Universidad de la República
Facultad de Ingeniería

# Monitoreo del Rumen Bovino

15 de Marzo de 2006

Integrantes:

- Mariano Cebey Ferrari
- Juan Curto Risso
- Julián Oreggioni Gamou

Tutores:

- Pablo Aguirre
- Pablo Chilibroste
- Fernando Silveira

# Agradecimientos

En primer lugar un agradecimiento sentido, emotivo para la familia y especialmente para padres, hermanos y novias. ¡Por el aguante!

A los Pablos, porque se la jugaron...

A la barra, porque estuvieron en las “pequeñas cosas”.

El grupo quiere reconocer especialmente la ayuda brindada por: Raúl Arbiza, María de los Ángeles Bruni, BUANLIR, Gabriel Cebey, Juan Carlos Cedrés, Rafael Canetti, Pedro Curto, Gonzalo Damonte, Julia Demasi, Droguería Montevideo, EEMAC, Francisco Elizondo, Pablo Ezzatti, Rafaella Fiorelli, Adrián Ferrari, Fiorella Haim, Guillermo Katzenstein, Martín Katzenstein, Jorge Martínez, PRANASYS, Martín Pedemonte, Conrado Rossi, Fernando Silveira, Gonzalo Villavedra.

# Contenido


**1. Generalidades** **1**
- 1.1. Motivación y descripción del proyecto . . . 1
- 1.2. Trabajos relacionados . . . 2
- 1.3. Requerimientos . . . 3
- 1.4. Solución propuesta . . . 4
- 1.5. Criterios generales de diseño . . . 4
- 1.6. Estructura del documento . . . 5

**2. Sensores** **7**
- 2.1. Sensor de pH . . . 7
  - 2.1.1. Tecnologías disponibles . . . 7
  - 2.1.2. Descripción y principio de funcionamiento de los sensores de vidrio . . . 8
  - 2.1.3. Características . . . 9
  - 2.1.4. Proceso de selección . . . 13
  - 2.1.5. Características del sensor PHE-7353 de Omega . . . 13
- 2.2. Sensor de Temperatura . . . 14
  - 2.2.1. Alternativas para la medición de temperatura. . . . 14
  - 2.2.2. Comparación . . . 16
  - 2.2.3. Proceso de selección . . . 17
  - 2.2.4. El sensor LM95071 de National Semiconductor . . . 18

**3. Hardware** **19**
- 3.1. Microcontrolador . . . 19
  - 3.1.1. Elección . . . 19
  - 3.1.2. Funcionamiento del PIC . . . 20
  - 3.1.3. Almacenamiento externo . . . 23
- 3.2. Interfaz PC-PIC . . . 23
  - 3.2.1. Protocolo RS232 . . . 24
  - 3.2.2. Implementación . . . 25
- 3.3. Medición del tiempo . . . 25
  - 3.3.1. TIMER1 del PIC . . . 25
  - 3.3.2. Elección del RTC . . . 25
  - 3.3.3. Análisis de consumo . . . 26
- 3.4. Circuito de adquisición de pH . . . 26
  - 3.4.1. Modelo eléctrico del sensor . . . 26
  - 3.4.2. Criterios de diseño . . . 27
  - 3.4.3. Requerimientos . . . 27
  - 3.4.4. Alternativas de diseño . . . 28
  - 3.4.5. Diseño final . . . 28
- 3.5. Referencia de Voltaje . . . 30
- 3.6. Integración . . . 31
  - 3.6.1. Disposición de los componentes . . . 31
  - 3.6.2. Técnicas de prototipado . . . 31
  - 3.6.3. Diseño de la placa final . . . 32

**4. Firmware** **35**
4.1. Diseño . . . 35
4.2. Consideraciones sobre la implementación . . . 36
4.2.1. Vector de estados . . . 36
4.2.2. Protocolo de comunicación con el PC . . . 38
4.2.3. Principales rutinas . . . 38
4.3. Estimación del consumo del DIR . . . 42
4.3.1. Consumo del DIR *Suspendido* . . . 42
4.3.2. Consumo del DIR *Activado* . . . 43
4.3.3. Consumo del DIR *Conectado* . . . 43
4.4. Deducción de las ecuaciones de medida . . . 44
4.4.1. pH . . . 44
4.4.2. Temperatura . . . 45

**5. AnubisLAB** **47**
5.1. Funcionalidades . . . 47
5.2. Diseño . . . 47
5.2.1. Descripción de los módulos . . . 47
5.2.2. Tratamiento de los datos . . . 49
5.3. Consideraciones sobre la implementación . . . 50
5.3.1. Visual Basic . . . 50
5.3.2. Entorno de trabajo . . . 50
5.3.3. Tipos de archivos . . . 50
5.4. Casos de uso . . . 51

**6. Diseño mecánico del encapsulado** **57**
6.1. Requerimientos . . . 57
6.2. Elección del material . . . 58
6.3. Diseño . . . 59
6.3.1. Panel . . . 59
6.3.2. Encapsulado del sensor de temperatura . . . 60
6.4. Fabricación . . . 62

**7. Resultados** **63**
7.1. Estimación del consumo . . . 63
7.1.1. Consumo del DIR *Suspendido* . . . 63
7.1.2. Consumo del DIR *Activado* . . . 63
7.1.3. Consumo del DIR *Conectado* . . . 64
7.2. Caracterización de los sensores de temperatura y pH . . . 66
7.2.1. Caracterización del sensor de temperatura . . . 66
7.2.2. Caracterización del sensor de pH . . . 67
7.3. Incertidumbre . . . 68
7.3.1. Incertidumbre en la medida de temperatura . . . 69
7.3.2. Incertidumbre en la medida de pH . . . 70
7.4. Validación . . . 75
7.4.1. Experimento de 1 hora . . . 76
7.4.2. Experimento de 24 horas . . . 77

**8. Conclusiones** **79**
8.1. Principales problemas encontrados . . . 80
8.2. Principales aportes . . . 81
8.3. Trabajo a futuro . . . 82

**A. Principio de funcionamiento de los sensores de pH** **A-1**
A.1. Sensores de vidrio . . . A-1
A.1.1. Definiciones previas . . . A-1
A.1.2. ¿Qué es el pH? . . . A-2
A.1.3. Pila electroquímica . . . A-3
A.1.4. Ecuación de Nernst . . . A-4
A.1.5. Electrodo de referencia . . . A-4

A.1.6. Electrodo de vidrio para medir pH . . . . . A-5
A.2. Sensores de pH basados en ISFETs . . . . . A-6
A.3. Hoja de datos del sensor PHE-7353 . . . . . A-8

**B. Esquemático de la placa del DIR** **B-9**

**C. Complemento de firmware** **C-11**
C.1. Tabla de comandos . . . . . C-11
C.2. Tabla ASCII . . . . . C-15
C.3. Vector de estados . . . . . C-16

**D. Planos de fabricación del encapsulado** **D-17**

**E. Gestión de proyecto y costos** **E-19**
E.1. Plan de proyecto . . . . . E-19
E.2. Costo del proyecto . . . . . E-19
E.3. Costo de producción . . . . . E-21

# Índice de figuras


1.1. Metodología actual de monitoreo . . . 2
1.2. Diagrama de bloques del sistema . . . 4

2.1. Esquema de un sensor de pH . . . 9
2.2. Esquema de un sensor de pH combinado . . . 10
2.3. Esquema de un sensor de pH combinado de doble juntura . . . 12
2.4. Circuito de Bandgap para medir temperatura . . . 16
2.5. Diagrama de bloques del sensor LM95071 . . . 18

3.1. Diagrama de bloques del hardware del sistema . . . 19
3.2. Circuito programador del PIC . . . 22
3.3. Esquema de la interfaz RS232 . . . 24
3.4. Circuito equivalente Thévenin del sensor de pH . . . 27
3.5. Circuito de adquisición de pH . . . 29
3.6. Prototipo en WireWrap . . . 31
3.7. Prototipo en PCB . . . 32
3.8. Placa final sin componentes . . . 32
3.9. Placa final con los componentes . . . 33
3.10. Layout de la parte inferior de la placa final . . . 33
3.11. Layout de la parte superior de la placa final . . . 33

4.1. Diagrama de bloques de alto nivel del firmware. . . . 35
4.2. Esquema de capas de programación. . . . 36
4.3. Vector de Estados . . . 37
4.4. Banderas no volátiles. . . . 37
4.5. Protocolo de comunicación con el PC . . . 38
4.6. Diagrama de flujo de la configuración inicial . . . 38
4.7. Diagrama de flujo del loop principal del firmware . . . 39
4.8. Diagrama de flujo de la rutina de atención a las interrupciones . . . 40
4.9. Diagrama de flujo de la rutina Intérprete . . . 40
4.10. Diagrama de flujo de la rutina MEDIR . . . 41
4.11. Diagrama de flujo de la rutina GUARDAR DATO . . . 41

5.1. Módulos de AnubisLAB . . . 48
5.2. Ventana principal de AnubisLAB . . . 50
5.3. Casos de Uso de AnubisLAB . . . 51

6.1. Foto de una vaca fistulada. . . . 57
6.2. Esquema del rumen bovino . . . 57
6.3. Esquema exterior del encapsulado. . . . 60
6.4. Foto del panel del encapsulado desde arriba y abajo. . . . 60
6.5. Distribución de elementos en el cuerpo principal del encapsulado . . . 61
6.6. Foto del sensor de temperatura . . . 61
6.7. DIR en manos de Mariano . . . 62

7.1. Gráfica de corriente vs tiempo . . . 63
7.2. Gráfica de consumo durante el borrado . . . 64
7.3. Gráfica de consumo cuando se descarga . . . 65

7.4. Gráfica de corriente en la toma de un dato conectado al PC . . . . . 65
7.5. Curva de calibración de temperatura . . . . . 67
7.6. Curvas de comparación del DIR con otros sensores de pH . . . . . 68
7.7. Comparación de medidas de pH con IIQ . . . . . 69
7.8. Incertidumbre Vs milivoltios, variando la deriva . . . . . 73
7.9. Incertidumbre Vs milivoltios, varíando la pendiente . . . . . 74
7.10. Introducción del DIR . . . . . 75
7.11. Extracción del DIR . . . . . 76
7.12. Los primeros datos de pH . . . . . 76
7.13. Los primeros datos de temperatura . . . . . 77
7.14. Gráfica de pH del experimento de 24 horas . . . . . 77
7.15. Gráfica de temperatura del experimento de 24 horas . . . . . 78
7.16. Gráfica del trabajo “Sub-Acute Ruminal Acidosis (SARA) in Dairy Cows” de T. Mutsvangwa 78

8.1. Extracción de líquido ruminal . . . . . 82

A.1. Pila electroquímica . . . . . A-3
A.2. Esquema de un electrodo de referencia . . . . . A-5
A.3. Esquema de un electrodo de vidrio para medir pH . . . . . A-5
A.4. Diagramas esquemáticos para MOSFET e ISFET . . . . . A-6
A.5. Curvas ideales de operación para un ISFET a diferentes valores de pH . . . . . A-7

B.1. Esquemático de la placa final . . . . . B-9
B.2. Esquemático de la placa final . . . . . B-10

D.1. Plano de las tapas del encapsulado . . . . . D-17
D.2. Plano longitudinal del cuerpo central del encapsulado . . . . . D-18

# Índice de tablas


1.1. Requerimientos del sistema . . . 3

2.1. Resumen hoja de datos PHE-7353 . . . 13
2.2. Tabla comparativa de las características de los sensores . . . 17
2.3. Principales características del sensor LM95071 . . . 18

3.1. Principales características de la memoria 25AA256 . . . 24
3.2. Principales características del MAX3221 . . . 25
3.3. Principales características del DS1306 . . . 26
3.4. Parámetros del circuito equivalente Thévenin del sensor de pH . . . 27
3.5. Principales características del TPS60243 . . . 31

4.1. Consumo de los componentes del DIR durante una medida. . . . 42
4.2. DIR *Activado*: Tiempos. . . . 43
4.3. DIR *Conectado*: Tiempos. . . . 44

5.1. Caso de uso: Conectar . . . 51
5.2. Caso de uso: Desconectar . . . 52
5.3. Caso de uso: Borrar Memoria . . . 52
5.4. Caso de uso: Descargar Datos . . . 53
5.5. Caso de uso: Setear DIR . . . 54
5.6. Caso de uso: Medida Continua . . . 54
5.7. Caso de uso: Calibrar . . . 55
5.8. Caso de uso: Descarga de Estado . . . 56
5.9. Caso de uso: Imprimir . . . 56
5.10. Caso de uso: Abrir archivo . . . 56

6.1. Principales características de “Cestilene HD 500” . . . 59
6.2. Características principales del encapsulado del DIR . . . 62

7.1. Consumo y tiempos de cada tarea del DIR *Conectado*. . . . 65
7.2. Resultados de experimento de calibración . . . 66
7.3. Promedios de medidas . . . 67
7.4. Valores para incertidumbre de G . . . 72
7.5. Valores para incertidumbre de los voltajes . . . 72
7.6. Resumen de datos para calculo de incertidumbre . . . 73
7.7. Resumen de datos para calculo de incertidumbre tipo B . . . 75

8.1. Resultados obtenidos vs requerimientos del sistema . . . 79

C.1. Estructura de la primer página de la memoria . . . C-16

E.1. Horas totales dedicadas y créditos acumulados . . . E-19
E.2. Horas dedicadas vs horas previstas . . . E-20
E.3. Horas hombre . . . E-20
E.4. Planilla de costos del desarrollo . . . E-20
E.5. Lista de precios FOB en Estados Unidos . . . E-21

# Capítulo 1

# Generalidades

El presente informe documenta y analiza las tareas desarrolladas en el marco del proyecto de fin de carrera *Monitoreo del comportamiento del rumen*[1] *bovino* de Ingeniería Eléctrica, perfil Electrónica.

## 1.1. Motivación y descripción del proyecto

La cosecha directa del forraje es la principal fuente de alimentación de las vacas lecheras en los sistemas de producción en Uruguay.

La producción en condiciones de pastoreo presenta varias restricciones cuando se la compara con la producción alcanzada en sistemas estabulados. En términos generales, los consumos de materia seca logrados en pastoreo son menores a los logrados en estabulación. Además, son insuficientes para sostener altas producciones de leche, las cuales son factibles de ser alcanzadas con el potencial genético disponible en nuestro país. Por otro lado, los animales seleccionan dentro del forraje disponible lo que modifica las condiciones del forraje remanente, su potencial de producción y por lo tanto su productividad en el largo plazo.

En este contexto, las decisiones de utilización del forraje son esenciales para lograr el equilibrio entre los componentes del sistema, su rentabilidad y su sustentabilidad. Una mejor comprensión de las interacciones entre los animales y su alimento es esencial para contribuir al desarrollo de sistemas pastoriles más eficientes en la utilización de los recursos disponibles, más rentables y finalmente menos dependientes de insumos externos para sostener buenos niveles de productividad.

Para lograr una mejor comprensión de estas interacciones el grupo de Utilización de Pasturas del Departamento de Producción Animal de la Facultad de Agronomía ha realizado una serie de trabajos en los que se han caracterizado las condiciones de ambiente y cinética ruminal, que se generan en condiciones de pastoreo.

El proceso de digestión de la vaca es relativamente complejo, involucrando la digestión del forraje cuya fracción dominante está constituida por una matriz compleja de celulosa, hemicelulosa y lignina. Este proceso de digestión es posible por la presencia en el rumen de una vasta población de bacterias y protozoos. La composición de la población microbiana varía según el patrón de ingestión, las características del forraje consumido y la participación o no de alimentos suplementarios (típicamente granos o subproductos industriales). Las condiciones de fermentación son rápidamente reflejadas por las condiciones del medio ambiente ruminal así como por la concentración de los diferentes productos de la fermentación ruminal.

Monitorear las condiciones internas del rumen aporta información relevante a la hora de modificar la alimentación e intervenir en la producción de leche. Las variables que caracterizan adecuadamente el rumen, y que por lo tanto se miden son: pH, temperatura, presión osmótica, ácidos grasos volátiles, amonio y relación líquido - sólido.

El interés en el tema surge a partir de un acercamiento al Ing. Agr. (PhD) Pablo Chilibroste, que a los efectos del presente proyecto actuó como contraparte. El comportamiento del rumen es una de sus principales líneas de investigación y disponer de un instrumento que lo monitoree continua y autónomamente le

[1] El rumen es el primer estómago de la vaca, tiene una capacidad de 150 litros

permitirá profundizar en la misma.

El problema que el presente proyecto se plantea resolver es monitorear el comportamiento del rumen de un bovino. Esto implica sensar, almacenar y presentar el conjunto de variables que lo caracterizan. Para compatibilizar los requerimientos de la contraparte con las características de un proyecto de grado de Ingeniería Eléctrica se ha restringido el alcance del proyecto a la medición de dos variables: pH y temperatura.

Para monitorear el rumen se trabaja sobre vacas fistuladas. Éstas vacas son sometidas a una operación quirúrgica en la que se realiza un orificio en su lomo, de modo que el rumen queda accesible desde el exterior mediante un tapón. Para obtener las medidas, personal especialmente dedicado a ello saca muestras de la materia que se encuentra en el rumen y las analiza lo más rápido posible, dado que el proceso que tiene lugar en el rumen se debe realizar en forma anaeróbica (Ver foto en figura 1.1). Actualmente en un experimento normal se sacan muestras cada 8 horas (excepcionalmente llegan a tomarse muestras cada 2 horas). La limitación más importante que tiene el sistema actual de monitoreo es la inviabilidad de hacerlo en forma continua. La solución que el presente proyecto implemente deberá lograr un sensado continuo de las variables (cada 5 minutos).

Figura 1.1: Metodología actual de monitoreo

En resumen, el presente proyecto consiste en construir un dispositivo que sea capaz de sensar continuamente la temperatura y el pH del rumen de una vaca fistulada.

Si bien la solución que se pretende aportar viene a satisfacer una carencia que existe en el ámbito de la investigación agronómica, tiene una proyección hacia la producción primaria que es notoria. Si el dispositivo lograse autonomía y costos razonables, se sabe que en un tambo o en sistemas de producción de leche estabulados intensivos (como feedlots) podría ser un producto de gran utilidad.

## 1.2. Trabajos relacionados

Hasta donde se pudo averiguar no se conoce que exista en el mundo, a nivel comercial, un dispositivo de estas características. A nivel académico, se ha tomado conocimiento de al menos dos proyectos similares.

En la “Swiss Federal Research Station for Animal Production”[2], un grupo a cargo de la Dra. Frigga Dohme, ha desarrollado un dispositivo de características semejantes. A pesar de los intentos no se pudo obtener mayor información, ya que el mismo se encuentra en fase de desarrollo.

En el “Centre de Recherche INRA” de Francia[3], en octubre de 2005, el Ing. Agr. Pablo Chilibroste discutió con el Prof. Michalet Doreau, sobre el desarrollo de un dispositivo que se estaba realizando en dicho instituto.

[2] http://www.sar.admin.ch/rap/inde.html
[3] http://www.clermont.inra.fr/

Se tiene pendiente un contacto con este centro ya que en su sitio web no se pudo hallar información al respecto.

Existen algunas propuestas también en etapa de pre-producción que miden solamente temperatura. Dos trabajos encontrados en este sentido son: "Radiotelemetry systems for measuring body temperature" del TEAGASC[4] y una aplicación de "TinyDB By Remote" de CSIRO[5] en "The Australian National University".

## 1.3. Requerimientos

La contraparte quiere lograr con el presente proyecto mejoras sustanciales en el proceso de obtención de datos para sus investigaciones. Para lo cual, el objetivo general del proyecto consiste en diseñar y construir el prototipo de un dispositivo que sea capaz de sensar continuamente la temperatura y el pH del rumen de una vaca fistulada. Deberá preverse la posibilidad de que en el futuro puedan agregarse otros sensores.

La contraparte considerará exitoso el proyecto si el dispositivo es capaz tomar muestras de pH y temperatura, con una precisión de 0.1 pH y 0,1 °C en cada caso, cada 5 minutos durante 72 horas. Se deberá poder acceder a los datos desde una PC fácilmente.

El resumen de los requerimientos se presenta en la tabla 1.1.

Tabla 1.1: Requerimientos del sistema

| | |
|---|---|
| Variables a medir | pH (entre 3.5 y 7.5), temperatura (entre 36 °C y 41 °C) y tiempo. |
| Precisión de los datos | Incertidumbre menor a 0,1 pH, 0,1 °C y 1 segundo en cada caso. |
| Costo | El costo del desarrollo e implementación deberá ser menor a 800 dólares. |
| Escalable | Deberá preverse la posibilidad de agregar más sensores. |
| Interfaz con el usuario | Sencilla y amigable. |
| Robustez | Adecuada. |
| Tiempo de vida | Máximo posible. |
| Consumo | Mínimo posible. Deberá contar con una alerta de batería baja y tener una duración del orden de meses. |
| Autonomía | Deberá ser capaz de permanecer en el rumen como mínimo durante 72 horas sin necesidad de ninguna acción por parte del usuario. |
| Período de muestreo mínimo | El intervalo de tiempo mínimo entre dos mediciones consecutivas deberá ser de 5 minutos. |
| Localización | Deberá preverse la posibilidad de incorporarle pesas al dispositivo de medición para posicionarlo en el retículo del rumen. |
| Tamaño | Deberá caber en un cilindro de 10 cm. de alto x 20 cm de diámetro. |
| Bio-compatibilidad | No deberá alterar el normal funcionamiento del rumen. |
| Encapsulado hermético | Deberá estar completamente aislado del rumen. |

[4] http://www.teagasc.ie/
[5] http://www.cmit.csiro.au/

## 1.4. Solución propuesta

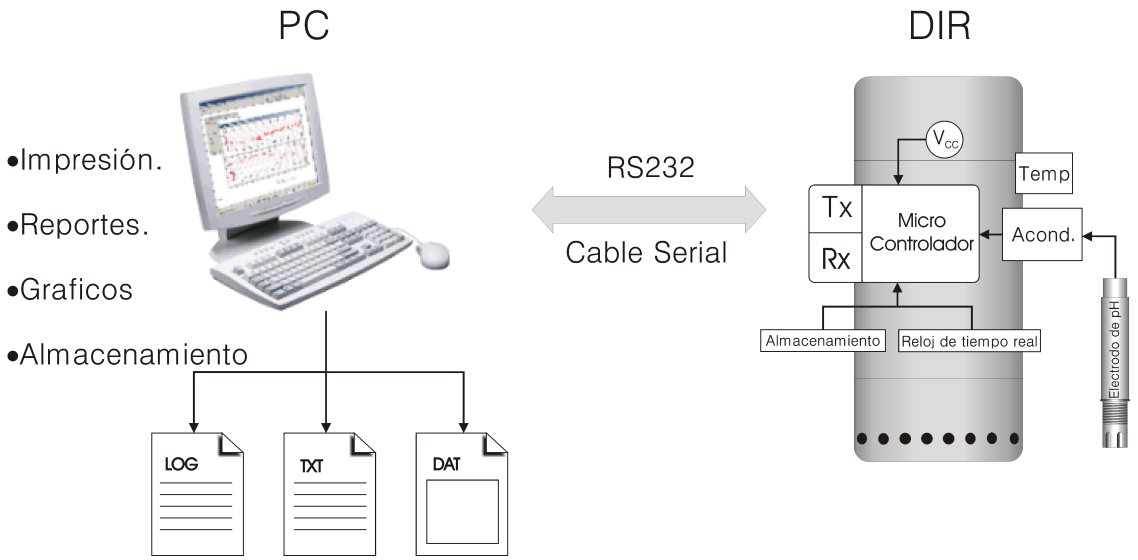



Figura 1.2: Diagrama de bloques del sistema

Anubis es un dispositivo capaz de sensar continuamente la temperatura y el pH del rumen de una vaca fistulada, en total acuerdo con los requerimientos establecidos en la sección 1.3.

Anubis consta básicamente de dos partes (Ver figura 1.2):

- El Dispositivo IntraRumial (DIR) es el que se encarga de adquirir los datos, almacenarlos y transmitirlos al exterior del rumen.
- Un programa en PC llamado AnubisLAB que recibe los datos del DIR, los procesa y los presenta al usuario de forma amigable.

## 1.5. Criterios generales de diseño

A continuación se verán los criterios generales utilizados para el diseño de Anubis.

Los requerimientos de Anubis imponen un diseño orientado al *bajo consumo*. Esta característica no sólo es conveniente en términos de eficiencia en el uso de recursos limitados, como la energía en un sistema autónomo, sino que también resulta deseable pensando en futuros desarrollos del sistema. En éstos se espera poder trabajar con animales no fistulados, en este escenario el DIR no sería recuperable y por lo tanto debería tener una gran autonomía.

La mayor parte de los componentes del DIR fueron elegidos, entre otras características, por su bajo consumo y la posibilidad de permanecer en "Standby". La mayor parte de los componentes analógicos y pasivos, no prevén una forma de trabajo de estas características, con lo cual debió implementarse un circuito de "prendido" y "apagado" del bloque analógico.

Anubis funcionará principalmente en el campo, con lo cual su fuente de alimentación no puede depender de baterías de difícil acceso. Para facilitar su sustitución una vez agotadas, el diseño se orientó a trabajar con dos pilas AA. Esta elección condicionó el tipo de componentes que se podían incluir en el desarrollo, ya que debían funcionar como una alimentación de $3\,V$.

Anubis deberá garantizar la integridad y la confiabilidad de los datos en todos los niveles de su diseño. Esto requiere acciones muy diversas, desde un especial cuidado en el tratamiento del *ruido* hasta implementar algún tipo de control en los protocolos de transmisión de datos.

Para la implementación de la comunicación del DIR con el exterior del rumen se manejaron tres opciones.

La primera opción considerada y la más atractiva era que el DIR se comunicara con un dispositivo de mano por un enlace de Radio-Frecuencia (RF). Luego, ese dispositivo se comunicaría con un PC para descargar los datos. Era la más atractiva en términos de la proyección que le da al sistema, pero a los efectos de los requerimientos no aportaba ningún beneficio. En efecto, como se verá en la sección 2.1, el sensor de pH debe ser calibrado y limpiado periódicamente. El aporte fundamental de esta opción es no tener que retirar el DIR del rumen para obtener los datos, pero éste, debe ser retirado necesariamente por las limitaciones de la tecnología de medición de pH antes mencionadas. Además la contraparte no hace experimentos mayores a 72 horas y no tiene mayor interés en procesar los datos en tiempo real.

La segunda alternativa establecía que el DIR se comunicara con la tapa de la fístula mediante un cable. Allí se instalaría un conector para que el usuario, con un dispositivo de mano, se conectara al DIR. Luego, ese dispositivo se comunicaría con un PC para descargar los datos. Esta opción adolece de los mismos problemas que presentaba la primera opción y agrega otro, aún más grave. La experiencia que tiene la contraparte en cables o dispositivos colgados de la tapa de la fístula es mala, porque el rumen tiene una dinámica importante y éstos se terminan enredando.

La tercer alternativa consistía en retirar el DIR del rumen y conectarlo a un PC. Esta opción fue la finalmente implementada y es la que se describe en la sección 1.4.

Si bien para comunicar al DIR con el PC se eligió el protocolo RS232, a nivel de diseño se tomaron algunos recaudos para facilitar la migración hacia otro protocolos. Para contemplar estos futuros cambios, la comunicación entre el DIR y el mundo exterior se encapsuló en un módulo llamado *Intérprete*. Éste es un intérprete de comandos, que con leves modificaciones sería capaz de utilizar cualquier canal de comunicación. En el mismo sentido, en AnubisLAB la comunicación con el DIR se centralizó en un solo módulo. De hecho, Anubis prevé que cualquier aplicación que implemente RS232 sea capaz de configurar el DIR, obtener datos, etc.

Como criterio general de diseño, se estableció que la complejidad en el tratamiento de los datos esté en AnubisLAB , simplificando así, la programación del DIR, mejorando los tiempos de procesamiento y el consumo.

Otros criterios de diseño seguidos fueron:

- Utilizar los elementos disponibles en el mercado local.
- Investigar implementaciones existentes en lugar de resolver los problemas desde cero.
- Aprovechar al máximo las posibilidades que brindan los microntroladores. En este sentido se seleccionó uno que contase con módulos que resuelvan la comunicación con el PC, la comunicación con periféricos seriales y la conversión analógico-digital.
- Criterio de *simplicidad*: cuando se tenían varias alternativas, en primera instancia siempre se optó por la más simple.

## 1.6. Estructura del documento

La presente documentación está organizada en 8 capítulos y 5 anexos. En el segundo capítulo se introducen los sensores, se describen las tecnologías disponibles, sus principios de funcionamiento, el proceso de selección y las características principales de los sensores seleccionados. El tercer capítulo está destinado a describir los diferentes componentes del DIR, sus principales características y cómo se integran. En los capítulos 4 y 5 se presentan las decisiones de diseño y los principales detalles de implementación del firmware y software respectivamente. En el capítulo 4 se incluye además un estudio teórico de consumo del sistema y se deducen las ecuaciones que deben utilizarse para interpretar los datos que entrega el DIR. En el capítulo 6 se discuten los detalles de diseño y fabricación del encapsulado del DIR. El capítulo 7 presenta los resultados obtenidos, el consumo real del sistema y la incertidumbre de los sensores. Además se presentan los resultados de la caracterización de éstos. El último capítulo está destinado a las principales conclusiones arribadas. Aquí se describen los problemas encontrados, los principales aportes que brinda la solución implementada y se plantean posibles líneas de trabajo a futuro.

En el apéndice E se incluye una evaluación y seguimiento del plan de proyecto con las horas reales dedicadas a cada tarea y un detalle de gastos realizados.

Junto a la documentación se entrega un CD que contiene:

- Versión electrónica de la documentación.
- Manual de Usuario.
- Programa instalador de AnubisLAB.
- Archivos fuente del Firmware.
- Archivos fuente de AnubisLAB.
- Archivos Eagle del diseño de la placa.
- Gráficas de datos experimentales.
- Hojas de datos, manuales y notas de aplicación utilizadas.
- Fotos.
- Otros documentos y archivos auxiliares.

.

# Capítulo 2

# Sensores

## 2.1. Sensor de pH

El objetivo de esta sección es presentar brevemente los sensores de pH. En el apéndice A.1 se desarrollan los conceptos teóricos involucrados y el principio de funcionamiento.

En primer lugar se estudian las diferentes tecnologías disponibles para la medición de pH, concluyendo que el sensor de vidrio es el más adecuado para la presente aplicación. Luego se muestran los conceptos teóricos que explican su funcionamiento, sus características principales, sus limitaciones y el fundamento de las mismas. Finalmente, se describe el proceso de selección y las características específicas del sensor seleccionado.

El sensor de pH de vidrio básicamente puede pensarse como una "pila electroquímica", donde uno de sus electrodos es la referencia y el otro se inserta en la solución a la cual se le quiere medir el pH. Como cualquier pila electroquímica, entre los electrodos se genera una diferencia de potencial, que es lo que efectivamente se mide y que está relacionada directamente con la medida de pH de la solución.

El modelo de la pila es el más ampliamente difundido y es el que aparece en los textos de enseñanza a nivel superior. Tiene la ventaja de ser relativamente sencillo, a pesar de que hay fenómenos que no logra explicar. No entraremos en esos aspectos ya que exceden el alcance de este trabajo pero se deja constancia que existen modelos más complejos, aunque no tan difundidos, basados en la ecuación de Boltzman que parecerían modelar de forma más adecuada el funcionamiento del sensor (véase por ejemplo [Che98]).

La comprensión del funcionamiento del sensor de pH ha sido una parte sustancial de este trabajo. Si bien los aspectos más teóricos no son esenciales para la utilización del sensor (ya que con saber la fórmula podría alcanzar) le dan contexto y fundamento a una serie de problemas con los cuales es inevitable convivir. Para no extender demasiado este trabajo, dichos aspectos se han incluido en el apéndice A.1, aunque se quiere resaltar que una lectura a los mismos puede resultar imprescindible para entender ciertos conceptos que se han asumido como conocidos.

Por último se quiere mencionar que la información que se aporta en este capítulo se obtuvo esencialmente en [BAT05], [Eme01] y [Cig04].

### 2.1.1. Tecnologías disponibles

Se encontraron dos tecnologías diferentes que ofrecen una precisión aceptable para la medición de pH: vidrio e ISFET[1].

El sensor de vidrio tiene la gran ventaja de ser un estándar a nivel industrial y de laboratorio. Su principio de funcionamiento se conoce desde principios de siglo XX y su uso está ampliamente generalizado y sus resultados ampliamente validados, al punto que el patrón de la medida de pH se basa en un electrodo de vidrio. Estos motivos llevaron a inclinarse por el sensor de vidrio y es por eso que esta sección está casi enteramente dedicada a él.

[1] Ion Selective Field Effect Transistor

El sensor de ISFET está en fase de investigación y está muy poco desarrollado a nivel comercial. Las pocas implementaciones encontradas tenían un precio muy superior a los de vidrio. Asimismo, el integrado en el cual está basado el sensor de ISFET no está a la venta por separado. A través del grupo de microelectrónica del IIE se intentó establecer infructuosamente contacto con algunos centros de investigación que tienen desarrollos sobre el tema (por ejemplo "Fraunhofer Institut Photonische Mikrosysteme[2]" y el "Centro Nacional de Microelectrónica[3]").

El principio de funcionamiento del ISFET fue propuesto por primera vez en 1970 (ver [Ber70]). El sensor tiene una serie de características que lo hacen muy interesante para nuestra aplicación y es razonable pensar que en pocos años su desarrollo llegue a un punto tal que desplace al sensor de vidrio. El sensor de ISFET en contraposición con el de vidrio es mucho más chico, podría tener una mayor vida útil y no requeriría limpieza ni calibración.

La utilización de un sensor de pH basado en ISFET podría darle una proyección enorme al presente trabajo. Debido a las limitaciones del sensor de vidrio, el sistema de monitoreo desarrollado en este trabajo, debe retirarse de la vaca cada una o dos semanas para calibrarlo y limpiarlo. Para esto es imprescindible trabajar con vacas fistuladas. Eliminar la necesidad de calibración y limpieza llevaría a no necesitar sacar el sistema de la vaca, con lo cual se podría trabajar con vacas no fistuladas y por lo tanto facilitan la inserción del producto en el mercado lechero.

Por más información sobre sensores de pH basados en ISFET's ver apéndice A.2.

### 2.1.2. Descripción y principio de funcionamiento de los sensores de vidrio

Las reacciones más importantes probablemente son las que tienen lugar en disolución acuosa. En general, todas las reacciones biológicas y particularmente las que se dan en el rumen bovino, se realizan en el agua. Por lo tanto el agua es el solvente de las reacciones que estudiaremos. El pH es un instrumento fundamental en el estudio de dichas reacciones ya que proporciona una medida de la acidez o de la alcalinidad de las sustancias acuosas. Formalmente el pH se define según la ecuación (2.1):

$$pH = -\log_{10}[H^+] \tag{2.1}$$

dónde $[H^+]$ es la concentración del ion hidrógeno. Por más detalles ver sección A.1.2.

El sensor de pH consiste en la combinación de un electrodo de referencia que brinda un potencial de referencia y un electrodo de vidrio que se inserta en la solución a la cual se le quiere medir el pH (ver figura 2.1), formando una pila electroquímica, que va a desarrollar en sus bornes un potencial $E$ proporcional al pH, según la ley de Nernst[4]:

$$E = E^0 + \frac{RT}{F} \ln [H^+] \tag{2.2}$$

donde:

- $R$ es la constante de los gases y vale $8{,}315\,\mathrm{K}^{-1}\mathrm{mol}^{-1}$.
- $T$ es la temperatura en °K.
- $F$ es la constante de Faraday y vale 96485 C.
- $[H^+]$ es la concentración del ion hidrógeno.
- $E^0$ es una constante que agrupa una serie de potenciales: en primer lugar el valor del voltaje de referencia, pero también otros[5] que aparecen en la pila y que escapan al alcance de este trabajo. Sin embargo se quiere mencionar que estos potenciales varían con el tiempo en la medida que la sustancia de referencia se va contaminando y es lo que provoca que se requiera una calibración periódica. Por otro lado, $E^0$ depende de la temperatura. Volveremos sobre estos puntos en la sección 2.1.3.

[2] http://www.ipms.fraunhofer.de
[3] http://www.cnm.es
[4] En el apéndice A.1 se presenta el modelo del sensor de vidrio, mostrando cómo se deduce esta ecuación.
[5] Por ejemplo los potenciales de frontera que aparecen en el disco poroso y que se han despreciado.

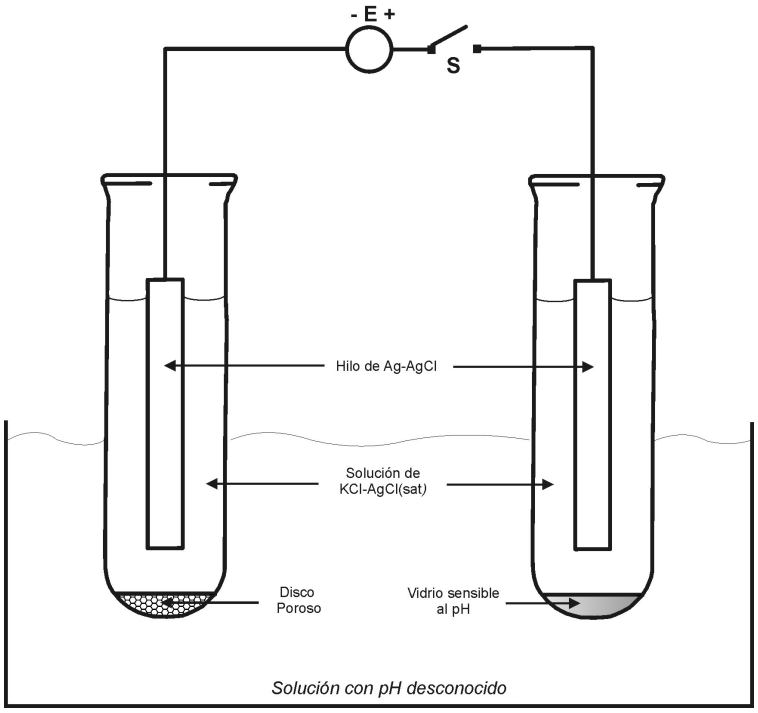



Figura 2.1: Esquema de un sensor de pH

Considerando la definición de pH dada por la ecuación (2.1), podemos reescribir la ecuación (2.2):

$$E = E^0 - \frac{RT}{F} \ln 10 \times pH \tag{2.3}$$

Idealmente $E^0$ es tal que a $pH = 7$, $E$ vale $0\,V$.

$$\Delta E = -\frac{RT \ln 10}{F} \times (pH - 7) \tag{2.4}$$

sustituyendo se obtiene que, a 25 °C, la pendiente de la recta vale $-59{,}16\,\mathrm{mV/pH}$.

