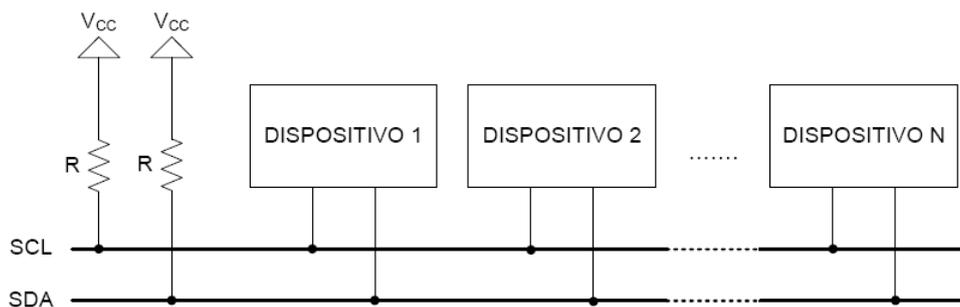


Figura III.1: Diagrama de conexionado de una comunicación I2C

III.2. Funcionamiento del protocolo I2C

El bus se encuentra libre cuando ambas señales están en nivel lógico alto. Solo los dispositivos maestros están habilitados para iniciar la comunicación. Con

el bus en estado libre cualquier dispositivo maestro puede ocuparlo, estableciendo la condición de inicio (start) como se muestra en la Figura III.2.

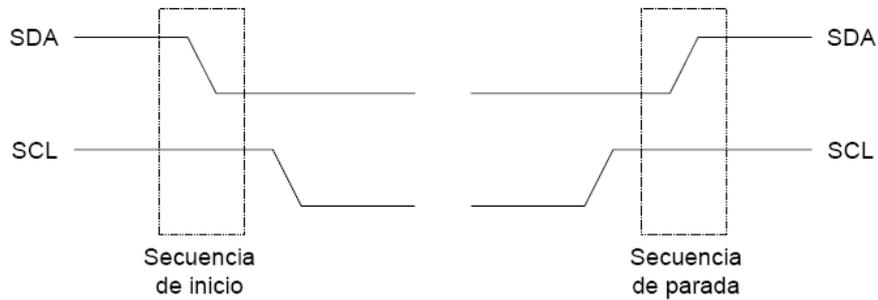


Figura III.2: Secuencias de inicio y parada del protocolo I2C

El primer byte que se transmite luego de la condición de inicio contiene siete bits que componen la dirección del dispositivo que se desea seleccionar, y un octavo bit que corresponde a la operación que se quiere realizar con él, lectura o escritura (R/W). Si el dispositivo que tiene esa dirección está presente en el bus contesta con un pulso bajo de un tiempo de bit como reconocimiento (ACK), ubicado inmediatamente luego del octavo bit que ha enviado el dispositivo maestro y se establece la comunicación. Si por algún motivo no se pudo procesar la transmisión, ya sea porque no se encuentra el receptor, o que por algún motivo no pueda procesar la transferencia, se envía un pulso alto de un tiempo de bit como no-reconocimiento (NACK). Esta secuencia se puede apreciar en la Figura III.3.

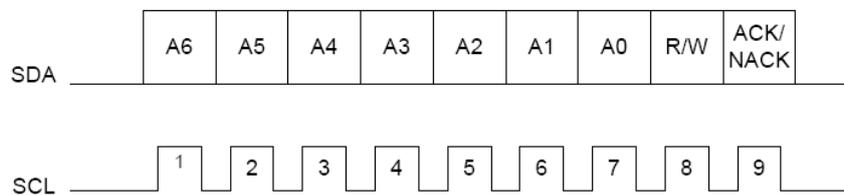


Figura III.3: Secuencia de bits al comienzo de la comunicación

Si el bit de lectura/escritura fue puesto en el nivel lógico bajo (escritura), el dispositivo maestro envía datos al dispositivo esclavo, siempre que continúe recibiendo señales de reconocimiento. La comunicación concluye estableciendo la secuencia de parada que se muestra en la Figura III.2.

Cuando el bit de lectura/escritura se coloca en el nivel lógico alto (lectura), el dispositivo maestro genera pulsos de reloj para que el esclavo pueda enviar los datos. Luego de cada byte recibido el dispositivo maestro genera un pulso de reconocimiento. Cuando ya no necesita recibir nada más del dispositivo esclavo, el maestro envía un bit NACK inmediatamente antes de la generar la condición de parada.

Anexo IV

Complementos para los sensores

IV.1. Configuración integrado DS620

Los dos modos de operación, “1-shot mode” (conversión única) y conversiones continuas, así como los parámetros presentados en la Tabla IV.3, son modificables en tiempo de ejecución. Para esto se envían escrituras (I2C) al dispositivo a direcciones de memoria específicas, como se muestra en la Tabla IV.3.

A0	TH MSB
A1	TH LSB
A2	TL MSB
A3	TL LSB
A4	Definida por usuario
A5	Definida por usuario
A6	Definida por usuario
A7	Definida por usuario
A8	No definida
A9	No definida
AA	Temperatura MSB
AB	Temperatura LSB
AC	Configuración MSB
AD	Configuración LSB

Tabla IV.1: Tabla de mapeo de memoria del integrado DS620

Como se observa en la Tabla IV.1 para configurar el dispositivo se necesitan escribir los registros AC y AD (hex). En la Tabla IV.2 se muestra como utilizar el registro de configuración y en la Tabla IV.3 se explica a que corresponde cada bit.

MS Byte	<i>Bit 15</i>	<i>Bit 14</i>	<i>Bit 13</i>	<i>Bit 12</i>	<i>Bit 11</i>	<i>Bit 10</i>	<i>Bit 9</i>	<i>Bit 8</i>
	DONE	NVB	THF	TLF	R1	R0	AUTO	1SHOT
LS Byte	<i>Bit 7</i>	<i>Bit 6</i>	<i>Bit 5</i>	<i>Bit 4</i>	<i>Bit 3</i>	<i>Bit 2</i>	<i>Bit 1</i>	<i>Bit 0</i>
	PO2	PO1	A2	A1	A0	M	M	M

Tabla IV.2: Registro de configuración

Además se tiene una lista de comandos necesarios para interactuar con el dispositivo:

Comenzar a convertir [51h]: Inicia una conversión o, si está en modo continuo pero sin arrancar a convertir, entonces inicia las conversiones.

Parar de convertir [22h]: Interrumpe las conversiones si está en modo

continuo.

Copiar desde EEPROM [B8h]: Copia registros desde la EEPROM

Copiar a EEPROM [48h]: Copia registros a EEPROM

Nombre del bit	Tipo de acceso	Descripción
DONE	solo lectura	1: Conversión en progreso 0: conversión terminada
NVB	solo lectura	1: Escritura en EEPROM en progreso 0: EEPROM no ocupada
THF, TLF	lectura/escritura	Registros para manejar termostatos
R1, R0	lectura/escritura	Fija resolución: 00 – 10 bits 01 – 11 bits 10 – 12 bits 11 – 13 bits
AUTO	lectura/escritura	1: Inicio (del apagado) realizando una conversión 0: Inicia sin conversión
1SHOT	lectura/escritura	Configuración de conversión 1: convierte una vez por cada comando 0: convierte continuamente
PO2, PO1	lectura/escritura	Registros para configuración de pines PO1 y PO2
A2, A1, A0	solo lectura	Muestra estado de los pines A2, A1 y A0
M	lectura/escritura	Bits de uso general

Tabla IV.3: Descripción de los bits del registro de configuración del integrado DS620

IV.2. Funcionamiento del interruptor analógico

En la Figura IV.1 se muestra un esquema de una compuerta de transmisión CMOS como la que se utiliza para apagar el circuito de medición de pH.

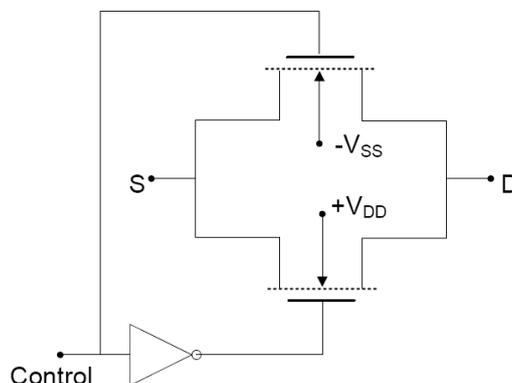


Figura IV.1: Esquema del interruptor TS3A4742

Como podemos ver en la Figura IV.1 el interruptor consiste en colocar en paralelo dos transistores MOSFET, uno tipo p y otro tipo n. El inversor es utilizado para tener una sola señal de control para encender y apagar los transistores. Cuando el $V_{Control}$ se encuentra en nivel bajo tanto el transistor NMOS como el CMOS se apagan. Cuando $V_{Control}$ pasa a nivel alto ambos transistores se prenden.