Tradicionalmente los electrodos venían en encapsulados separados, actualmente lo habitual es encontrarlos en un mismo encapsulado. Por este motivo comúnmente se le llama *sensor combinado* o *de combinación*. En la figura 2.2 se muestra un esquema del mismo.

### 2.1.3. Características

Si se analizan los sensores que se encuentran en el mercado internacional se observa que hay una gran variedad y si se clasifican en función de su uso se concluye que hay unos adecuados para ser usados en un laboratorio y otros en ambiente industrial.

Los *sensores industriales*, en contraposición a los de *laboratorio*, permiten una medida continua, no tienen requisitos de limpieza tan exigentes, no tienen requerimientos de direccionalidad, son mucho más robustos, pueden trabajar a presiones mayores que la presión atmosférica y a altas temperaturas. Por otra parte, no logran la precisión de aquéllos y son más caros.

A continuación se enumeran las diferentes características que tienen los sensores de vidrio, comentando cuando corresponde las particularidades del sensor seleccionado para la aplicación.

#### Calibración

Los sensores de pH con el uso y el tiempo varían su característica voltaje-pH. Ocurren cambios tanto en la pendiente, así como un corrimiento del cero que llamaremos *offset*. Para obtener una medida correcta es

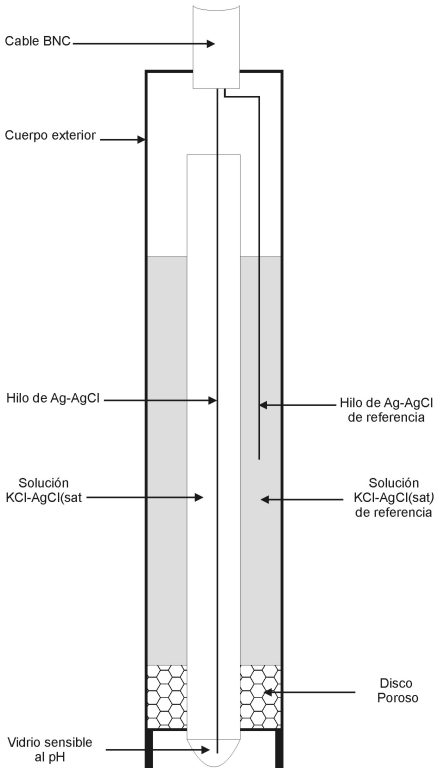



Figura 2.2: Esquema de un sensor de pH combinado

necesario calibrar el sensor, esto consiste en medir los nuevos valores de la pendiente y el offset, y utilizar estos nuevos valores en la ecuación (2.4).

La variación se debe a que el intercambio iónico a través del disco poroso termina por contaminar la referencia. Con el tiempo la contaminación será tal que el electrodo será obsoleto (la pila se habrá agotado).

Para calibrar se utilizan unas soluciones *buffer* que tienen la particularidad de brindar un valor de pH muy estable. En el mercado pueden encontrarse fácilmente soluciones que tienen un pH de 4; 7 y 10.

Para calibrar, alcanza con tomar dos medidas. Colocando el sensor en una solución buffer de pH 7 se obtiene el valor correspondiente a cero voltios (el offset). Con una solución de pH 4 o 10, se calcula otro punto de la recta obteniéndose la pendiente[6]. Se utilizará una solución buffer de 4 o 10 dependiendo de la aplicación, buscando que los puntos de calibración estén dentro del rango de medición. En el caso del presente proyecto se debe medir pH entre 3,5 y 7, con lo cual corresponde usar una solución buffer de pH 4.

No todos los fabricantes consignan el valor de la deriva de su sensor, aunque lo estándar es 2 mV/semana o equivalentemente a 0,03 pH/semana. En el caso de la presente aplicación, para mantener la medida dentro de la incertidumbre requerida (0,1 pH), un sensor con esas características debería calibrarse por lo menos cada 3 semanas.

**Efecto de la temperatura**

Al estar regidos por la ecuación (2.2), tanto el potencial que genera el electrodo de referencia como el que genera el electrodo de vidrio dependen de la temperatura. Sin embargo, los electrodos a un pH de 7, presentan un punto isopotencial. Usando este punto y conociendo el comportamiento teórico del electrodo es posible corregir el error para cualquier valor de temperatura.

Para la presente aplicación la temperatura de trabajo es de 38 °C y el rango de medición será entre 36 °C y 41 °C. De la ecuación (2.3) se deduce que la pendiente cambia 0,1984 mV por grado Celsius y que a 38 °C

[6]Se busca que estén lo suficientemente lejos de 7, recordar que es una escala logarítmica con lo cual la concentración de iones de hidrógeno a un pH 4 ó 10 es 1000 veces más chica o más grande respecto a un pH de 7

la pendiente ideal es $61,74$ mV/pH.

### Tiempo de vida

El offset es una medida de cuánto se ha deteriorado el electrodo de referencia (el nivel de carga de nuestra pila). El offset aumenta con la contaminación de la sustancia de referencia, pero mientras se mantenga por debajo de 3 unidades de pH el sensor funciona perfectamente. Cuando el offset alcanza 4 unidades de pH está todavía dentro de un rango utilizable pero su deterioro es significativo. Cuando el offset pasa de 4 unidades de pH o equivalentemente los 240 mV la solución de referencia está contaminada a tal punto que no debe utilizarse y el sensor debe cambiarse. [BAT05]

El tiempo que demora la sustancia de referencia en contaminarse al punto de volver obsoleto al sensor, depende de la aplicación. En procesos muy corrosivos, donde se trabaja con ácidos (por ejemplo en la industria papelera) el sensor puede tener un tiempo de vida de horas. En aplicaciones relacionadas con la alimentación o el agua los fabricantes aseguran tiempos de vida del orden del año.

### Precisión

La mayoría de los fabricantes no consigna nada al respecto y aquellos que sí lo hacen hablan de precisión, exactitud, sensibilidad o resolución indistintamente. Lo estándar está en el orden del 0,01 unidades de pH, y en el caso particular del sensor seleccionado para nuestro proyecto el fabricante declara una exactitud de $\pm 0,1\,\%$ a fondo de escala, lo cual es excelente.

El rango de pH en el cual el sensor es capaz de trabajar con la exactitud declarada es de 2 a 12. En los extremos de la escala, el sensor de pH presenta un error mayor que el que se encuentra en el resto de la escala.

A modo de ejemplo se mencionará el *error sódico*. A medida que el pH aumenta, la concentración de iones de hidrógeno baja, en tanto que la concentración de iones de sodio sube. El sodio es muy parecido al hidrógeno en su estructura química, y en la medida que tenemos muchos más iones de sodio, la membrana de vidrio empieza a confundirlos, dando una medida equivocada de pH. En particular, el fabricante del sensor usado en el presente proyecto, consigna un error sódico de 0,05 a un pH de 12,8.

De todos modos estos problemas no afectan la presente aplicación ya que se va a trabajar entre un pH de 3,5 y 7,5.

### El disco poroso

Para una explicación detallada de qué es el *disco poroso* o *juntura* y cuál es su función ver apéndice A.1.3.

La aplicación condiciona el material del disco poroso. La juntura *cerámica* es muy precisa pero no sirve en sustancias particuladas o en temperaturas o presiones medianamente elevadas (por ejemplo no se recomienda para temperaturas mayores a $50\,^{\circ}$C). Sus características la hacen ideal para usarse en los sensores de laboratorio, donde generalmente se trabaja a temperatura ambiente. Existen también junturas de diferentes clases de *polímeros*. En este caso se pierde un poco de precisión pero se gana robustez frente a la temperatura, presión y sustancias más complejas lo cual lo hace ideal para ser utilizadas en sensores industriales.

Se han podido relevar sensores de pH de hasta triple juntura, aunque lo estándar es que tengan una. Al aumentar la cantidad de junturas se enlentece el proceso de contaminación de la solución de referencia, redundando en un mayor tiempo de vida y aumentando los períodos de calibración.

El sensor utilizado en el presente proyecto es de doble juntura (de $KNO_3$ por un lado y $KCl - AgCl$ por otro), lo cual presenta un compromiso precio-prestaciones interesante. En la figura 2.3 se presenta el esquema de un sensor combinado de doble juntura, igual al que se utilizará en el presente proyecto.

### Direccionalidad

Los sensores de laboratorio y muchos industriales imponen que el sensor deba colocarse en forma perpendicular al flujo de la sustancia a la cual se quiere medir el pH (o equivalentemente se fija un ángulo máximo de inclinación). El sensor que usaremos en el presente proyecto no tiene requerimientos de este tipo lo cual

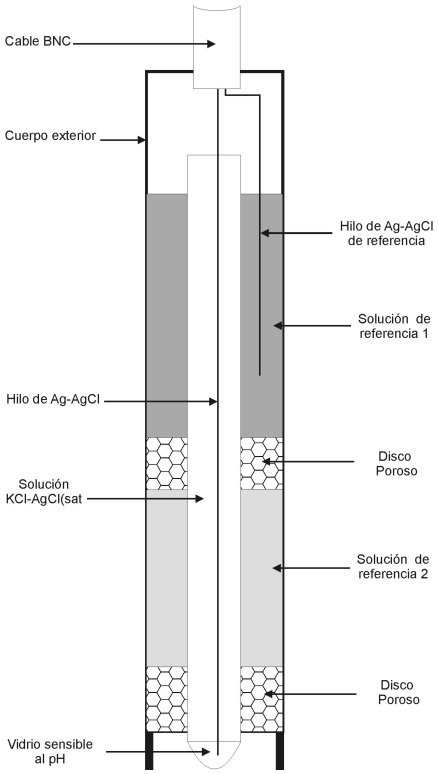



Figura 2.3: Esquema de un sensor de pH combinado de doble juntura

lo hace idóneo, ya que no es posible asegurar que el flujo del líquido ruminal corra en forma perpendicular al sensor.

### Características Eléctricas

*El sensor no consume energía desde el punto de vista eléctrico.* Es decir, no va a requerir corriente de la fuente de alimentación del circuito para funcionar ya que se "alimenta" de la degradación de la sustancia de referencia.

*La resistencia de salida de los sensores de pH es en general muy alta*, es función de la temperatura de trabajo y fundamentalmente de la composición, tamaño y forma de la membrana de vidrio. Pueden encontrarse sensores que presentan resistencia de salida desde varios MΩ hasta cientos de MΩ. En particular, el sensor seleccionado en el presente proyecto tiene una resistencia de salida de 150 MΩ a 25 °C.

### Mantenimiento

*Los sensores de pH requieren ser limpiados periódicamente*, ya que se va formando una película sobre la membrana de vidrio que termina afectando la medida. El período que debe pasar entre limpiezas, depende de las características específicas de la solución. En particular, la medición se afecta severamente cuando la membrana de vidrio está sucia con grasa o material orgánico insoluble en agua.

En un extremo, los sensores de laboratorio, para obtener medidas muy precisas, llegan a limpiarse entre una medida y otra. Los sensores industriales no logran medidas tan precisas, pero su vidrio recibe un tratamiento que permite tener requerimientos de limpieza menos exigentes.

Para aplicaciones relacionadas con la alimentación o el agua, los fabricantes establecen intervalos de limpieza del orden de semanas. Asimismo recomiendan la experimentación como el método idóneo para establecer el intervalo con seguridad.

*El electrodo debe mantenerse en un ambiente húmedo* (ver sección A.1.6). Esto debe tomarse especialmente en cuenta en los períodos durante los cuales el sensor no se va a utilizar.

### 2.1.4. Proceso de selección

Mediante los buscadores especializados "GlobalSpec[7]" y "Component Database[8]" se elaboró una lista de 184 empresas que fabrican sensores y sistemas de medición de pH en todo el mundo.

Se visitaron las páginas web de las 184 empresas y a partir de un relevamiento relativamente superficial se preseleccionaron 25 empresas. Éstas fueron relevadas con un grado de profundidad muy alto, pero con criterios que fueron cambiando en el tiempo debido al conocimiento y la experiencia que se iba adquiriendo. Finalmente se relevaron 155 sensores que pueden encontrarse en el archivo *tabla_sensores.xls* del CD[9].

En paralelo se buscó en la oferta disponible en plaza. Se contactaron los representantes en Uruguay de ABB, Endress+Hauser, Hanna Instruments, y Mettler-Toledo. Los modelos más populares en Uruguay son los de laboratorio, el stock muy limitado y los precios resultaban totalmente inaccesibles. Estos motivos llevaron a descartar una compra en Uruguay.

En primer lugar se seleccionó el fabricante "Omega", ya que posee una amplia gama de opciones y excelentes precios.

Se estudió la oferta de Omega seleccionando algunos sensores y en función de la disponibilidad en stock se escogió el sensor "PHE-7353". El plazo de entrega resultó ser una limitante muy significativa. Como se ha visto, la sustancia de referencia se va degradando con el tiempo, lo cual hace que los fabricantes mantengan un stock muy limitado.

Como nota aparte queremos mencionar el modelo ph300[10] de "Greenspan" ya que hasta ese momento, era lo más parecido a la presente aplicación que se pudo encontrar. Tiene un "datalogger" integrado al sensor, con capacidad de almacenamiento de 1 MB, que se comunica mediante el protocolo RS232 con un PC. No fue analizado con mucho más detalle ya que su largo (34 cm) lo hace incompatible con esta aplicación.

### 2.1.5. Características del sensor PHE-7353 de Omega

Se presenta una tabla con las características más significativas del sensor. En el apéndice A.3 se incluye la hoja de datos que brinda el fabricante.

Tabla 2.1: Resumen hoja de datos PHE-7353

| Característica | Valor |
|---|---|
| Rango pH | $0 - 14$ |
| Rango temperatura | $0 - 80\,^{\circ}\mathrm{C}$ |
| Rango presión | $0 - 100\,\mathrm{psig}$ |
| Precisión | $0,1\,\%$ sobre fondo de escala |
| Impedancia de salida a $25\,^{\circ}\mathrm{C}$ | $150\,\mathrm{M}\Omega$ |
| Referencia | Doble juntura de $KNO_3$ y $KCl - AgCl$ |
| Tiempo de respuesta | $10\,\mathrm{s}$ |
| Deriva | $2\,\mathrm{mV/semana}$ |
| Largo | $152\,\mathrm{mm}$ |
| Diámetro | $22\,\mathrm{mm}$ |
| Ángulo de orientación | Cualquiera |
| Compensación de temperatura | Pt100 incluida |
| Sumergible | SI |
| Medición Continua | SI |

[7] http://www.globalspec.com/
[8] http://www.medibix.com
[9] En la hoja 3 del archivo puede encontrarse una descripción de cada una de las columnas.
[10] http://www.greenspan.com.au/home/products/single_parameter_sensors/ph. Setiembre, 2004.

## 2.2. Sensor de Temperatura

La temperatura es un factor de gran interés e importancia en sistemas físicos, biológicos, eléctricos, mecánicos y químicos. Esto ha llevado a que la correcta medición de la temperatura sea un problema largamente estudiado. Ya en 1592, Galileo Galilei construyó un termómetro rudimentario utilizando la contracción del aire al enfriarse para hacer ascender agua por un tubo. En 1714, Daniel Gabriel Fahrenheit inventó el termómetro de mercurio. En 1821, T.J. Seebeck inventó la termocupla. En 1885, Calender-Van Duesen inventó el sensor de temperatura de resistencia de platino [Wik06b].

La presente sección está estructurada de la siguiente manera: En primer lugar, se introducen y comparan las alternativas más difundidas. En segundo lugar se describe el proceso de selección haciendo hincapié en los problemas encontrados con las alternativas implementadas. Finalmente se detallan las características específicas del sensor utilizado.

### 2.2.1. Alternativas para la medición de temperatura.

Los sensores más utilizados en circuitos eléctricos son: los termómetros de resistencia o RTD (Resistance Temperature Detector), los termistores, las termocuplas y los sensores de estado sólido.

En la elección del sensor adecuado para una determinada aplicación deben analizarse los siguientes aspectos: rango de temperatura que puede medir el sensor, linealidad, precisión, costo, consumo, complejidad de la circuitería extra para acondicionar y obtener la señal, complejidad para integrar el sensor al dispositivo de medida.

Las descripciones de los sensores que se hacen a continuación fueron escritas en base a [Sem], [Sem86], [Wik06b] y materiales teóricos del curso de Medidas Eléctricas.

#### RTDs

Las RTDs consisten en un elemento bimetálico cuya resistencia varía de forma reproducible con un cambio de temperatura. Las RTDs de platino se caracterizan por tener una curva de resistencia contra temperatura casi lineal a lo largo de un amplio rango de temperaturas ($-200$ a $800\,^{\circ}\mathrm{C}$) aunque raramente se trabaja con ellas por encima de $450\,^{\circ}\mathrm{C}$. La no linealidad puede llegar a varios grados en los extremos del rango, pero es altamente predecible y reproducible, con lo cual puede ser compensado mediante una calibración.

Generalmente se utilizan puentes de medida para obtener el valor de la resistencia, luego es amplificada y digitalizada, con lo cual es necesaria una importante circuitería externa.

Operar con estos sensores en un modo de bajo consumo puede ser complicado ya que los puentes establecen caminos de baja resistencia entre fuente y tierra. El consumo puede minimizarse, a costo de complejizar la circuitería aún más, utilizando una tensión de alimentación pulsada con grandes picos de corta duración de forma tal que el voltaje eficaz de la señal sea bajo. Un problema adicional que tienen este tipo de sensores es el fenómeno de autocalentamiento. La corriente que pasa por el sensor tiende a hacer subir la temperatura, por lo que sensores que tienen que manejar mA pueden llegar a desarrollar un error de varios grados. Para solucionar este problema se emplea la misma técnica que para minimizar el consumo antes descripta.

Hay una gran variedad de RTDs de platino (y de otros materiales), con un amplio rango de precios, pero aquellos que permiten obtener medidas con buena precisión tienden a ser caros.

Para las RTDs se toma una ley polinomial, los coeficientes y el grado dependen del rango de trabajo y la precisión necesaria.

$$R = R_0(1 + a_1T + a_2T^2 + ... + a_nT^n) \tag{2.5}$$

donde $R_0$ es el valor de la resistencia a $0\,^{\circ}\mathrm{C}$.

### Pt100

Se ha destinado una sección a la Pt100 debido a que el sensor de pH PHE-7353 trae incorporada de fábrica una de ellas.

La Pt100 es un caso particular de RTDs. *Pt* es como se identifica al platino en la tabla periódica de elementos y el *100* corresponde al valor en ohms de la resistencia a 0 °C. La ecuación característica es:

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta T) \tag{2.6}$$

Donde $R_0$ es el valor nominal, que en este caso es de 100 Ω[11] de su resistencia a 0 °C y $\alpha$ es el coeficiente de temperatura, característico del material, que en el caso del platino vale:

$$\alpha = 0{,}00385\ ^\circ\mathrm{C}^{-1} \tag{2.7}$$

### Termistores

El termistor es un sensor resistivo donde el elemento sensible a la temperatura es un semiconductor. Su característica resistencia-temperatura es fuertemente no lineal, con lo cual es necesario linealizar en torno a los puntos de trabajo.

$$R = R_0.e^{\beta(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})} \tag{2.8}$$

Los termistores pueden obtener una muy buena precisión a costos razonables. El rango de trabajo en general es de −100 °C a 150 °C.

Al igual que las RTDs sufren de autocalentamiento y requieren circuitería externa para minimizar este efecto y el consumo.

### Termocuplas

La termocupla consiste en la unión de dos cables de diferentes materiales. Se obtienen distintos tipos de termocuplas dependiendo de los materiales utilizados. Por ejemplo, la termocupla de tipo J está hecha de acero y constantan.

La sensibilidad de estos sensores es muy pequeña (10 μV/°C), con lo cual son necesarios amplificadores de muy bajo offset. Además requiere de compensación por punta fría y por lo tanto circuitería externa.

No tienen un comportamiento muy lineal, pero son pasibles de ser compensados fácilmente al igual que las RTDs. Dependiendo del tipo de unión, pueden operar entre los −200 °C y los 1700 °C. Esto lo hace muy populares en aplicaciones que requieren muy altas temperaturas.

La ecuación característica es:

$$R = a_0 + a_1T + a_2T^2 + ... + a_nT^n \tag{2.9}$$

donde $n$ varía entre 5 y 9 dependiendo del tipo de termocupla.

### Sensores de estado sólido

El voltaje base-emisor $V_{BE}$ de un transistor bipolar es proporcional al voltaje térmico, $V_T$, que a su vez es lineal con la temperatura. Sin embargo, la constante de proporcionalidad entre $V_{BE}$ y $V_T$ depende de forma no-lineal con la temperatura. Además, el valor de $V_{BE}$ para una misma corriente de colector varia de un transistor a otro. Varia entre transistores de una misma tirada y varia mucho mas entre transistores de tiradas distintas. En la práctica, uno puede encontrarse con un comportamiento no lineal que puede llegar a 3 °C o 4 °C sobre el rango −55 °C y 150 °C [Sem86].

[11] Existen en el mercado otros valores, por ejemplo 1000 Ω, la cual se denomina Pt1000.

Para compensar estos problemas, otra opción ha sido desarrollada, donde la diferencia entre los voltajes de base-emisor de dos transistores operando a diferentes densidades de corriente es usada para medir temperatura (Ver figura 2.4). Se puede demostrar que cuando dos transistores, $Q_1$ y $Q_2$, son operados a diferentes densidades de corriente de emisor, la diferencia entre sus voltajes de base-emisor, es:

$$\Delta V_{BE} = V_{BE1} - V_{BE2} = \frac{KT}{q} \ln \frac{J_{E1}}{J_{E2}} \tag{2.10}$$

Donde:

- $J_{E1}$ y $J_{E2}$ es la densidad de corriente de emisor de $Q_1$ y $Q_2$.
- $T$ = Temperatura en °K.
- $K$ = Constante de Boltzmann.
- $q$ = Carga del electrón.

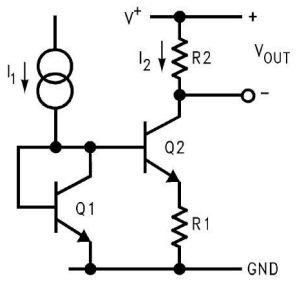



Figura 2.4: Circuito de Bandgap para medir temperatura

La ecuación (2.10) muestra que el voltaje es directamente proporcional a la temperatura, siempre que pueda mantenerse el cociente de corrientes $J_{E1}$ e $J_{E2}$ constante. Este resultado es válido hasta una temperatura de 200 °C aproximadamente, donde las corrientes de fuga empiezan a ser importantes [Max01].

Hay muchas formas de implementar este circuito. El más ampliamente difundido en circuitos integrados es el "Brokaw bandgap reference" [Max01]. Para profundizar en el funcionamiento de este circuito puede consultarse [Bro74].

La oferta de sensores de estado sólido es muy amplia. Muchos de éstos ofrecen una salida digitalizada, tiene modos de operación de bajo consumo o pueden generar una alarma si se mide una temperatura máxima predefinida. Hay algunos que llegan a una precisión de 0,5 °C pero requieren una fuente de alimentación mayor a 3 V. Los sensores encontrados que pueden trabajar a este voltaje aseguran un precisión de 1 °C. Para la presente aplicación se debe asegurar una incertidumbre de 0,1 °C, con lo cual es necesario realizar una calibración para obtener una curva de corrección.

Las principales ventajas de este sensor son su muy bajo costo y la necesidad de escasa circuitería externa.

### 2.2.2. Comparación

A continuación se presenta una tabla comparativa entre los diferentes sensores estudiados.

La filas *Precisión*, *Linealidad*, *Costo*, *Consumo*, *Calibración* y *Autocalentarmiento* recogen los conceptos discutidos en la sección anterior.

*Temperatura* hace referencia al rango durante el cual los sensores trabajan adecuadamente. El rango de trabajo para la presente aplicación es $36 - 41$ °C, con lo cual se concluye que todos ellos trabajan en nuestro rango de interés.

La complejidad de la circuitería externa para acondicionar y obtener la señal se refleja en *circuitería*.

*Integración* toma en cuenta la complejidad para integrar el sensor al dispositivo de medida y al ambiente de trabajo. Puede llamar la atención que la Pt100 se haya calificado como muy sencilla, esto se debe a que sensor de pH trae una incluida en su encapsulado.

Tabla 2.2: Tabla comparativa de las características de los sensores

| Sensor | RTD | Pt100 | Termistor | Termocupla tipo J | Sensor ES |
|---|---|---|---|---|---|
| Temperatura (°C) | -100 a 450 | -100 a 450 | -100 a 150 | 0 a 1700 | -55 y 150 |
| Linealidad | Buena | Buena | Mala | Mala | Buena |
| Precisión | Excelente | Excelente | Muy buena | Muy buena | Muy buena |
| Costo | Alto | Alto | Medio | Medio | Bajo |
| Consumo | Alto | Alto | Alto | Alto | Bajo |
| Circuitería | Media | Media | Media | Media | Sencilla |
| Autocalentamiento | Si | Si | Si | No | No |
| Calibración | Si | Si | Si | Si | Si |
| Integración | Muy complejo | Muy sencillo | Muy complejo | Muy complejo | Complejo |

### 2.2.3. Proceso de selección

Debido a su fácil integración al entorno de trabajo, en primera instancia se seleccionó la Pt100. Ya se contaba con ella y estaba perfectamente integrada al sensor de pH.

El circuito de acondicionamiento de la señal proveniente de la Pt100 consistía en un puente de Wheatstone, un amplificador operacional, un filtro pasa bajos de primer orden y se digitalizaba mediante un conversor A/D del Microcontrolador.

Si bien la elección de la Pt100 como sensor parecía ser, a priori, la más adecuada, durante el proceso de implementación se encontraron varios problemas que llevaron finalmente a descartar esta opción.

El primer problema detectado fue el consumo elevado del circuito de acondicionamiento de la señal de temperatura. Con el puente siempre prendido el circuito consumía del orden de los 30 mA, además se podía apreciar una deriva significativa producto del autocalentamiento. Para solucionarlo se diseñó un circuito de prendido y apagado implementado con un transistor funcionando como llave.

El segundo problema encontrado fue que los transitorios de carga y descarga de los capacitores de fuente de esta parte del circuito alteraban el valor de la señal a medir. Esto planteó un compromiso en el tiempo que se dejaba prendido el circuito. Por un lado debía ser lo suficientemente largo para lograr cargar los capacitores y por otro lado debía ser lo más corto posible para minimizar el consumo. Eligiendo un tiempo adecuado se logró reducir el consumo a picos de 5 mA cuando el puente estaba prendido.

Un tercer problema detectado fue la respuesta al escalón de bajada del sensor. El circuito demoraba del orden de un par de horas en bajar de 40 °C a temperatura ambiente. Aunque no dejaba de ser un problema, en la práctica no debería resultar crítico, ya que no son esperables cambios bruscos en la aplicación.

El cuarto problema y el que definitivamente llevó a descartar el uso de la Pt100 incluida en el sensor de pH, fue la necesidad de calibrarla para lograr la precisión requerida (0,1 °C). El proceso de calibración del sensor de temperatura requiere de equipos muy precisos de difícil acceso. Por otra parte los sensores de pH, como se ha visto en la sección 2.1.3, tienen una vida útil de aproximadamente un año. Al cambiar el sensor de pH, se está cambiando la Pt100 integrada a él, con lo cual sería necesario calibrar la Pt100 cada vez que se cambie el sensor de pH. Este proceso engorroso, caro e innecesario para el usuario puede evitarse usando un sensor de temperatura independiente del sensor de pH.

El siguiente paso fue utilizar un sensor de estado sólido, ya que no presentan problemas de autocalentamiento y no necesitan circuitería externa. Se buscaron sensores que entregaran el valor de la temperatura a través del protocolo SPI (que ya se tenía desarrollado) y que tuvieran un modo de trabajo de bajo consumo. A menos de la integración al encapsulado (que era un problema común a las otras opciones disponibles) estaría cumpliendo largamente con los requerimientos del problema.

Se buscó entre diferentes fabricantes (National Semiconductor, Dallas Semiconductor, Texas Instruments, entre otros), estableciendo los siguiente requerimientos:

- Alimentación entre $2,5\,\text{V}$ y $3,3\,\text{V}$.
- Salida digital a través del protocolo SPI.
- Modo de trabajo de bajo consumo.
- Precisión menor o igual a $1\,°\text{C}$.
- Resolución menor o igual a $0{,}05\,°\text{C}$.

El sensor que mejor se ajustó a estos requerimientos fue el LM95071 de National Semiconductor. A continuación se describen sus principales características.

### 2.2.4. El sensor LM95071 de National Semiconductor

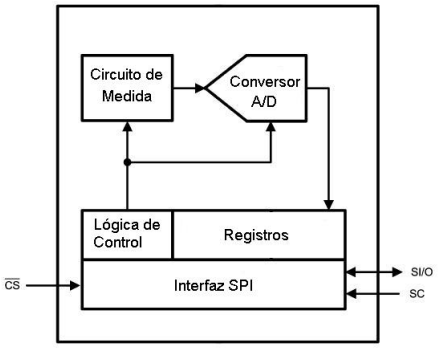



Figura 2.5: Diagrama de bloques del sensor LM95071

Según [Sem05] el LM95071 es un sensor de temperatura de bajo consumo, alta resolución (incorpora un conversor $\Sigma - \Delta$ de 14 bits), tiene salida digital a través del protocolo SPI y está disponible en un empaque muy pequeño (SOT23 de 5 pines).

En la figura 2.5 se presenta un diagrama de bloques del sensor. Sobre los detalles de la implementación del bloque "Circuito de Medida" la hoja de datos no provee mayor información. Se consultó a National Semiconductor y contestaron que los detalles del mismo eran confidenciales aunque podía asumirse que el principio de funcionamiento era el mismo que el sensor LM34 (ver [Sem86]).

El IC mide la temperatura de sus pines; esto implica que la integración del sensor al ambiente de trabajo deberá contemplar este aspecto. En la tabla 2.3 se resumen sus principales características.

Tabla 2.3: Principales características del sensor LM95071

| Característica | Valor |
|---|---|
| Voltaje de alimentación | 2,4 V a 5,5 V |
| Consumo típico en operación | 280 $\mu$A |
| Consumo típico en modo "shutdown" | 6 $\mu$A |
| Precisión (entre 0 °C y 70 °C) | 1 °C (máx) |
| Resolución | 14 bits (0,03125 °C) |
| Tiempo típico de conversión | 130 ms |
| Protocolo de comunicación | SPI (3 hilos) |
| Empaque | SOT23-5 |

# Capítulo 3

# Hardware

En el capítulo anterior se presentaron los sensores que forman parte del sistema. En este capítulo se describen el resto de los componentes que integran el hardware del sistema.

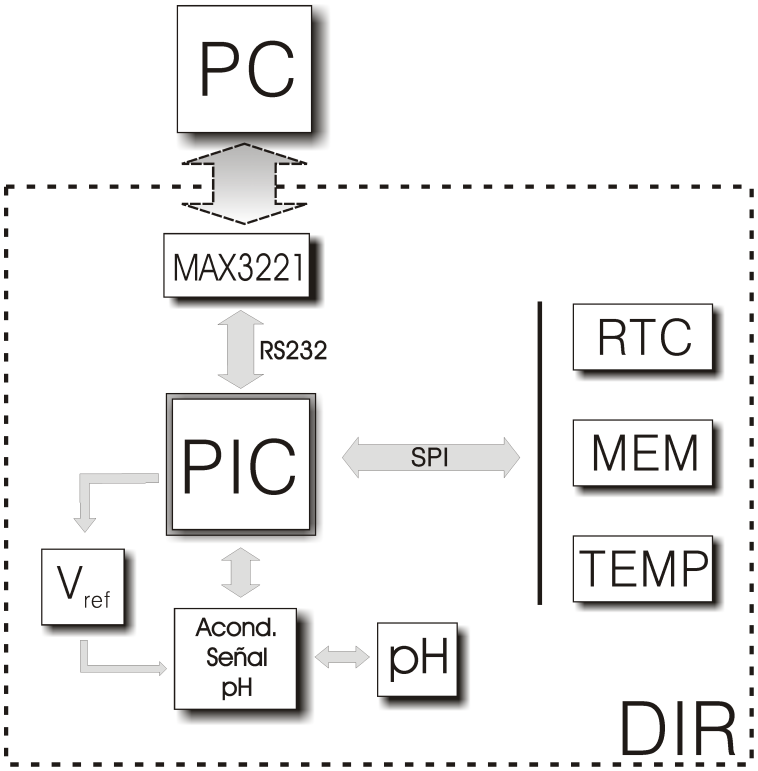



Figura 3.1: Diagrama de bloques del hardware del sistema

## 3.1. Microcontrolador

### 3.1.1. Elección

Se decidió utilizar un microcontrolador de la familia PIC de Microchip[1] por la amplia difusión en el medio local, versatilidad y sencillez de uso.

El microcontrolador debía ser de bajo consumo y bajo voltaje de funcionamiento debido a los requerimientos básicos del proyecto. Se necesitaba por lo menos de un conversor A/D para el sensor de pH. Al funcionar con baterías era necesario que contara con alguna forma de monitorear el estado de la alimentación. Para la etapa de diseño, debido a las técnicas de prototipado disponibles, era preferible que su empaquetado

[1] www.microchip.com

no fuera superficial; para la implementación final, se requería de un empaquetado de soldado superficial para minimizar área. Se estimó necesario contar con un mínimo de 16 pines de I/O para garantizar la escalabilidad del sistema. Estos y otros requerimientos se listan a continuación y fueron utilizados para filtrar la lista de posibles PIC:

- Bajo consumo ("NanoWatt Tecnology").
- Capacidad de trabajar en "Sleep mode".
- Bajo voltaje.
- Conversor A/D.
- Detección de bajo voltaje.
- Memoria de programa (Mínimo 8 kWord).
- Pines libres de I/O (Mínimo 16).
- Empaquetados superficial y no superficial.
- Programable en el circuito.
- Implementación de protocolos de comunicación serial (RS232, SPI, etc.).

Debido a su limitada capacidad, principalmente en memoria, las familias 12 y 14 fueron descartadas, quedando para la selección las familias 16 y 18[2].

La familia 16 está pensada para aplicaciones de mediano porte, tiene un conjunto de 35 instrucciones y una capacidad de hasta 8 kWord de memoria de programa. El largo de palabra es de 14 bits y se dispone stack de 8 lugares.
Una gran ventaja de esta familia es que tiene mucho tiempo en el mercado, su uso está muy difundido y hay una gran cantidad de material de referencia, desde reportes de "bugs" hasta rutinas para utilizar las diferentes prestaciones que brinda. Asimismo el fabricante provee muestras gratis para la mayoría de los modelos de esta familia.

La familia 18 está diseñada para sistemas de tamaño medio o grande. Su principal ventaja es que algunos de sus integrantes tienen hasta 1 MWord de memoria de programa en la cual se pueden guardar datos. Posee un conjunto de 77 instrucciones, incluyendo entre ellas la multiplicación. Los PICs de la familia 18 están optimizados para mejorar el rendimiento con lenguajes como C. El largo de palabra es de 16 bits y se dispone stack de 32 lugares. Al momento de la elección, los modelos que mejor se adaptan a los requerimientos del proyecto, recién estaban saliendo al mercado.

En una primera instancia la búsqueda se orientó hacia la familia 18, pero el elemento que más importancia tuvo en la elección de la familia, fue que la familia 16 estaba mucho más difundida y probada.

De la familia 16 el modelo que mejor se adaptaba a los requerimientos de la presente aplicación era el 16LF777.

### 3.1.2. Funcionamiento del PIC

A continuación se verán algunos de los módulos y funciones más importantes en el diseño del presente proyecto. Por más información debe consultarse [MIC97a] y [MIC97b].

El PIC posee un modo de funcionamiento "Sleep Mode" en el cual mantiene activas un mínimo de funcionalidades con el objetivo de ahorrar consumo. El PIC ingresa en este estado mediante la ejecución de una instrucción y sale mediante una interrupción o un reset. El consumo del PIC en este estado es de $0{,}5\,\mu A$ máximo.

[2]La familia 24 no existía al momento de realizar esta evaluación

### Memoria y puertos I/O

Las memorias del PIC están organizadas en arquitectura Harvard. Esto significa que la memoria de datos está físicamente separada de la memoria de programa.

La *memoria de programa* es físicamente una memoria *flash* organizada en forma lineal y su largo de palabra es igual al de una instrucción, 14 bits. En el caso del PIC 16LF777 su tamaño es de 8 kWord.

La *memoria de datos* es una memoria RAM estática, que en el caso del PIC 16LF777 es de 386 bytes. A los lugares de memoria se los denomina *Registros*. Esta memoria está organizada en bancos, los cuáles deben ser seleccionados antes de utilizar sus registros. Los registros se dividen en dos tipos, *Registros de uso general* y *Registros de uso específico*. Los registros de uso específico se utilizan para controlar el funcionamiento del PIC y se mapean al principio de cada banco. Los registros de uso general sirven comúnmente para implementar variables.

Un puerto es un conjunto de pines de I/O asociados a un registro. El PIC 16LF777 tiene una gran cantidad de funciones multiplexadas en sus pines, por lo que para utilizar un conjunto de pines como puerto I/O se deben inhabilitar las funciones que comparten. El PIC 16LF777 posee tres puertos de 8 bits y dos de 4 bits.

### USART

USART es la sigla en inglés de "Universal Syncronous Asyncronous Resiver Transmitter". Este periférico del PIC utiliza dos pines del PIC, uno para transmitir y otro para recibir. Los niveles lógicos en estos pines son los del PIC, por lo que algunas aplicaciones como la comunicación con el PC necesitan una adaptación de niveles.

Como todos los periféricos se configura y controla por medio de registros, en el caso de la USART son: TXSTA para la transmisión, RCSTA para la recepción y SPBRG para la configuración de la velocidad. Para transmitir y recibir datos también se utilizan registros, cuando se mueve un dato al registro TXREG, la USART se encarga de enviarlo y cuando la USART recibe un dato se coloca en el registro RCREG.

La USART utiliza banderas e interrupciones para señalizar los eventos de transmisión y recepción.

### Conversores A/D

El PIC tiene un único conversor A/D de 10 bits que funciona mediante el método de "aproximaciones sucesivas". Al conversor se le pueden conectar hasta 14 señales y mediante una palabra de control seleccionar cuál de ellas debe convertir. El voltaje de referencia del conversor es configurable, puede tomarse la propia alimentación del PIC o a través de una señal externa.

En la configuración de este periférico intervienen tres registros, uno para el control de la operación y la fuente de reloj (ADCON0), otro para configurar el período de muestreo (ADCON2) y un tercero para el resto de la configuración (ADCON1).

Para convertir un dato, luego de haber configurado correctamente los pines correspondientes, se debe setear un bit en el registro de control (GO/$\overline{DONE}$) y esperar a que termine la conversión. El conversor avisa el fin de una conversión borrando el bit del registro de control y generando una interrupción. De esta manera se puede hacer una rutina de atención a interrupciones o un "polling" sobre el bit mencionado.

Al terminar la conversión, el dato válido se encuentra en los registros ADRESH y ADRESL. La forma en que los 10 bits se guardan en estos registros es configurable.

### Módulo MSSP

MSSP es la sigla en inglés de "Master Synchronous Serial Port". Este módulo implementa una interfaz serial, muy útil y ampliamente difundida en la comunicación con otros microcontroladores u otros periféricos como memorias, relojes de tiempo real, sensores de temperatura, controladores de display o conversores A/D. El MSSP está orientado a implementar los protocolos: SPI (Serial Peripheral Circuit de Motorola) y el $I^2C$

(Inter-Integrated Circuit de Philips Semiconductors).

Se decidió implementar el protocolo SPI debido a su sencillez y a la gran cantidad de periféricos que trabajan con él. El protocolo SPI prevé la utilización de 4 señales[3]:

- Reloj (SCK - Serial Clock).
- Datos de entrada (SDI - Serial Data Input).
- Datos de salida (SDO - Serial Data Output).
- Chip Select(CS).

El funcionamiento es muy sencillo, el Maestro decide con cual periférico va hablar mediante el CS. Mientras el maestro provea el reloj hay comunicación y los datos fluyen a través de SDI y SDO.

A continuación se describirá brevemente como se implementa adentro del PIC, el protocolo SPI para que trabaje cómo maestro.

El MSSP se configura y controla por medio de registros. SSPBUF es un buffer para la transmisión y recepción de datos. SSPCON y SSPSTAT son los registro control y status respectivamente. SSPSR es un "Shif Register" que no es accesible por software.

En Recepción, los datos se guardan en el SSPSR. Al completarse los 8 bits, el dato pasa al SSPBUF, se genera una interrupción y se setea un bit del SSPSAT. El "doble buffereo" permite empezar a recibir el siguiente byte sin haber leído el byte recién llegado (que debe ser leído antes de completarse la segunda recepción). En transmisión esto último no es así, cuando se pone un dato de salida, se escribe en los dos registros.

El maestro puede iniciar una transferencia de datos en cualquier momento. Los datos comienzan a ser enviados/recibidos cuando el registro SSPBUF es escrito. El bit más significativo se transmite primero.

La frecuencia de trabajo se estableció en 256 kHz balanceando un compromiso entre velocidad y consumo.

**Entorno de desarrollo**

Microchip pone a disposición un entorno de desarrollo completo para lenguaje assembler (compilador, debbuger y otras herramientas). Este entorno se denomina "MPLAB IDE" y su uso es libre. Esto no es así con la herramienta de programación del PIC. Para solucionar este problema se implementó el grabador para microcontroladores PIC que se propone en [Pab04]. En la figura 3.2 se presenta el esquemático.

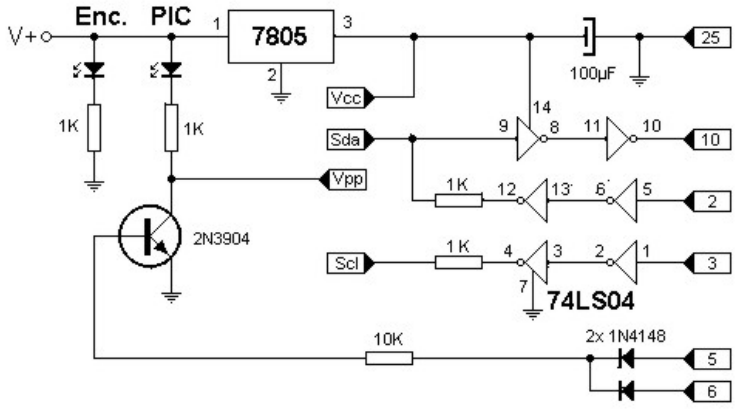



Figura 3.2: Circuito programador del PIC

Este circuito hace uso de la función ICSP ("In Circuit Serial Programming") con que cuentan los PIC. Para incluir el circuito programador en la placa de desarrollo se deben multiplexar los pines que se usan para

[3] Algunas implementaciones utilizan solo 3 señales juntando SDI y SDO en una.

la programación[4], ya que durante el funcionamiento normal del circuito éstas pueden cumplir otras funciones.

Para programar los PICs [Pab04] sugiere usar la aplicación ICPROG, pero éste no declara programar el PIC16LF777. Luego de una larga búsqueda se seleccionó el "Oshon PIC Programmer"[5] que programa el modelo utilizado y sugiere utilizar un circuito muy similar al de [Pab04].

Al implementar el circuito de la figura 3.2 surgieron algunos problemas, que llevaron a modificarlo, adaptándolo a los requerimientos de nuestro sistema. En primer lugar, se eliminó una etapa de inversión por cada señal, ya que existe la posibilidad de invertir por software. Asimismo se diseñó una nueva interfaz entre el programador y la placa del DIR. Esta interfaz permite mantener el programador conectado a la placa mientras se verifican los cambios realizados en el programa del PIC, seleccionando el modo de funcionamiento por medio de un selector. Una vez retirado el programador se conecta una llave que restablece los caminos de las señales que se compartían con el programador.

**Frecuencia del Microcontrolador**

La frecuencia de trabajo se fijó en 4 MHz a través de un cristal externo. Ésta es la máxima frecuencia a la cual el PIC puede trabajar en todo su rango de voltaje (desde 2,0 V hasta 5,5 V). Además presenta un buen compromiso entre rapidez y consumo, ya que puede procesar una instrucción por micro-segundo, requiriendo un consumo máximo de 600 $\mu$A[6].

### 3.1.3. Almacenamiento externo

El PIC 16LF777 tiene 8 kWord de memoria de programa. Esta memoria, en tiempo de ejecución, no puede ser escrita. Asimismo la memoria de datos, como se vio en la sección 3.1.2, es muy pequeña. En consecuencia, el almacenamiento externo de datos se hace imprescindible.

La memoria es una variable fundamental en la determinación del tiempo de duración de un experimento. Según los requerimientos del sistema, el período de muestreo mínimo es de 5 minutos. Si hubiera que guardar 4 bytes por dato muestreado, con una memoria de 8192 bytes, el tiempo máximo de duración de un experimento antes que se llene la memoria sería de 170 horas (aproximadamente una semana), lo cual supera el mínimo exigido de 72 horas.

Microchip cuenta con una gama variada de memorias EEPROM de las cuales se eligió la familia 25AAXXX. Esto fue así debido a que utiliza el protocolo SPI (Ver sección 3.1.2), tiene un modo de funcionamiento "Standby", puede funcionar con una fuente de alimentación baja (3 V) y dispone de modelos con diferentes capacidades de almacenamiento (desde 128 bytes hasta 32 Kb).

Para el primer diseño se eligió la 25AA640 que cuenta con 8 Kb, en el transcurso del presente proyecto Microchip lanzó la 25AA256 con 32 Kb y fue incorporada a la presente aplicación. En la tabla 3.1 se resumen sus principales características.

## 3.2. Interfaz PC-PIC

Para la interacción entre el PC y el Microcontrolador se eligió el Protocolo serial RS232, debido a su simplicidad y a que se contaba con módulos y periféricos en el PC (Ver sección 5.2.1) y en el PIC (Ver sección 3.1.2) que lo implementan.

Como se mencionó en la sección 1.5 la interfaz con el usuario debía ser lo más encapsulada posible. En este sentido cualquier aplicación que implemente RS232, usando la Tabla de Comandos (Ver Apéndice C.1) debería ser capaz que manipular el DIR.

En una primera instancia la interfaz utilizada entre el usuario y el PIC fue el programa Terminal[7], este programa permite utilizar el puerto serial del PC con el protocolo RS232. A medida que el sistema fue

[4] Éstas son Master Clear (pin 1), Program Data (PGD, pin 40) y Program Clock (PGC, pin39)
[5] Programa de uso libre desarrollado por Oshon y se puede encontrar en www.oshonsoft.com/pic.html
[6] Este valor no toma en cuenta el consumo de los periféricos.
[7] Programa de licencia libre diseñado por Bray++, http://bray.velenje.cx/avr/terminal

Tabla 3.1: Principales características de la memoria 25AA256

| Característica | Valor | Condiciones |
|---|---|---|
| Tamaño | 32 Kb | |
| Voltaje de alimentación | 1,8 V a 5,5 V | |
| Consumo típico de lectura | 500 $\mu$A | $V_{CC} = 2{,}5$ V; $F_{CLK} = 5{,}0$ MHz |
| Consumo típico de escritura | 150 $\mu$A | $V_{CC} = 2{,}5$ V |
| Consumo típico en modo "Standby" | 0,1 $\mu$A | $V_{CC} = 5{,}5$ V |
| Tiempo de escritura máximo | 5 ms | |
| Protocolo de comunicación | SPI (4 hilos) | |
| Máxima Frecuencia del reloj | 3,0 MHz | $1{,}8\text{ V} \leq V_{CC} < 2{,}5$ V |
| | 5,0 MHz | $2{,}5\text{ V} \leq V_{CC} < 4{,}5$ V |
| Empaque | PDIP, SOIC, TSSOP. | |

creciendo en complejidad esta interfaz dejó de ser apropiada, con lo cual se diseñó el programa AnubisLAB (Ver sección 5) para ofrecer un entorno más amigable.

### 3.2.1. Protocolo RS232

La redacción de la presente sección esta basada en [SSGS06].

RS232-C es un estándar que describe una interfaz entre un DTE (Data Terminal Equipment) y un DCE (Data Communications Equipment) que emplea un intercambio serial de datos binarios. En él se definen características eléctricas, mecánicas y funcionales de la interfaz así como modos de conexión comunes.

Figura 3.3: Esquema de la interfaz RS232

En la figura 3.3 se presenta un esquema de la interfaz. En la misma puede apreciarse que hay señales de transmisión (TxD), recepción (RxD), de retorno por tierra y de control. El estándar prevé la utilización de hasta 25 señales, aunque es posible implementarlo solamente con tres (TxD, RxD y tierra).

Existen dos modos de transferencia de datos. El primero es la *comunicación síncrona*, el emisor y el receptor se sincronizan usando una señal de reloj que indica el tiempo entre cada bit. Una vez que se sincronizan los equipos, se envían datos continuamente; un carácter llamado "idle" se envía cuando no se desea enviar información. Un aspecto a tener en cuenta es que si alguno de los extremos de la comunicación pierde la señal de reloj, la comunicación finaliza.

El método alternativo, conocido como *comunicación asíncrona*, consiste en añadir marcadores dentro del flujo de bits para indicar el comienzo y fin de una palabra de datos (*bit de arranque* y *bit de parada*). De esta forma, la posición de cada bit puede ser determinada temporizando los bits en períodos regulares, y los dos equipos no tienen que estar sincronizados por señales de reloj, ya que conociendo la velocidad de transmisión, se tiene la duración de cada bit. El posible desapareo entre los relojes de transmisión y recepción que produciría un muestreo inadecuado, se evita utilizando bloques de datos de tamaño pequeño. Algunas veces se añade un bit de paridad entre el último bit de la palabra y el bit de parada para comprobar la integridad de los datos.

### 3.2.2. Implementación

La interfaz implementada cuenta solamente con tres señales (TxD, RxD y tierra). La USART fue configurada para generar palabras de 8 bits con un bit de parada. No se utilizaron controles de flujo ni controles de error, ya que la cantidad de bytes traficados es pequeña y no lo amerita. Se decidió trabajar con transmisión asíncrona a una velocidad de 9600 bps, que es la velocidad a la cual el PIC brinda el menor error de sincronismo (0.16 %).

Los niveles lógicos de salida del PIC no son los del protocolo RS232 por lo que se debe utilizar un convertidor de nivel. El integrado elegido para este propósito fue el MAX3221 de Texas Instruments.

El MAX3221 presenta varias características que lo hacen ideal para la presente aplicación:

- Puede trabajar con una alimentación de 3V.
- Tiene un modo de funcionamiento de bajo consumo al cual puede accederse seteando una entrada, o automáticamente si no detecta señales válidas en su pin de recepción.
- Dispone de un pin mediante el cual avisa si tiene señales válidas en su pin de recepción. Esto último permite generar una interrupción en el PIC cuando el DIR está enchufado al puerto serial.

Tabla 3.2: Principales características del MAX3221

| Característica | Valor |
|---|---|
| Voltaje de alimentación | 3,0 V a 5,5 V |
| Consumo típico en operación | 300 $\mu$A |
| Consumo típico en modo “Standby” | 1 $\mu$A |
| Máxima tasa de transferencia (típica) | 250 Kbit/s |
| Empaque | SSOP, TSSOP. |

## 3.3. Medición del tiempo

Se evaluaron dos alternativas para la medición del tiempo. Por un lado los timer’s que el PIC trae integrados y un reloj de tiempo real (RTC por sus siglas en inglés).

### 3.3.1. TIMER1 del PIC

El PIC posee varios timer’s pero el TIMER1 es el que puede medir el mayor intervalo de tiempo en forma autónoma. Su capacidad máxima de cuenta, alimentado con un cristal externo de 32 kHz, es de aproximadamente 2 s. Este timer sigue funcionando cuando el PIC está en “Sleep mode” y genera una interrupción cuando llega al tiempo preestablecido. Esto implica que es necesario prender el PIC cada dos segundos para incrementar los registros que llevan la cuenta de tiempos mayores.

El TIMER1 consume 3,8 $\mu$A cuando el PIC está en “Sleep mode”.

### 3.3.2. Elección del RTC

Se hizo un relevamiento de relojes de tiempo real, buscando que tuvieran alimentación de 3 V, bajo consumo y capacidad de generar alarmas. Con la restricción complementaria de poder utilizar el protocolo SPI como modo de comunicación con el PIC, se llegó a la conclusión de que el DS1306 de *MAXIM* era la mejor opción.

El DS1306 puede configurarse de dos formas diferentes para que genere alarmas cada cierto tiempo, activando así una interrupción que “despierte” al PIC en los momentos adecuados. En la primera, llamada INT1, el chip genera un pulso de 62,5 ms. En la segunda, llamada INT0, el chip genera un pulso y lo mantiene hasta tanto no se resetee un bit de su registro de STATUS.

Cuando está en operación normal consume 667 $\mu$A y estando en modo "timekeeping" consume 0,6 $\mu$A.

Tabla 3.3: Principales características del DS1306

| Característica | Valor |
|---|---|
| Voltaje de alimentación | 2,0 V a 5,5 V |
| Consumo máximo en operación ($V_{CC} = 2{,}0$ V) | 400 $\mu$A |
| Consumo máximo en modo "Timekeeping" ($V_{CC} = 2{,}0$ V) | 0,4 $\mu$A |
| Protocolo de comunicación | SPI (4 hilos) |
| Máxima frecuencia del reloj ($V_{CC} = 2{,}0$ V) | 600 kHz |
| Empaque | TSSOP. |

### 3.3.3. Análisis de consumo

En esta sección se realiza una comparación del consumo de las dos alternativas planteadas para medir el tiempo.

La interrupción INT0 que brinda el DS1306 parece ser la más razonable para la aplicación ya que los 62,5 ms que insume INT1 son excesivos. El tiempo que se demoraría en resetear el bit involucra el tiempo que demore en PIC en atender la interrupción, que básicamente es el tiempo que demora en salir del "Sleep mode" (256 $\mu$s) y la duración misma de la rutina de atención a interrupciones. Se estima en 600 $\mu$s el tiempo que está activo el DS1306.

El "peor caso", desde el punto de vista del consumo para ambas alternativas, se da cuando las medidas se toman una vez cada cinco minutos (mínimo período de muestreo requerido). En un hora de funcionamiento continuo, el DS1306 se deberá prender 12 veces, con lo cual el consumo del RTC sería:

$$C_{RTC} = \frac{667\,\mu\text{A} \times 12 \times 600\,\mu\text{s} + 0{,}6\,\mu\text{A} \times (3600\,\text{s} - 12 \times 600\,\mu\text{s})}{3600\,\text{s}} = 0{,}6\,\mu\text{A} \tag{3.1}$$

En el caso de usar el TIMER1 del PIC, debería prenderse cada 2 segundos para incrementar el registro, comprobar que no es tiempo de medir y volver a modo de "Sleep mode". Para hacer todo esto se estima que el PIC que estará prendido durante 300 $\mu$s. En una hora el PIC deberá prenderse 1800 veces, por lo que el consumo sería:

$$C_{TIMER1} = \frac{603{,}8\,\mu\text{A} \times 1800 \times 300\,\mu\text{s} + 3{,}8\,\mu\text{A} \times (3600\,\text{s} - 1800 \times 300\,\mu\text{s})}{3600\,\text{s}} = 3{,}9\,\mu\text{A} \tag{3.2}$$

De los resultados anteriores, se concluye que el uso de un RTC disminuye sustancialmente el consumo. Además el RTC brinda una base de tiempos real, mucho más precisa e independiente del procesamiento que realice el microcontrolador.

## 3.4. Circuito de adquisición de pH

La medición de pH tiene algunas particularidades que impiden una lectura directa en los bornes del sensor de pH. Por ejemplo, la resistencia de salida del sensor[8] y la obtención de una buena precisión en la medida hacen necesario un circuito de acondicionamiento que adapte la señal de pH al conversor A/D del PIC.

### 3.4.1. Modelo eléctrico del sensor

De la hoja de datos del fabricante se obtuvieron los parámetros para confeccionar el circuito equivalente Thévenin del sensor de pH (ver figura 3.4).

El equivalente presenta resistencia de salida $R_S$ del orden 150 M$\Omega$ y una fuente de voltaje proporcional al pH del líquido en el cual se encuentra sumergido.

[8] Ver sección 2.1.3

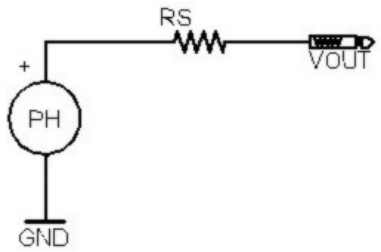



Figura 3.4: Circuito equivalente Thévenin del sensor de pH

Tabla 3.4: Parámetros del circuito equivalente Thévenin del sensor de pH

| Parámetro | Valor |
|---|---|
| $R_S$ | $150\,\mathrm{M\Omega}$ |
| $V_{pH@25\,^\circ\mathrm{C}}$ | $59,16\,\frac{\mathrm{mV}}{\mathrm{pH}}$ |

### 3.4.2. Criterios de diseño

En el diseño del bloque de adquisición se siguieron los criterios generales establecidos en la sección 1.5.

Para minimizar el consumo se va implementar un circuito de "prendido y apagado" del bloque analógico.

Para el tratamiento del ruido se incluyó un filtro pasabajos de primer orden a la entrada del conversor A/D. Éste fue implementado mediante un condensador en el lazo de realimentación del amplificador operacional.

Los requerimientos de incertidumbre en la medida de pH imponen la necesidad de contar con señales muy limpias. Inicialmente[9] este rango va desde $-30\,\mathrm{mV}$ (que equivale a $7,5\,\mathrm{pH}$) hasta $220\,\mathrm{mV}$ (que equivale a $3,5\,\mathrm{pH}$). La existencia de resistencias del orden de los MΩ obligó a diseñar filtros que pudiesen actuar sin generar retardos significativos, ya que toda demora en el momento de la medición atenta contra el bajo consumo.

Para utilizar al máximo la precisión del conversor A/D se debió amplificar el rango de voltajes de salida del sensor. Como el rango de entrada al conversor A/D del PIC para una alimentación de 3 V, es de 0 V a 2,9 V,se decidió amplificar la señal de entrada por un factor de 10.

El sistema funciona alimentado por una batería asimétrica de 3 V, de modo que tanto el PIC como el amplificador no pueden manejar voltajes negativos. Para solucionar este problema se plantearon dos alternativas. La primera de ellas, y la más simple, es sumar un voltaje constante a la señal de entrada con un divisor resistivo. A primera vista, la desventaja de esta alternativa podría ser el consumo, ya que se establece un camino resistivo directo entre fuente y tierra. La otra alternativa es utilizar una fuente simétrica para esta parte del sistema. Ésta se podría obtener a partir de un integrado que, a partir de la fuente positiva obtenga un voltaje negativo de referencia, esta opción fue descartada debido a que no se encontraron circuitos integrados que cumplieran la función requerida, con una eficiencia aceptable. Finalmente, la opción de sumar una constante a través de un divisor resistivo resultó ser la mejor alternativa, ya que solucionó el problema en forma sencilla utilizando un consumo razonable.

Para no afectar la medida, el amplificador deberá tener una resistencia de entrada mucho mayor a la resistencia de salida del sensor. Ésta última es de 150 MΩ, entonces el amplificador debería tener una resistencia de entrada de por lo menos $1,5\,\mathrm{G\Omega}$.

### 3.4.3. Requerimientos

A partir de las consideraciones establecidas en la sección anterior los requerimientos pueden resumirse en la siguiente lista:

- Alimentación asimétrica de 3V.

[9] Las características eléctricas del sensor pH varían con el tiempo y el uso, ver sección 2.1.3

- Rango de voltajes a la entrada entre $-30\,\text{mV}$ y $220\,\text{mV}$.
- Amplificador: ganancia de $10\,\text{V/V}$ y resistencia de entrada mucho mayor a $150\,\text{M}\Omega$
- Minimizar el consumo.
- Minimizar el ruido.

### 3.4.4. Alternativas de diseño

Al comienzo se diseñó el bloque de adquisición basado en el amplificador de instrumentación AD623 de *Analog Devices* en una configuración no inversora. Éste cuenta con una resistencia de entrada de $2\,\text{G}\Omega$, soporta alimentación asimétrica y tiene un consumo bajo (corriente máxima $575\,\mu\text{A}$).

El problema con este amplificador, es que se logró trabajar correctamente sólo en un reducido rango de voltajes de entrada. En efecto, el rango de entrada diferencial ($V_{Dif}$) viene dado por la ecuación (3.3).

$$|V_{Dif_{max}}| = 2\,\frac{V_{cc} - 0,7V - V_{CM}}{G} \tag{3.3}$$

$V_{Dif}$ depende linealmente del voltaje de modo común ($V_{CM}$). El máximo del rango de entrada de modo común se obtiene a partir de la ecuación (3.4).

$$V_{CM} = \frac{Vcc + Vss}{2} \tag{3.4}$$

Sustituyendo se obtiene que $|V_{Dif_{max}}| = 160\,\text{mV}$. Este rango de entrada diferencial no satisface los requerimientos, por lo que fue descartado.

El AD623 fue sustituido por el amplificador operacional con entrada J-FET TL062 de *Texas Instrument*. Este amplificador posee una resistencia de entrada mayor que la del AD623 (del orden de $\text{T}\Omega$), tiene menor consumo (corriente máxima $250\,\mu\text{A}$), soporta alimentación asimétrica y no presenta inconvenientes en cuanto al rango de voltajes de entrada.

El problema encontrado con el TL062 es que para voltajes cercanos a $0\,\text{V}$ saturaba. Los voltajes de este entorno se encuentran dentro de los valores de mayor interés por dos motivos fundamentales. En primer lugar, este valor corresponde a un pH de 7, que es la neutralidad y es un estado muy importante del rumen de la vaca. En segundo lugar, este valor se usa para la calibración del instrumento.

### 3.4.5. Diseño final

Finalmente se optó por utilizar el amplificador operacional con entrada MOS TLC2254 de *Texas Instrument*. Dicho amplificador tiene una resistencia de entrada muy elevada (del orden de $\text{T}\Omega$), tiene bajo consumo (corriente máxima $250\,\mu\text{A}$), soporta alimentación asimétrica, no presenta inconvenientes en cuanto al rango de voltajes de entrada y maneja adecuadamente voltajes cercanos a los $30\,\text{mV}$.

Se utilizó una configuración de amplificador de instrumentación (ver figura 3.5), con este diseño se obtiene un CMRR alto y se logran eliminar los ruidos en modo común como puede ser la interferencia de la red eléctrica.

En el circuito diseñado se distinguen dos bloques principales: Offset y Amplificador.

#### Bloque Offset

El bloque *Offset* suma una constante de $60\,\text{mV}$ al voltaje de salida del sensor de pH. De este modo el menor voltaje de interés que entrega el sensor se transforma en los $30\,\text{mV}$ mínimos manejables por el amplificador.

El bloque *Offset* consiste en un divisor resistivo con una alta impedancia vista desde la alimentación. Por el camino resistivo que se forma entre fuente y tierra circulan $4,3\,\mu\text{A}$, lo cual no contradice los requerimientos

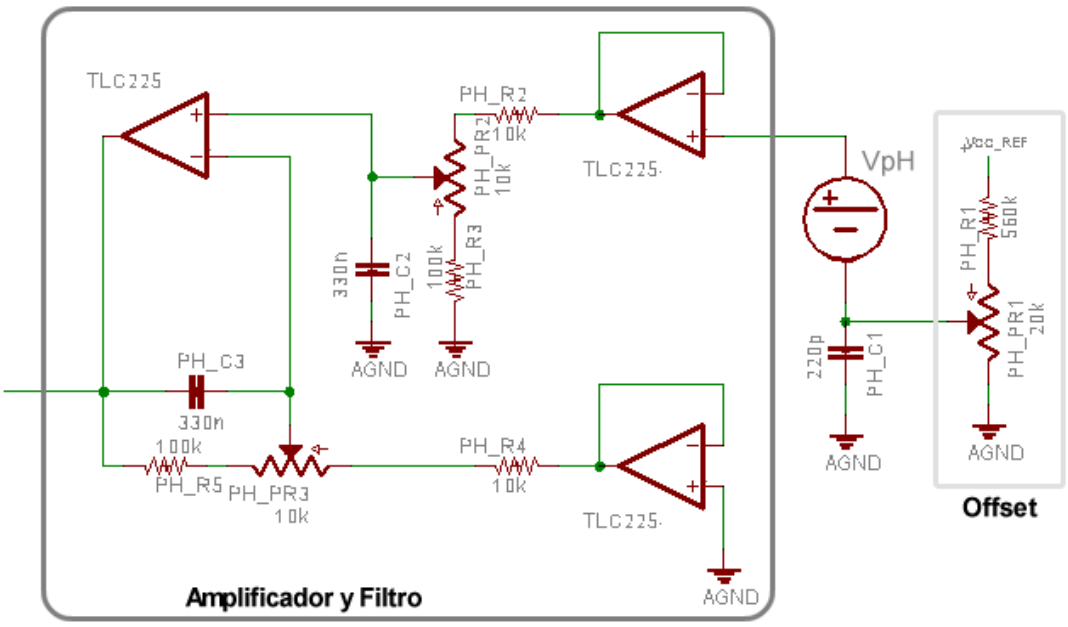



Figura 3.5: Circuito de adquisición de pH

de bajo consumo.

A medida que la batería se va descargando, la constante de 60 mV disminuye proporcionalmente. Lo mismo ocurre con el rango dinámico del conversor A/D del PIC, ya que el sensor de pH es activo. Estos problemas implican una pérdida de precisión en la medida. Para solucionar este problema se optó por alimentar el circuito de adquisición de pH mediante una referencia de voltaje (TPS60243 de *Texas Instruments*, ver sección 3.5).

Por último, se observa que la implementación de este bloque compensa automáticamente el voltaje de offset del amplificador operacional.

### Bloque Amplificador

El bloque *Amplificador* cumple dos funciones, filtrar y adaptar los niveles de salida del sensor para aprovechar el rango de entrada del conversor A/D.

Para lograr un CMRR alto, se tomaron iguales las resistencias vistas desde las entradas al amplificador, de aquí surgen las siguientes relaciones:

$$R4' = R2'$$
$$R5' = R3'$$

Donde:

$$R4' = PH_R4 + PH_PR3.(1 - x)$$
$$R5' = PH_R5 + PH_PR3.(x)$$
$$R3' = PH_R3 + PH_PR2.(x')$$
$$R2' = PH_R2 + PH_PR2.(1 - x')$$

Con lo cual la transferencia del bloque *Amplificador* es:

$$H(s) = \left[\frac{R3'\tau_2}{s + R2'\tau_3}\right]\left[\frac{s + \tau_3(R3' + R2')}{s + \tau_2(R3' + R2')}\right] \tag{3.5}$$

Donde:

$$\tau_2 = \frac{1}{R3'R2'C_2}$$
$$\tau_3 = \frac{1}{R3'R2'C_3}$$

Como se vio en la sección 3.4.3 la ganancia en continua de este bloque debía ser 10 $\frac{V}{V}$. Su expresión es igual a $R3'/R2'$, de donde se obtiene que:

$$R3' = 10.R2' \tag{3.6}$$

Para obtener esta relación en forma precisa se utilizan los presets $PH_PR2$ y $PH_PR3$. A partir de las ecuaciones (3.6) y (3.5) los polos de la transferencia son los siguientes:

$$p_2 \cong \frac{11}{R3'C_2}$$
$$p_3 \cong \frac{1}{R3'C_3}$$

Si se eligen $C_2$ y $C_3$ iguales, el $p_3$ aparece como polo dominante, por lo que el efecto del polo restante y del cero es despreciable. Al mismo tiempo el polo no dominante se cancela con el cero y se llega a la nueva transferencia en la ecuación 3.7[10].

$$H(s) = \frac{R3'\tau}{s + R2'\tau} \tag{3.7}$$

Para bajar la corriente que tienen que entregar los amplificadores, se eligió un valor alto para $R3$ (100 kΩ). Finalmente, para filtrar el ruido a 50 Hz el valor del condensador quedó fijado en 330 $\mu$F. Las señales provenientes del sensor de pH se pueden considerar continuas por lo que ubicar el polo en ese punto no afecta el funcionamiento del sistema.

## 3.5. Referencia de Voltaje

La inclusión de un chip que generara una referencia de voltaje independiente de la alimentación se debe a tres motivos:

- Generar la constante de 60 mV del bloque Offset, ver sección 3.4.5.
- Implementar el circuto de "prendido y apagado" del bloque analógico. Aprovechando que este chip tiene un modo de funcionamiento "Shutdown" configurable mediante un pin de ENABLE
- Implementar el circuto para medir el nivel de la batería. Este circuito consiste en una pista entre la salida del chip y un conversor A/D del PIC.

El chip utilizado es el TPS60243 de *Texas Instruments*, se trata de un regulador de voltaje basado en "condensadores conmutados", que genera una tensión de salida constante de 3 V para un amplio rango de voltajes de entrada y es capaz de entregar hasta 25 $mA$. En la tabla 3.5 se presenta un tabla con sus principales características.

El problema que puede presentar el uso de este tipo de dispositivos es que genera un ripple en la señal de salida que alimenta a los amplificadores. Según la hoja de datos el valor de éste es 170 $\mu VRMS$, los

[10] Esto no es estrictamente así ya que los capacitores no son exactamente iguales, de todas formas este efecto es de segundo orden.

amplificadores operacionales tienen un PSRR[11] de $80dB$ por lo que este efecto no tiene efectos apreciables sobre el sistema.

Tabla 3.5: Principales características del TPS60243

| Característica | Valor | |
|---|---|---|
| Voltaje de salida | $3 \pm 0{,}075$ : V | |
| Voltaje de entrada | 1,8 V a 5,5 V | |
| Corriente de salida (máx) | 25 mA | |
| Frecuencia de oscilación (típica) | 160 kHz | |
| Consumo típico en modo "Shutdown" | 0,1 $\mu$A | |
| Eficiencia | 81 % | $I_O = 10\,\text{mA}, V_I = 1{,}8\,\text{V}$ |
| Empaque | MSOP | |

## 3.6. Integración

En esta sección se discuten los aspectos relativos a la integración de todos los elementos que conforman el diseño, así como la aplicación utilizada para ello.

### 3.6.1. Disposición de los componentes

La disposición de los elementos en la placa final puede separarse en dos grandes sectores: el sector analógico, que es donde se encuentra el circuito de adquisición de pH y el voltaje de referencia; el sector digital, integrado por el PIC y sus periféricos. De este modo las señales digitales, intrínsecamente ruidosas, no afectan a los bloques analógicos donde se lleva a cabo la adquisición de los datos.

Los elementos en el sector digital se pueden clasificar según la forma de interactuar con el PIC, es así que existe un grupo de periféricos que utilizan un *bus* SPI, estos son: la memoria externa, el reloj de tiempo real (RTC) y el sensor de temperatura. Estos chips y sus componentes asociados se colocaron cerca para facilitar el ruteo. Por otro lado, el MAX3221, responsable de la adaptación de niveles lógicos entre el PIC y PC, se colocó próximo al conector que comunica al Panel Frontal.

### 3.6.2. Técnicas de prototipado

Para realizar el prototipo finalmente diseñado se utilizaron dos métodos o tecnologías: WireWrap e impresos PCB.

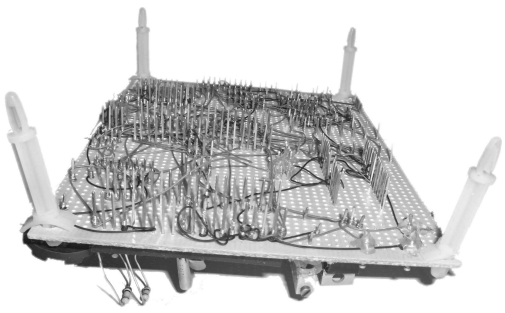


Figura 3.6: Prototipo en WireWrap

WireWrap es la técnica que se utilizó en la mayor parte del diseño de la placa. Consiste en la interconexión de los componentes de un circuito utilizando un alambre fino recubierto de un aislante delgado, que una vez enrollado en un pin queda firme, obteniendo una conexión segura. Para la etapa de rediseño, el WireWrap proporciona una ventaja muy importante sobre otras técnicas, ya que es muy sencillo cambiar

[11] Power Supply Rejection Ratio

componentes, incluir nuevos bloques, etc. Mediante esta técnica se obtienen muy buenos resultados, pero no tiene la robustez de una impresión PCB y es costosa en área utilizada.

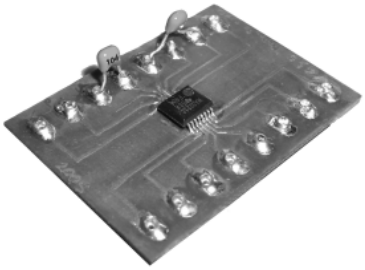


Figura 3.7: Prototipo en PCB

En la impresión PCB, se toma una placa de pertinax con una o dos caras laminadas en cobre y se le imprime el layout del circuito. Luego se sumerge en percloruro de hierro, el cual corroe las partes del cobre que no están cubiertas por la impresión. Al final se obtiene un trazado en pistas de cobre sobre las cuales se sueldan los componentes del circuito (Ver figura 3.7). Con esta técnica se obtienen uniones mucho más firmes que las de WireWrap y además se puede trabajar con componentes de soldadura superficial lo que deriva en placas de tamaños reducidos. Esta técnica se utilizó en los chips MAX3221 y TPS60243, para incorporarlos a la placa de WireWrap, ya que no se fabrican en encapsulados PDIP.

### 3.6.3. Diseño de la placa final

Para diseñar el circuito impreso de la placa final se utilizó la versión gratuita del EAGLE[12]. Esta aplicación trabaja en dos modos, Esquemático y Layout, estos modos abordan el diseño desde dos puntos de vista diferentes pero muy relacionados. En el primero se arma el conexionado de los componentes en un nivel lógico, aquí no importa la ubicación física. Para diseñar el trazado de las pistas y la ubicación de los componentes a la placa se utiliza el modo Layout.

#### Esquemático

En el esquemático del circuito se tiene una visión clara del diseño realizado, ya que se tienen en cuenta las interacciones entre los componentes a nivel de las señales que comparten. En el apéndice B se incluye dicho diagrama.

#### Layout

En el modo Layout se integran los componentes mediante el trazado de las pistas que los interconectan, el EAGLE cuenta con una herramienta que simplifica el diseño llamada *Autoruteo*, esta herramienta resuelve las conexiones evitando los cruces entre las pistas.

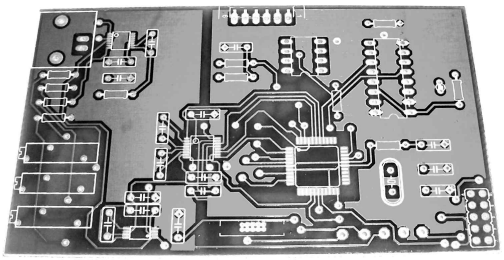


Figura 3.8: Placa final sin componentes

Para la impresión de la placa se consideraron opciones de empresas en el exterior pero los costos y tiempos de envío no eran adecuados, finalmente se recurrió a Audiosonic, una empresa del medio local que si bien tiene mayores restricciones técnicas, tiene precios razonables y plazos de entrega excelentes (48 hs).

[12]Desarrollado por CadSoft, http://www.cadsoftusa.com/

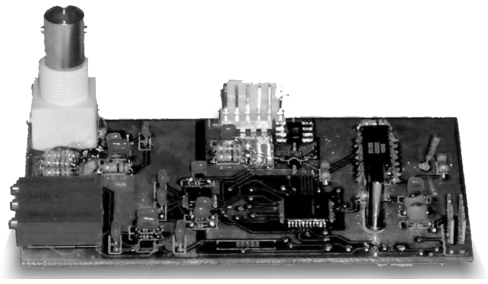


Figura 3.9: Placa final con los componentes

El fabricante utiliza una técnica de grabado y dispone de las tecnologías apropiadas para hacer la máscara anti-soldante y de componentes. No realiza agujeros metalizados, con lo cual las vías deben ser soldadas a mano, ni pre-estaña los pads de soldado superficial.

Para adaptarse a las limitantes del fabricante la función de *Autoruteo* permite configurar algunas reglas de diseño. Por ejemplo, puede establecerse tamaños mínimos de ancho de pista, distancias mínimas entre pads, pistas y vías, entre otras reglas.

Para simplificar la interconexión de los componentes, el layout se diseñó en dos capas. Para unir las pistas de uno y otro lado se necesitan vías. Como el fabricante no implementa agujeros metalizados, se buscó minimizar la cantidad de vías.

El fabricante también impuso que las pistas no debían tener ángulos rectos ya que este tipo de trazados no reaccionan de forma adecuada ante el ácido.