El interruptor también podría implementarse con un solo transistor, aunque la mejora con dos, se encuentra en que la resistencia source-drain es mucho menor para estos, como se ve en la Figura IV.2 (aunque en cualquier de los dos casos es muy pequeña).

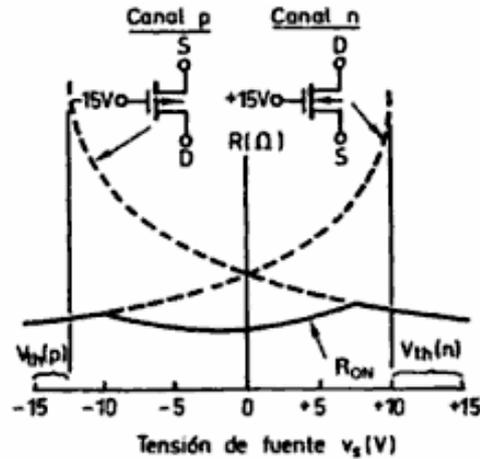


Figura IV.2: Resistencia del interruptor

IV.3. Funcionamiento filtro pasabajos

En la Figura IV.3 se observa un filtro RC pasabajos de primer orden. La función de transferencia de dicho filtro es:

$$G(s) = \frac{V_0(s)}{V_1(s)} = \frac{1}{1 + sRC} \quad (IV.9)$$

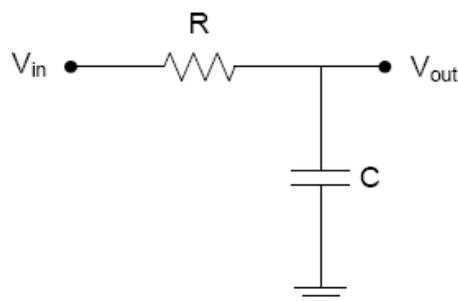


Figura IV.3: Filtro pasabajos de primer orden

Para voltaje continuo ($s=0$) la ganancia es unitaria. La transferencia del filtro se muestra en la Figura IV.4.

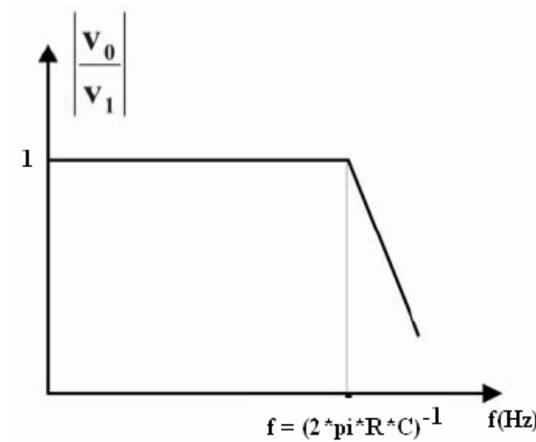


Figura IV.4: Transferencia de un filtro pasabajos de primer orden

El filtro pasabajos tiene un polo en $f = (2 \cdot \pi \cdot R \cdot C)^{-1}$. Para tener un buen rechazo al ruido de 50Hz, lo conveniente es tener el polo al menos una década por debajo, a 5Hz o menos. Por otro lado, el fabricante del microprocesador del Mote, recomienda una impedancia de entrada de 10kΩ para un óptimo uso del conversor A/D. Finalmente, debe tenerse en cuenta que el rango de capacitores cerámicos que se encuentran en plaza es de hasta 2.2 μF, pero además al momento de la compra lo que se consiguió fue capacitores de 1 μF. Para solucionar este inconveniente se colocaron 4 capacitores en paralelo de 1 μF lo que equivale a colocar uno de 4 1 μF.

Utilizando $R = 10 \text{ k}\Omega$ y $C = 4 \text{ }\mu\text{F}$ se obtiene el polo en $f = 4.0 \text{ Hz}$.

Para ver el tiempo que demora en responder el filtro se calcula el tiempo de subida al 90% de la carga del capacitor, obteniéndose un tiempo menor a 0.1s lo que resulta aceptable para esta aplicación.

$$\left(e^{\frac{-T}{RC}} - 1 \right) = 0.9 \quad \Rightarrow \quad T_{subida} = 2.3RC < 0.1s \quad (\text{IV.10})$$

IV.4. Layout de los PCBs

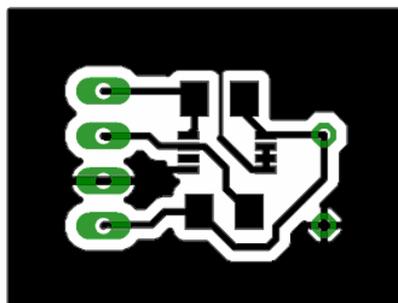


Figura IV.5: Layout del sensor de temperatura

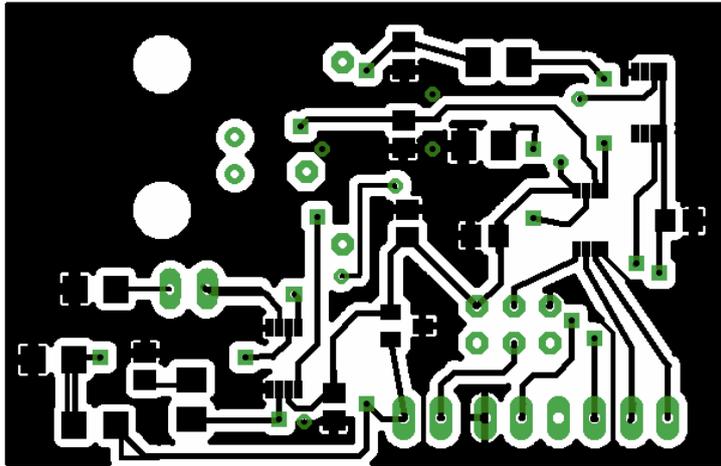


Figura IV.6: Layout del PCB de la electrónica del sensor de pH (arriba)

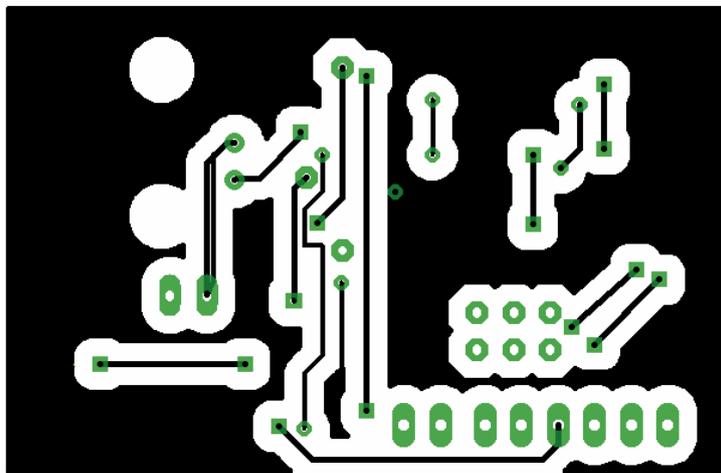


Figura IV.7: Layout del PCB de la electrónica del sensor de pH (abajo)

Anexo V

Interfaz Mote - sensores

El nodo sensor en su conjunto consta básicamente de tres grandes bloques independientes (salvo en la alimentación que es común): el Mote, el circuito de medición de temperatura y el circuito de medición de pH.

Debido a que es necesaria la interacción de los circuitos con el Mote, se hace indispensable el conexionado de los mismos. Las señales a intercambiar son todas con el microprocesador del Mote (a excepción de la alimentación eléctrica que se cablea directamente de las pilas a través del conector de 51 pines). Para el integrado de temperatura se utiliza el puerto de comunicación I2C y para obtener la señal de pH y se utilizan dos entradas analógicas, una salida digital y el puerto I2C.

V.1. Conector de expansión de 51 pines

En la Figura V.1 se aprecia el conector de 51 pines, este se encuentra en la parte inferior del Mote. Como ya se vio en la Figura 2.2 de la sección 2.1.7 el conector está íntegramente cableado al microprocesador del Mote, menos la alimentación.



Figura V.1: Foto del conector de expansión

Los conectores de expansión macho y hembra se observan en la Figura V.2. El macho es el utilizado por el Mote (Hirose DF-51P-1V(54)), por lo que fue necesario conseguir el conector hembra (Hirose DF9-51S-1V(54)), para realizar un circuito impreso con las señales de interés para la aplicación.

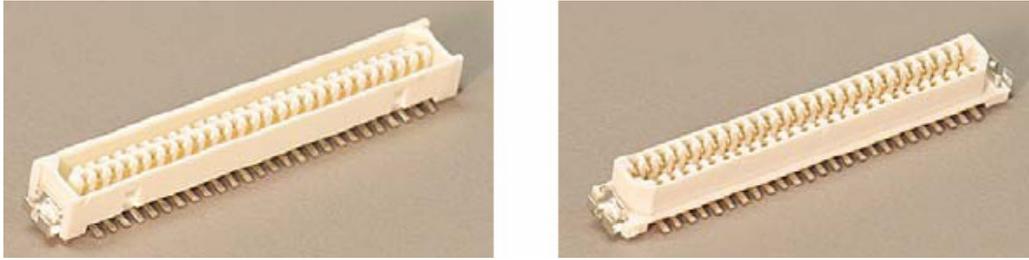


Figura V.2: Conector macho (izquierda) y conector hembra (derecha)

En el esquemático de la Figura V.3 se detalla el conexionado del conector de 51 pines con el Mote.