Como se menciona en la sección 3.6.1 la disposición de los elementos en la placa se realizó según el tipo de tierra que utilizan. En la figura 3.10 se distinguen dos zonas, a la izquierda la zona digital y a la derecha la analógica. Para evitar "loops de tierra" se implementó una conexión en estrella. Las tierras analógica y digital se unen con la tierra del PC y la del sensor de temperatura en la esquina superior izquierda, de esta forma todas las tierras del circuito están al mismo potencial.

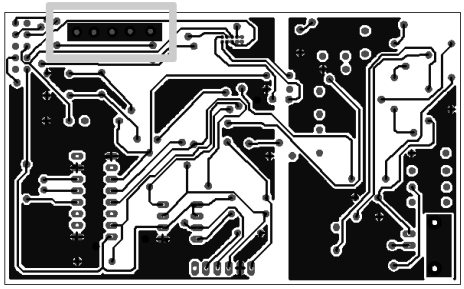


Figura 3.10: Layout de la parte inferior de la placa final

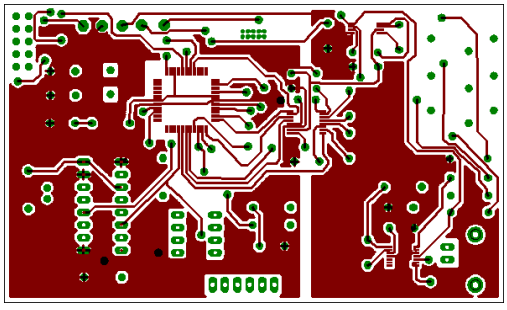


Figura 3.11: Layout de la parte superior de la placa final

# Capítulo 4

# Firmware

En esta sección se presentan los rasgos más importantes del programa implementado en el PIC. Las funciones que éste desarrolla son el centro del funcionamiento del sistema. El PIC se encarga de la adquisición de los datos, su almacenamiento, el control de la base de tiempos y la comunicación con el PC. Controla todos los periféricos, así como el encendido y apagado de los circuitos.

## 4.1. Diseño

En la figura 4.1 se presenta un diagrama de bloques de alto nivel del firmware implementado. Se definió que el DIR tenga tres modos de funcionamiento: *Conectado*, *Activado* y *Suspendido*.

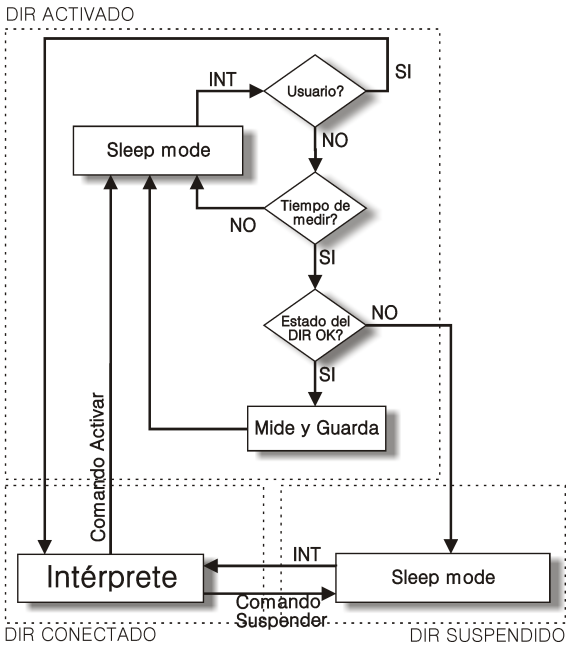



Figura 4.1: Diagrama de bloques de alto nivel del firmware.

El DIR está *Conectado* cuando está en comunicación con el PC. El DIR espera que el usuario, a través de un PC, le envíe comandos y éste responde a las mismas. Para contemplar futuros cambios, la comunicación entre el DIR y el PC se encapsuló en un módulo llamado *Intérprete*. Éste es un interprete de comandos, que con leves modificaciones sería capaz de utilizar otro canal de comunicación.

El DIR está *Activado* cuando fue desconectado del PC y fue configurado para tomar medidas. En este caso, el sistema se encuentra operando en un modo de bajo consumo, el PIC estará la mayor parte del tiempo en "Sleep Mode" despertándose por interrupciones, solamente cuando sea tiempo de tomar medidas o cuando el usuario lo requiera.

El DIR está *Suspendido* en cualquier otro caso. El DIR pasará a este estado cuando el nivel de la batería sea insuficiente para una operación normal o los datos medidos hayan alcanzado el tamaño máximo de la memoria. Asimismo, si el DIR está *Conectado* al PC y no se envían comandos por más de 3 minutos, pasará automáticamente al modo *Suspendido*. En este estado, el PIC mantiene un mínimo de funcionalidades ("Sleep Mode"), no toma medidas y solamente puede volver a la operación normal conectándolo al PC (mediante interrupciones).

Se decidió que la información relevante del DIR esté guardada en su memoria externa, en contraposición con guardarla en el PC (Por ejemplo los datos de calibración de pH o la fecha de inicio de un experimento). Esto facilita enormemente la tarea del usuario en el caso de utilizar diferentes PC's.

Para ahorrar espacio en memoria se decidió que no era necesario guardar toda la fecha. La fecha se guarda en dos momentos: cuando el PIC es configurado y cuando ocurre un reset.

Para desarrollar el Firmware se eligió utilizar Assembler. Un diseño orientado a bajo consumo, requiere de la optimización de código que puede obtenerse a través de Assembler. Por otra parte, el grupo tenía experiencia previa en este tipo de programación.

La programación se diseñó en capas (Ver figura 4.2). Se diseñaron rutinas que implementan los protocolos con los cuales se comunican el PIC y los periféricos. Luego, utilizando estas rutinas, se estableció la comunicación entre los periféricos. Finalmente, el programa principal y las rutinas de alto nivel utilizan las funciones que brindan la rutinas de la capa de periféricos. A modo de ejemplo, se describirán las rutinas que trabajan con la memoria. En la capa de protocolos se tiene las rutinas que implementan la transmisión y recepción de datos del Protocolo SPI (las mismas rutinas son utilizadas por los otros periféricos SPI). En la capa de periféricos se tienen las rutinas que permiten leer y escribir bloques de memoria, leer y escribir de a byte, borrar y verificar la memoria completa, entre otras. También se incluyen en esta capa rutinas para configurar la memoria, leer su registro de STATUS o hacer un "polling" a su bit de BUSY.

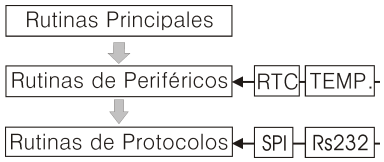



Figura 4.2: Esquema de capas de programación.

Esta estrategia permitió optimizar el código escrito y facilitó la distribución del trabajo a la hora de programar. Como contrapartida este método exigió controlar el nivel del stack[1] para que no se desbordara. Un ejemplo de esto es que el interprete se realizó como un salto y no como rutina, para ahorrar un nivel de stack.

La memoria de programa del PIC está organizada en cuatro bancos de 2048 bytes. En el primer banco están las rutinas principales. En el segundo banco está las rutinas de periféricos y de protocolo.

## 4.2. Consideraciones sobre la implementación

### 4.2.1. Vector de estados

El sistema posee una serie de variables que deben ser preservadas en la memoria externa para evitar que dependan de la continuidad de la alimentación del sistema o de la presencia de un reset. Para ello se reservaron los primeros 32 bytes de la memoria externa (ver figura 4.3, en la sección C.3 se presenta la tabla completa).

#### Puntero de Memoria

Los procedimientos de lectura y escritura de la memoria externa se manejan a través de un puntero al primer lugar vacío. Los dos primeros bytes del vector de estados guardan este puntero.

[1]Los PICs de la familia 16 tienen un stack de 8 lugares

| Byte | Contenido |
|---|---|
| 00 | Parte alta de puntero de memoria |
| 01 | Parte baja de puntero de memoria |
| 02 | Banderas |
| 03 | Tiempo de muestreo |
| 04–07 | Datos de calibración pH7 |
| 08–0A | Datos de calibración pH4 |
| 0B–17 | Fecha de inicio de experimento |
| 18–19 | Estado de Batería |
| 1A | Tamaño de memoria |
| 1B–1F | Libre |

Figura 4.3: Vector de Estados

### Banderas

En el Vector de Estados se guardan las banderas no volátiles del sistema (Ver figura 4.4).

Figura 4.4: Banderas no volátiles.

Si $BBB = 1$ entonces la batería está por debajo del nivel mínimo permitido para funcionar (2,5 V). Como se mencionó anteriormente, si esto ocurre el sistema pasará al modo *Suspendido*.

$BS = 1$ indica que el DIR está o debe pasar al modo *Suspendido*.

$BML = 1$ indica que la memoria está llena. De ser así el sistema pasa al modo *Suspendido* y no volverá a tomar medidas hasta que se borre la memoria.

### Tiempo de muestreo

El sistema debe disponer del período de muestreo para la configuración del RTC y para reconstruir la escala de tiempos para la presentación de los datos.

### Datos de calibración

Se guardan los parámetros de la curva de calibración de pH (en mV) correspondientes a pH 7 y pH 4 y los valores de temperatura de las respectivas medidas, obtenidos en la última calibración.

### Fecha de inicio de experimento

Esta información se guarda para saber cuándo se inició la toma de medidas, para el usuario es una información muy importante y para el sistema tiene como principal utilidad reconstruir la escala de tiempos para la presentación de los datos.

### Estado de batería

El sistema mide el nivel de la batería cada vez que se toma una medida y lo guarda aquí. Este dato sirve para informar al usuario del estado de la batería.

### Tamaño de la memoria

El tamaño de la memoria se guarda debido a que el sistema puede funcionar con varios tamaños de memoria (desde 128 bytes hasta 64 kb). Con este dato el sistema determina cuántos datos se pueden almacenar según el tipo de memoria.

### 4.2.2. Protocolo de comunicación con el PC

El protocolo de bajo nivel utilizado para comunicar el DIR con el PC fue RS232 (Ver sección 3.2). Al enchufar el DIR al PC, el MAX3221 detecta niveles válidos y genera la interrupción en el PIC.

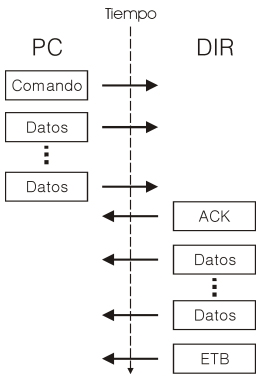



Figura 4.5: Protocolo de comunicación con el PC

Sobre RS232 se diseñó una comunicación orientada a conexión que tiene la siguiente estructura (ver figura 4.5): El PC manda el comando y datos en caso de ser necesario, el DIR responde un ACK, procesa el comando y envía los datos solicitados. Finalmente el DIR envía el carácter ASCII "ETB" para señalizar la finalización de la trama.

### 4.2.3. Principales rutinas

Es esta sección se presentan las principales rutinas desarrolladas.

#### Configuración inicial

En la figura 4.6 se presenta un diagrama de flujo de la configuración inicial.

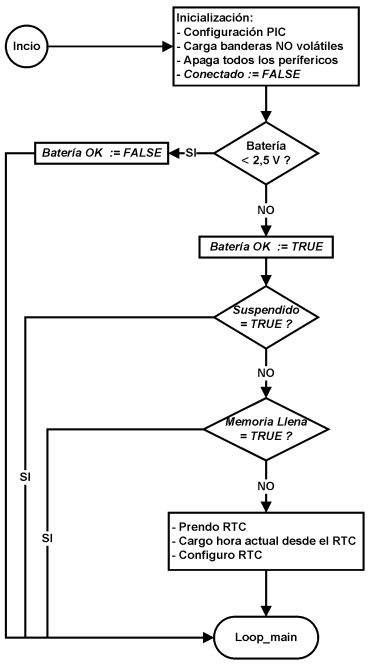



Figura 4.6: Diagrama de flujo de la configuración inicial

Luego de un reset, se configura el PIC, se inicializan las variables y se configuran y apagan los periféricos. Se arma el "vector de estados" (se mide nivel de batería y el resto de la variables se cargan desde la memoria externa) y en función del mismo se pasa al loop principal (*Loop_main*), en estado *Activado* o *Suspendido*.

### Loop principal

En la figura 4.7 se presenta un diagrama de flujo del loop principal del firmware.

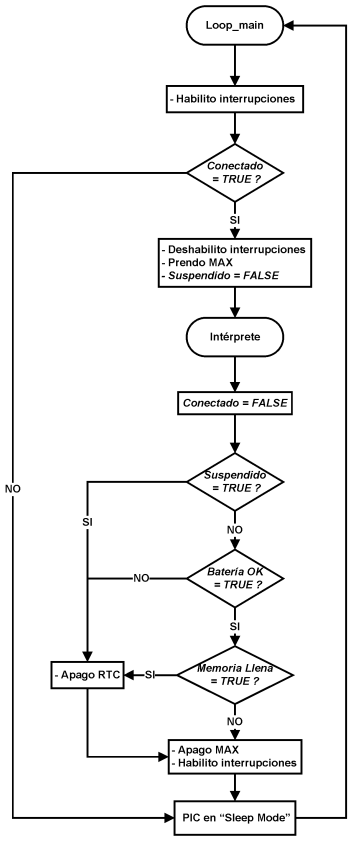



Figura 4.7: Diagrama de flujo del loop principal del firmware

En el loop principal se habilitan las interrupciones y dependiendo de si se recibió una interrupción del PC, se pasa a "Sleep Mode" (quedando el DIR *Activado* o *Suspendido* según corresponda) o al modo *Conectado*.

Si se recibió una interrupción del PC, se deshabilitan las interrupciones, se prende el MAX3221 y se pasa al "Intérprete". Al regresar de éste, se actualiza y verifica el "vector de estados" para que el DIR quede *Activado* o *Suspendido*.

### Interrupciones

En la figura 4.8 se presenta un diagrama de flujo de la rutina de atención a las interrupciones.

En primer lugar se consulta sobre el origen de la interrupción. Si fue el RTC (esto solamente es posible si el DIR está *Activado*) significa que se debe tomar una medida de temperatura y pH, verificar el estado de la batería y si no hay problemas, configurar el RTC para la siguiente medida. Si se detecta una anomalía (baja batería o memoria llena) se actualiza el "vector de estados" y se configura el DIR para pasar al modo *Suspendido*.

El RTC posee unos registros internos, donde debe cargarse la hora a la cual se pretende que se genere la próxima alarma. Con lo cual, en cada interrupción, el PIC debe consultarle al RTC cual fue la condición de alarma anterior, sumarle el período de muestreo y configurar al RTC con la nueva condición de alarma. El sistema está implementado considerando los carry's que se suceden entre segundos, minutos y horas, con lo cual es capaz de sumarle cualquier período de muestreo a cualquier hora.

Si la interrupción fue generada por el PC, simplemente se actualiza seteando la bandera "Conectado" y se vuelve al programa principal.

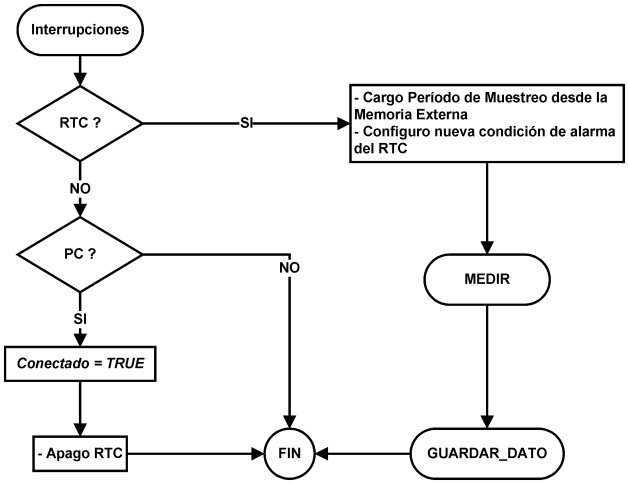



Figura 4.8: Diagrama de flujo de la rutina de atención a las interrupciones

### Intérprete

En la figura 4.9 se presenta un diagrama de flujo del intérprete.

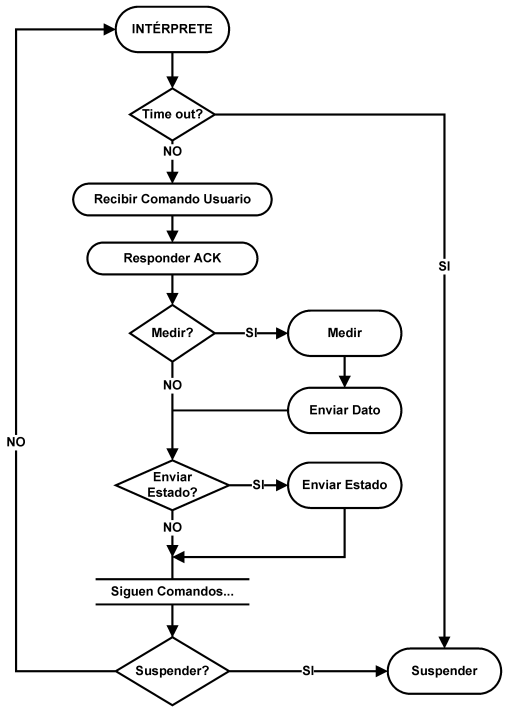



Figura 4.9: Diagrama de flujo de la rutina Intérprete

El interprete es la rutina encargada de decodificar el comando que se solicitó desde el PIC. Cuando llega el dato, el intérprete simplemente lo analiza y ejecuta la rutinas correspondientes. En el apéndice C.1 se presenta la Tabla de Comandos implementada por este intérprete.

Como se vio en la sección 3.1.2 la USART del PIC puede ser manejada por interrupciones o por interrogación. Para ahorrar un nivel de stack, tanto para transmitir como para recibir, se utilizó el segundo método. Entonces, cuando el DIR está en modo *Conectado* queda siempre esperando que el PC le envíe un byte, si no le llega en aproximadamente 3 minutos, sale por time-out al modo *Suspendido*.

### Rutina MEDIR

En la figura 4.10 se presenta un diagrama de flujo de la rutina MEDIR.

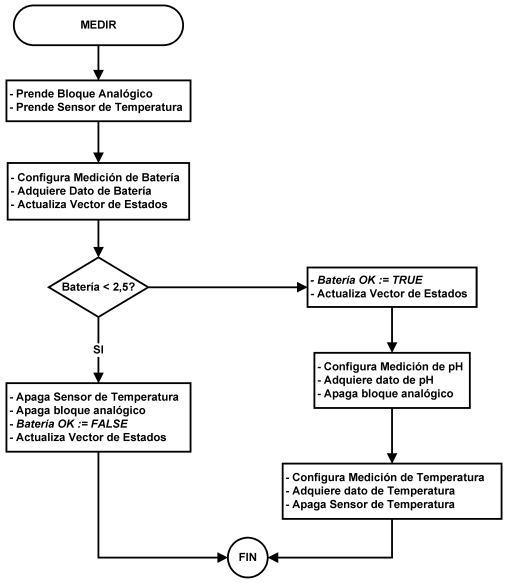



Figura 4.10: Diagrama de flujo de la rutina MEDIR

La rutina MEDIR, enciende el Bloque Analógico y luego el sensor de Temperatura (en ambos casos se espera un delay para garantizar la estabilidad de circuito antes de medir). En primer lugar se mide y guarda el nivel de la batería, para ello configuran previamente los conversores A/D. Si el nivel de batería es malo se setean las banderas correspondientes y se finaliza. Si el nivel de batería está bien, se adquieren las medidas de temperatura y pH y se apagan los circuitos correspondientes.

### Rutina GUARDAR_DATO

En la figura 4.11 se presenta un diagrama de flujo de la rutina GUARDAR_DATO.

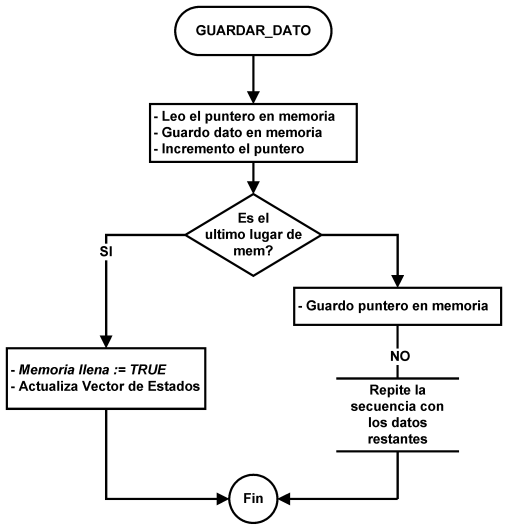



Figura 4.11: Diagrama de flujo de la rutina GUARDAR DATO

Como ya se dijo antes para no perder la referencia al lugar de memoria donde se debe escribir, se decidió usar un puntero que se guarda en el Vector de Estados. La rutina MEDIR en primer lugar levanta el puntero, guarda el dato, incrementa el puntero y verifica si llego al final de la memoria. En este caso, se setean las

banderas correspondientes y se finaliza. En caso contrario se siguen guardando los datos hasta finalizar.

En la memoria se guardan básicamente tres datos: los dato de medida, un reset o un dato no válido de temperatura. Los datos se guardan en 4 bytes, primero el byte alto y luego el bajo de pH y después la medida de temperatura en el mismo orden. El reset se guarda en 8 bytes, almacenando la hora a la cual se produjo. Un dato no válido de temperatura se guarda en 4 Bytes al igual que un dato común solo que en los dos bytes se guardan 0xFF para avisar de esta situación.

## 4.3. Estimación del consumo del DIR

Para estimar el consumo del DIR se propone hacer un promedio en el tiempo, del consumo de cada uno de sus componentes, en función de los diferentes modos de funcionamiento que tiene. Para efectuar el cálculo, se tomó el consumo de los componentes en el peor caso, para luego calcular el tiempo total que podría funcionar el circuito con dos pilas alcalinas AA de 1200 mAh. Este valor corresponde al modelo K3A[2] de Kodak®.

En sus tres modos de funcionamiento posibles el DIR hace diferentes tareas. En el estado *Suspendido* el DIR no realiza casi ninguna tarea, ya que todos sus componentes están en inactivos.

Cuando el DIR está *Activado* se agrega la tarea de adquirir un dato y guardarlo en la memoria, además se debe configurar la próxima toma de medidas. Este proceso se repite tantas veces por hora como el tiempo de muestreo lo indica.

Finalmente, si el DIR se encuentra *Conectado* la mayoría de los componentes se encuentran en funcionamiento y existen picos de consumo como la descarga de datos o el funcionamiento de medida continua. En este modo de funcionamiento es cuando el DIR consume más.

En la tabla 4.1 se presentan los consumos declarados en las hojas de datos de los componentes, en los dos estados en los que se pueden encontrar. En los casos de los amplificadores y del divisor resistivo sólo se da su consumo prendidos ya que se apagan completamente al desactivar la referencia de voltaje.

Tabla 4.1: Consumo de los componentes del DIR durante una medida.

| Dispositivo | Activo | Inactivo |
|---|---|---|
| PIC | $600\,\mu A$ | $0{,}5\,\mu A$ |
| Conversor A/D | $2\,\mu A$ | - |
| Memoria | $3\,mA$ | $1\,\mu A$ |
| RTC | $670\,\mu A$ | $0{,}6\,\mu A$ |
| MAX3221 | $1\,mA$ | $10\,\mu A$ |
| TPS60243 | $150\,\mu A$ | $0{,}04\,\mu A$ |
| Amplificadores | $140\,\mu A$ | - |
| LM95075 | $280\,\mu A$ | $0{,}6\,\mu A$ |
| Divisor resistivo | $5{,}5\,\mu A$ | - |

### 4.3.1. Consumo del DIR *Suspendido*

En este modo el sistema se encuentra en un estado estacionario del cual sale cuando se conecta al PC. Los dispositivos están todos inactivos por lo que el consumo es:

$$I_{Suspendido} = 12{,}74\,\mu A$$

Con estos datos se puede estimar que el DIR podría estar *Suspendido* durante unos 11 años.

[2] http://www.kodak.com/eknec/PageQuerier.jhtml?pq-path=9/35/1682/1688&pq-locale=es_AR , Febrero de 2006

### 4.3.2. Consumo del DIR *Activado*

Para este caso, al análisis anterior se debe agregar el consumo correspondiente a cuando el DIR esta midiendo.

En la tabla 4.2 se observan los tiempos aproximados, durante los cuales los componentes del DIR salen de su estado de inactividad para participar de la operación de medida. El resto del tiempo se encuentran inactivos. En la ecuación 4.1 se ve el resultado del consumo promedio en un segundo.

Tabla 4.2: DIR *Activado*: Tiempos.

| Dispositivo | Tiempo |
|---|---|
| PIC | $1\,s$ |
| Conversor A/D | $50\,\mu s$ |
| Ref. Voltaje | $500\,ms$ |
| Operacionales | $500\,ms$ |
| Divisor resistivo | $500\,ms$ |
| Memoria | $100\,ms$ |
| RTC | $600\,\mu s$ |
| Sensor de temp | $150\,ms$ |

$$C_{Medida} = 1491{,}85\,\mu A \tag{4.1}$$

Para poder determinar cuánto es el consumo promedio se toma el peor caso, o sea midiendo cada 5 minutos (mínimo período de muestreo especificado por los requerimientos de la aplicación). En este caso el DIR estará midiendo uno de cada 300 segundos por lo que el consumo promedio en una hora sería:

$$C_{mAh} = \frac{1491{,}85\,\mu A \times 12\,s + 12{,}74\,\mu A \times 3588\,s}{3600s} = 17{,}67\,\mu A$$

Con lo cual se puede estimar que el DIR podría estar *Activado* durante aproximadamente 7 años y medio.

### 4.3.3. Consumo del DIR *Conectado*

En este caso el PIC está permanentemente activo. El resto de los componentes están activos según la tarea que se esté realizando. En el caso del MAX3221 solo está inactivo durante el período de borrado de la memoria.

Para evaluar un peor caso representativo se va a considerar una sesión de conexión al programa. Se tomará en cuenta una descarga de datos de unos 10 s, el borrado de la memoria, una sesión de calibración de unos 10 minutos y un 50 % más de tiempo donde el usuario no hace nada pero mantiene el canal de comunicación abierto con el DIR.

**Descarga:** Aquí además del PIC intervienen la memoria y el MAX3221. Los consideraremos prendidos todo el tiempo. El consumo es $4\,mA$ durante 10 segundos.

**Borrado de memoria:** Este proceso lleva unos 8 segundos e interviene la memoria de igual manera que en el caso anterior. El consumo es $3\,mA$ durante 8 segundos.

**Calibración:** Esta es la más compleja de las actividades, aquí participan todos los componentes del sistema. Se toman unas 20 medidas y se guardan dos datos en memoria. El resto del tiempo se comporta como si solo el PIC y el MAX3221 estuvieran activos.

Los cálculos de consumo durante las medidas son parecidos a los ya hechos para el caso del DIR en modo Activo. A partir de la tabla 4.3 se obtiene que el consumo es $1441{,}5\,\mu A$ durante 10 segundos.

El tiempo estimado de uso es de aproximadamente 15 minutos. Durante este tiempo el PIC está activo permanentemente por lo que el consumo sería $600\,\mu A$ durante 900 segundos. El MAX3221 durante todo

Tabla 4.3: DIR *Conectado*: Tiempos.

| Dispositivo | Tiempo |
|---|---|
| Conversores A/D | $10\,s$ |
| Ref. Voltaje | $10\,s$ |
| Operacionales | $10\,s$ |
| Divisor Resisitivo | $10\,s$ |
| Sensor de temperatura | $3\,s$ |
| Memoria | $200\,\mu s$ |
| MAX3221 | $10\,s$ |

el tiempo no considerado en las actividades está activo, por lo que su consumo es $1\,mA$ durante 862 segundos.

Finalmente se llega a que el consumo del DIR *Conectado* fue de $1656{,}02\,\mu A$, que de suponer un uso continuo en esta modalidad la duración de la batería sería de un mes.

La situación es bastante distinta cuando se considera al sistema funcionando en medida continua, tomando muestras cada 2 segundos.

El consumo de los componentes sin contar al MAX3221 y al PIC es de $591{,}85\,\mu A$ durante 1 segundo, considerando que mide un segundo si y otro no, obtenemos que el consumo es $295{,}92\,\mu A$ durante dos segundos. Si a esto le sumamos el consumo de los componentes restantes se obtiene que el consumo promedio en dos segundos es de $1895{,}92\,\mu A$. Con lo cual, Anubis podría funcionar unos 26 días en estas condiciones.

Se puede obtener como conclusión que si estos consumos teóricos se confirman en la práctica, se estaría cumpliendo ampliamente con los requisitos, siempre que no se abuse de "Medida Continua".

## 4.4. Deducción de las ecuaciones de medida

En ésta sección se deduce la ecuación que permite reconstruir a partir de los 4 bytes de datos que transmite el DIR los valores medidos de pH y temperatura.

### 4.4.1. pH

Según la ecuación (2.4) la relación entre $pH$ y el voltaje $E$ medido en bornes del sensor es la siguiente:

$$E = -\frac{RT\ln 10}{F} \times (pH - 7) \tag{4.2}$$

Considerando $K = \frac{R\ln 10}{F}$ y despejando pH, se obtiene:

$$pH = -\frac{E}{KT} + 7 \tag{4.3}$$

Para modelar la descalibración del sensor, es decir los cambios que se producen en la pendiente y en el término independiente de la ecuación, se introducen los coeficientes $\alpha$ y $\beta$:

$$pH = -\alpha\frac{E}{KT} + 7 + \beta \tag{4.4}$$

La calibración consiste en obtener los voltajes $E_7$ y $E_4$, correspondientes a la salida del sensor de pH, cuando es colocado en buffer 7 y buffer 4 respectivamente. Esto nos brinda dos ecuaciones:

$$\begin{cases} pH = 7: & -\alpha\frac{E_7}{KT_7} + \beta = 0 \\ pH = 4: & -\alpha\frac{E_4}{KT_4} + 7 + \beta = 4 \end{cases}$$

Los valores de $T_7$ y $T_4$, corresponden a las temperaturas de calibración, en buffer 7 y buffer 4 respectivamente. Resolviendo el sistema se obtiene:

$$\alpha = \frac{-3K}{E_7/T_7 - E_4/T_4} \tag{4.5}$$

$$\beta = \frac{-3E_7/T_7}{E_7/T_7 - E_4/T_4} \tag{4.6}$$

Sustituyendo (4.5) y (4.6) en (4.4) se obtiene la ecuación de corrección del pH que debe utilizarse.

La ecuación del circuito de acondicionamiento de pH es la siguiente:

$$E_{out} = G.(E + V_{offset}) \tag{4.7}$$

Donde $E_{out}$ es la señal de salida del circuito, $G$ es la ganancia y $V_{offset}$ es la constante que suma el Bloque Offset.

El paso de cuantización del Conversor A/D del PIC es:

$$\Delta = \frac{V_{REF}}{2^{10}} = \frac{3}{1024} \tag{4.8}$$

Si $pH_H$ y $pH_L$ son los dos bytes que envía el DIR correspondientes a la medida de pH, la ecuación (4.9) permite hallar el voltaje en bornes del sensor de pH. Sustituyendo ese valor en la ecuación (4.4) se obtiene el valor de pH correspondiente.

$$E = -V_{offset} + \frac{\Delta}{G}(255.pH_H + pH_L) \tag{4.9}$$

### 4.4.2. Temperatura

En el caso de la temperatura, el DIR envía los bytes $Temp_H$ y $Temp_L$, tal como los recibe del sensor de temperatura. El valor de la temperatura medida se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$T(^oC) = 255.Temp_H + Temp_L \tag{4.10}$$

Como se mencionó en la sección 2.2.1 el sensor de temperatura requiere calibración. A diferencia del sensor de pH, esta calibración debe realizarse solamente una vez. En la sección 7.2.1 se presentan el procedimiento utilizado y los resultados obtenidos. Allí puede verse que la curva de corrección es la siguiente:

$$T_{corregida} = a.T^4 + b.T^3 + c.T^2 + d.T + e \tag{4.11}$$

donde $a$, $b$, $c$, $d$ y $e$ son coeficientes que se determinaron en la calibración del sensor de temperatura (Ver sección 7.2.1). A partir de la ecuaciones (4.10) y (4.11) se obtiene el valor de la temperatura.

# Capítulo 5

# AnubisLAB

AnubisLAB es la aplicación desarrollada en el marco del presente proyecto para brindarle al usuario una forma amigable de configurar, obtener y procesar los datos que recaba el DIR.

El objetivo de esta sección es brindar una descripción a nivel de sistema de las funcionalidades de la aplicación AnubisLAB. Una descripción detallada de todas la funciones y ventanas del programa se pueden encontrar en el Manual de Usuario que se adjunta.

Esta sección está estructurada de la siguiente manera: En primer lugar se detallan las funcionalidades de la aplicación. Luego se explicitan los criterios de diseño e implementación. Finalmente se presentan los casos de uso de la aplicación.

## 5.1. Funcionalidades

AnubisLAB brinda las siguientes funcionalidades al usuario:

- Configuración del DIR: Borrar memoria, verificar nivel de batería, establecer el período de muestreo de un experimento, calibrar el sensor de pH.
- Obtener los datos recabados por el DIR en un experimento realizado en el rumen bovino.
- Utilizar al DIR como ph-metro y termómetro de tiempo real en el laboratorio.
- Procesar los datos recabados por el DIR: Visualización en modo gráfico y texto, exportarlos a diferentes formatos.
- Imprimir los datos recabados por el DIR.
- Abrir y guardar en disco los datos recabados por el DIR.

## 5.2. Diseño

Como criterio general de diseño, se estableció que la complejidad en el tratamiento de los datos esté en AnubisLAB y de esta forma simplificar la programación y tiempo de procesamiento en el DIR, lo cual mejora su consumo.

### 5.2.1. Descripción de los módulos

En la figura 5.1 se presenta un diagrama de funcionalidades de los módulos de la aplicación. A continuación se describen cada uno de ellos.

#### ComRS232

Para la comunicación con el DIR se utiliza el protocolo serial RS232. Como se puede observar en la figura 5.1, la comunicación entre las diferentes partes que componen la aplicación y el DIR, está centralizada por el componente “ComRS232”. Esto se hizo así previendo la posibilidad de que en el futuro se cambien las características de la comunicación entre el DIR y AnubisLAB. Si esto sucediera alcanzaría con cambiar el módulo,

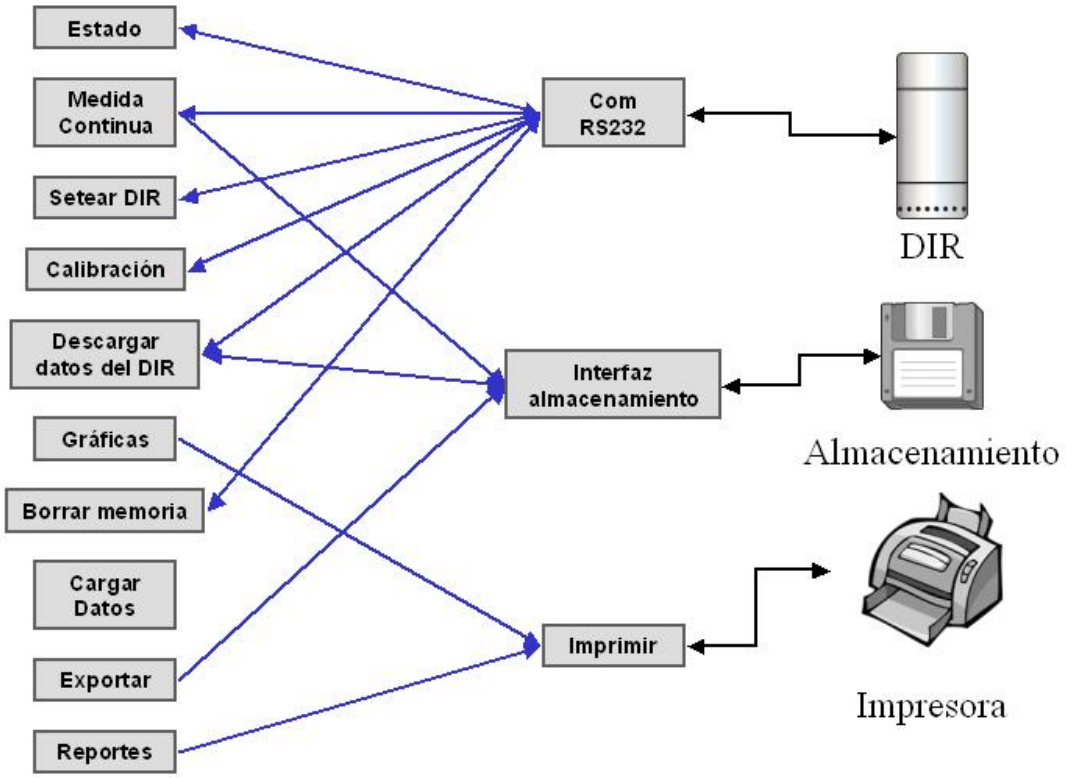



Figura 5.1: Módulos de AnubisLAB

respetando las interfaces actuales, para que este cambio sea transparente para el resto de la aplicación.

La implementación de ComRS232 está basada en el controlador *mscomm32* de Microsoft©. Este controlador permite acceder a los puertos seriales para establecer el "canal".

Los bytes se transmiten sin codificar, por lo que fue necesario implementar un protocolo de nivel superior para asegurar la integridad de los datos procesados. Para esto se utilizaron palabras de arranque y parada, estableciendo que cada paquete comience y termine con un par de bytes específicos. Los datos que no lleguen entre este par de bytes no serán interpretados como válidos y, según corresponda, serán descartados o se pedirá su retransmisión. Por ejemplo, en la descarga de datos de un experimento, es necesario conservar la serie completa de datos almacenados. Si se perdiesen uno o más datos, se vería alterada la línea de tiempo y con ella, la serie entera. En este caso, es necesario retransmitir. Por el contrario, la información transmitida en el modo de "Medida Continua" es en tiempo real, por lo que la retransmisión alteraría la continuidad. Aquí, los datos deben ser descartados.

### Estado

Este módulo guarda, actualiza y presenta en forma amigable el valor de los parámetros que conforman el estado en que se encuentra el DIR. Estos son: Identificación del DIR, estado de la memoria, nivel de batería, datos correspondiente a la curva de la última calibración, tiempo de muestreo y fecha de inicio de la última sesión.

### Descargar datos del DIR

El DIR posee una memoria no volátil en la que se almacenan los datos de cada experimento, para acceder a estos datos se utiliza este módulo. Los datos son descargados y presentados de dos formas, gráfica y como reporte utilizando los módulos encargados de estas tareas.

#### Setear DIR

Este módulo implementa la configuración del tiempo de muestreo con el que se trabajará en el próximo experimento, además permite verificar la hora del sistema y eventualmente corregirla.

#### Medida Continua

Este módulo permite que el sistema funcione como un pH-metro y termómetro de tiempo real. Las medidas provenientes del DIR se presentan en forma gráfica, dándole al usuario una idea rápida de la evolución de los valores. Asimismo se puede generar un archivo de texto .LOG para procesar los datos posteriormente.

#### Calibración

Este módulo implementa el procedimiento de calibración del sensor de pH. Se trata de un procedimiento periódico y realizado por el usuario, por lo tanto debe ser sencillo.

#### Borrar memoria

Este módulo implementa el borrado de la memoria no volátil del DIR, donde son guardados los datos.

#### Gráficas

Este módulo permite visualizar en forma gráfica los datos descargados del DIR y los obtenidos mediante "Medida Continua". Esto le brinda al usuario una idea global de la evolución de las variables medidas.

El módulo Gráficas implementa las funciones de Zoom y Escala que le facilitan la navegación al usuario dentro de la serie de datos. Por otra parte, los datos se pueden guardar en formatos estándares con el módulo Exportar.

La implementación de este módulo está basada en el programa ChartDirector® de Advanced Software Engineering[1].

#### Reportes

Este módulo implementa la visualización de los datos descargados del DIR en forma de reportes. Éstos son archivos de texto donde se muestra la información de forma ordenada y es posible abrirlos con otras aplicaciones.

#### Exportar

Este módulo implementa la exportación de los datos presentados en forma gráfica a formatos de imagen comprimidos como GIF y PNG, o en mapa de bits como BMP.

#### Cargar Datos

Una vez guardados los datos de un experimento se pueden volver a cargar en el sistema mediante este módulo. Este módulo permite cargar tanto reportes como gráficas.

### 5.2.2. Tratamiento de los datos

La forma en el cual el DIR entrega los datos y como a partir de ellos se obtienen los valores de pH y temperatura se desarrollaron en la sección 4.4. AnubisLAB simplemente implementa las ecuaciones deducidas en la sección antes mencionada.

[1] http://www.advsofteng.com

## 5.3. Consideraciones sobre la implementación

### 5.3.1. Visual Basic

La elección de Visual Basic© como lenguaje para implementar AnubisLAB se basó en que su curva de aprendizaje es rápida. La programación es sencilla e intuitiva, la creación de ventanas o formularios es muy fácil, ya que se obtienen simplemente dibujándolos, de esta forma se lograron resultados aceptables en poco tiempo. Como puntos en contra se observa entre otros, que su licencia no es GNU y la imposibilidad de compilar ejecutables en sistemas operativos distintos a Windows©.

Es de mencionar que como base de información se utilizó [Ceb00].

### 5.3.2. Entorno de trabajo

El entorno de trabajo de la aplicación está organizado en barras de tareas y menús, desde donde se puede acceder a todas las funciones de la aplicación. Las barras de tareas tienen los botones de las funciones más utilizadas buscando facilitar la tarea del usuario. En los menús hay algunas funciones que no se encuentran en las barras de botones, por ejemplo las ventanas de configuración del sistema y parámetros de funcionamiento del DIR. El uso de los menús Archivo, Herramientas y Ayuda entre otros, facilitan el manejo por parte de un usuario familiarizado con los programas para Windows©.

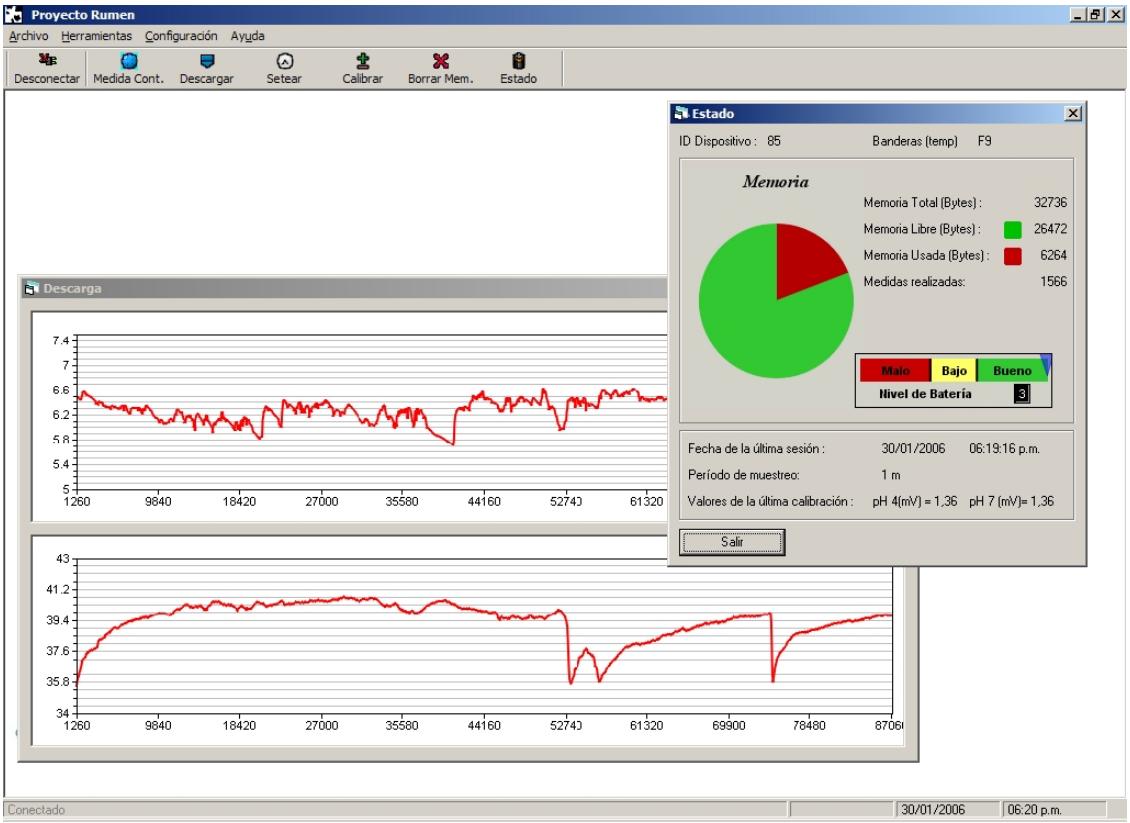



Figura 5.2: Ventana principal de AnubisLAB

### 5.3.3. Tipos de archivos

El sistema cuenta con 4 tipos de archivos: DAT, CFG, LOG y TXT.

Los tipos DAT y TXT son utilizados para guardar los datos de las medidas descargas del DIR. El tipo DAT se utiliza cuando se guardan los datos directamente desde la pantalla Descargar mientras que, cuando se elige ver los datos en forma de Reporte los mismos se guardan como TXT. Los datos cargados en formato DAT se pueden ver en forma gráfica.

Cuando el sistema está en Medida Continua los datos y eventos se guardan secuencialmente en archivos LOG. En el menú de Configuración se puede elegir el nombre del archivo que se genera. Si se elige un archivo con nombre fijo, los datos del LOG serán guardados en un solo archivo separados por banderas de tiempo con el comienzo de la medida. En caso de utilizar como nombre una combinación de la fecha y el nombre los datos de diferentes días se guardan en diferentes archivos.

Las variables de configuración del sistema se guardan en un archivo con extensión CFG, este archivo contiene los valores de todos los parámetros necesarios para el funcionamiento de la aplicación. Los datos del archivo *config.cfg* no se guardan cifrados por lo que la edición de dicho archivo modifica las variables.

## 5.4. Casos de uso

Figura 5.3: Casos de Uso de AnubisLAB

A continuación se presentan los casos de uso más importantes para comprender el funcionamiento de AnubisLAB. En un caso de uso se describe la interacción entre la aplicación y los actores. En la figura 5.3 se muestran los actores y su interacción se muestra en forma lineal aunque existen cursos alternativos. En las tablas que se presentan a continuación se muestran solamente los cursos alternativos más importantes.

| **Conectar**: El usuario inicia el AnubisLAB y presiona el botón conectar | | | |
|---|---|---|---|
| | **Usuario** | **AnubisLAB** | **DIR** |
| 1 | Presiona el botón conectar | | |
| 2 | | Habilita el puerto de comunicación | |
| 3 | | Envía el comando conectar al DIR | |
| 4 | | | Responde a la solicitud indicando que se ha conectado |
| 5 | | Despliega la ventana de Estado | |

Tabla 5.1: Caso de uso: Conectar

| **Desconectar**: El usuario quiere iniciar un experimento, habiendo terminado de configurar el DIR | | | |
|---|---|---|---|
| | **Usuario** | **AnubisLAB** | **DIR** |
| 1 | Presiona el botón desconectar | | |
| 2 | | Envía al DIR la hora actual | |
| 3 | | | Responde confirmando la recepción de la hora |
| 4 | | Envía al DIR la condición de alarma y el tiempo de muestreo | |
| 5 | | | Responde confirmando la configuración de la alarma y el tiempo de muestreo y comienza a tomar medidas |
| 6 | | Presente un mensaje confirmando la configuración del DIR | |
| 7 | | Deshabilita el puerto de comunicación | |

Tabla 5.2: Caso de uso: Desconectar

| **Borrar memoria**: El usuario puede borrar la memoria para preparar el DIR para un nuevo experimento | | | |
|---|---|---|---|
| | **Usuario** | **AnubisLAB** | **DIR** |
| 1 | Elige Borrar Memoria desde la barra de herramientas o el menú de herramientas | | |
| 2 | | Envía comando de borrado de memoria | |
| 3 | | | Comienza borrado de memoria |
| 4 | | Muestra un cuadro con el progreso del borrado de la memoria | |
| 5 | | | Avisa que finalizó el borrado de memoria |
| 6 | | Envía comando de verificación de borrado | |
| 7 | | | Comienza verificación |
| 8 | | Muestra un cuadro con el progreso del chequeo de memoria | |
| 9 | | | Envía resultado de la verificación |
| 10 | | Muestra un cuadro con el resultado de la operación | |

Tabla 5.3: Caso de uso: Borrar Memoria

| **Descarga de Datos**: Luego de finalizado el experimento el usuario conecta el DIR al puerto serial del PC y solicita la descarga de los datos recabados | | | |
|---|---|---|---|
| | **Usuario** | **AnubisLAB** | **DIR** |
| 1 | Solicita la descarga desde la barra de herramientas o el menú de herramientas | | |
| 2 | | Solicita los datos | |
| 3 | | | Envía los datos |
| 4 | | Muestra los datos en la pantalla de forma gráfica | |
| 5 | Elige ver el reporte de los datos | | |
| 6 | | Muestra un cuadro de texto con tres columnas: Hora, PH y Temperatura | |
| 7 | Elige guardar los datos como .txt | | |
| 8 | | Muestra cuadro de dialogo para seleccionar nombre, directorio y extensión para guardar | |
| 9 | Define los parámetros y presiona Guardar | | |
| 10 | | Muestra mensaje con el resultado de la operación | |
| **Curso alternativo (a)**: el usuario elige guardar los datos como .dat | | | |
| 5a | Elige guardar los datos | | |
| 6a | | Muestra cuadro de diálogo para seleccionar nombre, directorio para guardar | |
| 7a | Define los parámetros y presiona Guardar | | |
| 8a | | Muestra mensaje con el resultado de la operación | |
| **Curso alternativo (b)**: el usuario elige exportar los gráficos en lugar de guardarlos como .dat | | | |
| 5b | Elige exportar los datos en forma gráfica | | |
| 6b | | Muestra un cuadro de diálogo donde se define el directorio de destino, el formato y el nombre del archivo al que se quiere exportar | |
| 7b | Ingresa los parámetros y presiona Aceptar | | |
| 8b | | Muestra mensaje con el resultado de la operación | |

Tabla 5.4: Caso de uso: Descargar Datos

| **Setear de DIR**: Para su funcionamiento el DIR requiere que se le configuren algunos parámetros, entre ellos la hora y el tiempo de muestreo | | | |
|---|---|---|---|
| | **Usuario** | **AnubisLAB** | **DIR** |
| 1 | Elige Setear desde la barra de herramientas o el menú de herramientas | | |
| 2 | | Muestra un formulario con la hora y un combo con los tiempos de muestreo que es capaz de utilizar | |
| 3 | Selecciona un tiempo de muestreo, verifica la hora del sistema y presiona Salir | | |
| 4 | | Actualiza el vector de estados | |

Tabla 5.5: Caso de uso: Setear DIR

| **Medida continua**: El usuario puede hacer medidas instantáneas de pH y temperatura, para esto conecta el DIR al PC y lo pone en contacto con el líquido a observar | | | |
|---|---|---|---|
| | **Usuario** | **AnubisLAB** | **DIR** |
| 1 | Selecciona Medida continua de la barra de herramientas o el menú de herramientas | | |
| 2 | | Muestra un cuadro con dos gráficos (pH y Temp.) | |
| 3 | Elige el tiempo entre muestras y presiona comenzar | | |
| 4 | | Solicita medida | |
| 5 | | | Envía medida |
| 6 | | Muestra los datos en las gráficas | |
| 7 | | Guarda los valores en el archivo de log | |
| 8 | Repiten los pasos 4 a 7 hasta que el usuario presiona Detener | | |

Tabla 5.6: Caso de uso: Medida Continua

| **Calibrar**: El usuario con el DIR conectado al PC y sumergido en los líquidos buffers calibra el dispositivo | | | |
|---|---|---|---|
| | **Usuario** | **AnubisLAB** | **DIR** |
| 1 | Selecciona de la barra de herramientas el botón calibrar o selecciona la opción calibrar en el menú herramientas | | |
| 2 | | Muestra la pantalla de calibración | |
| 3 | Presiona el botón Comenzar en pH 7 | | |
| 4 | | Solicita Medidas | |
| 5 | | | Envía Medidas |
| 6 | Se repiten los pasos 4 y 5 hasta que se estabilice la medida de pH 7 | | |
| 7 | | Pone el indicador en Amarillo | |
| 8 | | Solicita 10 medidas cada 5 segundos, el indicador parpadea en verde cada vez que toma una medida | |
| 9 | | | Envía 10 medidas cada 5 segundos |
| 10 | | Calcula el promedio de las muestras y habilita el botón Comenzar en pH 4 | |
| 11 | Presiona el botón comenzar en pH 4 | | |
| 12 | Se repiten los pasos 4 a 8 para pH 4 | | |
| 13 | | Calcula el promedio de las muestras y habilita el botón Guardar Configuración | |
| 14 | | Muestra una pantalla con los nuevos datos de calibración y pide confirmación para guardarlos | |
| 15 | Confirma que quiere guardar la nueva calibración | | |
| 16 | | Guarda los datos de la nueva calibración y cierra la pantalla | |

Tabla 5.7: Caso de uso: Calibrar

| **Descarga de Estado**: El vector de estados contiene las variables no volátiles del DIR por ejemplo el valor de la batería, el porcentaje de memoria usada y la fecha del último experimento entre otras. | | | |
|---|---|---|---|
| | **Usuario** | **AnubisLAB** | **DIR** |
| 1 | Presiona el botón Estado en la barra de herramientas | | |
| 2 | | Solicita el vector de estados | |
| 3 | | | Envía el vector de estados |
| 3 | | Recibe el vector de estados | |
| 4 | | Muestra los datos en pantalla | |

Tabla 5.8: Caso de uso: Descarga de Estado

| **Imprimir**: El usuario puede elegir imprimir los datos que está observando (gráficos o texto) | | | |
|---|---|---|---|
| | **Usuario** | **AnubisLAB** | **DIR** |
| 1 | Selecciona imprimir del menú de Archivo | | |
| 2 | | Muestra un cuadro de diálogo con los parámetros de impresión | |
| 3 | Setea los parámetros de impresión y presiona Imprimir | | |
| 4 | | Envía los datos a la impresora | |
| 5 | El usuario retira la hoja impresa | | |

Tabla 5.9: Caso de uso: Imprimir

| **Abrir archivo**: El usuario puede abrir archivos .dat o .txt guardados anteriormente | | | |
|---|---|---|---|
| | **Usuario** | **AnubisLAB** | **DIR** |
| 1 | Selecciona Abrir del menú de Archivo | | |
| 2 | | Muestra un cuadro de diálogo para buscar y cargar el archivo | |
| 3 | Define el directorio, la extensión y el archivo que desea abrir y presiona Abrir | | |
| 4 | | Carga el archivo y lo presente dependiendo del tipo como gráfico o texto | |

Tabla 5.10: Caso de uso: Abrir archivo

# Capítulo 6

# Diseño mecánico del encapsulado

## 6.1. Requerimientos

El medio en el cual el sistema debe funcionar es esencialmente acuoso. El rumen de la vaca tiene volumen de entre 100 y 150 litros, allí puede encontrarse pasto (en diferentes estados de descomposición), otro tipo de alimentos (por ejemplo materia seca o concentrado) y agua. Por otra parte, el rumen se encuentra en permanente movimiento. Con lo cual, el DIR se encontrará inmerso en una mezcla viscosa húmeda, en constante movimiento, con flujos de líquido recorriendo el rumen en cualquier dirección. Por lo tanto, para evitar los daños a la electrónica del sistema el encapsulado debe ser hermético.

El pH del rumen varía entre 5,5 y 7, la presión a la cual está sometido es levemente superior a la atmosférica y la temperatura oscila alrededor de los 38 °C. Estos valores no imponen restricciones significativas sobre el encapsulado.

Figura 6.1: Foto de una vaca fistulada.

El encapsulado debe colocarse en una zona del rumen llamada “Retículo”(ver figura 6.2). Ésta tiene una forma cilindríca de aproximadamente 20 cm de diámetro por 10 cm de alto. Otro aspecto que limita el tamaño es el largo del sensor de pH (15,2 cm). Por último, el dispositivo es introducido por la fístula de la vaca, que tiene forma circular con un diámetro de 13 cm.

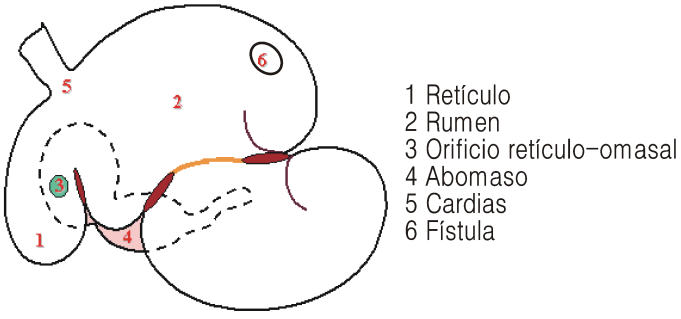



Figura 6.2: Esquema del rumen bovino

Finalmente debe mencionarse que el aparato debe ser biocompatible, esto quiere decir de que no debe generar alteraciones significativas en el proceso biológico en el que se encuentra inmerso. En particular, los bordes no deben contener filos que puedan dañar las paredes del rumen y no debe generar reacciones químicas que perjudiquen al animal. Asimismo el encapsulado debe ser lo suficientemente grande para evitar riesgos de obstrucción en el tracto digestivo.

A continuación se resumen los requerimientos:

- No debe alterar las variables a medir (pH y temperatura).
- Adaptado a la condiciones de su medio: líquido y en permanente movimiento.
- Biocompatible.
- Hermético.
- Largo Mínimo: 15,2 cm
- Diámetro Máximo: 13 cm

## 6.2. Elección del material

Los materiales que se consideraron para la confección del encapsulado, fueron aquellos que pueden encontrarse con relativa facilidad en el mercado local: ABS, acero inoxidable, APM (Polietileno de Alto Peso Molecular), AUPM (Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular), nailon y teflón.

En el proceso de selección se consideraron aspectos como el costo, maleabilidad, repetitividad de la construcción y la adaptación al medio.

El nailon fue descartado debido a que se hincha con la humedad y con el tiempo termina dejando pasar el agua. El ABS u otros plásticos que se utilizan en inyección fueron descartados debido a que el proceso de construcción es muy caro para pocas unidades. El teflón se descartó debido a que al quebrarse libera elementos tóxicos que pueden perjudicar al animal, además es un material muy blando que se desgasta rápido. El acero inoxidable es un muy buen material ya que se consiguen paredes más finas, es impermeable y biocompatible. El problema es que es un material difícil de trabajar, su proceso es muy lento y caro. Además en atmósferas ácidas, en presencia de oxígeno, puede puede corroerse por efecto “pitting”.

Finalmente se optó por los polietilenos de alto peso molecular. En el momento de realizar el encapsulado no había en plaza UAPM, por lo cual se decidió fabricar el encapsulado con APM.

El material utilizado fue el “Cestilene HD 500” natural (PE-HMW) de la empresa Quadrant Products[1]. Según su hoja de datos (ver [DSM06]) ofrece una buena combinación de rigidez, tenacidad y capacidad de amortiguamiento mecánico, junto con una buena resistencia al desgaste y a la abrasión, además de poder ser soldado con facilidad. El “Cestilene HD 500” es un tipo de polietileno utilizado principalmente en la industria de la alimentación (manipulación de carnes y pescados), además de todo tipo de aplicaciones mecánicas, químicas y eléctricas. Se destacan las siguientes propiedades (en el cuadro 6.1 se detallan los valores más importantes):

- Buena resistencia al desgaste y a la abrasión.
- Elevada resistencia al impacto, incluso a bajas temperaturas.
- Excelente resistencia química.
- Bajo coeficiente de rozamiento.
- Excelentes propiedades de resiliencia[2].
- Resistencia mecánica, a la fluencia y rigidez, moderadas.

[1] http://www.quadrantplastics.com

[2] La resiliencia mide la capacidad de los materiales para absorber energía cuando son deformados. Es un valor indicativo de la fragilidad o la resistencia a los choques del material ensayado. [Wik06a]

Tabla 6.1: Principales características de “Cestilene HD 500”

| Propiedad | Método de ensayo ISO/(IEC) | Cestilene 500 |
|---|---|---|
| Color | - | Blanco |
| Peso molecular | - | $0{,}5 \times 10^6$ g/mol |
| Densidad | 1183 | 0,96 g/mol |
| Absorción de agua hasta la saturación en agua 23 °C | - | 0,01 % |
| Propiedades térmicas | | |
| Punto de fusión(DSC, 10 °C/min) | 3146 | 130 − 135 °C |
| Conductividad Térmica a 23°C | - | 0,40 W/(°K.m) |
| Coeficiente de dilatación valor medio entre 23 y 100 °C | - | $200 \times 10^{-6}$ m/(m.°K) |
| Propiedades Mecánicas | | |
| Ensayo a tracción: | | |
| - esfuerzo en el punto de efluencia | 527 | 28 MPa |
| - elongación en el punto de efluencia | 527 | 10 % |
| - elongación nominal a la ruptura | 527 | > 50 % |
| - módulo de elasticidad | 527 | 1350 MPa |
| Resistencia al impacto Charpy-sin estalla | 179/1eU | Sin Rotura |
| Resistencia al impacto Charpy-con estalla | 179/1eA | 105 P kJ/m$^2$ |
| Resistencia al impacto Charpy-con estalla | DIS 11542-2 | ≥ 25 |
| Factor de desgaste a la abrasión | - | 350 |
| Propiedades eléctricas a 23°C | | |
| Rigidez dieléctrica | (243) | ⩽ 45 kV/mm |
| Resistividad volumétrica | (93) | $> 10^{14}$ Ω.cm |
| Resistividad superficial | (93) | $> 10^{13}$ Ω |

- Muy buenas propiedades dieléctricas y de aislamiento eléctrico.
- Fisiológicamente inerte.
- Buena resistencia a las radiaciones de energía elevada (rayos gama y X)
- No autoextinguible.

## 6.3. Diseño

En función de los requerimientos se adoptó una forma cilíndrica de 18 cm de largo y 9, 6 cm de diámetro con los vértices suavizados. Como se puede apreciar en la figura 6.3 el encapsulado se divide en tres partes: un cuerpo central y tres tapas. El cuerpo central es cilíndrico, hueco y con un lado ciego con una rosca para la sujeción del sensor de pH, en los extremos tiene roscas para las tapas.

Adentro del cuerpo central van colocados la placa, el sensor de pH y el sensor de temperatura según la disposición mostrada en la figura 6.5.

### 6.3.1. Panel

En la parte no ciega del cuerpo central va un panel en el cual se colocan los componentes de interfaz cotidiano con el usuario. En la parte superior del panel se encuentran el puerto serie, la llave de encendido y el botón de reset; en el parte inferior, las pilas de alimentación (ver figura 6.4).

Estos componentes se han colocado aquí debido a que es una zona de fácil acceso. Las pilas fueron colocadas en la parte inferior del panel por estética y para facilitar su recambio.

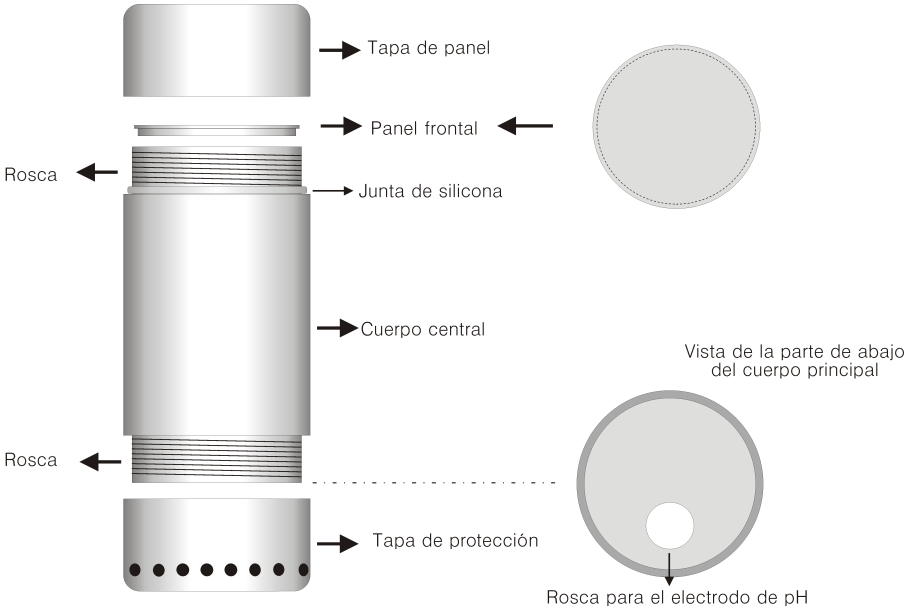



Figura 6.3: Esquema exterior del encapsulado.

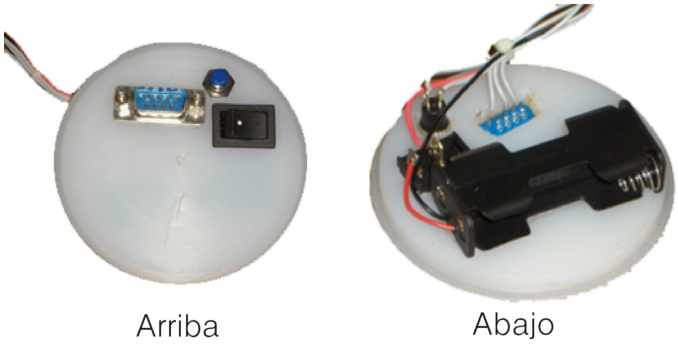



Figura 6.4: Foto del panel del encapsulado desde arriba y abajo.

Las tapas están hechas para enroscarse en el cuerpo principal y la que va del lado no ciego lleva una junta de silicona para evitar las filtraciones, haciendo hermético el cierre. La tapa de portección del lado ciego tiene el objetivo de proteger la membrana de vidrio en el extremo del electrodo, pero debe dejar pasar el líquido por lo cual es agujereada. Los agujeros también están pensados para colocar un cordel para facilitar el retiro del DIR del rumen y para poder colgarle pesas que permitan ubicar al DIR dentro del rumen en el Retículo.

A efectos de la calibración y el almacenaje del aparato se hizo la tapa de almacenamiento idéntica a las anteriores pero no agujereada.

Como último detalle constructivo se previó el uso de una junta para el sensor de pH, aunque el uso de cinta estándar de teflón mostró ser suficiente.

### 6.3.2. Encapsulado del sensor de temperatura

El sensor de temperatura es un chip, y no puede estar en contacto con agua y tampoco debe quedar expuesto a humedad. Para ello se lo encapsuló en resina poliester y la salida de cables se selló con silicona, material que además se utilizó para adherir el sensor al resto del encapsulado. Se lo colocó cerca de la membrana de vidrio del sensor de pH para que la temperatura sensada fuera lo más parecida posible a la de sensor de pH (ver figuras 6.5 y 6.6).

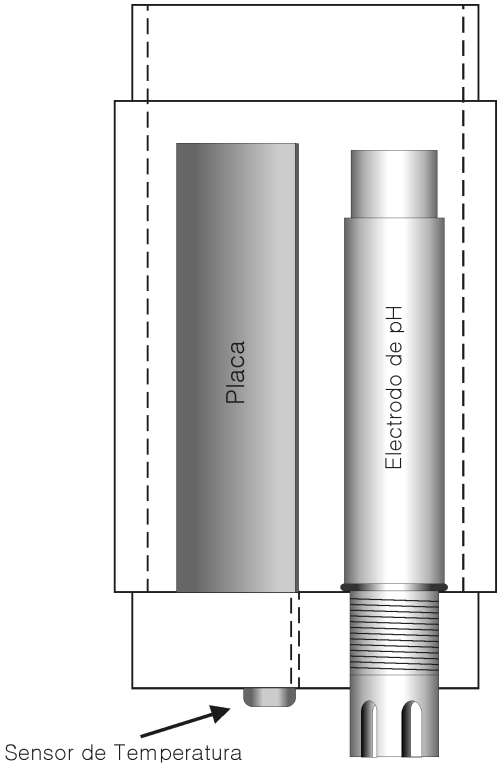



Figura 6.5: Distribución de elementos en el cuerpo principal del encapsulado

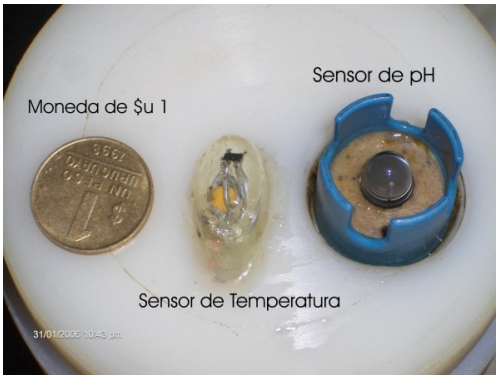



Figura 6.6: Foto del sensor de temperatura

## 6.4. Fabricación

Figura 6.7: DIR en manos de Mariano

En el proceso de diseño se utilizaron cuatro piezas cilíndricas, tres de 7 cm y una de 17 cm de largo y 100 mm de diámetro. Con las tres primeras se fabricaron las tapas y con la cuarta el cuerpo central y con un sobrante se fabrico la tapa frontal. Para la construcción de la rosca para el sensor de pH se utilizó un contramacho de $3/4\,''$ tipo MNPT.

Las piezas se construyeron en un torno de la empresa Buanlir S.A. y el proceso llevó 10 horas de trabajo.

En la figura 6.7 puede apreciarse una foto del encapsulado segundos antes de ser introducido en el rumen. En las figuras D.2 y D.1 se pueden ver los planos utilizados en la fabricación y en la tabla 6.2 se presentan las características principales del encapsulado del DIR.

Tabla 6.2: Características principales del encapsulado del DIR

| Propiedad | Valor |
|---|---|
| Material | APM |
| Altura | 24 cm |
| Diámetro | 9,6 cm |
| Peso | 0,3 $Kg$ |
| Volumen | 1737 $cm^3$ |

# Capítulo 7

# Resultados

## 7.1. Estimación del consumo

Aquí se presenta el estudio que se realizó sobre el consumo de Anubis en sus diferentes modos de funcionamiento, comparando además con las estimaciones hechas en la sección 4.3.

El experimento se realizó en el laboratorio docente del IIE. Consistió en introducir una fuente de voltaje constante de 3 V y en medir la corriente que entrega. Para esto se utilizo un caracterizador de parámetros de semiconductores[1].

### 7.1.1. Consumo del DIR *Suspendido*

Primero se forzó a que el DIR trabajase en su modo *Suspendido* y se midió la corriente que entrega la fuente. Con los datos obtenidos se realizó un promedio, y el resultado fue que la corriente que se consume en este estado es $I_{suspendido} = 6{,}15\,\mu A$.

Si se contrasta este consumo con el estimado en $12{,}74\,\mu A$ (ver 4.3), se observa que el consumo es mucho menor, aproximadamente la mitad. Esto se debe a que el cálculo hecho en la estimación es un peor caso. En estas condiciones, con dos pilas doble A alcalinas, el DIR puede mantenerse *Suspendido*durante 22 años, casi el doble de lo estimado.

### 7.1.2. Consumo del DIR *Activado*

Para medir este consumo se configuró a Anubis para que mida cada 2 segundos.

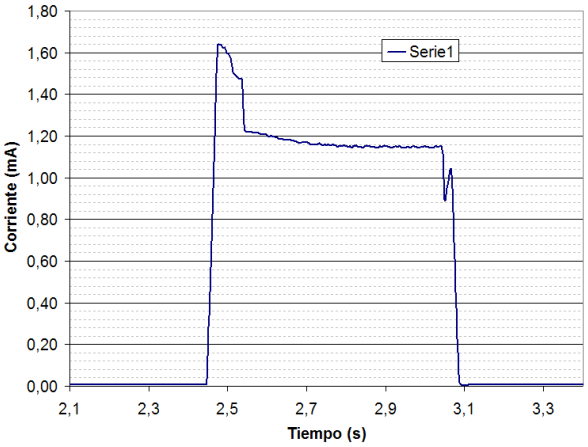



Figura 7.1: Gráfica de corriente vs tiempo

[1] HP4155 de "Hewlett Packard".

Observando la figura 7.1 el promedio de la corriente suministrada por la fuente es 1,19 $mA$, este valor es muy similar al estimado.

El tiempo estimado que tarda en tomar una medida fue de un segundo, en el experimento se vio que en realidad la medida tarda unos 600 $ms$, esto hace que el estimativo de cuanto puede durar Anubis midiendo cada 5 minutos varíe.

En estas condiciones el tiempo que puede durar tomando medidas es 16 años, lo cual es bastante más de lo estimado originalmente.

### 7.1.3. Consumo del DIR *Conectado*

Primero se hicieron medidas del consumo con el DIR conectado al PC y sin ninguna otra función activa. Esto arrojó que el consumo promedio es de 3,9 $mA$, observando que este valor es muy superior al estimado. Esto se puede deber a que el MAX3221 consuma mucho más de lo que establece la hoja de datos. Las condiciones de ensayo son con el MAX3221 sin carga, además dicho integrado está siendo utilizado muy cerca de su valor mínimo de alimentación.

**Borrado de memoria:** En la figura 7.2 se puede observar el consumo durante el borrado. Aquí se puede observar una caída en la corriente debido al apagado del MAX3221. El pico de consumo en el medio de la gráfica corresponde a la finalización del proceso de borrado, debido a que aquí se prende el MAX3221 para realizar la comunicación entre el PC y el DIR para el inicio del chequeo de memoria. Durante este período el MAX3221 también permanece apagado y se vuelve a encender cuando el DIR se comunica con el PC para avisar que terminó el chequeo.

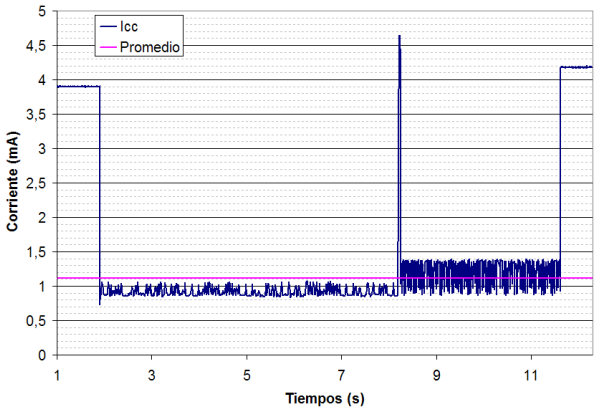



Figura 7.2: Gráfica de consumo durante el borrado

Todo el proceso tiene, en promedio, un consumo de corriente de $1,11\,mA$ y dura unos $9,8$ segundos.

**Descarga:** Aquí el comportamiento dista de lo esperado, ya que como se ve en la figura 7.3 casi no hay variación de la corriente, de hecho el promedio es muy similar al consumo estando simplemente conectado, $3,82\,mA$.

**Calibración:** Son 20 medidas que cada una dura 600 $ms$, esto significa que por un período de 12 $s$ el DIR consume la corriente promedio de una medida. En la figura 7.4 se observa la forma de la corriente durante la toma de un dato. En este caso el consumo promedio es $3,38\,mA$.

Con estos datos se puede calcular cual es el consumo en el caso descripto, en la tabla 7.1 se resumen las diferentes tareas, cuanto consumen y por cuanto tiempo. El tiempo total para toda la operación es de 927 $s$.

En estas condiciones el consumo es de 3,86 $mA$, por lo que Anubis puede funcionar en este modo por 13 días.

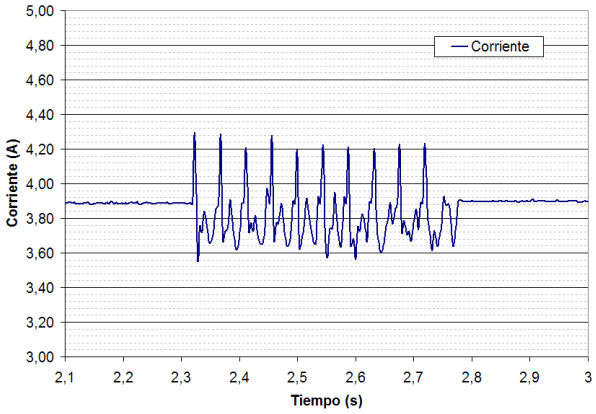



Figura 7.3: Gráfica de consumo cuando se descarga

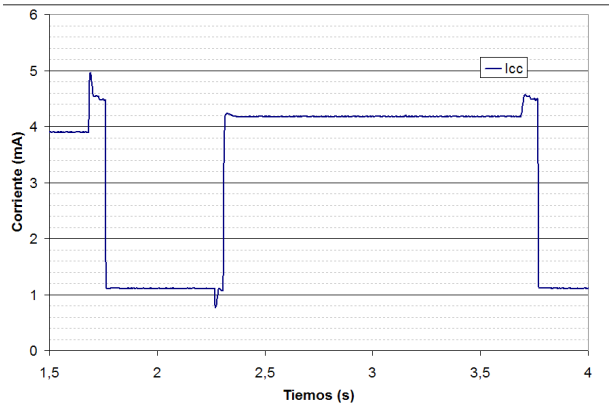



Figura 7.4: Gráfica de corriente en la toma de un dato conectado al PC

**Medida Continua:** Cuando se realiza medida continua, en las condiciones de 4.3, el consumo es de $3,87\,mAh$, con lo cual el sistema podría funcionar en ese régimen durante 13 días.