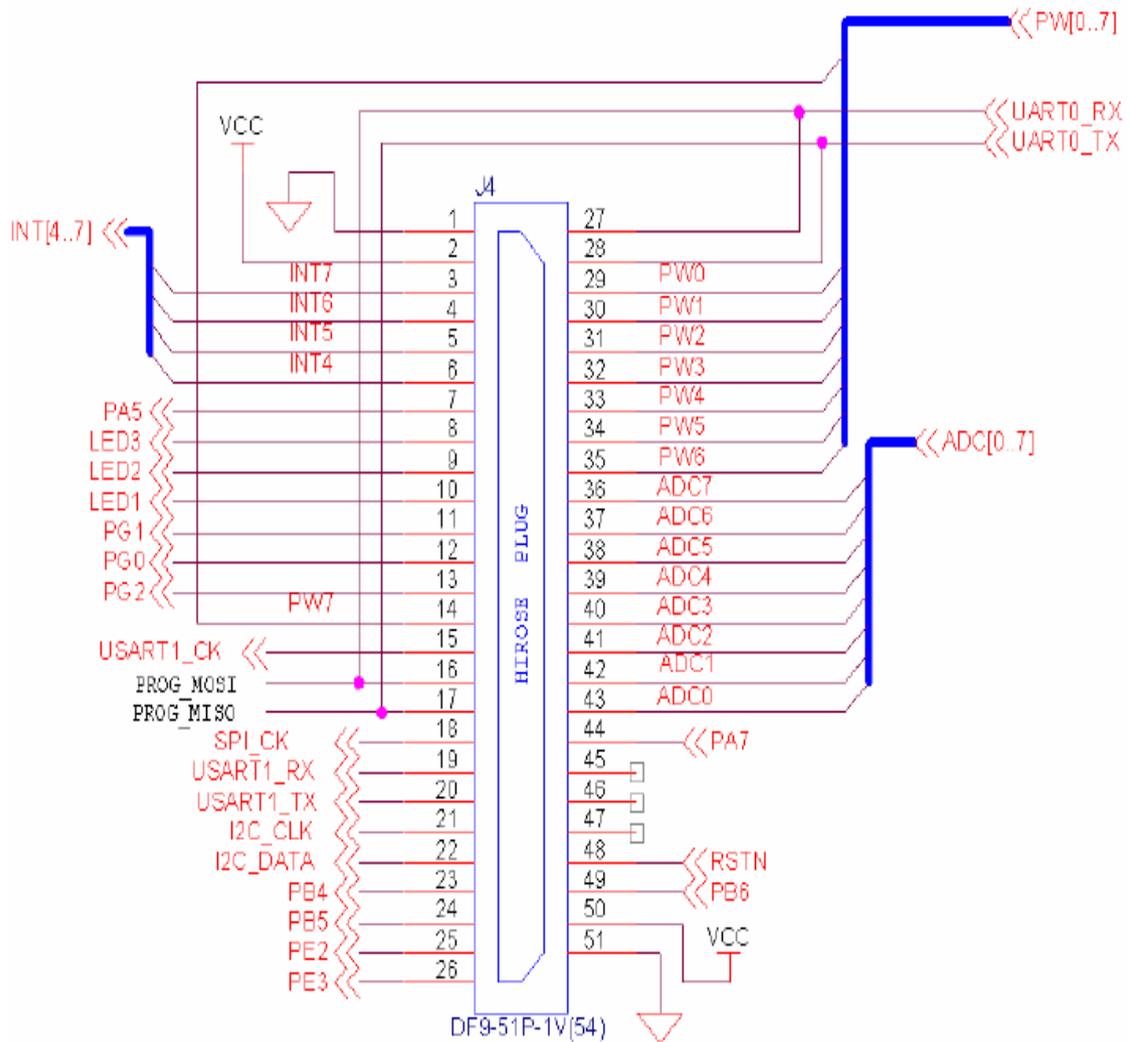


Figura V.3: Esquemático del conector

Los pines del conector utilizados son los que se muestran en la Tabla V.1.

Pin	Nombre	Señal
1	GND	Tierra, referencia de las pilas
2	Vcc	Potencial de las pilas
21	I2C_CLK	Reloj para comunicación serial I2C
22	I2C_DATA	Línea de datos para comunicación I2C
29	PW0 ¹⁷	GPIO ¹⁸ salida que activa el circuito de medición de pH
30	PW1	GPIO, reservada
42	ADC1	Entrada analógica para medir el voltaje de referencia
43	ADC0	Entrada analógica para medir la tensión de sensor de pH

Tabla V.1: Pines de interés del conector de expansión

V.2. Conector Molex

Para derivar las señales hacia los circuitos de medida, se buscaron en plaza conectores que fueran fáciles de soldar a los impresos y de fácil armado de los cables. Con lo cual la mejor opción encontrada, fue la de conectores Molex de 2.54 mm que se muestran en la Figura V.4.



Figura V.4: Molex macho (izquierda) y Molex hembra (derecha)

Otra opción para los conectores podría haber sido conectores USB, pero como solo pueden tener 4 señales por conector se eligió por los anteriores.

Para los cables se utilizaron cables multifilar de 0.25 mm² de diámetro, porque estos hacen mejor contacto entre los conectores.

V.3. Comunicación entre el nodo base y PC

Otro punto importante para el proyecto es la base de programación que hace de interfaz entre el Mote y la computadora. Esta base tiene principalmente dos funciones: programar los Motes y hacer de interfaz entre el nodo base y el PC. Esta comunicación serial es necesaria para poder transmitir los paquetes de datos, desde el Mote a la PC y viceversa que serán utilizados por la aplicación de usuario.

¹⁷ El pin PW0 corresponde al puerto digital C0 del micro del Mote

¹⁸ GPIO se refiere a Señales de entrada / salida de propósito general, llamado así por las siglas en inglés (General Purpose Input Output)

El modelo de la base de programación es el Mib510 y en la Figura V.5 se muestra una foto de la misma. Este dispositivo consiste en un conversor USB serial, en el cual el Mote se conecta a través de su conector de 51 pines, en la superficie de la misma. Con esto se logra además de comunicar datos, alimentar el Mote de la fuente del PC. Es por esto que no es necesario tener un programa de bajo consumo en el Mote base, pudiendo de esa manera tener siempre prendida la radio del mismo, a la escucha de paquetes.



Figura V.5: Base de programación Mib510

V.4. Layout del PCB del conector de 51 pines

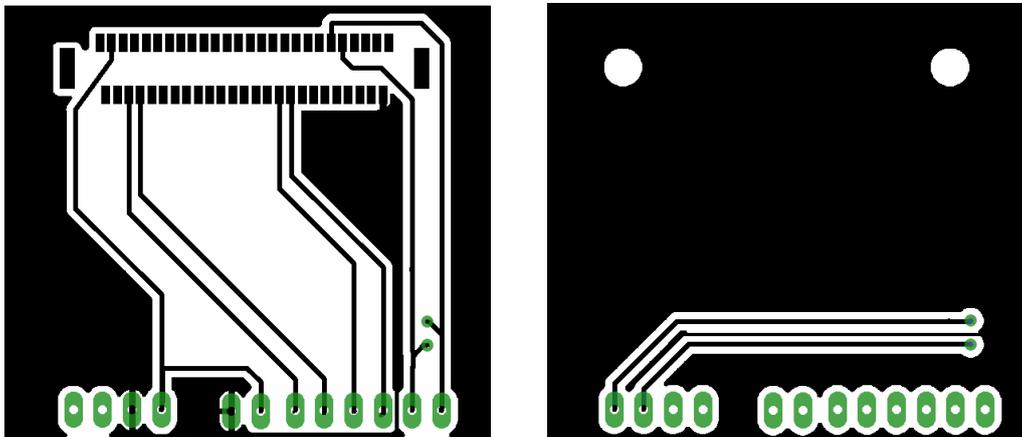


Figura V.6: Layout del PCB del conector de 51 pines

Anexo VI

Manuales para el cliente

VI.1. Manual de usuario

Para iniciar la aplicación se debe dar doble clic en *AplicacionRII.bat*. Esto despliega la ventana que se muestra en la Figura VI.1.

Panel de selección de periodos de muestreo de temperatura y de pH.
Permite seleccionar cada período a través de los botones de períodos estándar o seleccionando el botón “Otro” y colocando dentro del cuadro de texto un período entero mayor a cero. El botón “OFF” apaga al sensor seleccionado. Tener en cuenta que solo se puede tener un período de temperatura y de pH para toda la red.