En conclusión, con Anubis *Conectado*, los estimativos presentados en la sección 4.3 están lejos de lo que los experimentos arrojan, esto como ya se explico se le adjudica a un exceso de consumo del MAX3221. En la hoja de datos se declara un consumo de $1\,mA$ y se estima que consume realmente en el entorno de $3\,mA$.

### Evaluación

A pesar de los resultados obtenidos en modo *Conectado*, el consumo del DIR se considera excelente.

*Ejemplo 1:* supongamos que el aparato se conecta y se mantiene una vez por semana y que el resto del tiempo está midiendo cada 5 minutos. En estas condiciones el consumo es $13{,}86\,\mu A$ con lo cual las baterías durarían más de 5 años.

*Ejemplo 2:* Hora supongamos que se tiene un caso de uso medio o sea: Calibración, tres días en el rumen y una descarga de datos y el borrado de la memoria . En este caso el consumo es de $21{,}89\,\mu A$, con lo que el sistema puede cumplir con 760 de estos ciclos de uso.

Tabla 7.1: Consumo y tiempos de cada tarea del DIR *Conectado*.

| Tarea | Consumo real | Consumo Estimado | Tiempo real | Tiempo estimado |
|---|---|---|---|---|
| Borrado de memoria | $1{,}11\,mA$ | $3\,mA$ | $9{,}8\,s$ | $8\,s$ |
| Descarga | $3{,}82\,mA$ | $4\,mA$ | $10\,s$ | $10\,s$ |
| Calibración | $3{,}86\,mA$ | $1{,}441\,mA$ | $10\,s$ | $20\,s$ |
| Tiempo de inactividad | $3,9\,mA$ | $1,6\,mA$ | 897 2 | 897 2 |

## 7.2. Caracterización de los sensores de temperatura y pH

Los sensores de temperatura y pH utilizados para el diseño cuentan con hojas de datos donde se especifican sus características eléctricas. Estos valores son estadísticos, por lo que para obtener las precisión e incertidumbre requerida fue necesario realizar una caracterización específica de nuestros sensores.

Por otra parte, el fabricante provee las características del sensor de pH al momento de la fabricación y como se vio anteriormente éstas varían con el tiempo y el uso.

### 7.2.1. Caracterización del sensor de temperatura

El sensor elegido para la medición de la temperatura presenta una incertidumbre que según la hoja de datos del fabricante es de $\pm 1$°C en el rango de 0 °C a 70 °C y de $\pm 2$°C entre $-40$ °C y 150 °C. Como la presente aplicación requiere una incertidumbre de $\pm 0{,}1$°C en torno de los 38 °C en un rango de $\pm 3$°C, este valor es inaceptable. Para disminuir la incertidumbre es necesario realizar una corrección mediante una curva de calibración.

$$T_{corregida} = a.T^4 + b.T^3 + c.T^2 + d.T + e \tag{7.1}$$

Donde $a$, $b$, $c$, $d$ y $e$ se calcularon mediante el proceso de calibración que se describe más adelante.

$$\begin{aligned} a &= 8{,}2895381e-05 \\ b &= -0{,}012521713 \\ c &= 0{,}70725068 \\ d &= -16{,}710265 \\ e &= 165{,}89396 \end{aligned}$$

Calibración del sensor

Para obtener los coeficientes de la ecuación (7.1) se comparó el sensor contra un patrón de temperatura que tiene una precisión del orden de mK. En la comparación se colocaron ambos sensores en un ambiente de temperatura controlado y se los dejó midiendo durante aproximadamente 24 horas. Se compararon las medidas en cinco temperaturas de la siguiente forma: el sensor patrón indica cuando una medida está estable[2], luego se toma un conjunto de datos adquiridos por nuestro sistema en ese entorno y se compara la medida del sensor patrón con el promedio de las medidas del conjunto. En la tabla 7.2 se muestran los resultados.

Tabla 7.2: Resultados de experimento de calibración

| | 35 °C | 37 °C | 39 °C | 41 °C | 43 °C |
|---|---|---|---|---|---|
| Sensor patrón | | | | | |
| Valor Medio | 35,003 | 36,997 | 38,999 | 41,004 | 43,000 |
| Desviación Estándar | 0,001 | 0,001 | 0,001 | $< 0{,}001$ | 0,001 |
| Sensor | | | | | |
| Valor Medio | 35,06 | 37,06 | 39,08 | 41,11 | 43,10 |
| Desviación Estándar | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,01 |

Con estos datos se obtuvo el gráfico 7.5, aquí se observa que la relación entre ambas medidas es lineal con una desviación estándar máxima de 0,1 °C. Estos valores son aceptables para medidas fuera del rango de trabajo, para el intervalo de uso se necesita disminuir el error. Con los datos de la comparación se confeccionó la tabla 7.3 donde se observa que la diferencia máxima, que se presenta a 41 °C, es de $0,11$ °C. Para corregir este error se utiliza la ecuación (7.1), obteniendo diferencias menores a los $0,001$ °$C$.

[2]Estable: $\Delta t < 10$ mk en los últimos 10 minutos

| **Valor esperado** [°$C$] | **Promedio de medidas** [°C] |
|---|---|
| 35,00 | 35,06 |
| 37,00 | 37,06 |
| 39,00 | 39,08 |
| 41,00 | 41,11 |
| 43,00 | 43,10 |

Tabla 7.3: Promedios de medidas

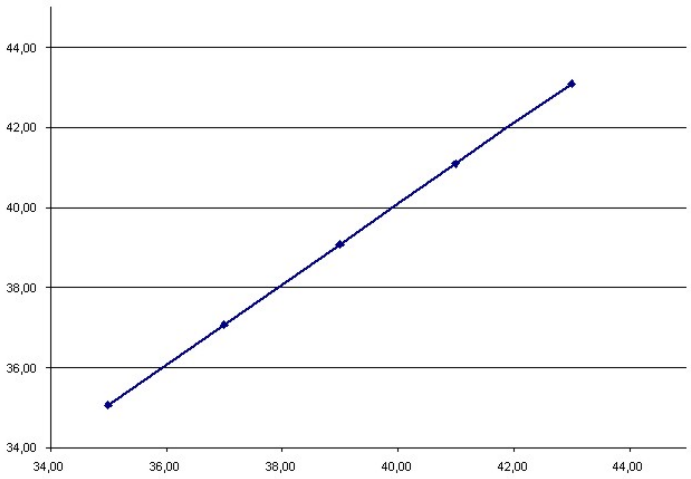



Figura 7.5: Curva de calibración de temperatura

### 7.2.2. Caracterización del sensor de pH

En esta sección hablaremos de las derivas detectadas en los parámetros de la curva y compararemos los resultados con las predicciones teóricas descritas en la sección 2.1 y las especificaciones del fabricante.

Como se vio en la sección 4.4, el valor de pH se vincula con el voltaje según una curva de calibración. Esta curva aproxima la respuesta del sensor por una recta por lo cual alcanza con dos parámetros para caracterizarla.

$$pH = -\alpha \frac{E}{KT} + 7 + \beta \tag{7.2}$$

La curva de calibración (ecuación 7.2) es una recta que inicialmente pasa por cero, con el uso del sensor y el paso del tiempo la recta se aparta del origen (efecto modelado por $\beta$). Luego de pasados 488 días se observa un corrimiento de 80 mV hacia valores negativos y según la hoja de datos el corrimiento debería ser de 140 mV. El sensor utilizado para el diseño está orientado a aplicaciones industriales, lo que puede explicar la diferencia, ya que el uso al que fue sometido dista mucho de una aplicación de medición continua.

El efecto del corrimiento del voltaje a pH 7 hacia valores negativos compromete el rango de entrada al circuito de adquisición de pH (ver sección 3.4), ya que para valores cercanos a cero la respuesta de los amplificadores no es lineal. Para corregir este efecto se dispuso un bloque de Offset, el cual le sumaba inicialmente 60 $mV$ a la salida del sensor, de modo que a la entrada de los amplificadores siempre hayan valores positivos mayores a 30 $mV$ y así asegurar una ganancia lineal para valores de pH en el rango de $3,5$ a $7,5$.

El corrimiento hacia valores negativos del voltaje correspondiente a pH 7 obligó a aumentar la constante[3] del bloque Offset. En el transcurso del proyecto la constante se subió a 90 mV. En el futuro va ser necesario volver a subir esta constante. En la sección 8.3 se discuten alternativas para no trasladar al usuario este

[3]La constante es ajustable mediante un preset

problema.

Otro término a tener en cuenta en la recta de calibración es la variación en la pendiente (efecto modelado por $\alpha$), la cual inicialmente es de 59,16 $mV/pH$, es decir que la diferencia entre los voltajes a pH 7 y pH 4 es de aproximadamente 180 $mV$. En el sensor utilizado ésta no ha variado significativamente luego de transcurridos 488 días. La poca variación de este parámetro puede ser atribuible al uso que se le ha dado al dispositivo.

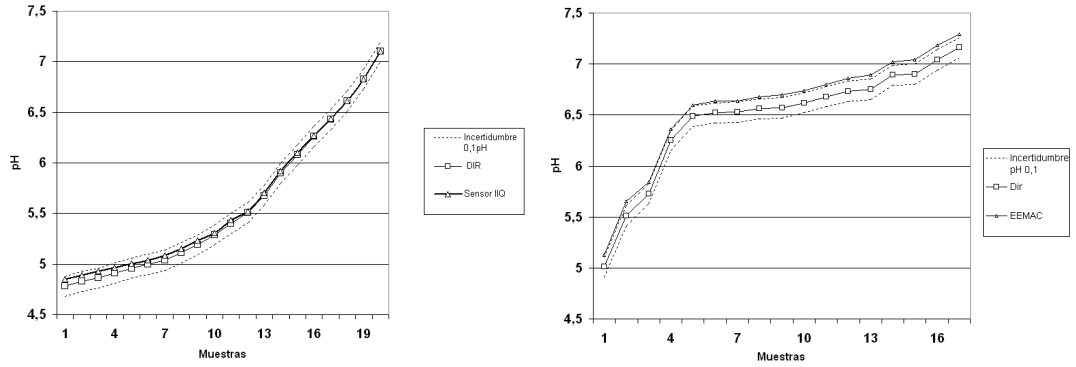
**Comparación con un sensor patrón**

Para terminar de caracterizar el sensor de pH se recurrió al IIQ[4] donde se comparó con un pH-metro de laboratorio al que consideraremos como patrón.

De la comparación se obtuvo la siguiente gráfica (ver figura 7.7), donde se observa que las medidas realizadas con uno y otro sensor son prácticamente iguales en el rango de interés.

En las gráficas 7.6(a) y 7.6(b) se muestran las diferencias entre las medidas realizadas con el sensor patrón del IIQ y el sensor que se utiliza en la EEMAC respectivamente, aquí se observa que en ambos casos la diferencia entre las medidas de los sensores queda inscripta dentro de la franja de incertidumbre del DIR por lo que se pueden considerar ambas comparaciones como satisfactorias.

Sobre estas comparaciones se pueden hacer un par de consideraciones, en la comparación con el sensor de la EEMAC se observa una diferencia constante entre ambas medidas, este es un error corregible y se debe a una diferencia en las calibraciónes de los sensores. En ambos casos las diferencias son mayores cuanto más cerca están de pH 4, para poder tener una comparación más fiel a la realidad se necesitan sensores de los cuales se posean más datos sobre su incertidumbre.




(a) Comparación entre medidas realizadas con el DIR y el sensor patrón del IIQ

(b) Comparación entre medidas realizadas con el DIR y el sensor de la EEMAC

Figura 7.6: Curvas de comparación del DIR con otros sensores de pH

## 7.3. Incertidumbre

En esta sección se presentan las estimaciones de la incertidumbre para las dos variables que registra el sistema.

El método seguido para el cálculo de la incertidumbre es el sugerido en [ISO95] y ejemplificado en [Slo02]. Este consiste en hacer dos cálculos, uno basado en la experimentación (donde se obtiene la incertidumbre de tipo A) y otro basado en el conocimiento sobre el sistema de medida (donde se obtiene la incertidumbre de tipo B).

Luego, ambos aportes son combinados para obtener la varianza total. Finalmente suponiendo una distribución gaussiana se calcula la incertidumbre total introduciendo un factor de cobertura, que tiene por objetivo asociar un determinado nivel de confianza a la incertidumbre informada. Si el factor de cobertura es

[4]Instituto de Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería. Universidad de la República

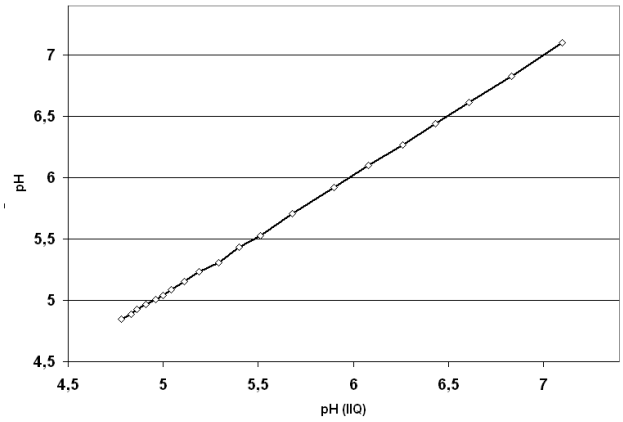



Figura 7.7: Comparación de medidas de pH con IIQ

1 implica informar la incertidumbre como el valor de una desviación estándar, lo cual equivale a un nivel de confianza de 68 %. Esto es, hay una probabilidad del 68 % que el valor informado esté dentro del intervalo de incertidumbre declarada. Si se elige informar con un nivel de confianza del 95 % o 99 %, el factor de cobertura debe ser 2 o 3 respectivamente.

### 7.3.1. Incertidumbre en la medida de temperatura

Debido a que la calibración se hace desde el inicio, no hay aporte de conocimientos previos sobre el sensor de temperatura que contribuyan a la incertidumbre, por lo que el aporte principal a la misma proviene de la de tipo A. La incertidumbre tipo B esta compuesta por el aporte de la incertidumbre $\pm 1$ del conversor A/D del sensor y por la incertidumbre del patrón (horno del IIE).

En el caso del patrón se tiene una sensibilidad de 1 y para la correspondiente al conversor se tiene una sensibilidad dada por la ecuación de corrección 7.1:

$$\alpha_i = \frac{\delta T}{\delta T_{AD}} = 4 \cdot a \cdot T_{AD}^3 + 3 \cdot b \cdot T_{AD}^2 + 2 \cdot c \cdot T_{AD} + d \tag{7.3}$$

Como la sensibilidad depende de la temperatura, se tomó como criterio adoptar el peor caso (35,74 °C), con esto:

$$\alpha_i = 0{,}9978 \tag{7.4}$$

La incertidumbre del conversor debido a la cuantización es de $\pm\, 0{,}03125$ °C y considerando una distribución rectangular se tiene que la incertidumbre asociada es:

$$U_{AD} = \frac{\alpha_i \cdot 0{,}03125}{\sqrt{3}} = \frac{0{,}9978 \cdot 0{,}03125}{\sqrt{3}} = 0{,}0180 \tag{7.5}$$

En cuanto a la incertidumbre debida al patrón, su valor es de $\pm\, 0{,}001$ °C (factor 3 de cobertura) y su distribución es normal.

$$U_{Patron} = \frac{0{,}001}{3} = 3{,}33 \times 10^{-4} \tag{7.6}$$

Por lo tanto la incertidumbre tipo B es:

$$U_B = \sqrt{(3{,}33 \times 10^{-4})^2 + (0{,}0180)^2} = 0{,}0180 \tag{7.7}$$

De la tabla 7.2 se puede ver que la desviación estándar máxima en el rango de medición es 0,02 °C considerando una distribución normal y que la cantidad de datos es 60 se obtiene una incertidumbre de:

$$U_A = \frac{0{,}02}{\sqrt{60}} = 2{,}582 \times 10^{-3}\,^{\circ}\mathrm{C} \tag{7.8}$$

A este valor se lo debe multiplicar por la sensibilidad (ecuación 7.4):

$$U_A = 2{,}5786 \times 10^{-3}\,^{\circ}\mathrm{C} \tag{7.9}$$

Ahora se deben combinar los dos tipos de incertidumbre para obtener la incertidumbre total:

$$U_{Temp} = \sqrt{(2{,}59 \times 10^{-3})^2 + (0{,}0180)^2} = 0{,}0182 \tag{7.10}$$

Finalmente debemos darle un factor de cobertura, para tener un 99 % de certeza, se debe dar un factor de cobertura de 3 (suponiendo distribución normal). Por lo que la incertidumbre final es:

$$U_{Temp} = \pm\, 0{,}05\,^{\circ}\mathrm{C} \quad con \quad K = 3 \tag{7.11}$$

### 7.3.2. Incertidumbre en la medida de pH

**Incertidumbre tipo A**

El procedimiento utilizado consistió en calibrar el sistema como se describe en la sección 2.1.3. Luego se tomaron muestras de una solución buffer de pH 7 y otra de buffer pH 4. Se calculó el valor medio y la varianza de las muestras para los dos casos, y la varianza de cada variable.

De los cálculos realizados se desprenden los siguientes valores:

$$m_{pH7} = 6{,}98 \tag{7.12}$$

$$U_{ApH7} = 0,0084 \tag{7.13}$$

Utilizando que la desviación estándar del valor medio se calcula como

$$\sigma(\overline{X})^2 = \frac{\sigma(X)^2}{N^o\, de\, muestras} \tag{7.14}$$

se obtuvo que:

$$U_{\overline{ApH7}} = 0,0028 \tag{7.15}$$

En el caso de pH 4 los resultados fueron:

$$m_{pH4} = 4,00 \tag{7.16}$$

$$U_{ApH4} = 0,022 \tag{7.17}$$

$$U_{\overline{ApH4}} = 0,0075 \tag{7.18}$$

**Incertidumbre tipo B**

La ecuación que rige la conversión de voltaje a pH en el sistema es la siguiente:

$$pH = \frac{T_{cal}}{T_{med}} \times \frac{pH7 - pH4}{V_{pH7} - V_{pH4}} \times (V_{med} - V_{pH7}) + pH7^{5} \tag{7.19}$$

donde:

- $T_{med}$ = Temperatura de la medida.
- $T_{cal}$ = Temperatura de la calibración.
- $pH7$ = Valor del Buffer pH 7.
- $pH4$ = Valor del Buffer pH 4.
- $V_{pH7}$ = Voltaje medido con Buffer pH 7.
- $V_{pH4}$ = Voltaje medido con Buffer pH 4.
- $V_{med}$ = Voltaje de la medida.

Para cada uno de estos factores se debe determinar la desviación estándar, la distribución y la sensibilidad.

**Temperatura:** La incertidumbre de la temperatura se calculó en la sección anterior (ver 7.3.1) y la incertidumbre es de $\pm\,0,01\,^{o}C$ con factor de cobertura 3 y distribución normal.

**Buffer:** En cuanto a la incertidumbre de los Buffer el fabricante declara 0.02 pH a $25^{0}C$, por no poseer más información sobre la incertidumbre a la temperatura de trabajo (aproximadamente $37^{0}C$) se tomará esta como su valor. La distribución se considera normal.

**Voltajes:** Finalmente se opto por introducir el voltaje del sensor de pH en la ecuación ya que su valor es el único de los que no se puede "medir" en forma externa al sistema[6]. La expresión por la cual se deriva este valor es la siguiente:

$$V_{pH} = \frac{V_{AD}}{G} + V_{offset} \tag{7.20}$$

Donde:

- $V_{pH}$ = Voltaje en el sensor de pH.
- $V_{AD}$ = Voltaje medido a la entrada del conversor.
- $V_{offset}$ = Voltaje de offset introducido por la electrónica.
- $G$ = Ganancia del circuito amplificador.

Para determinar la incertidumbre del valor del voltaje se debe proceder según la guía. El voltaje de offset se obtiene por ajuste de un preset (ver 3.4.5) y midiendo el voltaje del divisor resistivo, por ende la incertidumbre está dada por el voltímetro utilizado. El fabricante declara $0{,}5\,\% + 1$ dígito con lo cuál si $V_{offset} = 90\,mV$ da $\pm 0{,}55\,mV$.

El voltaje en el conversor se conoce luego de la conversión o sea que la incertidumbre viene dada por en conversor A/D. Según Microchip la incertidumbre es de $\pm 1\,LSB$, la referencia de conversión es $3\,V$ entonces la incertidumbre es $\pm 2{,}93\,mV$.

En cuanto a la ganancia $G$, se puede considerar que es $\frac{V_{out}}{V_{in}}$ donde $V_{in}$ y $V_{out}$ son los voltajes de entrada y salida respectivamente. La ganancia fue fijada en 10, con $90\,mV$ de entrada se obtuvieron $0{,}901\,V$.

$$\frac{\delta G}{\delta V_{in}} = -\frac{V_{out}}{V_{in}^{2}}$$

[5] Esta ecuación supone que la temperatura durante la calibración fue constante, hipótesis que se puede asumir debido a que las diferencias que se pueden dar durante el proceso son despreciables frente al resto de los fenómenos considerados.

[6] Notar que en realidad en la ecuación podrían usarse el voltaje a la entrada del conversor o simplemente el valor entero que surge de la conversión.

$$\frac{\delta G}{\delta V_{out}} = \frac{1}{V_{in}}$$

Entonces los coeficientes de ponderación son $111{,}23\,V^{-1}$ y $11{,}11\,V^{-1}$ respectivamente. Además se debe considerar la incertidumbre del instrumento digital. En la tabla 7.3.2, teniendo en cuenta que las distribuciones de las medidas de voltaje son rectangulares se obtiene, se presetan los aportes a la incertidumbre de cada una de las fuentes.

Tabla 7.4: Valores para incertidumbre de G

| Variable | Valor | Distribución | Incertidumbre | Coeficiente | Aporte |
|---|---|---|---|---|---|
| $V_{out}$ | $0{,}0055\,V$ | Rectangular | $0{,}0032\,V$ | $11{,}11\,V^{-1}$ | 0,0356 |
| $V_{out}$ | $0{,}001\,V$ | Rectangular | $0{,}0006\,V$ | $11{,}11\,V^{-1}$ | 0,0067 |
| $V_{in}$ | $0{,}55\,mV$ | Rectangular | $0{,}32\,mV$ | $111{,}23\,V^{-1}$ | 0,0356 |
| $V_{in}$ | $0{,}1\,mV$ | Rectangular | $0{,}058\,mV$ | $111{,}23\,V^{-1}$ | 0,0065 |

Por lo que siguiendo el método sugerido en la guía se obtiene:

$$U_G = \sqrt{0{,}0356^2 + 0{,}0067^2 + 0{,}0356^2 + 0{,}0065^2} = 0{,}051 \tag{7.21}$$

Ahora hay que asignar a las variables una distribución, en todos los casos se utilizarán distribuciones rectangulares.

Los coeficientes de ponderación son los siguientes:

$$\frac{\delta V_{pH}}{\delta V_{offset}} = 1 \tag{7.22}$$

$$\frac{\delta V_{pH}}{\delta V_{AD}} = \frac{1}{G} \tag{7.23}$$

$$\frac{\delta V_{pH}}{\delta V_{G}} = -\frac{V_{AD}}{G^2} \tag{7.24}$$

Por lo que los elementos para el cálculo de incertidumbres de los voltajes tiene la forma que es muestra en la tabla 7.5.

Tabla 7.5: Valores para incertidumbre de los voltajes

| Variable | Valor | Distribución | Incertidumbre | Coeficiente | Aporte |
|---|---|---|---|---|---|
| $V_{AD}$ | $2{,}93\,mV$ | Rectangular | $1{,}69\,mV$ | 0,1 | $0{,}169\,mV$ |
| $V_{offset}$ | $0{,}55\,mV$ | Rectangular | $0{,}317\,mV$ | 1 | $0{,}317\,mV$ |
| $V_{offset}$ | $0{,}1\,mV$ | Rectangular | $0{,}058\,mV$ | 1 | $0{,}058\,mV$ |
| $G$ | 0,051 | Rectangular | 0,0294 | $\frac{V_{AD}}{100}$ | $0{,}00029 \times V_{AD}$ |

Observar que el aporte de la ganancia depende del voltaje $V_{AD}$, por lo que es de esperar que la incertidumbre debida a los voltajes no sea igual en todo en rango. Para simplificar los cálculos se tomará el peor caso, o sea $V_{AD} = 3\,V$ (que corresponde a un voltaje en el sensor de unos $210\,mV$). Entonces la incertidumbre debida a los voltajes es como en la ecuación 7.25.

$$U_V = \sqrt{(0{,}169\,mV)^2 + (0{,}317\,mV)^2 + (0{,}058\,mV)^2 + (0{,}88\,mV)^2} = 0{,}952\,mV \tag{7.25}$$

En este caso también la distribución la consideraremos rectangular.

Resta determinar la sensibilidad para cada componente de la ecuación 7.19 :

$$\alpha_1 = \frac{\delta pH}{\delta T_{med}} = -\frac{T_{cal}}{T_{med}^2}\frac{(pH7 - pH4)}{(V_{pH7} - V_{pH4})} \cdot (V_{med} - V_{pH7})$$

$$\alpha_2 = \frac{\delta pH}{\delta T_{cal}} = \frac{1}{T_{med}} \cdot \frac{(pH7 - pH4)}{(V_{pH7} - V_{pH4})} \cdot (V_{med} - V_{pH7})$$

$$\alpha_3 = \frac{\delta pH}{\delta pH7} = \frac{T_{cal}}{T_{med}} \cdot \frac{(V_{med} - V_{pH7})}{(V_{pH7} - V_{pH4})} + 1$$

$$\alpha_4 = \frac{\delta pH}{\delta pH4} = -\frac{T_{cal}}{T_{med}} \cdot \frac{(V_{med} - V_{pH7})}{(V_{pH7} - V_{pH4})}$$

$$\alpha_5 = \frac{\delta pH}{\delta V_{pH7}} = -\frac{T_{cal}}{T_{med}} \frac{(pH7 - pH4)}{(V_{pH7} - V_{pH4})^2} \cdot (V_{med} - V_{pH4})$$

$$\alpha_6 = \frac{\delta pH}{\delta V_{pH7}} = \frac{T_{cal}}{T_{med}} \frac{(pH7 - pH4)}{(V_{pH7} - V_{pH4})^2} \cdot (V_{med} - V_{pH7})$$

$$\alpha_7 = \frac{\delta pH}{\delta V_{med}} = \frac{T_{cal}}{T_{med}} \frac{(pH7 - pH4)}{(V_{pH7} - V_{pH4})}$$

Notar que las sensibilidades dependen del lugar en el rango de medida en el cual nos encontremos, por lo cual se debe determinar cuál es un peor caso.

A modo de resumen se presentan en la tabla 7.6 los elementos reunidos hasta ahora:

Tabla 7.6: Resumen de datos para calculo de incertidumbre

| Variable | Valor | Distribución | Incertidumbre | Coeficiente |
|---|---|---|---|---|
| $T_{med}$ | $0{,}05\,^oC$ | Normal | $0{,}0289\,^oC$ | $\alpha_1$ |
| $T_{cal}$ | $0{,}05\,^oC$ | Normal | $0{,}0289\,^oC$ | $\alpha_2$ |
| $pH7$ | $0{,}02\,pH$ | Normal | $0{,}0067\,pH$ | $\alpha_3$ |
| $pH4$ | $0{,}02\,pH$ | Normal | $0{,}0067\,pH$ | $\alpha_4$ |
| $V_{pH7}$ | $0{,}952\,mV$ | Rectangular | $0{,}550\,mV$ | $\alpha_5$ |
| $V_{pH4}$ | $0{,}952\,mV$ | Rectangular | $0{,}550\,mV$ | $\alpha_6$ |
| $V_{med}$ | $0{,}952\,mV$ | Rectangular | $0{,}550\,mV$ | $\alpha_7$ |

En principio, debido al desgaste, el valor de la incertidumbre varía con la diferencia entre los voltajes a pH 7 y pH 4 y con el offset que tiene el sensor de pH. Utilizando MATLAB se determinó que si se mantiene la pendiente constante, la incertidumbre se mantiene constante, y que si aumenta la pendiente, la incertidumbre aumenta.

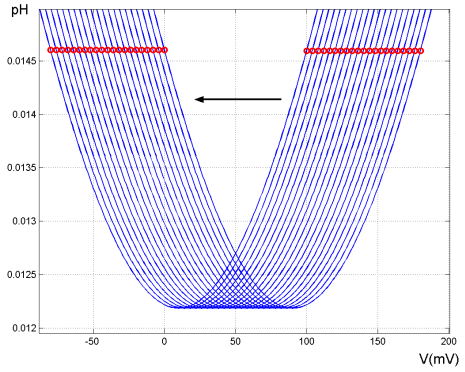



Figura 7.8: Incertidumbre Vs milivoltios, variando la deriva

En la figura 7.8 se muestra como varía la estimación de la incertidumbre según se vaya corriendo el offset hacia valores negativos, en la misma se aprecia como los valores de incertidumbre en los valores de calibración se mantienen constantes.

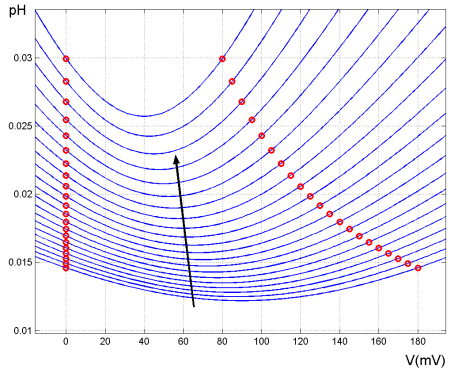



Figura 7.9: Incertidumbre Vs milivoltios, varíando la pendiente

En la figura 7.9 se muestra como aumenta la estimación de incertidumbre a medida que los valores de calibración se acercan entre si, esto muestra como con el desgaste del electrodo aumenta la incertidumbre en la medida.

Utilizando los resultados que se han mostrado hasta ahora y suponiendo un sensor nuevo evaluaremos la incertidumbre tipo B. Esto se debe a que es difícil estimar la influencia del desgaste debido a la poca experiencia adquirida, si bien el peor caso es con un sensor desgastado, este punto es difícil de determinar a priori.

Cuando el sensor es nuevo la diferencia ente pH7 y pH4 es de aproximadamente $180\,mV$, valor que usaremos en las fórmulas. Supondremos que el voltaje a pH 7 es cero, ya que vimos que la incertidumbre es independiente del offset.

Con estas suposiciones se tienen las siguientes sensibilidades:

$$\alpha_1 = \frac{\delta pH}{\delta T_{med}} = 0{,}0113$$

$$\alpha_2 = \frac{\delta pH}{\delta T_{cal}} = 0{,}0113$$

$$\alpha_3 = \frac{\delta pH}{\delta pH7} = 0{,}1667$$

$$\alpha_4 = \frac{\delta pH}{\delta pH4} = 0{,}1667$$

$$\alpha_5 = \frac{\delta pH}{\delta V_{pH7}} = 0{,}0028$$

$$\alpha_6 = \frac{\delta pH}{\delta V_{pH7}} = 0{,}0192$$

$$\alpha_7 = \frac{\delta pH}{\delta V_{med}} = 0{,}0167$$

En la tabla 7.7 se observan los valores necesarios para el calculo de la incertidumbre.
Por lo que la incertidumbre tipo B finalmente es:

$$U_B = 0{,}0162 \tag{7.26}$$

Tabla 7.7: Resumen de datos para calculo de incertidumbre tipo B

| Variable | Valor | Distribución | Incertidumbre | Coeficiente | Aporte |
|---|---|---|---|---|---|
| $T_{med}$ | 0,05 °$C$ | Normal | 0,0289 °$C$ | 0,0113 | 0,0003 |
| $T_{cal}$ | 0,05 °$C$ | Normal | 0,0289 °$C$ | 0,0113 | 0,0003 |
| $pH7$ | 0,02 $pH$ | Normal | 0,0067 $pH$ | 0,1667 | 0,0011 |
| $pH4$ | 0,02 $pH$ | Normal | 0,0067 $pH$ | 0,1667 | 0,0078 |
| $V_{pH7}$ | 0,952 $mV$ | Rectangular | 0,550 $mV$ | 0,0028 | 0,0015 |
| $V_{pH4}$ | 0,952 $mV$ | Rectangular | 0,550 $mV$ | 0,0192 | 0,0107 |
| $V_{med}$ | 0,952 $mV$ | Rectangular | 0,550 $mV$ | 0,0167 | 0,0092 |

**Incertidumbre Final**

Ahora debemos combinar las incertidumbres:

En el caso de pH 7:

$$U_{pH\,7} = \sqrt{U_{A7}^2 + U_{B7}^2} = 0{,}016 \tag{7.27}$$

Para pH 4:

$$U_{pH\,4} = \sqrt{U_{A4}^2 + U_{B4}^2} = 0{,}019 \tag{7.28}$$

Finalmente utilizando un factor de cobertura de tres, las incertidumbres son:

$$U_{pH7} = 0{,}048 \; con \; K = 3$$

$$U_{pH4} = 0{,}057 \; con \; K = 3$$

Entonces se puede afirmar que la incertidumbre queda dentro de los parámetros especificados.

## 7.4. Validación

Las pruebas de validación tuvieron lugar en la EEMAC[7] en Paysandú durante los días 17 y 18 de diciembre de 2005. Las pruebas realizadas se hicieron bajo la supervisación de la Ing. Agr. María de los Ángeles Bruni y del Ing. Agr. Pablo Chilibroste.

Figura 7.10: Introducción del DIR

Se realizaron dos experimentos. En el primero se colocó al DIR dentro del rumen midiendo cada 10 s durante una hora. Luego de retirar los datos y de algunos chequeos se volvió a colocar por un lapso de 24 horas midiendo una vez por minuto.

En la figura 7.10 se puede observar a Ing. Agr. Pablo Chilibroste colocando por primera vez al DIR dentro del rumen y en la figura 7.11 se lo puede ver retirando el DIR una hora más tarde.

En ninguno de los casos se presentaron mayores problemas. En particular, las dimensiones del DIR fueron adecuadas aunque cabe resaltar que la utilización de la correa de la tapa es imprescindible a la hora de retirar el aparato del rumen.

[7]Estación Experimental Mario Cassinoni

Figura 7.11: Extracción del DIR

### 7.4.1. Experimento de 1 hora

El DIR se introdujo en el rumen de la vaca situándolo a la altura del Retículo. En las figuras 7.12 y 7.13 se observan los datos obtenidos. En ambas gráficas se puede observar una línea con una leyenda que dice 14:17:01. Ésta señaliza la hora exacta en que es introducido el DIR en el rumen, y que debe considerarse como el inicio el experimento. El resto de los tiempos se miden a partir de este punto, expresados en minutos.

Se observa como antes de la marca, la señal de pH "flota" y la temperatura medida es la ambiente[8], esto refleja que el sensor de pH se encontraba al aire.

Los expertos afirman que los gráficas son consistentes con lo esperado y reflejan la actividad que la vaca desarrolló en ese período de tiempo.

Luego de introducido el DIR en el rumen, el pH presenta un pico en 7 y luego desciende. Era esperable que el rumen estuviera en un valor alto de pH ya que estos animales estaban encerrados desde la mañana sin consumir alimentos, permitiendo el proceso de bufferización[9] del sistema por varias horas. Si bien no se cuantificó es altamente probable que haya habido durante el período de encierro de los animales proceso de rumia de la ingesta realizada durante la noche. Esto también estimula el proceso de bufferización del sistema.

Luego de colocarle el DIR a la vaca, se la llevó al tambo para ser ordeñada, en ese momento se le suministró ración[10]. La fermentación del producto ingerido y la consecuente concentración de AGV (ácidos grasos volátiles) explica el descenso en el pH que se aprecia en la figura 7.12.

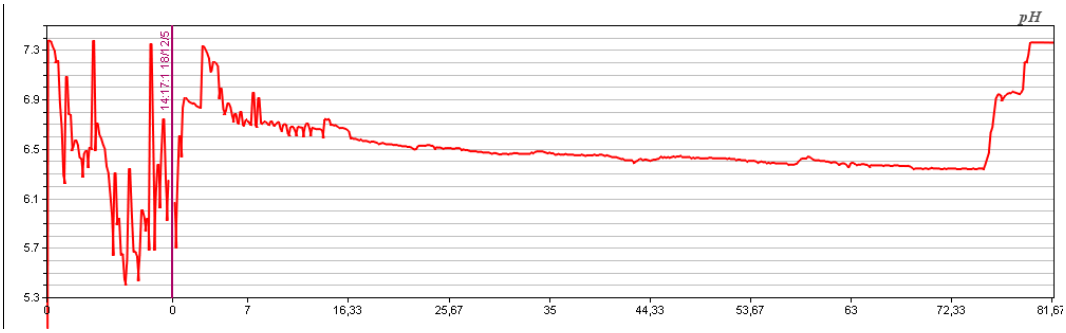



Figura 7.12: Los primeros datos de pH

Por último, en la figura 7.13 puede observarse que la temperatura se estabiliza rápidamente en los valores

[8] En realidad la temperatura es menor a la ambiente ya que para evitar que el sensor se secara, se lo humedeció permanentemente con agua destilada.

[9] Así se denomina al proceso mediante el cual, a través de la saliva, ingresan carbonatos y fosfatos al rumen

[10] Se le suministraron 4 kg de concentrado comercial con una densidad energética estimada de 1.7 Mcal ENL (megacalorías de energía neta de lactación) por kilogramo de materia seca.

esperados (38°C - 39°C).

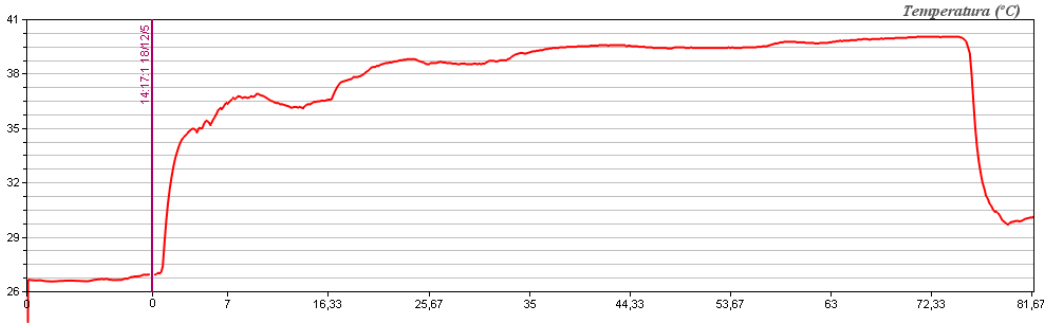



Figura 7.13: Los primeros datos de temperatura

### 7.4.2. Experimento de 24 horas

En este experimento el DIR se colocó en la superficie exterior del rumen con la intención de observar diferencias con la primer tanda de medida. La marca de tiempo indica que el experimento comenzó a las 15:56:22.