Elección de muestreo temperatura	
<input type="radio"/> 1 min	<input checked="" type="radio"/> 10 min
<input type="radio"/> 30 min	<input type="radio"/> 60 min
<input type="radio"/> 90 min	<input type="radio"/> Otro (min): <input type="text"/>
<input type="radio"/> OFF	

Elección de muestreo pH	
<input type="radio"/> 1 min	<input type="radio"/> 10 min
<input type="radio"/> 30 min	<input type="radio"/> 60 min
<input type="radio"/> 90 min	<input type="radio"/> Otro (min): <input type="text"/>
<input checked="" type="radio"/> OFF	

Fulón N°1	
ID del Nodo :	2
Medida de temperatura	
Hora de medida :	15:36
Temperatura (°C) :	31.25
Medida de pH	
Hora de medida :	15:02
pH :	5.2
Periodo de muestreo (min)	
Temperatura :	10
pH :	60
Carga de la batería	
36%	

Fulón N°2	
ID del Nodo :	3
Medida de temperatura	
Hora de medida :	15:32
Temperatura (°C) :	29.0
Medida de pH	
Hora de medida :	14:45
pH :	5.9
Periodo de muestreo (min)	
Temperatura :	10
pH :	60
Carga de la batería	
87%	

Iniciar calibración

Figura VI.1: Ventana principal de la aplicación

Panel de estado de las variables del fulón.
Este panel informa el último valor obtenido para cada una de las variables sensadas. Además se muestra en ID del nodo sensor que se encuentra en el fulón y la carga que le queda a la batería.

Inicio de la aplicación de calibración del sensor de pH.

VI.1.1 Calibración del sensor de pH

Para el proceso de calibración se debe de desmontar el sistema, se debe llevar cerca del PC y se tiene que tener soluciones buffers de pH 4 y 7.

Esta aplicación puede ser cancelada en cualquier instante apretando el botón “Cancelar”.

Al calibrar lo que se obtiene son los nuevos parámetros de calibración del sensor de pH. Estos son guardados en un archivo de texto plano, el formato del nombre es *coef_nodo_<ID_nodo>.txt*. A su vez antes de guardar estos parámetros se hace un respaldo de los hallados en la calibración anterior en el archivo de la forma *coef_nodo_<ID_nodo>.backup.txt*. Esto es útil por si hubo algún inconveniente en la última calibración y se desea volver atrás, para hacerlo basta con cambiarle el nombre del archivo de respaldo al activo.

Para iniciar la calibración se debe hacer clic en el botón “Iniciar calibración”. Esto despliega una nueva ventana como muestra la Figura VI.2. En esta se debe ingresar el número ID del nodo sensor que se desea calibrar.



Figura VI.2: Ventana emergente para la calibración del sensor de pH

Al apretar el botón “Aceptar” se abre otra ventana como se ve en la Figura VI.3. Se deberá colocar el electrodo en solución buffer 7 y cuando esto esté pronto pulsar el botón “Calibrar pH=7” para comenzar a medir la solución buffer 7.

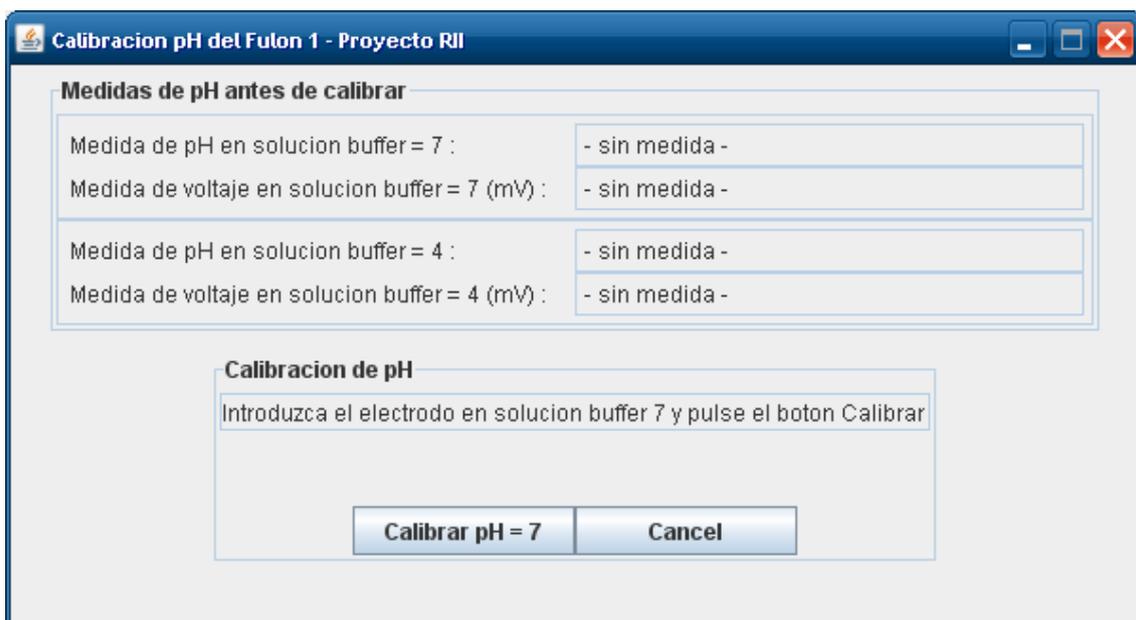


Figura VI.3: Ventana inicial de calibración del sensor de pH

Mientras se está tomando la medida de pH7 se muestra la ventana de la Figura VI.4



Figura VI.4: Ventana de calibración mientras se está tomando la medida de pH 7

Al finalizar la calibración se muestra la ventana de la Figura VI.5. Aquí se muestra el valor que la se hubiese obtenido al medir la solución buffer 7 si se hubiera utilizado la calibración anterior. Esto sirve para tener una idea de cuan alejada de la realidad se encontraba la calibración anterior. También se muestra el valor en mV de la salida de la electrónica del sensor de pH.

En este punto se debe colocar el electrodo en la solución buffer 4 y cuando esté pronto pulsar el botón "Calibrar pH=4".

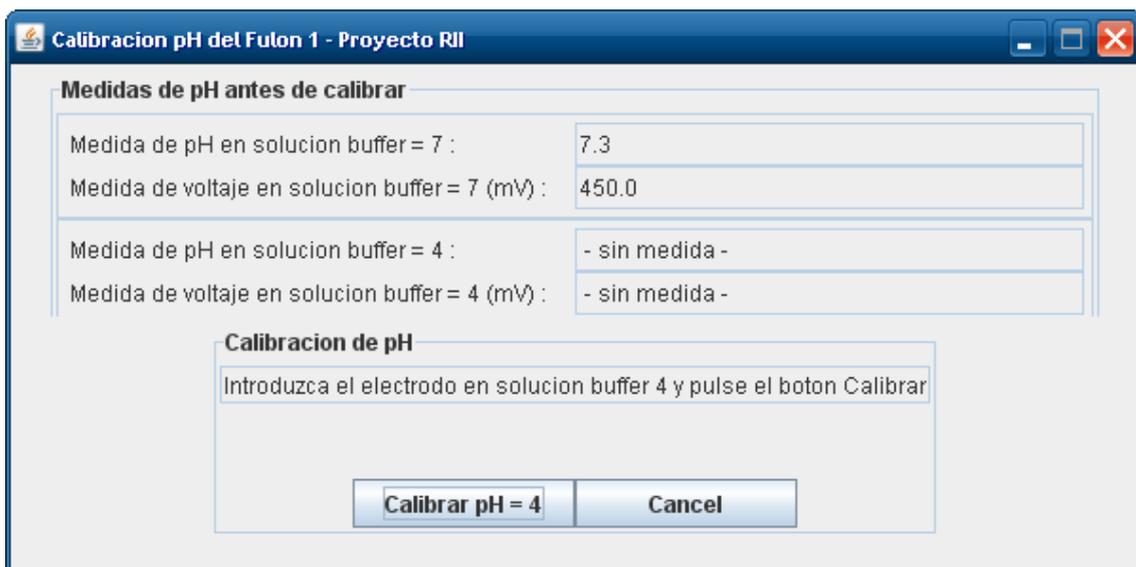


Figura VI.5: Ventana de calibración al finalizar la medida de pH 7

A partir de aquí el proceso es análogo al realizado para tomar una muestra de pH en solución buffer 7. En la se muestra el estado de la ventana de calibración

mientras se espera a tener una medida en solución buffer 4.