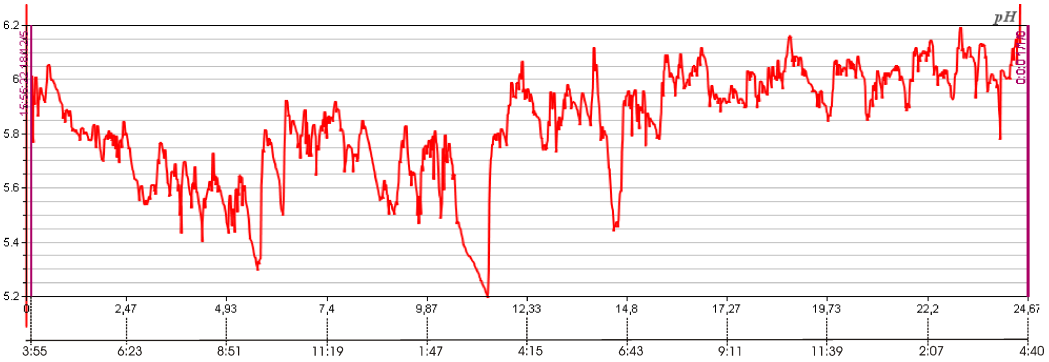



Figura 7.14: Gráfica de pH del experimento de 24 horas

A continuación expresamos algunas ideas intercambiadas con la contraparte, intentando interpretar los datos que se muestran en las figuras 7.14 y 7.15:

- A partir de las 5 PM las vacas van al campo y pastorean. Los antecedentes experimentales ubican en esta sesión de pastoreo las mayores tasas de ingestión y por períodos prolongados, lo que permite altos consumos de materia seca y el comienzo de un proceso activo de fermentación. 4 o 5 horas de pastoreo continuas son posibles en esta sesión, luego sigue un período de rumia del material recién ingerido (entre 6 y 10 PM). Este proceso de rumia tiene un doble efecto: a) a través de la salivación comienzan a ingresar buffers al sistema, lo cual implica un alza en los valores de pH; pero, b) como resultado de la rumia se fracciona el material, se liberan componentes solubles y se acelera la tasa de fermentación, lo cual hace el tender el valor de pH a la baja. La dirección del pH puede estar indicando el balance entre estos dos fenómenos. El Ing. Agr. Pablo Chilibroste afirma que esto no hace más que resaltar la importancia de contar con un dispositivo que pueda brindar una idea de los procesos dominantes en el rumen, su intensidad y dirección.

- Las variaciones de pH pueden estar asociados a cambios en la posición del animal (por ejemplo se echa), a cambios de actividad (por ejemplo comienza un período de rumia) o cambios de posición del aparato dentro del rumen debido a su constante movimiento.

- Que el pH suba a partir de la madrugada se condice con que haya disminuido la intensidad la ingestión de alimentos en la parcela, la absorción comienza a superar la producción de ácidos y a su vez con la rumia se comienza a bufferizar el sistema.

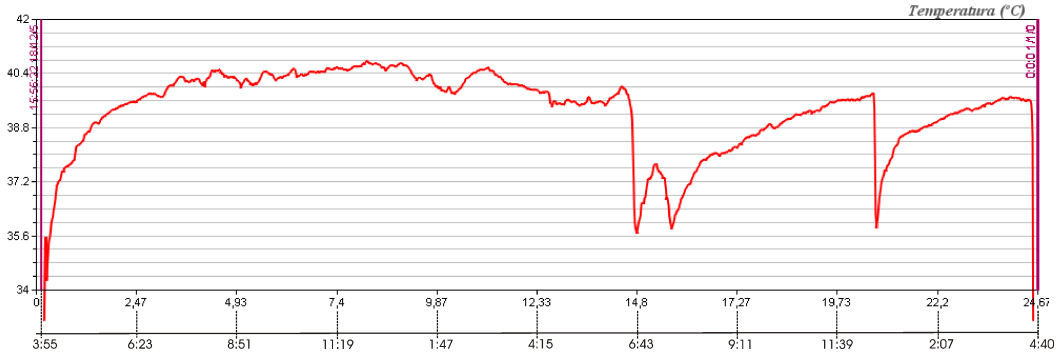



Figura 7.15: Gráfica de temperatura del experimento de 24 horas

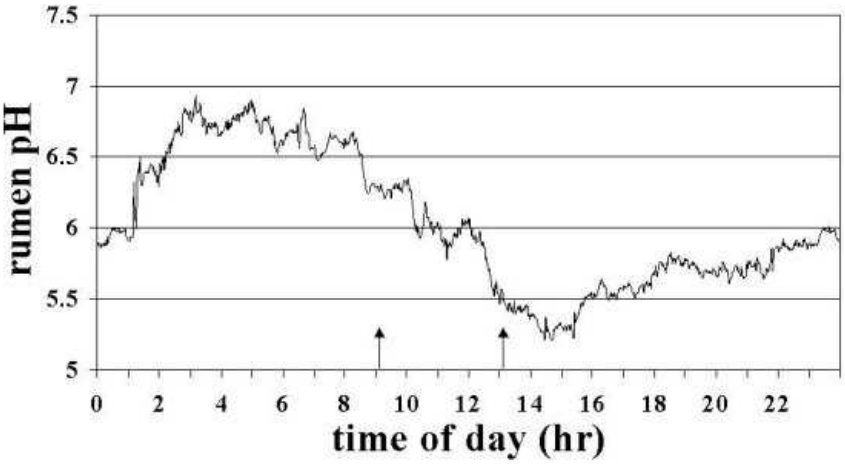



Figura 7.16: Gráfica del trabajo "Sub-Acute Ruminal Acidosis (SARA) in Dairy Cows" de T. Mutsvangwa [13]

- Las vacas son traídas al tambo entre las 5 y 6 AM, luego esperan a ser ordeñadas por lo que el pico de temperatura es altamente probable que esté asociado a ingestión de agua. Luego del ordeñe las vacas tienen un período de pastoreo corto y a las 11 AM vuelven al encierro donde pueden ingerir agua nuevamente hasta las 4 PM.

Como conclusión los resultados son muy buenos y muy alentadores. En una etapa posterior se debería estudiar la dependencia de las medidas con la ubicación del DIR en el rumen. Esto podría lograrse mediante la utilización de pesas. Asimismo debería registrarse exactamente el comportamiento de la vaca, para poder contrastar de forma más rigurosa las medidas con la actividad de la vaca por períodos más largos.

A priori parecería ser necesario buscar que los datos de pH sean más limpios, aunque se han comparado con gráficas de otros trabajos[11] y parecen ser consistentes. En la figura 7.16 se puede ver como las variaciones de pH son un poco menores. Es de resaltar que la fuente no aclara la forma en que se tomaron los datos.

[11] http://www.omafra.gov.on.ca/english/livestock/dairy/facts/03-031.htm

# Capítulo 8

# Conclusiones

En primer lugar se quieren destacar algunas particularidades del proyecto que lo hacen muy interesante y motivador. Éste va más allá de la electrónica, integrando otras áreas de la ingeniería, como el diseño mecánico o la informática. Otro aspecto a destacar son las diferentes disciplinas que se han integrado en este proyecto. Naturalmente la ingeniería y la agronomía, pero también la Química, Biología y Veterinaria. Ha sido muy enriquecedor interactuar con especialistas de estas disciplinas.

Se destaca que se cumplieron todos los objetivos marcados, Anubis es un dispositivo capaz de sensar continuamente la temperatura y el pH del rumen de una vaca fistulada, en total acuerdo con los requerimientos establecidos en la sección 1.3. En la tabla 8.1 se presenta una comparación entre los resultados obtenidos y los requerimientos del sistema.

Tabla 8.1: Resultados obtenidos vs requerimientos del sistema

| Requerimientos del sistema | Resultados obtenidos |
|---|---|
| Incertidumbre en pH $\leq$ 0,1 | 0,1 pH |
| Incertidumbre en temperatura $\leq$ 0,1 °C | 0,05 °C |
| Costo total $\leq$ 800 dólares | 710 dólares |
| Autonomía | |
| Consumo: del orden de meses | Años |
| Mantenimiento: 72 horas | 72 horas |
| Período de muestreo $\geq$ 5 minutos | 10 segundos |
| Tiempo de vida del sensor de pH máximo posible | 3 años |
| Localización en el retículo | OK |
| Tamaño | OK |
| Bio-compatible | OK |
| Encapsulado hermético | OK |
| Robustez adecuada | OK |
| Escalable | OK |
| Interfaz con el usuario sencilla y amigable | OK |

Los requerimientos de incertidumbre y costos fueron cumplidos. La incertidumbre que se asegura en la temperatura es 0,01 °C entre 36 °C y 41 °C (fuera de este rango la precisión es de 1 °C). En la sección E.2 se hace un estudio detallado de los costos asociados al desarrollo y la producción de Anubis.

La autonomía depende de dos factores: el consumo del DIR y el mantenimiento que debe efectuarse al sensor de pH. En la sección 7.1 se discuten los aspectos relativos al consumo. Allí puede verse que el consumo depende del tipo de uso que se le de al DIR, para usos "razonables" el DIR permite una autonomía de años usando pilas AA alcalinas.

El período de muestreo mínimo es de 10 segundos, aunque con una memoria de 32kb permitiría tomar medidas durante 22 horas. Para compatibilizar la autonomía requerida (72 hs) con la memoria disponible (32 kb) se tiene que el período mínimo de muestreo es de 35 segundos.

Es difícil asegurar un tiempo de vida para el sensor de pH. Los fabricantes no informan este valor ya que depende de las características de la solución donde se mide pH. Como no hay experiencia previa en la medición continua de pH en el rumen bovino, no se tienen bases ciertas para realizar una estimación. Sobre la experiencia adquirida con el sensor PHE-7353 durante 488 días de uso, se estima que el sensor podría durar 3 años siempre que se respeten las recomendaciones establecidas en el Manual de Usuario.

Si bien el tamaño del DIR resultó adecuado, una reducción del mismo se visualiza como necesaria.

El DIR prevé la colocación de pesas en su "tapa de protección" para localizarlo en el retículo. El encapsulado es Bio-compatible, tiene la robustez adecuada y con la utilización de las juntas apropiadas es hermético.

Anubis es fácilmente escalable. En particular, la implementación del bus SPI, va permitir la fácil integración de periféricos, sensores u otros componentes.

El microcontrolador cuenta con suficientes recursos libres para asegurar la escalabilidad:

- Memoria de programa: 60 %.
- Memoria de datos: 60 %.
- Señales digitales de I/O: 6 pines.
- Conversores A/D: 8 pines.

Además existe la posibilidad de sustituir la memoria externa por una de mayor tamaño, sin necesidad de realizar modificaciones, pudiendo obtener hasta 64 kb.

Esto aspectos proporcionan una gran flexibilidad a la hora de aumentar las prestaciones implementadas e introducir nuevas. En este sentido se ha diseñado el firmware de la forma más modular posible teniendo en cuenta las limitaciones del Assembler de PIC, así si se desea sustituir una función, por ejemplo el protocolo de comunicación con el PC, o agregar una nueva no deberían presentarse mayores inconvenientes.

Por último, AnubisLAB provee una interfaz con el usuario sencilla y amigable.

En el capítulo E se presentan las tareas realizadas para la concreción del presente proyecto, y se comparan las horas realmente dedicadas contra las planificadas en el plan de proyecto. Allí puede verse que el proyecto insumió un total de 3237 horas-hombre.

A continuación se presenta un resumen de los principales problemas encontrados, los principales aportes que brinda Anubis y algunas ideas para continuar mejorando el producto.

## 8.1. Principales problemas encontrados

El gran desafío de este proyecto era poder medir pH correctamente. Desde el comienzo, el primer gran problema fue involucrarse con conceptos de Química totalmente nuevos. Asimismo, las fuertes limitaciones que imponen los sensores estándar fueron fuentes contantes de problemas. Por mencionar algunos: tamaño, limpieza y calibración. El más reciente, la necesidad de corregir la constante que impone el Bloque Offset (Ver sección 7.2.2).

La medición de pH a través de ISFET's, tal vez sea más adecuada a los requerimientos del sistema, pero las versiones comerciales no reducen el tamaño de forma significativa y su precio es muy superior. Por otra parte, la adquisición del transistor ISFET no es posible ya que no se lo comercia por separado.

En las primeras etapas del diseño nos encontramos con problemas relacionados con las interferencias externas, principalmente de la red eléctrica, electricidad estática y ruido ambiente en general. Estos fenómenos jugaban un papel importante en la estabilidad de las señales, especialmente en la que provenía del circuito de adquisición de pH. La mayor parte de estos problemas se solucionaron colocando capacitores en los puntos de alta impedancia (en especial el punto de conexión del sensor de pH); y adecuando la conexión mediante un conector BNC.

El caso de la red eléctrica, tiene mayor incidencia cuando el DIR se encuentra conectado al PC, aquí el ruido resultaba en variaciones del orden de 0,1 pH o superiores. Esto es muy delicado, en particular al momento de la calibración, ya que la precisión con la que se realice, afecta las medidas posteriores. Para corregir este problema se tomaron dos medidas, la primera fue utilizar las propiedades de rechazo al modo común del amplificador de instrumentación, haciendo ingresar la tierra como señal de modo común. Como segunda medida se agregaron capacitores entre alimentación y tierra. Esta solución trajo aparejados mayores retardos en la estabilización de la medida y por ende aumentó levemente el consumo.

Luego de las correcciones el sistema quedó más robusto, sin embargo en ambientes muy ruidosos con equipos eléctricos de mucha potencia como pueden ser los motores de inducción, bombas o compresores, los problemas persisten aunque no con la intensidad de las primeras etapas. En ambientes particularmente ruidosos, con por ejemplo el laboratorio de IIQ, se pudieron apreciar fluctuaciones máximas en las medidas del orden de 0,06 pH[1]. En los laboratorios del IIE, en la EEMAC y en las casas de los integrantes del grupo la interferencia de la red no era perceptible.

La fuente de alimentación resultó ser una variable importante para la precisión de la medición, tanto a nivel de los conversores A/D, así como en la generación de la constante del bloque Offset (ver sección 3.4.5). Al utilizar un sistema alimentado por pilas no se podía garantizar un valor de la fuente constante como era necesario. Esto se resolvió incluyendo en el circuito un integrado que implementa una referencia de voltaje. Éste mismo chip se utilizó para implementar el circuito de "prendido y apagado" del bloque analógico y medir el nivel de la batería.

Los problemas encontrados con la medición de temperatura se explican en detalle en la sección 2.2.3.

Una de las limitaciones más grandes que se tuvieron en el transcurso de este proyecto fue la dimensión del mercado local de la Electrónica. Es un mercado muy chico, no orientado al diseño. En un país que tiene buenos recursos humanos y que pretende algún día dejar de depender tecnológicamente, no debería pasar esto. Se presentaron problemas a todo nivel, insumiendo muchas horas para su solución. A modo de ejemplo se mencionan: conseguir componentes, fabricantes de PCBs y torneros; o en la aduana para retirar muestras gratis.

Una alternativa interesante que se evaluó para minimizar el consumo, fue tratar de alimentarse desde el puerto serial del PC. Esto se descartó debido a que el estándar EIA-562 (utilizado principalmente en notebooks) prevé, que la máxima corriente que puede obtenerse del puerto serial es de 1,5 mA. Si bien Anubis tiene un consumo promedio mucho menor a este valor, puede requerir de picos de corriente que lo superen. Si bien otros drivers de RS232, que por ejemplo se utilizan en PCs, permiten obtener más corriente (hasta 6,5 mA), no era razonable implementar una solución que no funcionara en notebooks [Ele95].

## 8.2. Principales aportes

Actualmente el método utilizado para medir las variables pH y temperatura consiste en la extracción directa de líquido ruminal por medio de una bomba de vacío manual (Ver figura 8.1). El período mínimo de muestras que es capaz de tomar esta metodología se ve disminuido por dos aspectos. En primer lugar, la abertura periódica de la fístula altera el micro-clima de rumen; en segundo lugar, esta metodología es cara en recursos humanos.

Con el uso de Anubis se logran medidas con una frecuencia mucho mayor y no se requiere abrir la fístula. Esto solamente es necesario para introducirlo y quitarlo al final del experimento, el cual puede durar varias semanas dependiendo del tiempo de muestreo y la precisión que se quiera obtener. Otra ventaja que presenta Anubis frente a la metodología actual es la no interferencia actividad cotidiana de la vaca.

AnubisLAB proporciona una interfaz amigable para el trabajo con Anubis, y entre otras cualidades brinda una rápida visión de lo ocurrido durante el experimento a los pocos minutos de haberse terminado.

Con estas herramientas se espera lograr un aumento significativo en el volumen y calidad de los datos del comportamiento del rumen bovino.

[1] Para independizarnos de estos problemas se trabajó con una laptop

Figura 8.1: Extracción de líquido ruminal

Es de interés para los investigadores poder contar con información de la actividad de la vaca. Por ejemplo cuando está en proceso de rumia, pastoreo, tomando agua, etc. Para ello disponen de sensores que por diversos motivos no resultan los más adecuados.

El Ing. Agr. Pablo Chilibroste, a partir del análisis primario de los datos obtenidos por Anubisen el experimento de 24 horas, planteó que se podría estudiar la posibilidad de utilizar el pH como variable de actividad del bovino. Como actualmente no se dispone de un dispositivo de las características del DIR, ésta idea no había sido manejada por ellos.

## 8.3. Trabajo a futuro

Se visualizan dos líneas de trabajo a futuro, que en algún caso pueden ser complementarias. La primera de ellas es seguir mejorando el producto con el objetivo de comercializarlo en ámbitos de investigación y desarrollo. La otra línea de trabajo apunta a modificar Anubis para insertarlo en el sector primario de producción.

En las dos líneas de trabajo planteadas resultaría de interés aumentar la cantidad de sensores, para lograr monitorear otras variables.

Mejoras para Anubis

A medida que pasa el tiempo de uso, la característica sensor del sensor pH va cambiando hasta llegar a inutilizarlo. En el caso del corrimiento del voltaje a pH 7 es necesario corregir el valor de la constante que se suma (ver sección 7.2.2).

En diseños futuros se puede incluir una forma de corrección automáticamente del valor de la constante, pudiendo generar una alarma al usuario para que sustituya el sensor. Para esto se propone la inclusión de una referencia de voltaje programable por el PIC. Por ejemplo la X60250 de *Intersil* (http://www.intersil.com).

En la sección 7.1 se mostró que el mayor consumo del circuito se da cuando Anubis está conectado al PC. Una alternativa analizada para eliminar este consumo, fue tratar de extraer energía directamente del puerto serial. El puerto serial no está pensando para ello y la idea tuvo que abandonarse. En próximas implementaciones se podría incluir la utilización del puerto USB para la comunicación serial, este paso parece deseable por dos razones, en primer lugar por la popularidad de esta tecnología (actualmente las notebooks están empezando a fabricarse sin puerto serial) y en segundo lugar la utilización de este puerto como alimentación del DIR durante la conexión con el PC.

Se podría estudiar la posibilidad de modificar el diseño para que pueda ser utilizado con pilas recargables. Esto implica cambiar la fuente de alimentación de 3 V a 2, 4 V. El único componentes del sistema que requeriría ser cambiado para funcionar a 2, 4 V es el MAX3221. Una aspecto importante a tener en cuenta en este cambio es la hipótesis sobre el consumo de este chip planteada en 7.1.

Uno de los problemas relevados durante el transcurso del presente proyecto fue la influencia que tiene la red eléctrica. Como Anubis no va funcionar en ambientes industriales o laboratorios con dispositivos que afectan el normal funcionamiento de la red, no se profundizó en este punto. Si existen futuras implementaciones que deban trabajar en este tipo de ambientes, deberán prestar especial atención a este efecto.

Introducción de Anubis en la producción primaria

El tamaño del sensor utilizado y la necesidad de mantenimiento periódico impiden pensar en una aplicación que tome muestras por tiempo indefinido. Un importante trabajo a futuro es profundizar, en tecnologías alternativas como el ISFET, para lograr un dispositivo del tamaño adecuado para el ingreso por vía oral y así poder utilizar vacas no fistuladas. Esta sustancial mejora traería aparejada la inclusión de una consulta inalámbrica para obtener los datos.

**Otras aplicaciones**

La función Medida Continua de Anubis permite tomar medidas conectado al PC en tiempo real. En este modo se puede ver al Anubis como un pH-metro con corrección automática de temperatura, éste puede ser un dispositivo de gran utilidad en aplicaciones de laboratorio ya que permite observar la evolución de la muestra en forma gráfica y guardar los datos para el análisis posterior.

Toda aplicación que involucre procesos biológicos o químicos, está potencialmente interesado en medir el pH. A modo de ejemplo se menciona que se ha tomado contacto con docentes de la Facultad de Ciencias, que han quedado muy interesados en el presente proyecto. Estos docentes trabajan en Limnología[2], aquí las variables pH y temperatura son de gran importancia. Para que Anubis pueda ser utilizado en este área es necesario hacer algunas modificaciones en los rangos de medida, actualmente se puede medir pH entre 3,5 y 7,5, típicamente el pH de las lagunas por ejemplo varía entre 6 y 9.

La industria alimenticia es otra potencial interesada en Anubis. En especial se puede mencionar la industria vitivinícola o cervecera.

[2]La limnología es la rama de la ecología que estudia los ecosistemas acuáticos continentales (lagos, lagunas, ríos, charcas, marismas y estuarios), las interacciones entre los organismos acuáticos y su ambiente, que determinan su distribución y abundancia en dichos ecosistemas.

# Apéndice A

# Principio de funcionamiento de los sensores de pH

## A.1. Sensores de vidrio

El contenido del presente capítulo se estructuró en base a [SW89].

### A.1.1. Definiciones previas

Por *reacción química* entendemos al cambio en la estructura de las moléculas. Las reacciones pueden consistir en ataques de moléculas entre sí para formar una molécula más grande, rompimiento de moléculas para formar moléculas más chicas o reagrupamiento de átomos en moléculas. Una reacción química es *reversible* si el producto de determinada reacción es capaz de recombinarse para volver a las sustancias originales.

Las reacciones químicas en las que los electrones se transfieren desde un reactivo a otro se conocen como reacciones de *oxidación-reducción* o *redox*. La *oxidación* implica la pérdida de electrones por una sustancia, mientras que la *reducción* se refiere a la ganancia de electrones.

La *concentración* indica cuánto de cierta sustancia se encuentra en mezcla con otra. Esto se aplica a cualquier mezcla química, pero es más frecuentemente usada en relación a soluciones, donde se refiere a la cantidad de *soluto* disuelto en *solvente*. Para *concentrar* una solución, uno debe agregar más soluto o reducir la cantidad de solvente. En contraste, para *diluir* una solución, uno debe agregar solvente o reducir la cantidad de soluto. La notaremos con el símbolo [ ] y a menos que se diga lo contrario estará expresada en *moles/litro*. Existe una concentración a partir de la cual deja de disolverse nuevo soluto en la solución. Cuando eso sucede, se dice que la solución está *saturada*.

Para que haya *equilibrio químico* la reacción debe ser reversible. El equilibrio químico es el estado al cual, la reacción directa y su inversa llegan a la misma velocidad y las concentraciones de reactivos y productos dejan de variar. Cuando esta condición es alcanzada, no hay cambios en las proporciones de los componentes involucrados y la reacción termina.

Una reacción, sin inyección de energía externa, tiende al equilibro. Para una reacción en el equilibrio se cumple:

$$aA + bB \leftrightarrows cC + dD \tag{A.1}$$

donde $A$,$B$,$C$,$D$ representan las fórmulas de las especies que participan en la reacción y $a$,$b$,$c$,$d$ son sus respectivos números de moles. La *constante de equilibrio* $K$ de la reacción se define así:

$$K = \frac{[A]^a[B]^b}{[C]^c[D]^d} \tag{A.2}$$

La ecuación (A.2) es válida si las concentraciones de las especies involucradas en la reacción son extremadamente bajas. Una definición más general introduce un factor de corrección llamado *coeficiente de actividad* $f$. Reescribiendo la ecuación (A.2) se obtiene:

$$K = \frac{f_A[A]^a f_B[B]^b}{f_C[C]^c f_D[D]^d} \tag{A.3}$$

Los subíndices de los valores de $f$ indican la especie en particular a la se refiere. En una solución infinitamente diluida, todos los valores de los coeficientes de actividad valen 1.

### A.1.2. ¿Qué es el pH?

Las reacciones más importantes probablemente son las que tienen lugar en disolución acuosa. En general, todas las reacciones biológicas y particularmente las que se dan en el rumen bovino, se realizan en el agua. Por lo tanto el agua es el solvente de las reacciones que estudiaremos.

El pH es un instrumento fundamental en el estudio de dichas reacciones ya que proporciona una medida de la acidez o de la alcalinidad de las sustancias acuosas.

Una sustancia *ácida* es toda aquella capaz de ceder un ion $H^+$ (protón), y una *base* es toda sustancia capaz de aceptar un ion $H^+$. Por tanto, la acidez o la alcalinidad de una solución acuosa queda determinada por la concentración de iones de hidrógeno ($[H^+]$) y aniones hidroxilo ($[OH^-]$) que están presentes. Las soluciones ácidas tienen una mayor $[H^+]$, mientras que las sustancias bases tienen una mayor $[OH^-]$.

Formalmente el $pH$ se define con el negativo del logaritmo de la actividad del ion hidrógeno[1]:

$$pH = -\log_{10} f_H.[H^+] \tag{A.4}$$

En la mayoría de las aplicaciones de interés la cantidad de agua que se consume o se forma durante la reacción química es pequeña comparada con la cantidad de agua presente, con lo cual se asume que el coeficiente de actividad es 1:

$$pH = -\log_{10}[H^+] \tag{A.5}$$

Una discusión del comportamiento ácido-base debe iniciarse con una consideración sobre el solvente mismo, en nuestro caso el agua. En el agua pura sus iones se generan en concentraciones pequeñas e iguales según la reacción A.6.

$$H_2O + H_2O \leftrightarrows H^+ + OH^- \tag{A.6}$$

con $K_{eq}$ como constante de equilibrio:

$$K_{eq} = \frac{[H^+][OH^-]}{[H_2O]^2} \tag{A.7}$$

Considerando nuevamente que la cantidad de agua que se consume o se forma durante la reacción química es pequeña comparada con la cantidad de agua presente, los coeficientes de actividad valen 1. Además el valor de $[H_2O]$ puede considerarse constante. A partir de esto puede definirse una nueva constante de equilibro $K_a$, llamada *producto iónico*, para reescribir la ecuación (A.7) de la siguiente manera:

$$K_a = [H^+][OH^-] \tag{A.8}$$

[1]Debido a que las potencias de 10 son incómodas de trabajar, se introduce la notación logarítmica.

El valor $K_a$ varía con la temperatura. A 25°C es $1,0 \times 10^{-14}$. En el agua pura $[H^+]$ y $[OH^-]$ valen $1,0 \times 10^{-7}$ cada una. Si se añade una sustancia ácida al agua pura, la $[H^+]$ aumenta respecto a este valor, pero como $K_a$ permanece constante, la $[OH^-]$ desciende. Lo inverso ocurre, si se añade una sustancia básica.

En base a lo expuesto se concluye que en el agua pura el $pH$ es 7. Todas las soluciones neutras tienen este valor de pH, mientras que el de las ácidas es menor que 7, y el de las básicas, mayor.

Por otra parte, si se toma el logaritmo en ambos términos de la ecuación (A.8) se obtiene:

$$\log_{10} K_a = pH + pOH \tag{A.9}$$

A partir de (A.9) podemos ver que conociendo el valor de la constante $K_a$ y el $pH$, se puede calcular $[OH^-]$, y viceversa.

### A.1.3. Pila electroquímica

La *electrólisis* es un proceso que consiste en la descomposición química de una sustancia, a partir del pasaje de una corriente eléctrica. El *electrólito* es la sustancia que, mezclada en solución y sometida al pasaje de una corriente eléctrica, se disocia parcial o totalmente en partículas cargadas, llamadas *iones*. Los iones de carga positiva se llaman *cationes* y los de carga negativa se llaman *aniones*.

La pila electroquímica consiste en un par de electrodos metálicos, sumergidos en un electrólito. El positivo se llama *cátodo* y el negativo *ánodo*.

En el ejemplo de la figura A.1, puede observarse un electrodo de zinc ($Zn$) como cátodo, sumergido en sulfato de zinc ($Zn^{2+}SO_4^{2-}$) y otro electrodo de cobre ($Cu$) como ánodo, sumergido en sulfato de cobre ($Cu^{2+}SO_4^{2-}$). La corriente producida, cuando el interruptor S está cerrado, se debe a la fuerte tendencia del zinc a ser oxidado en la superficie del electrodo y a la tendencia del cobre a ser reducido en la superficie del otro.

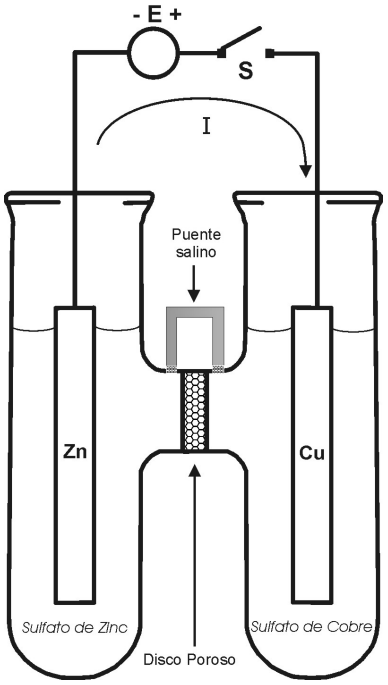



Figura A.1: Pila electroquímica

Cuando S está cerrado se produce una reacción en las superficies de los electrodos que consiste en la liberación de electrones en el electrodo de zinc y en la aceptación de los mismos por parte del electrodo

de cobre. La concentración de iones de hidrógeno sube en la solución de sulfato de zinc y desciende en la solución de cobre. Este proceso ocurre hasta llegar al equilibrio, estado en el cual no fluye más corriente, que es cuando la pila se agota.

En la figura A.1 puede observarse un *disco poroso* (también llamado *juntura*) que se coloca entre las soluciones para cerrar el circuito. El mismo no permite que ocurra la mezcla de las soluciones, pero sí el pasaje de los iones.

Debido a la naturaleza de la reacción, los electrones presentes en la solución de sulfato de zinc son atraídos hacia el electrodo de zinc. Lo inverso ocurre en la solución de cobre. Esto produce una acumulación de carga positiva del lado izquierdo del disco y una acumulación de carga negativa del lado derecho. Por lo tanto se genera una diferencia de potencial indeseable, llamado *potencial de juntura*, entre las superficies del disco poroso. Para evitar dicha diferencia de potencial puede implementarse un "puente salino" con cloruro de potasio saturado ($KCl$).

### A.1.4. Ecuación de Nernst

La magnitud del potencial que se desarrolla entre los electrodos, es una medida de la "fuerza" que impulsa a las 2 semi-reacciones (oxidación y reducción) que ocurren durante el proceso, hacia la condición de equilibrio. Este potencial está directamente relacionado con la constante de equilibrio del proceso, así como con la magnitud en que las concentraciones existentes de los reactivos se apartan de sus valores de equilibrio. De hecho la transferencia de electrones (corriente eléctrica) sucederá hasta que la reacción llegue a su equilibrio (hasta que la pila se agote).

Dicho potencial, que denotaremos por la letra $E$, se rige por la *ecuación de Nernst*. Dada la siguiente reacción:

$$aA + bB + ... + ne \leftrightarrows cC + dD + ... \tag{A.10}$$

la ecuación de Nernst establece que:

$$E = \frac{RT}{nF} \ln \frac{f_C[C]^c f_D[D]^d ...}{f_A[A]^a f_B[B]^b ...} \tag{A.11}$$

donde:

- $e$ representa a un electrón y $n$ su número de moles
- $R$ es la constante de los gases y vale $8,315 K^{-1} mol^{-1}$
- $T$ es la temperatura en grados kelvin
- $F$ es la constante de Faraday y vale $96485 C$

### A.1.5. Electrodo de referencia

Para usar la pila como instrumento de medida debe utilizarse uno de los electrodos como referencia.

La principal característica de un electrodo de referencia es que mantiene un potencial constante aun después del paso de pequeñas cantidades de corriente. Además es resistente, fácil de acoplar e insensible a la composición de su solución (para lograrlo se utilizan soluciones saturadas).

Los electrodos de referencia más comunes son los electrodos de calomelanos saturados (ECS) y electrodos de $Ag - AgCl$ (plata-cloruro de plata).

El ECS no se usa en aplicaciones industriales por dos razones. En primer lugar, el electrodo tiende a romperse cuando la temperatura a la cual está expuesto excede los $80°C$. En segundo lugar, el electrodo contiene mercurio y esto podría convertirse en un riesgo para la salud. Por su parte el electrodo de $Ag - AgCl$ puede llegar a los $125°C$, no contiene mercurio y es relativamente fácil de construir dentro de un electrodo

combinado (ver sección 2.1.2).

El electrodo de $Ag - AgCl$, ver figura A.2, consiste en un hilo de plata sumergido en una solución de $KCl$ (cloruro de potasio) saturada con $AgCl$ (cloruro de plata).

Como se mencionó en la sección A.1.3, el disco poroso cumple la función de cerrar el circuito.

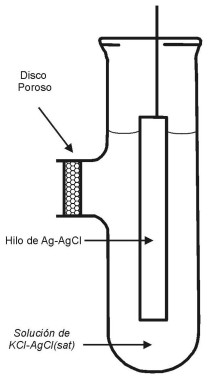



Figura A.2: Esquema de un electrodo de referencia

### A.1.6. Electrodo de vidrio para medir pH

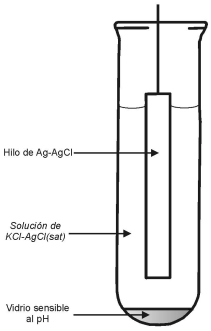



Figura A.3: Esquema de un electrodo de vidrio para medir pH

Los electrodos de vidrio forman parte de una familia más grande que son los *electrodos de membrana*. Éstos se valen de la medida de potencial que se establece a través de una delgada membrana de vidrio que separa dos soluciones con diferentes concentraciones de determinado ion. En el caso del pH se trata del ion de hidrógeno, aunque también podemos encontrar electrodos sensibles al ion de calcio, por ejemplo, donde obtendremos el pCa.

El electrodo consiste en un fina membrana de vidrio sensible[2] al pH soldada al extremo de un tubo de plástico o de vidrio resistente (ver figura A.3). El tubo contiene una solución que mantiene el nivel de pH constante en su parte interior (en general es una solución que contiene ion cloruro). En el caso de usarse un electrodo de referencia de $Ag-AgCl$, por simetría la solución interior es $KCl$ saturada con $AgCl$. Finalmente, un hilo de plata se constituye en el terminal del electrodo cuyo potencial es proporcional al pH.

[2]La superficie de la membrana debe estar hidratada, los vidrios no higroscópicos no son sensibles al pH. Aunque este efecto es reversible, también los vidrios higróscopicos pierden su sensibilidad al pH por deshidratación

## A.2. Sensores de pH basados en ISFETs

Se utilizaron como base para la presente descripción los artículos [Ber03] y [MCL+].

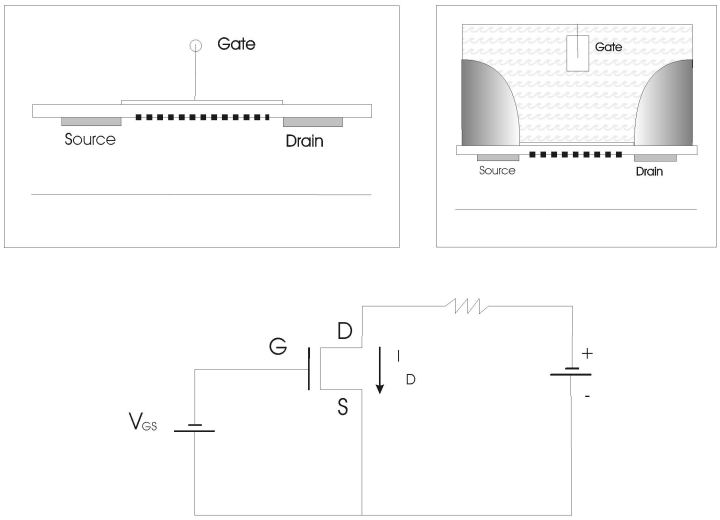



Figura A.4: Diagramas esquemáticos para MOSFET e ISFET

La mejor forma de describir el funcionamiento del ISFET es compararlo con su pariente, el MOSFET.

El contacto metálico del *gate* en el MOSFET se cambia por el metal de un electrodo de referencia y el polisilicio[3] es sustituido por el líquido al cual se le quiere medir el pH al cual se lo deja en contacto con el aislante por un lado, y con el electrodo de referencia por el otro.

El óxido de silicio ($SiO_2$), utilizado como aislante en la construcción del MOSFET, no es la mejor elección cuando se trata de ISFET ya que parte de su funcionamiento depende de la respuesta del $SiO_2$ al pH; en este caso se utilizan $Al_2O_3$, $Si_3N_4$ y $Ta_2O_5$ cuyas propiedades químicas en lo que a ello refiere resultan más convenientes.

Ambos dispositivos tienen el mismo equivalente eléctrico, como se ve en la figura A.4. Asimismo puede apreciarse que mientras el empaquetado del MOSFET es aislado completamente, en el ISFET se debe dejar libre el área del *gate* para que entre en contacto con el líquido.

Para ambos dispositivos la siguiente ecuación describe el funcionamiento en la zona activa:

$$I_d = \beta(V_{gs} - V_T - \frac{V_{ds}}{2})V_{ds} \tag{A.12}$$

Donde $\beta = \frac{\mu C_{ox} W}{L}$ y el voltaje de umbral está dado por:

$$V_T = V_{FB} - \frac{Q_B}{C_{ox}} + 2\phi_F \tag{A.13}$$

$V_{FB}$ es el voltaje de *flat band*, $Q_B$ es la carga de deplección en el silicio y $\phi_F$ el potencial de Fermi. El voltaje de *flatband* representa la diferencia de potencial que existe **entre el óxido y el gate** y está descrito por la siguiente ecuación:

$$V_{FB} = \frac{\Phi_M - \Phi_{Si}}{q} - \frac{Q_{ss} + Q_{ox}}{C_{ox}} \tag{A.14}$$

En el caso del MOSFET estas constantes están definidas por las características del material y la carga acumulada, operando de forma estable el voltaje $V_{FB}$ es constante, de esta manera, la corriente calculada en la ecuación (A.12) depende solamente del voltaje drain-source $V_{ds}$. Por el contrario cuando se trate de

[3]Sustancia conductora utilizada en la construcción del MOSFET con la que se unen el metal del *gate* y el óxido de silicio

ISFET el voltaje de gate será el voltaje en el electrodo de referencia (usualmente en 0V), pero como veremos a continuación el voltaje de umbral ya no es constante. Éste contiene términos que reflejan la interfase entre líquido-óxido de un lado y el líquido-[electrodo de referencia] del otro. El último término (líquido-[electrodo de referencia]) representa el potencial en el electrodo de referencia relativo al vacío $E_{ref}$, el cual incluye $\Phi_M$[4]. El potencial de la interfase líquido-óxido queda determinada por el potencial en la superficie de la solución $\chi_{sol}$, el cual es constante, y el potencial en la superficie $\Psi_o$ que resulta de la reacción química, generalmente llevada a cabo por la disociación de grupos de óxido en la superficie. La ecuación que resulta para el voltaje *flatband* es la siguiente:

$$V_{FB} = E_{ref} - \Psi_o + \chi_{sol} - \frac{\Phi_{Si}}{q} - \frac{Q_{ss} + Q_{ox}}{C_{ox}} \tag{A.15}$$

Dado que todos los términos excepto $\Psi_o$ son constantes, este será el término que hace que el ISFET sea sensible al pH del electrolito.

De la combinación de las ecuaciones A.12, A.13 y A.15 se obtiene la expresión para la corriente de Drain en el ISFET que depende de los voltajes $V_{GS}$, $V_{DS}$ y $V_t(pH)$, esto determina una relación entre $I_D$ y $V_{ds}$ diferente para diferentes valores de pH en el elecrtolito como se observa en la figura A.5.

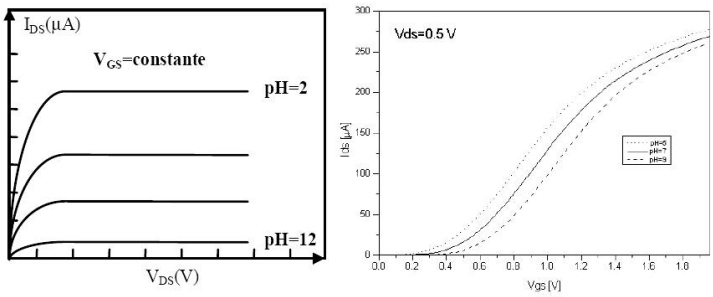


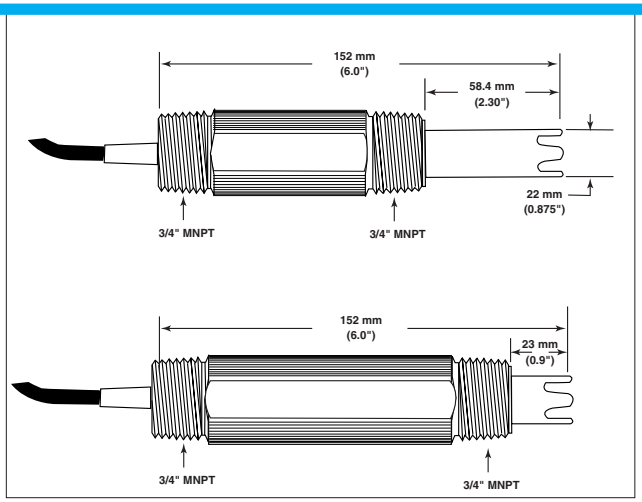

Figura A.5: Curvas ideales de operación para un ISFET a diferentes valores de pH

[4]Función de Trabajo o Energía Libre, es la energía necesaria para desprender un electrón de la superficie de un conductor

## A.3. Hoja de datos del sensor PHE-7353

# Heavy-duty pH Sensor for Submersible Applications

PHE-7352 PHE-7353




The PHE-7352-15 is a combination pH sensor designed for insertable use in process and waste water applications where greater pipeline penetration is required. The outer body material is PPS (Ryton®) and has ¾" MNPT (or optional 1" MNPT) front and rear facing threads with 2¼" (57.1mm) insertion depth. The sensor features sealed double junction construction which is highly resistant to electrode poisoning solutions, (typically those with cyanide, ammonia, sulfide and heavy metals in appreciable concentrations). The use of the non-fouling patented Porous Teflon® liquid junction ensures a steady presence of reference electrolyte. Coupled with the novel Plunger pH glass electrode design, this sensor assures a low long maintenance service life in most applications. Use of the high temperature version is recommended where service temperatures continuously exceed 80°C (176°F).

### *Application*

- **Suitable for Severe Conditions**
- **Large Diameter Pipe Insertion**
- **Waste Water Pipeline Insertion**

- **Strong Ryton® Body**
- **Low Maintenance**
- **Short or Long Insertion Lengths**
- **Any Angle Orientation**

### SPECIFICATIONS

**pH Range:** 0 to 14 pH
**Temperature Range:** 0 to 80°C (32 to 176°F) or 0 to +110°C (32 to 230°F) (high temperature version)
**Pressure Range:** 0 to 100 psig or 0 to 150 psig (high temperature version)
**Accuracy:** ±0.1% over full range
**Sodium Error:** Less than 0.05 pH in 0.1 Molar Na+ ion @ 12.8 pH
**Impedance:** 150 Mohm @ 25°C (76°F)
**Reference Cell:** Double junction $KNO_3$ and KCl/AgCl
**Zero Potential:** 7.0 pH ± 0.2 pH
**Wetted Materials:** PPS (Ryton®), Teflon®, Viton,Glass
**Response Time:** 95% of reading in 10 seconds
**Drift:** Less than 2 mV per week

***MOST POPULAR MODELS HIGHLIGHTED!***

**To Order** *(Specify Model Number)*

| Model No. | Price | Price w/ATC | Description |
|---|---|---|---|
| PHE-7352-15-(*) | $115 | $145 | Heavy-duty submersible pH sensor |
| PHE-7353-15-(*) | 125 | 155 | Heavy-duty long length submersible pH sensor |

***Specify ATC sensor:*** *"**-PT100**" for 100 ohm Platinum RTD or "**-PT1K**" for 1000 ohm Platinum RTD.*

***Ordering Example:*** ***PHE-7352-15-PT100-HT*** *is a heavy-duty submersible pH sensor with "**-HT**" (for high temperature), and 100 ohms ATC, $145 + 30 = **$175.***

D-56

D INDUSTRIAL pH INSTRUMENTATION & ELECTRODES

# Apéndice B

# Esquemático de la placa del DIR

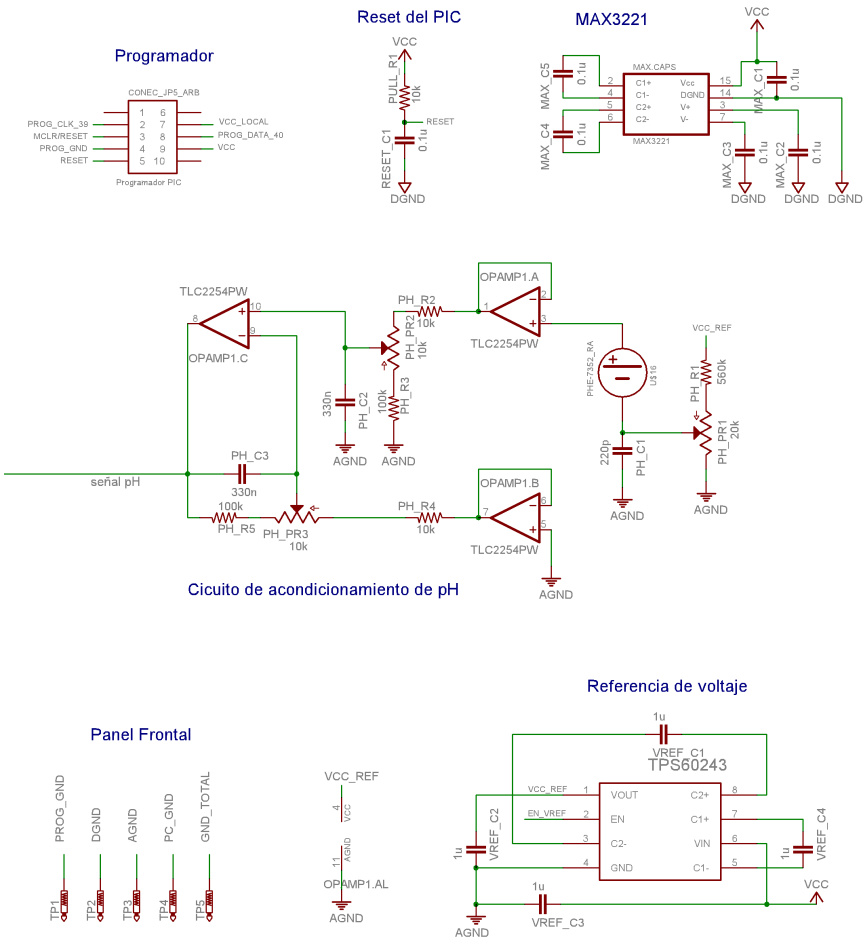



Figura B.1: Esquemático de la placa final

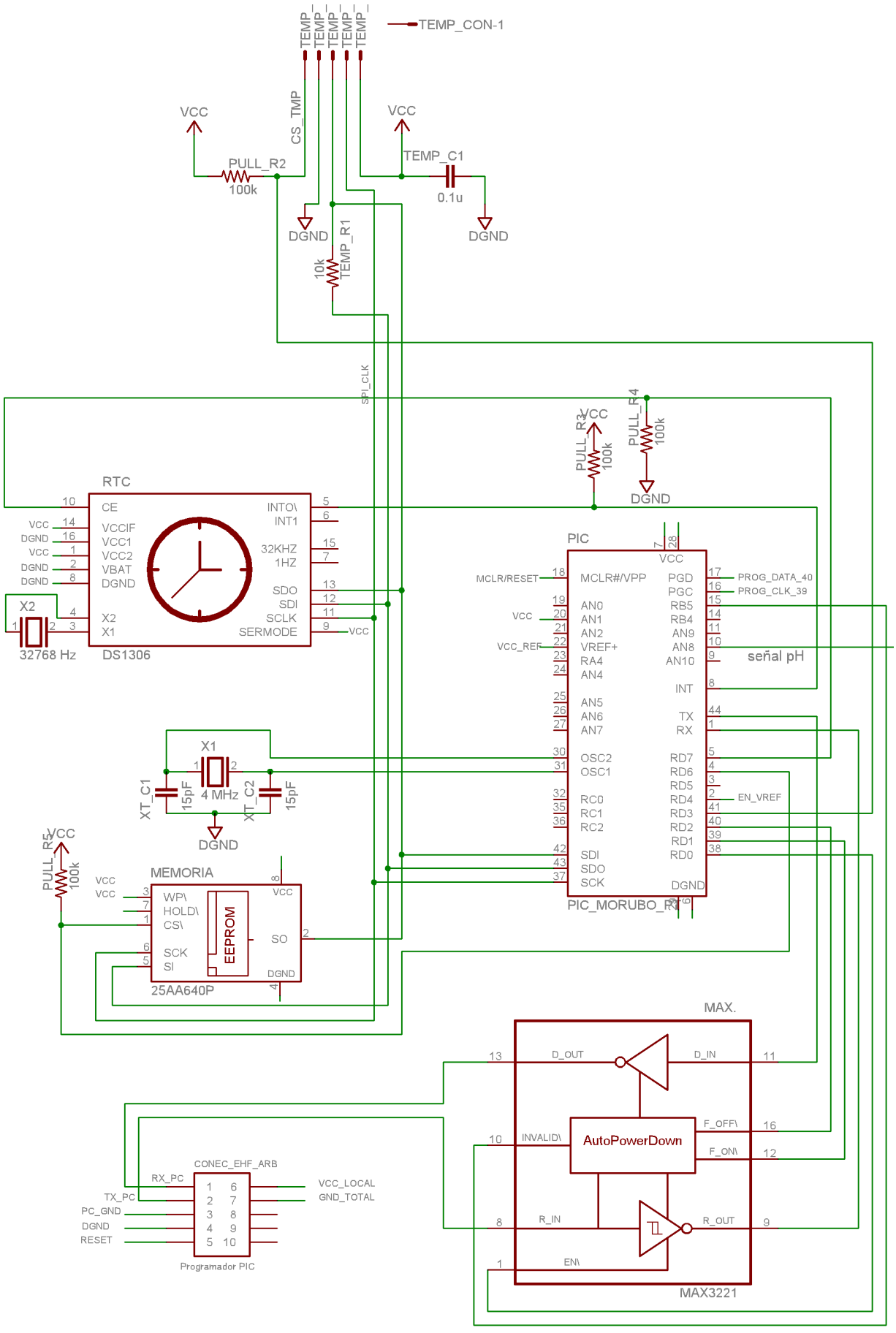



Figura B.2: Esquemático de la placa final

# Apéndice C

# Complemento de firmware

## C.1. Tabla de comandos

**Borrar Memoria**

| PC | DIR |
|---|---|
| b | b |
| | ETB |

El comando de borrado de la memoria se inicia enviando una "b" al DIR. Este responde con la "b" y cuando termina de borrar envía un ETB.

---

**Calibrar4**

| PC | DIR |
|---|---|
| 4 | 4 |
| PH H | ETB |
| PH L | |
| Temp H | |
| Temp L | |

Este comando se utiliza para escribir en la primer página los valores correspondientes a la calibración a buffer 4. Los datos a almacenar deben ir precedidos de un "4". Se envían primero la parte alta del dato de pH luego la parte baja y finalmente lo mismo con el dato de temperatura.

---

**Calibrar7**

| PC | DIR |
|---|---|
| 7 | 7 |
| PH H | ETB |
| PH L | |
| Temp H | |
| Temp L | |

Este comando es idéntico a Calibrar4 sólo que sirve para guardar el dato de buffer 7 de la calibración.

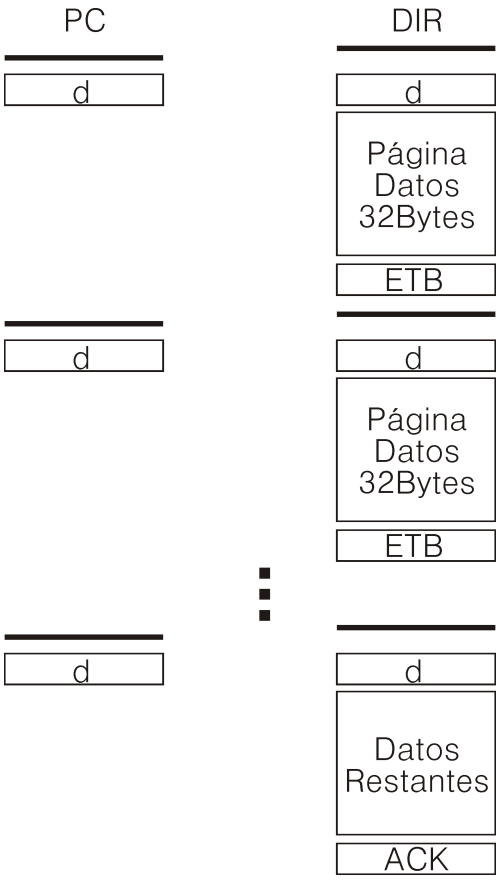
---

**Conectar**

Este comando se utiliza para verificar en el momento de la conexión que el DIR se encuentra prendido.

---

**Descarga de datos**




La descarga de datos se realiza en páginas de 32 Bytes.

Cuando se solicita descargar datos el DIR devuelve los primeros 32 bytes de los datos, si son menos los transmite todos. En ese momento el DIR queda esperando que le soliciten más datos, si se le envía una "d", se envían los datos siguientes y si se le envía cualquier otra palabra reenvía los datos anteriores.

Cada bloque enviado inicia con la "d" seguido de 32 Bytes y el ETB. Es importante marcar que quien lleva la cuenta de cuántos datos (bloques) faltan es el programa que interroga al DIR. Éste enviará todos los datos y no saldrá del comando hasta terminar.

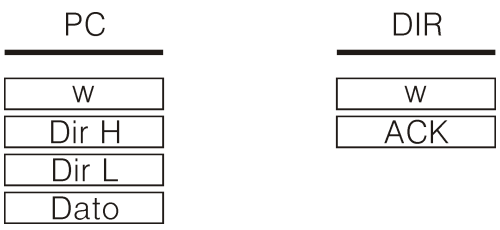
---

**Desconectar**

Con este comando se manda a modo Activo al DIR. Este responderá con el XOFF y el ACK, para luego entrar en el modo mencionado.

---

**Escribir Dato**




Cuando se quiere escribir un dato en un lugar específico de memoria, se debe enviar en orden una "w", la parte alta de la dirección, la parte baja de la dirección y el dato a escribir.

El DIR responderá con "w" y con el ETB.

---

**Estado**

| PC | DIR |
|---|---|
| a | a |
| | Página Estado 32Bytes |
| | ETB |

Este comando permite descargar las variables almacenadas en la primer página de la memoria. Cuando el PC envía una "a" el DIR le responde con "a", los 32 bytes de la primera página y el ETB.

---

**Inactivo**

| PC | DIR |
|---|---|
| e | e |
| | ACK |

La función de este comando es poner al DIR en su estado Inactivo. Funciona exactamente igual que el comando Desconectar.

---

**Leer Dato**

| PC | DIR |
|---|---|
| x | x |
| Dir H | Dato |
| Dir L | ACK |

Para leer un dato se debe especificar en orden la parte alta y la parte baja de la dirección de memoria.

Al enviar la "x" seguida de los bytes de dirección, el DIR responde con:"x", el dato y finalmente el ETB.

---

**Medir**

| PC | DIR |
|---|---|
| m | m |
| | PH H |
| | PH L |
| | Temp H |
| | Temp L |
| | ETB |

Este comando toma un dato y lo envía al PC. Se utiliza básicamente en Medida Continua. Al recibir la "m" el DIR responde con la misma letra y luego los datos en el orden en que se guardarían en la memoria.

---

**Setear Hora y Alarma**

| PC | DIR |
|---|---|
| h | h |
| U sec | ETB |
| D sec | |
| U min | |
| D min | |
| U hora | |
| D hora | |
| Día sem | |
| U día | |
| D día | |
| U mes | |
| D mes | |
| U año | |
| D año | |
| | |
| U sec | H |
| D sec | ETB |
| U min | |
| D min | |
| U hora | |
| D hora | |
| Día sem | |
| Muestreo | |

Este comando configura la hora del sistema y el momento de la primer medida. Se deben enviar la hora y la fecha por dígitos.

Luego de enviar la "h" y la hora se debe esperar a que el DIR envíe el ACK para enviar la alarma, cuando el DIR termina envía el ETB.

La fecha y la hora se envían separando los dígitos de unidades y decenas, D-xxx para las decenas y U-xxx para las unidades, estos dígitos son un valor decimal de una cifra. Por ejemplo para setear 14:05:00 del viernes 14 de Abril del 2006 la secuencia de datos es la siguiente:

0-0-5-0-4-1 (4∗)-4-1-4-0-6-0

(∗) El día de la semana comienza con un 0 el lunes.

**Verificar Memoria**

| PC | DIR |
|---|---|
| c | c |
| | Estado |
| | ETB |

Con este comando se verifica la integridad de la memoria. Sólo se puede utilizar una vez que la memoria fue borrada.

Si el dato devuelto por el DIR es una "j" significa que la memoria pasó la verificación y si es un ∗ significa que no.

## C.2. Tabla ASCII

| Dec | Oct | Hex | Binary | Value |
|---|---|---|---|---|
| 006 | 006 | 006 | 00000110 | ACK Reconocimiento |
| 017 | 021 | 011 | 00010001 | XON Conectar |
| 019 | 023 | 013 | 00010011 | XOFF Desconectar |
| 023 | 027 | 017 | 00010111 | ETB Fin de transmición del Bloque |
| 042 | 052 | 02A | 00101010 | $*$ Verificación de memoria fallida |
| 052 | 064 | 034 | 00110100 | 4 Calibración buffer 4 |
| 055 | 067 | 037 | 00110111 | 7 Calibración buffer 7 |
| 097 | 141 | 061 | 01100001 | a Estado |
| 098 | 142 | 062 | 01100010 | b Borrar memoria |
| 099 | 143 | 063 | 01100011 | c Verificar memoria |
| 100 | 144 | 064 | 01100100 | d Descarga de datos |
| 101 | 145 | 065 | 01100101 | e Inactivo |
| 104 | 150 | 068 | 01101000 | h Setear hora |
| 106 | 152 | 06A | 01101010 | j Verificación de memoria OK |
| 109 | 155 | 06D | 01101101 | m Medir |
| 119 | 167 | 077 | 01110111 | w Escribir dato |
| 120 | 170 | 078 | 01111000 | x Leer dato |

## C.3. Vector de estados

Tabla C.1: Estructura de la primer página de la memoria

| Lugar de memoria | | Contenido |
|---|---|---|
| 00<br>01 | Puntero a memoria | Parte alta<br>Parte baja |
| 02 | | Banderas no volátiles |
| 03 | | Tiempo de muestreo |
| 04<br>05<br>06<br>07<br>08<br>09<br>0A<br>0B | Datos de última calibración | pH7_HI<br>pH7_LO<br>temp_ph7_HI<br>temp_ph7_LO<br>pH4_HI<br>pH4_LO<br>temp_ph4_HI<br>temp_ph4_LO |
| 0C<br>0D<br>0E<br>0F<br>10<br>11<br>12<br>13<br>14<br>15<br>16<br>17 | Hora de inicio del experimento | Unidades de los segundos<br>Decenas de los segundos<br>Unidades de los minutos<br>Decenas de los minutos<br>Unidades de los horas<br>Decenas de los horas<br>Unidades de los días<br>Decenas de los días<br>Unidades del mes<br>Decenas del mes<br>Unidades del año<br>Decenas del año |
| 18<br>19 | Estado de batería | Parte alta<br>Parte baja |
| 1A | | Tamaño de memoria |
| 1B<br>1C<br>1D<br>1E<br>1F | Libre | |

# Apéndice D

# Planos de fabricación del encapsulado

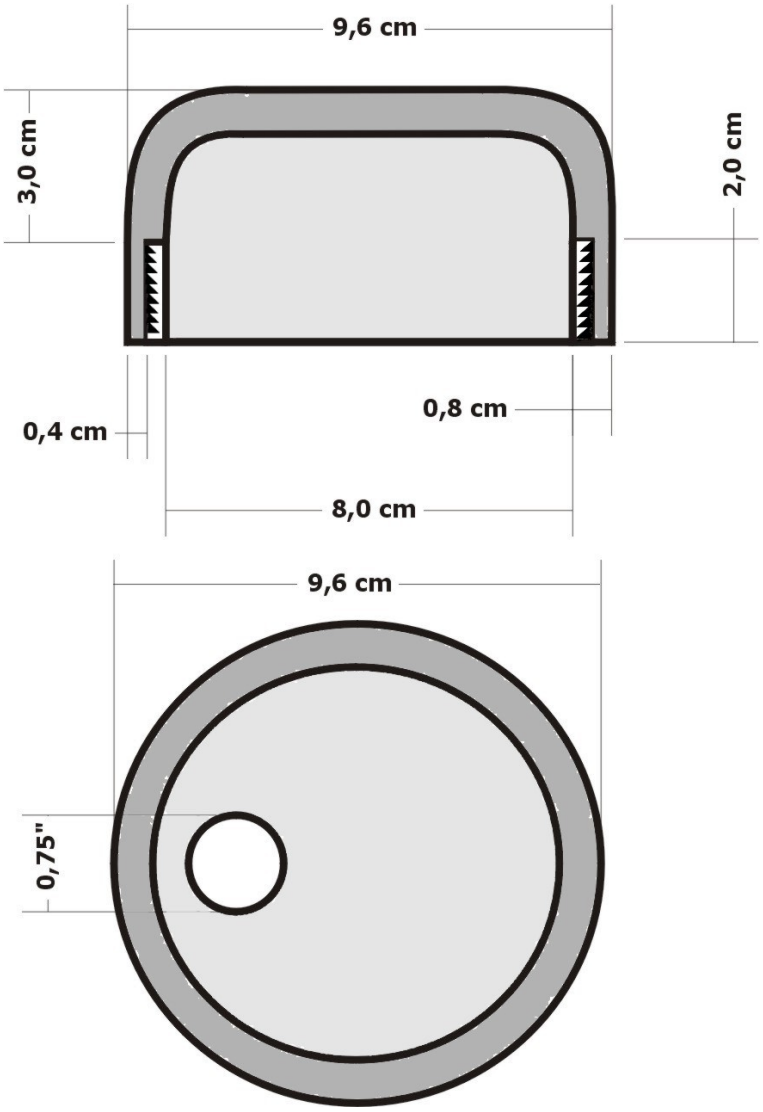



Figura D.1: Plano de las tapas del encapsulado

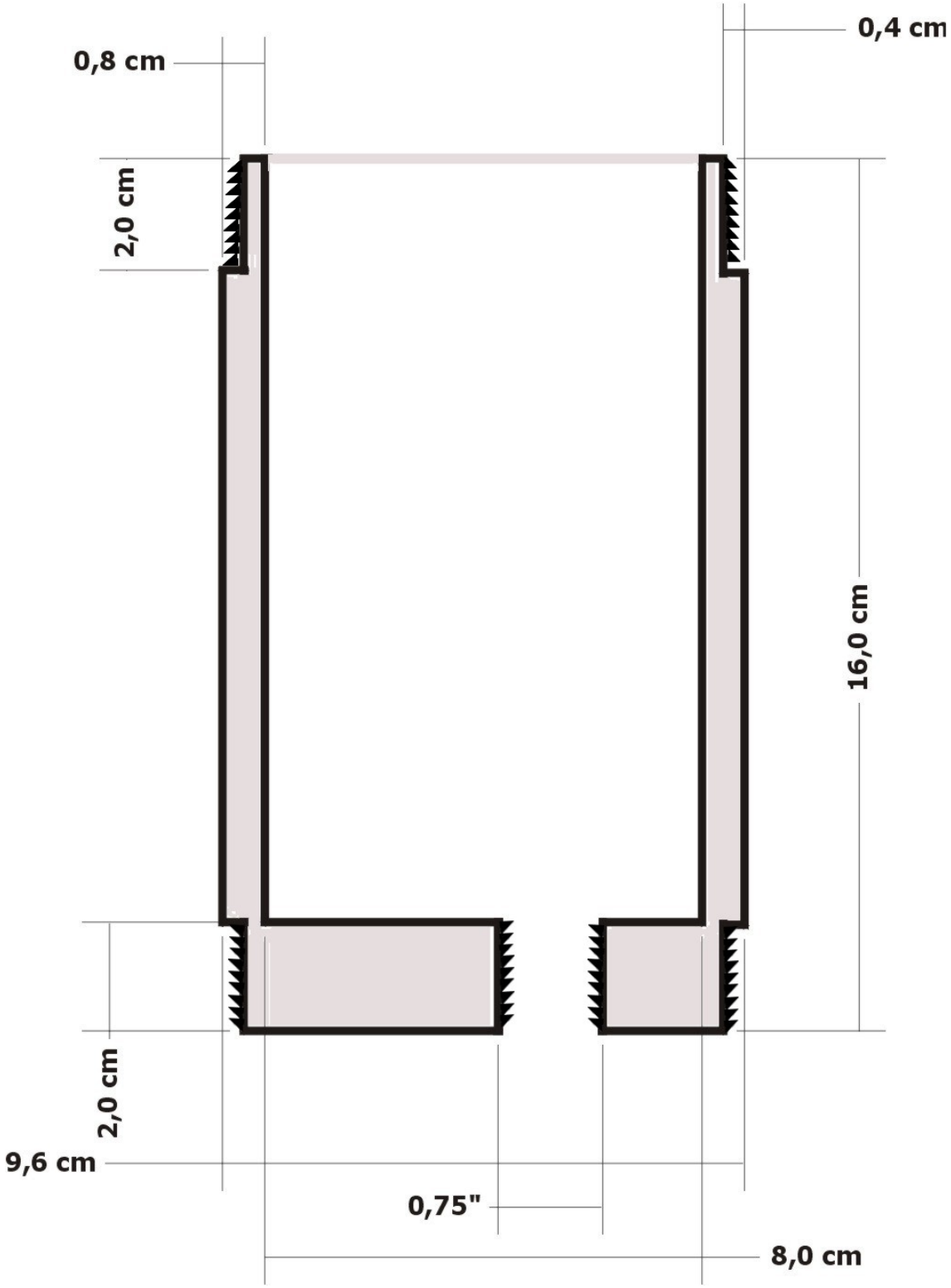



Figura D.2: Plano longitudinal del cuerpo central del encapsulado

# Apéndice E

# Gestión de proyecto y costos

En los siguientes cuadros se presentan las tareas realizadas para la concreción del presente proyecto, aquí se comparan las horas realmente dedicadas y las planificadas en el plan de proyecto. En el CD se incluye el archivo *bitacora.xls* donde puede encontrarse un detallado cronograma de todas las tareas realizadas.

## E.1. Plan de proyecto

En la tabla E.1 se observa que la horas dedicadas exceden en un 50 % a las planificadas. A continuación estudiaremos el origen de las diferencias encontradas.

De las tareas listadas en la tabla E.2 destacan: Sensor de temperatura, Sensor de pH y documentación. Estas tareas superan en un 100 % las horas planificadas en el Plan de proyecto. En lo que refiere a las dos primeras, la diferencia se debe a imprevistos en el desarrollo de la tarea, a modo de ejemplo, la sustitución de la Pt100 integrada en el sensor de pH por un sensor de estado sólido (ver sección 8.1).

Otra de las tareas subestimadas fue el Programa de Usuario, en este caso el resultado de la tarea es un software con más funciones y mejor presentación que el planificado. Si bien en este caso no se supera en un 100 %, la diferencia es significativa. De forma más general la falta de experiencia del grupo a la hora de planificar este tipo de tareas influyó en la sobre-estimación de horas.

Por último, en el plan de proyecto se omitieron las horas de planificación y coordinación. Éstas tareas aportan un total de 301 horas, lo que representan un 10 % del total.

Tabla E.1: Horas totales dedicadas y créditos acumulados

| Totales | Utilizados | Previstos |
|---|---|---|
| Horas | 3237 | 2157 |
| Horas por integrante | 1079 | 719 |
| Créditos por integrante | 71,9 | 47,9 |

## E.2. Costo del proyecto

Intentaremos aquí dar un estimativo del costo total del proyecto, para ello se consideró la planilla de costos simplificada en un modelo completo resultante.

Se consideró como elemento del costo al proceso de desarrollo. Los cargos fabriles no contemplan ni costos de local, ni otros costos como depreciación del instrumental utilizado.

En cuanto a la mano de obra la tabla E.3 muestra la distribución de horas utilizadas.

En el caso de los estudiantes se consideró una remuneración equivalente a un ingeniero del escalafón más bajo de ANTEL, lo que equivale aproximadamente a $US\$\,6,5$ por hora.

Tabla E.2: Horas dedicadas vs horas previstas

| Tareas | Horas utilizadas | Horas previstas |
|---|---|---|
| Sensor de temperatura | 143 | 52 |
| RTC | 92 | 80 |
| Electrodo pH | 388 | 236 |
| PIC y almacenamiento | 403 | 144 |
| Placa de desarrollo | 220 | 296 |
| Estimación de incertidumbre | 25 | 16 |
| Protocolo RS232 | 172 | 195 |
| Encapsulado | 62 | 142 |
| Estudio del rumen | 32 | 40 |
| Placa final | 100 | 76 |
| Programa de usuario | 311 | 160 |
| Validación | 200 | 288 |
| Planificación | 301 | 0 |
| Documentación | 788 | 378 |
| Presentación | – | 54 |
| Total de horas | 3237 | 2157 |

| Concepto | Horas |
|---|---|
| Estudiantes | 3237 |
| Tornero | 10 |

Tabla E.3: Horas hombre

La materia prima no incluye las muestras gratis que se trajeron del exterior pero si algunos gastos por trabas aduaneras.

Finalmente se debe aclarar que debido a que se trató de un desarrollo de un único proyecto, todos los costos se consideraron directos.

Tabla E.4: Planilla de costos del desarrollo

| Concepto | Costo(dólares) |
|---|---|
| Materia prima | 563 |
| Mano de Obra | 21040,5 |
| Cargos Fabriles | 150 |
| Total | 21753,5 |

## E.3. Costo de producción

En la tabla E.5 se presentan los costos aproximados de producción por unidad, estos valores se refieren a los precios FOB de los componentes del DIR en los Estados Unidos.

Tabla E.5: Lista de precios FOB en Estados Unidos

| parte | cantidad | package | Precio por unidad | Precio total |
|---|---|---|---|---|
| C 0.1u | 12 | | 0,019 | 0,228 |
| C 220p | 1 | | 0,019 | 0,019 |
| C 330n | 1 | | 0,019 | 0,019 |
| C 15p | 2 | | 0,019 | 0,038 |
| R 10k | 4 | | 0,054 | 0,216 |
| Preset 10k | 2 | | 2,710 | 5,420 |
| Preset 20k | 1 | | 2,710 | 2,710 |
| R 56k | 1 | | 0,054 | 0,054 |
| R 100k | 6 | | 0,054 | 0,324 |
| 25AA640 | 1 | PDIP08 | 1,200 | 1,200 |
| TLC2254C | 1 | TSSOP14 | 1,780 | 1,780 |
| RTC DS136 | 1 | PDIP16 | 2,532 | 2,532 |
| PHE-7353 | 1 | | 140,000 | 140,000 |
| LM95071 | 1 | | 2,060 | 2,060 |
| BNC | 1 | | 2,790 | 2,790 |
| EHF | 1 | | 0,064 | 0,064 |
| TPS60243 | 1 | TSSOP8 | 2,590 | 2,590 |
| Test pad | 5 | | 0,302 | 1,510 |
| L06p | 1 | | 0,302 | 0,302 |
| PIC16LF777 | 1 | TQFP44 | 9,300 | 9,300 |
| Conector JP5 | 1 | | 0,302 | 0,302 |
| X 4MHz | 1 | | 0,580 | 0,580 |
| X 32768 Hz | 1 | | 0,270 | 0,270 |
| Cables ensamblados | 3 | | 2,000 | 6,000 |
| Llave | 1 | | 0,600 | 0,600 |
| Botón | 1 | | 0,500 | 0,500 |
| Conector DB9 | 1 | | 0,600 | 0,600 |
| Soporte pilas | 1 | | 0,500 | 0,500 |
| Encapsulado | 1 | | 60,000 | 60,000 |
| Placas | 1 | | 8,330 | 8,330 |
| Total | | | | 250,838 |

Para pensar en una producción en Uruguay se deberán tener en cuenta los costos de importación e impuestos, además de los costos fabriles de producción, licencias de software, entre otros.

# Bibliografía


[BAT05] BAT. pH theory and measurement. *www.bat4ph.com/bat/pdf_files*, 2005.

[Ber70] Piet Bergvlet. Develop of an ion-selective solid state device for neuro-physiological measurements. *IEEE Tr. Biomedical Engineering*, 17(1):70–71, January 1970.

[Ber03] Piet Bergvlet. Isfet, theory and practice. *IEEE Sensor Conference Toronto*, October 2003.

[Bro74] P. Brokaw. A simple three-terminal IC bandgap reference. *IEEE J. Solid-State Circuits*, 9(6):388–393, December 1974.

[Ceb00] Fco. Javier Ceballos. *Curso de Programación de Visual Basic 6.* Alfaomega, 1 edition, 2000.

[Che98] K.L. Cheng. Explanation of misleading Nernst slope by Boltzmann equation. *Microchemical Journal*, 59(3):457–461, July 1998.

[Cig04] Lyl Ciganda. Electrodos para medir pH. *XIII Seminario de Ingeniería Biómedica, NIB-IIE*, 2004.

[DSM06] DSM. Hoja de datos de CESTILENE HD 500. *www.quadrantplastics.com/spaans/Cestilene.asp*, January 2006.

[Ele95] B&B Electronics. Tips for using port powered converters. *Technical Article Nº 2*, May 1995.

[Eme01] Emerson. The theory of pH measurement. *www.emersonprocess.com/raihome/documents*, August 2001.

[ISO95] ISO. *Guide to expression of uncertainty in mesurement*, 1995.

[Max01] Maxim. IC temperature sensors find the hot spots. *http://www.maxim-ic.com/appnotes.cfm/appnote_number/*689, Nota de Aplicación:689, January 2001.

[MCL+] J. Molina, W. Calleja, M. Landa, P. Alarcón, and A. Diaz. Fabrication, packaging and characterization of isfet's.

[MIC97a] MICROCHIP. PIC16F7X7 data sheet. *www.microchip.com*, 1997.

[MIC97b] MICROCHIP. PICmicro Mid-Range MCU Family Referente Manual. *www.microchip.com*, 1997.

[Pab04] Pablin. Programador PIC. *www.pablin.com.ar*, 2004.

[Sem] National Semiconductor. Temperature sensor handbook. *www.national.com/appinfo/tempsensors/files/temphb2.pdf*#page = 1.

[Sem86] National Semiconductor. LM34/LM35 Precision monolithic temperature sensors. *http://www.national.com/an/AN/AN-460.pdf#page*=1, Nota de Aplicación:460, October 1986.

[Sem05] National Semiconductor. LM95071. SPI/MICROWIRE 13-bit plus sign temperature sensor. *http://www.national.com/pf/LM/LM*95071.*html*, Hoja de Datos, February 2005.

[Slo02] Daniel Slomovitz. Ejemplo de cálculo de incertidumbres. *Material del curso de Medidas Eléctricas, IIE*, 2002.

[SSGS06] Ran Shaham, Rachel Shemesh, Alon Gendel, and Gal Shaham. Rs-232. *http://www2.rad.com/networks/1995/rs232/rs232.htm*, January 2006.

[SW89] Skoog and West. *Química analítica*, chapter 13, pages 352–365. McGraw-Hill, 1989.

[Wik06a] Wikipedia. Resiliencia. *http* : *//es.wikipedia.org/wiki/Resiliencia*, January 2006.

[Wik06b] Wikipedia. Temperature measurement. *http* : *//en.wikipedia.org/wiki/Temperature_measurement*, January 2006.