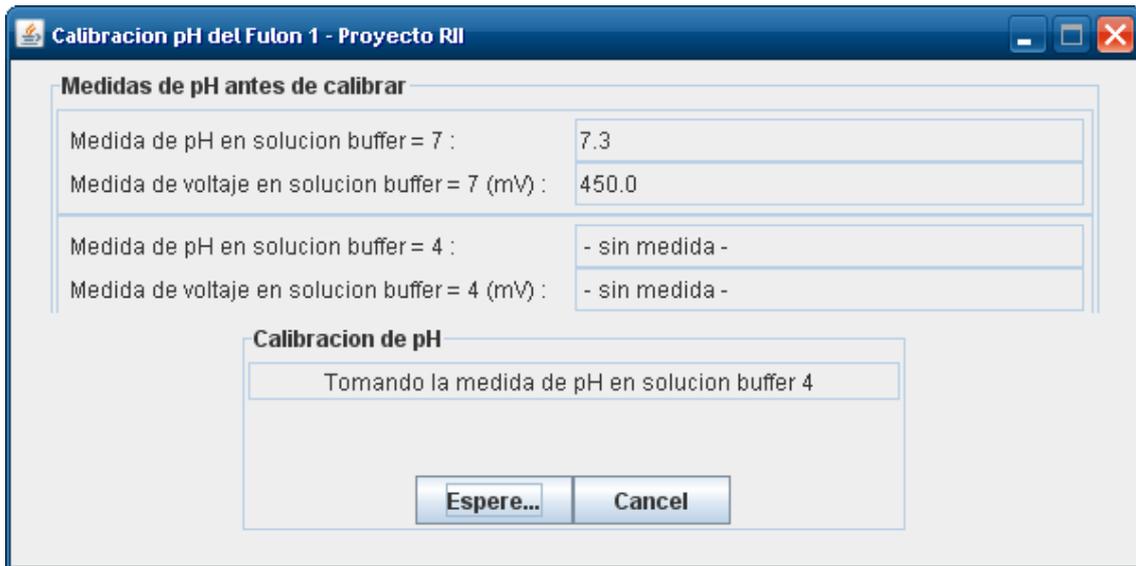


Figura VI.6: Ventana de calibración mientras se está tomando la medida de pH 4

Al tomar la medida en solución buffer 4 se obtiene una ventana como la de la Figura VI.7. Igual que en el caso de la solución buffer 7 se muestra el valor de pH obtenido con la calibración anterior y el voltaje de salida de la electrónica del sensor de pH.

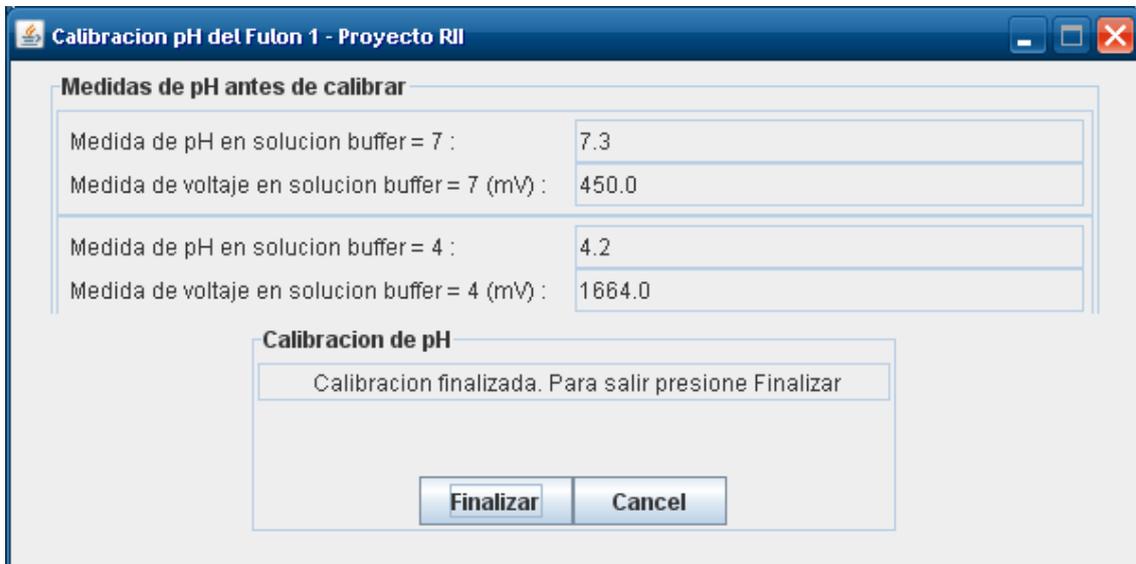


Figura VI.7: Ventana de calibración al finalizar la medida de pH 4

Al pulsar el botón “Finalizar” la aplicación calcula, con las medidas obtenidas los nuevos parámetros de calibración. Realiza el respaldo de la calibración anterior y guarda los nuevos parámetros en el archivo activo para el nodo sensor seleccionado.

VI.2. Manual de instalación

Instalar Java Runtime Edition: *jre-6u13-windows-i586-p-s*

Copiar los archivos de la carpeta win32 que se encuentra en el CD de instalación como se detalla a continuación.

De win32\bin en Archivos de programa\Java\jre6\bin

De win32\lib\ext en Archivos de programa\Java\jre6\lib\ext

De win32\lib\javax.comm.properties en Archivos de programa\Java\jre6\lib

Conectar el mote al puerto USB, esperar que se instale el controlador. Si no lo encuentra seleccionar para que busque el controlador en la carpeta USB_Drivers que se encuentra en el disco de instalación,

Ver puerto USB a utilizar en System → Hardware → Administrador de dispositivos.

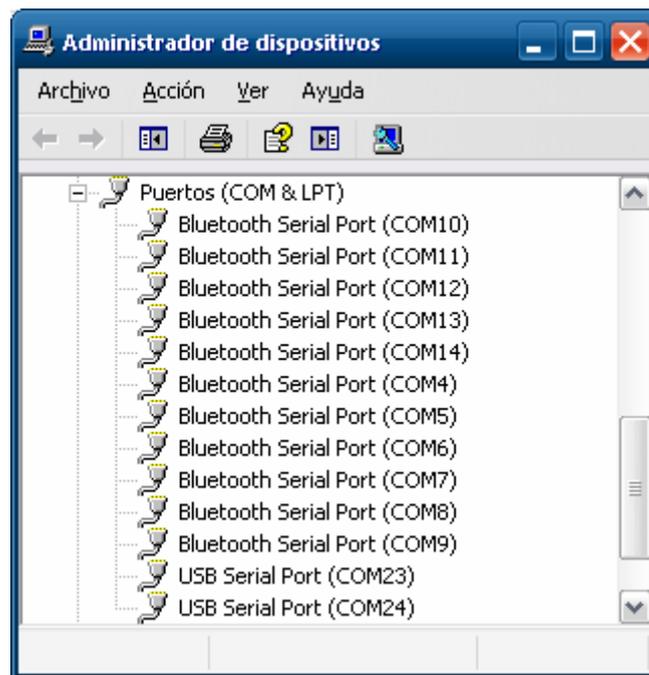


Figura VI.8: Ventana de administrador de dispositivos de WinXP

En este caso el puerto utilizado es el COM24.

Editar con un editor de texto el archivo AplicacionRII.bat para que utilice el puerto encontrado en el punto 4. Por ejemplo en este caso sería:

```
java -jar CommMotePC.jar -comm serial@COM24:57600
```

Colocar en un mismo directorio los archivos AplicacionRII.bat y CommMotePC.jar. Por ultimo correr el archivo AplicacionRII.bat

Anexo VII

Costos

En la se detallan los costos del proyecto.

Descripción	Cantidad de unidades	Precio unitario (U\$S)	Costo (U\$S)
Componentes pasivos			
Resistencias (varias)	1	22,00	22,00
Capacitores (varias)	1	19,84	19,84
Presets multivuelta	2	1,00	2,00
Conectores			
Jumpers	1	1,82	1,82
Molex (2,4 y 6 pines sumados)	2	1,81	3,62
BNC	2	9,65	19,30
51 pines	5	3,16	15,80
Integrados			
Sensor de temperatura	3	2,28	6,84
Tensión de referencia	3	1,00	3,00
Interruptor digital	3	0,81	2,43
Potenciómetro digital	3	1,05	3,15
Amplificador de instrumentación	3	4,05	12,15
PCBs			
Placa temperatura	2	47,73	95,45
Placa conector 51 pines	2	43,18	86,36
Placa pH	2	51,14	102,27
Plataforma hardware			
Mote	3	115,00	345,00
Gateway	2	95,00	190,00
Otros			
Soluciones buffers	2	4,36	8,73
Agua destilada	1	0,64	0,64
Gastos de envíos			
MiamiBox	5	5,50	27,50
MiamiBox	2	4,50	9,00
TOTAL			976,91

Tabla VII.1: Costos del proyecto

Cabe aclarar que se desconocen los costos de importación de los Motes y Gateways debido a que fueron importados por el cliente. También es de destacar

que no se incluye el costo del electrodo de pH ya que el mismo fue prestado por el cliente. El costo de un sensor como el requerido para esta aplicación es de alrededor de U\$S 200 más gastos de importación.

Referencias

- [1] “El proceso de curtido”. Agosto 2009.
Disponible: www.biologia.edu.ar/tesis/forcillo/proceso_de_curtido.htm
- [2] T. Croft, C. C. Carr y J. H. Watt. *Manual del montador electricista*. Barcelona: Reverte, 1993
- [3] Hoja de datos E91 Energizer, Agosto 2009.
Disponible: data.energizer.com/PDFs/E91.pdf
- [4] TinyOS, Setiembre 2009.
Disponible: es.wikipedia.org/wiki/TinyOS
- [5] Intoduction to pH, Setiembre 2009.
Disponible: www.omega.com/techref/ph.html
- [6] Information on pH meter, Agosto 2009.
Disponible: www.ph-meter.info
- [7] Glass electrode, Agosto 2009 en.wikipedia.org/wiki/Glass_electrode
- [8] Greg McMillan and Jim Gray. *The Essentials of pH Measurement Design, Installation, Maintenance, and Improvement*. Agosto 2009.
Disponible: www.modelingandcontrol.com/repository/ISA55thIISPaperIIS09-P054.pdf
- [9] Frequently Asked Questions about "ISFET" pH Technology. Abril 2009.
Disponible: www.phmeters.com/isfet-faq.htm
- [10] *Cleaning and Preventative Maintenance Procedures for Jenway pH Electrodes*. Setiembre 2009.
Disponible: www.jenway.com/adminimages/P01_002A_Maintenance_and_Cleaning_of_pH_electrodes.pdf
- [11] *Operations Manual YSI pH100*. Setiembre 2009.
Disponible: www.ysiecosense.com/shop/store/20060723001/assets/templateimages/images/ph100-manual.pdf
- [12] *Oakton pH 300 brochure*. Agosto 2009.
Disponible: www.4oakton.com/SellSheets/pHORP%20measurement/pH%20B5.pdf
- [13] Nadia Zine. “Desarrollo y caracterización de sensores químicos de estado sólido para aplicaciones biomédicas”. Universitat Autònoma Barcelona, Barcelona, Diciembre 2004.
Disponible: www.tesisenxarxa.net/TESIS_UAB/AVAILABLE/TDX-1024105-224207//nz1de1.pdf

- [14] J. Briz. *Naturación urbana: cubiertas ecológicas y mejora medioambiental*. Mundi-Prensa Libros, 2004.
- [15] NXP semiconductor. “UM10204 I2C-bus specification and user manual Rev.03”, Junio 2007.
Disponible: www.nxp.com/acrobat_download/usermanuals/UM10204_3.pdf

Sistema de medida en ambientes industriales basado en redes de sensores inalámbricos

Alfonso González, Natacha Leone, Mauricio Murdoch, Pablo Mazzara y Julián Oreggioni
 {alfgonz, nathybolso, mauriciomurdoch}@gmail.com, {mazzara,juliano}@fing.edu.uy
Instituto de Ingeniería Eléctrica, Universidad de la República.

Resumen — La medida de temperatura y pH resulta de gran importancia en una amplia gama de procesos industriales. En particular, se destaca su importancia en el procesamiento del cuero dentro de los fulones giratorios de una curtiembre. Este trabajo presenta un sistema de medida de temperatura y pH, basado en una red de sensores inalámbricos, que fue probado en este tipo de instalación industrial. El prototipo construido consta de un nodo base y dos nodos sensores remotos alimentados con dos pilas AA. Estos últimos son los encargados de realizar las medidas y transmitirlos mediante enlaces de radio multi-hop al nodo base, conectado a un PC. El sistema incluye el software de usuario que permite guardar y visualizar los datos recibidos en el PC, así como monitorear y configurar el sistema. El análisis de datos experimentales recabados en pruebas realizadas en la planta industrial muestran que el sistema es capaz de medir pH en el rango de 2 a 8 con una incertidumbre de 0.1 pH; y temperatura en el rango de 10°C y 70°C con una precisión de 0,5°C. Los principales aportes de este trabajo, consisten en la adaptación del sistema al ambiente industrial y el desarrollo de la interfaz eléctrica del sensor de pH a la plataforma de hardware elegida

Palabras claves — red de sensores inalámbricos, ambiente industrial, pH, temperatura, bajo consumo.

I. INTRODUCCION

La medida de temperatura y pH resulta de gran importancia en varios de los procesos involucrados en la producción del cuero. En especial, se destaca el “proceso de pelambre”, que consiste en colocar pieles dentro de un fulón y disolver el pelo utilizando cal y sulfuro de sodio. Un fulón es un recinto cilíndrico de madera de gran tamaño (aprox. 3 metros de diámetro por 3.5 metros de largo) como se observa en la Fig. 1. A lo largo del proceso, el fulón rota con una velocidad de 4 r.p.m. para lograr la correcta homogenización del proceso.

Tradicionalmente para sensar temperatura y pH se detiene el proceso, se abre una puerta lateral y se toma una muestra de la sustancia del interior. Esta manera de recabar las medidas no solo tiene el inconveniente de ser manual y de detener el proceso, sino que además al abrir el fulón el operario queda expuesto a los vapores que pueden ser nocivos para su salud. Otro método que se emplea actualmente es la utilización de “dataloguers” con sensores de temperatura colocados sueltos en el interior del fulón junto con las pieles. Estos recaban la

información durante el proceso y luego que termina, se extrae el “dataloguer” de entre las pieles y se levantan los datos en un PC para analizarlos. Este proceso evita los problemas del método anterior, ya que ni es manual ni detiene el proceso. En contrapartida no es en tiempo real y por tanto no puede controlar el proceso.



Fig. 1: Foto de un fulón

La opción que plantea este trabajo es desarrollar un sistema basado en una red de sensores inalámbricos. Esta alternativa permite obtener medidas en tiempo real sin necesidad de interrumpir el proceso, elimina la posibilidad de errores humanos al tomar o registrar la medida y minimiza los riesgos para la salud del operario. Asimismo, la solución es muy fácilmente escalable y el costo de mantenimiento es bajo.

En contrapartida, la utilización de esta tecnología en esta aplicación se ve dificultada, tanto por el giro de los fulones como por la propagación de las ondas de radio en un ambiente industrial. Las redes de sensores inalámbricos se han aplicado con éxito al monitoreo de condiciones ambientales [1] [2]. Al aire libre, la calidad de los enlaces es buena, pero en ambientes cerrados las reflexiones y refracciones de las ondas en las paredes y objetos provocan interferencias que disminuyen el alcance y la calidad de la comunicación.

En [3] varias configuraciones de redes de sensores son analizadas simulando un ambiente industrial generando interferencia. En [4] se comparan distintas arquitecturas de redes de sensores para aplicaciones industriales de mantenimiento preventivo y se concluye que el costo de la inversión es bajo comparado con los resultados que se pueden obtener.

El desarrollo alcanzado por los últimos estándares [5], permiten mejorar la comunicación mediante el uso de espectro expandido y usando combinaciones de 802.15.4 con redes 802.11 tipo malla [6].

El trabajo que presenta este documento consistió en el desarrollo de un sistema de medida de temperatura y pH, basado en una red IEEE 802.15.4 tipo árbol, capaz de funcionar en un ambiente industrial. Se realizaron pruebas de un nodo sensor midiendo temperatura en la planta industrial de una curtiembre y se estudió la viabilidad de realizar las pruebas para el sensado de pH.

II. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

A. Características del sistema

El sistema (ver Fig. 2) está basado en un nodo base conectado a un PC y en nodos sensores que se encuentran instalados en los fulones.

En el PC corre un software de usuario desarrollado en Java, que permite el registro y manejo de los datos, el monitoreo en tiempo real y la modificación de parámetros en línea.

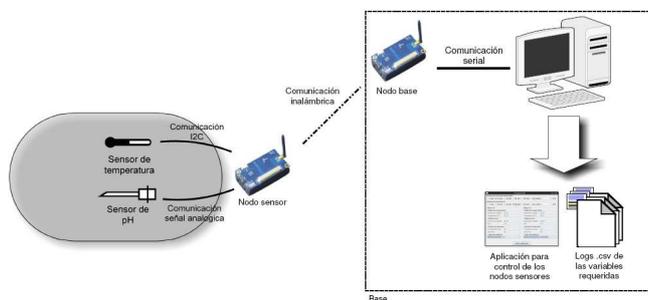


Fig. 2: Esquema del sistema desarrollado

Para implementar los nodos sensores y el nodo base se utilizó la plataforma IRIS de la empresa Crossbow [7], cuyos módulos (llamados Motes) consisten en un microcontrolador y una radio. Los Motes permiten recibir información a través de sus interfaces, procesarla y transmitirla inalámbricamente hacia otro nodo o hacia un PC. Las principales características de la plataforma de hardware utilizada se muestran en la Tabla I.

TABLA I
CARACTERÍSTICAS DE LA PLATAFORMA IRIS

Performance del microcontrolador	
Memoria flash para programa	128 kB
RAM	8 kB
Frecuencia	7.37 MHz
Convertor A/D	10 bits
Otras interfaces	E/S digital, I2C
Almacenamiento de datos	
Memoria flash externa	512 kB
Trasceíver de RF	
Banda de frecuencia	2.4GHz
Velocidad de transmisión	250kbps
Electromecánico	
Alimentación	2 pilas AA
Conector de expansión	51 pines
Performance del microcontrolador	
Memoria flash para programa	128 kB

El sistema es muy fácilmente escalable hasta una cantidad máxima de 255 nodos sensores por cada nodo base. Los nodos

sensores pueden tener entre ellos una distancia en el orden de 50 metros bajo techo y un orden de magnitud mayor al aire libre

Los nodos sensores se alimentan con dos Pilas AA cuya duración estimada es de más de un año para una topología en estrella.

Este trabajo estuvo orientado a optimizar el consumo de los sensores, dejando para una siguiente etapa la optimización del consumo utilizado en las comunicaciones. A este nivel, el sistema se limitó a hacer uso del LPL (Low Power Listening) estándar implementado en TinyOS. [8]

Se diseñaron y fabricaron los circuitos eléctricos de adaptación del sensor de pH y del sensor de temperatura al Mote. El sistema permite trabajar con un período de muestreo mínimo de 1 minuto y es capaz de medir temperatura entre 10°C y 70°C con una incertidumbre de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ y una resolución de 0,25 °C. Por otra parte, es capaz de medir pH entre 2 y 8 pH con una incertidumbre de $\pm 0,1$ pH y una resolución de 0,1 pH.

B. Plataforma de software

El software embebido en los nodos sensores para la adquisición de las medidas y en el nodo base de interfaz entre el nodo sensor y la PC, se implementó usando el sistema operativo abierto TinyOS 2.1 desarrollado por la Universidad de Berkeley. Se trata de un sistema operativo de código abierto específico para redes de bajo consumo. Proporciona componentes básicos que junto con módulos específicos, diseñados por el usuario, permiten armar las aplicaciones de los nodos.

Comunicación

Para implementar la comunicación entre los nodos sensores y el nodo base se programó una aplicación basada en dos protocolos de comunicación de TinyOS: Collection y Dissemination. También se utilizó el protocolo LPL para el manejo del encendido de la radio.

El protocolo Collection [8] se utiliza para comunicar los datos recabados por los nodos sensores. Se arma una arquitectura de red de tipo árbol, donde en las puntas del mismo se encuentran los nodos sensores y en la base el nodo base conectado al PC. El protocolo es de tipo multi-hop y best-effort.

El protocolo Dissemination [8] se utiliza para enviar los cambios solicitados por el usuario a través del PC. En este protocolo todos los nodos de la red tienen, en régimen, el mismo valor en todas las variables. El protocolo no asegura un tiempo de espera máximo para que todos los nodos reflejen el cambio pero el algoritmo usado sí tiende a unificar rápidamente el valor.

El protocolo LPL [8] se ubica a nivel de la capa MAC, es asíncrono y permite ahorrar energía disminuyendo el tiempo en que la radio está prendida (se establece un “duty cycle” o ciclo de trabajo de la radio).

C. Sensores

Sensor de temperatura

Para medir temperatura se utilizó el sensor integrado DS620 de Maxim. Este chip mide la temperatura del ambiente y puede transmitir ese dato en formato digital mediante la interfaz serial I2C. Se destaca su bajo consumo en modo idle y que puede funcionar con una alimentación de 1.7V (ver detalles en Tabla II). En la Fig. 3 se muestra una foto del PCB desarrollado.

TABLA II
CARACTERÍSTICAS DEL INTEGRADO DS620

Rango de voltaje de alimentación	1.7 ... 3.5 V
Rango de operación	-55 ... 125 °C
Precisión	± 0.5 °C @ 0 ... 70 °C
Resolución	11 bits (0.25 °C)
Velocidad de conversión	50ms
Interfaz	Serial I2C
Consumo en modo idle	2 μ A
Consumo en conversión	800 μ A
Modos de operación	Conversión única

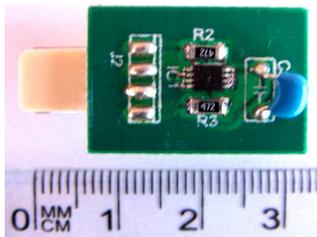


Fig.3 Foto del PCB del sensor de temperatura

Sensor de pH

Se decidió desarrollar un sensor de pH basado en un electrodo de vidrio debido a su bajo costo y a su amplio desarrollo en el ámbito industrial. El funcionamiento de este electrodo se modela mediante una celda galvánica, que desarrolla un potencial eléctrico, que responde a la ecuación de Nernst, que es función del pH y la temperatura de la solución que se quiere medir. Este electrodo no presenta consumo desde el punto de vista eléctrico, posee una muy alta resistencia de salida (centenas de mega ohms) y su característica pH-Voltaje tiene una deriva temporal que debe corregirse mediante calibración periódica.

Para integrar el electrodo al Mote se diseñó el circuito electrónico que se presenta en la Fig. 4 y en la Fig. 5. El circuito debió respetar los siguientes requerimientos: alimentación asimétrica entre 0 y V_{DD} (con un V_{DD} que podía variar entre 2V y 3V), bajo consumo y capacidad para trabajar con señales de pH que pudieran variar entre 2 pH y 8 pH.

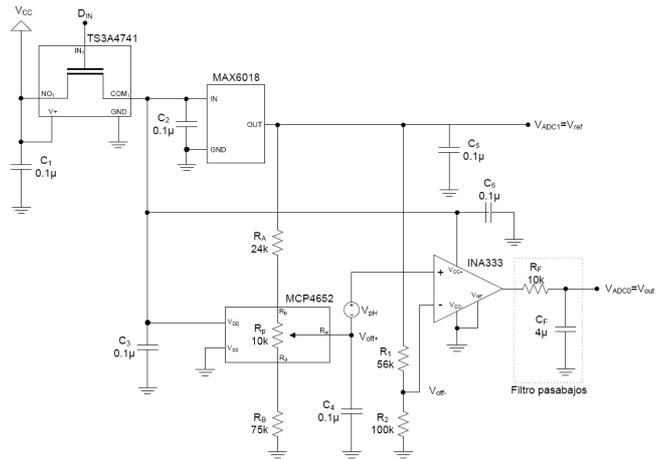


Fig. 4. Esquema del circuito desarrollado para medir pH.

El circuito tiene cinco componentes principales. La llave analógica (TS3A4741 de Texas Instruments) tiene como propósito encender el circuito solamente durante el período de tiempo que se toma una medida. El voltaje de referencia (MAX6018 de Maxim) se utiliza para obtener un potencial constante independiente del voltaje de la pila. El potenciómetro digital (MCP4652 de Microchip) que se utiliza para compensar la deriva temporal del electrodo de vidrio. El amplificador de instrumentación (INA333 de Texas Instruments) de muy alta resistencia de entrada, permite maximizar la resolución del convertidor A/D. El filtro pasabajos a la salida disminuye el ruido electromagnético.

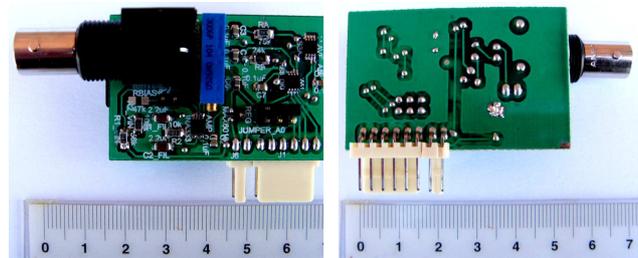


Fig. 5. Foto del PCB de pH realizado.

D. Interfaz con el usuario

El software de usuario fue desarrollado en Java. Al ejecutar la aplicación se abre la ventana principal del programa, que se divide en tres secciones (ver Fig. 6). En la sección superior se puede seleccionar el período de muestreo de temperatura y de pH de los nodos sensores. En la sección central se encuentran los paneles de cada fulón. En la sección inferior se tiene un botón para iniciar la calibración del sensor de pH de un nodo sensor.



Fig. 6. Ventana principal de la aplicación.

E. Montaje

Para la fabricación del encapsulado del nodo sensor y su montaje en el fulón fue necesario tener en cuenta varios factores. En primer lugar, debía presentar la robustez necesaria para trabajar en un ambiente industrial, y en particular ser apto para soportar los vapores corrosivos de los procesos con los cuáles debe estar en contacto. En segundo lugar, debía prever un mecanismo para cambiar las pilas y calibrar el sensor de pH con facilidad. Finalmente debía ser funcional a los intereses del dispositivo: los componentes internos debían entrar adecuadamente, estar debidamente protegidos, etc.

El encapsulado utilizado fue una caja estanca estándar de 15cm x 15cm, IP66, con una tapa con tornillos según puede observarse en la Fig. 7.

La vaina de metal que protege al circuito de medición de temperatura se diseñó teniendo en cuenta que debía ser lo suficientemente robusta para soportar las sustancias altamente corrosivas en las que se encontraría inmersa. Asimismo, fue considerado que debe ser lo más pequeña posible, para tener una buena transferencia de calor entre el integrado que sensa la temperatura y la sustancia que a medir. Finalmente, la vaina debe tener el tamaño suficiente como para alojar al sensor de temperatura construido.



Fig. 7. Montaje del sensor de temperatura.

III. RESULTADOS

A. Fuente de alimentación

Para relevar el mínimo voltaje de alimentación con el cual el nodo sensor es capaz de funcionar se realizó la siguiente prueba: se dejó el nodo sensor todo el tiempo encendido, midiendo temperatura y pH y enviando los datos al nodo base. Esta prueba reveló que el nodo sensor es capaz de funcionar hasta una alimentación de 1.9V y que es el mote del nodo sensor quien empieza a funcionar erráticamente.

B. Consumo

Para medir el consumo del circuito se colocó una resistencia de 1 ohm en serie con la alimentación y se realizaron diversas medidas según las distintas funciones que debe realizar el Mote. Esto permitió corroborar el bajo consumo de los sensores (menor a 30 μ A) y detectar el alto impacto que tiene el consumo del Mote en el funcionamiento del sistema (1.3mA).

C. Validación del circuito para medir pH

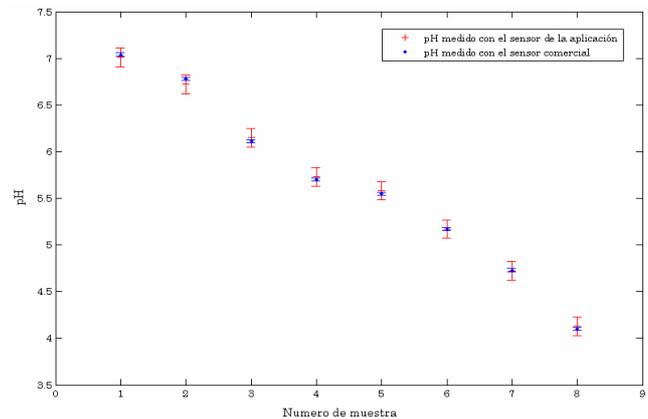


Fig. 8 Grafica de comparación de electrónicas de pH

Se relevaron y compararon las medidas obtenidas por un sensor de pH comercial (EcoSense pH100 de YSI) y por el sensor de pH realizado en este proyecto (utilizando el electrodo InLab 413 de Mettler Toledo).

La Fig. 8 muestra las medidas relevadas con sus intervalos de confianza correspondientes. Allí puede verse que las medidas de ambos sensores son consistentes.

D. Medidas en ambiente industrial

Se realizaron varios ensayos en la planta industrial de una curtiembre de gran porte (30 fulones distribuidos en más 15000 m²), capaz de procesar entre 5000 y 6000 cueros terminados por día (cueros que miden en promedio más de 4 m²).

Todos los ensayos fueron realizados utilizando un nodo sensor montado en un fulón y un nodo base conectado a un PC a una distancia de 30 metros.

El experimento más largo tuvo una duración de 108 horas, tomando medidas de temperatura cada 2 minutos, obteniendo una tasa de pérdida de paquetes del 13%.

En la Fig. 9 se muestran medidas de temperatura tomadas

por el sistema a lo largo de 42 horas. Durante las primeras 10 horas de la gráfica puede apreciarse la parte final del proceso de pelambre. Luego, se dejó enfriar el fulón a temperatura ambiente durante unas 20 horas. El último tramo corresponde al inicio de un nuevo proceso en donde se agrega hielo y puede observarse como baja rápidamente la temperatura.

Los resultados fueron validados por operarios expertos.

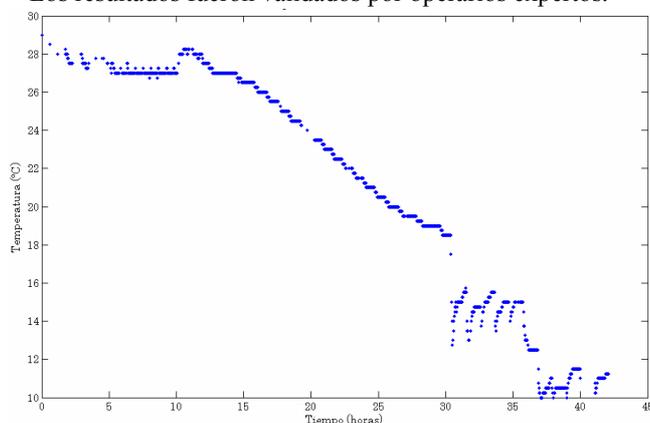


Fig. 9 Gráfica de medida de temperatura en la planta industrial.

IV. CONCLUSIONES

Se logró implementar un sistema para medir temperatura y pH basado en de red de sensores inalámbricos en un ambiente industrial.

Por una parte se destaca que se lograron satisfacer todas los requerimientos de la aplicación. En primer lugar el sistema es de muy fácil instalación (no requiere cableado alguno). En segundo lugar, brinda información en tiempo real de las variables importantes del proceso, mejorando el seguimiento del proceso y el control del mismo. Finalmente, introduce mejoras sustanciales respecto al proceso actual de medida: no es necesario detener el proceso, se eliminan posibles errores de operación y de registro, y es un sistema más seguro para la salud del operario.

En la experiencia realizada, la comunicación entre los nodos sensores y la base presentó una tasa de pérdidas del 13%, y se estimó que la duración de las pilas no superaría los tres meses. El uso de una red tipo árbol y un protocolo de diseminación, que no permitía disminuir demasiado el ciclo de trabajo de la radio, redujo considerablemente la estimación inicial de consumo. Estos parámetros pueden ser mejorados usando otro protocolo. En efecto, existen protocolos para monitoreo de medio ambiente que permiten duraciones de la pilas de varios años [9] y [10], pero portarlos a nuestra plataforma no era un objetivo de esta etapa. Por otra parte, mediante la multiplicidad de caminos en una red tipo malla se puede disminuir las pérdidas de paquetes, pero en nuestro caso, por limitaciones de presupuesto, sólo se usaron tres nodos.

Finalmente se destacan dos aspectos interesantes del diseño del circuito electrónico diseñado para este sistema. Por un lado, la corrección automática de la deriva del electrodo de pH utilizando un potenciómetro digital funciona adecuadamente. Por otro lado, se obtuvo un circuito que funciona con una

alimentación de 2.0V, lo cual permite hacer un uso bien intensivo de las dos pilas AA.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo a Fernando Silveira, Conrado Rossi, Raúl Arbiza y a la curtiembre Zenda por el apoyo brindado.

REFERENCIAS

- [1] Cerpa, A., Elson, J., Estrin, D., Girod, L., Hamilton, M., And Zhao, J. Habitat monitoring: Application driver for wireless communications technology. In 2001 ACM SIGCOMM Workshop on Data Communications in Latin America and the Caribbean (San José, Costa Rica, Apr. 2001).
- [2] Szewczyk, R., Osterweil, E., Polastre, J., Hamilton, M., Mainwaring, A., And Estrin, D. Habitat monitoring with sensor networks. *Communications of ACM* 47, 6 (2004), 34–40.
- [3] M. Bertocco, G. Gamba, A. Sona, and S. Vitturi. Performance Measurements of CSMA/CA-Based Wireless Sensor Networks for Industrial Applications. In IMTC 2007 – IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (Warsaw, Poland, May 1–3, 2007)
- [4] Lakshman Krishnamurthy, Robert Adler, Phil Buonadonna, Jasmeet Chhabra, Mick Flanigan, Nandakishore Kushalnagar, Lama Nachman, Mark Yarvis. Design and Deployment of Industrial Sensor Networks: Experiences from a Semiconductor Plant and the North Sea. In *Proceedings of the Third International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp. 64-75 (San Diego, CA, USA, November 2-4, 2005)
- [5] 802.15.4-2006 IEEE Standard for Information Technology- Part 15.4: Wireless MAC and PHY Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)
- [6] Daniel Sexton, Michael Mahony, Michael Lapinski, Jay Werb. Radio Channel Quality in Industrial Wireless Sensor Networks Sicon/05 – Sensors for Industry Conference Houston, Texas, USA, 8-10 February 2005
- [7] IRIS 2.4GHz. www.xbow.com/Products/productdetails.aspx?sid=264
- [8] TinyOS Community Forum An open-source OS for the networked sensor regime. <http://www.tinyos.net>
- [9] N. Burri, P. von Rickenbach, and R. Wattenhofer. Dozer: ultra-low power data gathering in sensor networks. In *Proc. 6th Int'l Conf. Information Processing Sensor Networks (IPSN '07)*, pages 450–459. ACM Press, New York, Apr. 2007.
- [10] Roman Lim, Matthias Woehrle, Andreas Meier, Jan Beutel. Harvester - Energy Savings Through Synchronized Low-power Listening The 6th European Conference on Wireless Sensor Networks (EWSN 2009); Cork, Ireland, February 11-13, 2009.