

Anubis: Un sistema de monitoreo del rumen bovino.

J.Oreggioni¹, J.Curto¹, M.Cebey¹, P.Aguirre¹ y P.Chilibroste²

¹ Instituto de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. Julio Herrera y Reissig 565, Montevideo, Uruguay.

² EEMAC, Facultad de Agronomía, Universidad de la República. Ruta 3 km 363, Paysandú, Uruguay.

* Corresponding author: Julián Oreggioni, +598(99)132282, juliano@cei.fing.edu.uy

Abstract: A pH and temperature sensing and recording device (Anubis) is presented. This device was designed to monitor cow's rumen in order to better understand complex interactions between milk cows and their food in order to improve their productivity. The biological environment constrained aspects of the designing process such as the power consumption and packaging. A low power biological compatible prototype powered by two AA batteries was built and tested inside an actual milk producing cow. A software tool was also developed to facilitate the device configuration as well as the analysis of the collected data. Experimental analysis showed that pH ranging from 4 to 7 could be measured with ± 0.1 pH precision, whereas temperature could be measure with $\pm 0.05^\circ\text{C}$ precision.

Keywords: pH, temperature, milk cows, low power

Introducción

1.1 Motivación y descripción

El pastoreo es la principal fuente de alimentación de las vacas lecheras en los sistemas de producción en Uruguay. Dicho sistema presenta varias restricciones cuando se lo compara con la producción alcanzada en sistemas estabulados. En especial, no logra sostener altas producciones de leche, las cuales son factibles de ser alcanzadas con el potencial genético disponible en nuestro país.

Una mejor comprensión de las interacciones entre las vacas y su alimento es esencial para contribuir al desarrollo de sistemas pastoriles más eficientes en la utilización de los recursos disponibles, más rentables y menos dependientes de insumos externos. Monitorear las condiciones internas del rumen de la vaca aporta información relevante para entender estas interacciones, brindando elementos para modificar la alimentación e intervenir en la producción de leche.

Anubis es un dispositivo que integra un sensor de pH de vidrio industrial y un sensor de temperatura de estado sólido, con el fin de medir y almacenar continuamente la temperatura y el pH del rumen de una vaca fistulada, para luego visualizar en un PC los datos recabados.

Anubis introduce cambios sustanciales respecto a la metodología de monitoreo actual: permite un muestreo continuo, es menos invasivo y facilita los procedimientos.

Si bien Anubis satisface una carencia que existe en el ámbito de la investigación agronómica, su adaptación para la producción primaria sería de alto impacto. [1]

1.2 Trabajos relacionados

Hasta el momento, no se pudo encontrar a nivel comercial, un dispositivo de las características de Anubis. A nivel académico, se encontraron dos proyectos similares.

En la Swiss Federal Research Station for Animal Production, un grupo a cargo de la Dra. Frigga Dohme, ha desarrollado un dispositivo de características semejantes (ver [2]). Asimismo se ha tomado conocimiento de la existencia del desarrollo de un dispositivo con similares objetivos en el Centre de Recherche INRA de Francia.

1.3 Requerimientos

El objetivo general de este trabajo consistió en diseñar y construir el prototipo de un dispositivo que fuese capaz de sensar continuamente la temperatura y el pH del rumen de una vaca fistulada¹.

El dispositivo debía ser capaz de tomar muestras de pH y temperatura, con una precisión de 0.1 pH y 0,1 °C en cada caso, con un intervalo mínimo entre muestras de 5 minutos y una autonomía mínima de 72 horas.

1.4 Solución propuesta

Anubis consta de dos partes (ver Figura 1): El Dispositivo Intra-Rumial (DIR) es el que se encarga de adquirir los datos, almacenarlos y transmitirlos al exterior del rumen; y un programa en un PC llamado AnubisLAB que recibe los datos del DIR, los procesa y los presenta al usuario de forma amigable.

¹ Es una operación quirúrgica en la que se realiza un orificio en el costado de la vaca, de modo que el rumen queda accesible desde el exterior mediante un tapón.

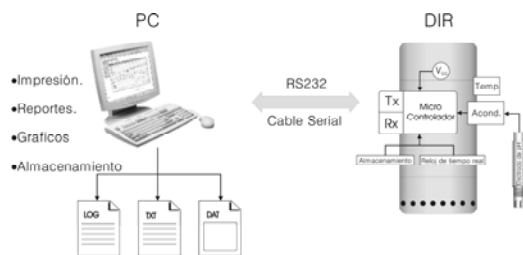


Figura 1: Esquema principal de Anubis

1.5 Criterios generales de diseño

Los requerimientos de Anubis imponen un diseño orientado al bajo consumo. Esta característica es conveniente en términos de eficiencia en el uso de recursos limitados, como la energía en un sistema autónomo, y es muy deseable pensando en futuros desarrollos del sistema.

Anubis funcionará principalmente en el campo, con lo cual su fuente de alimentación no puede depender de baterías de difícil acceso. Es así que el diseño se orientó a trabajar con dos pilas AA. Anubis deberá garantizar la integridad y la confiabilidad de los datos en todos los niveles de su diseño.

Materiales y Métodos

1.6 Sensor de pH

Los procesos biológicos y químicos más importantes probablemente son los que tienen lugar en disolución acuosa y el pH es un parámetro fundamental para la caracterización de las distintas reacciones químicas que tienen lugar entre las sustancias disueltas en el agua.

Se evaluaron dos tecnologías diferentes para la medición de pH que ofrecen una precisión adecuada a los requerimientos de la aplicación: sensor de vidrio e ISFET (Ion Selective Field Effect Transistor).

El sensor de ISFET se encuentra 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 chip en el cual está basado el sensor de ISFET no está a la venta por separado.

El sensor de vidrio es un sensor electroquímico basado en un Electrodo de Ion Selectivo (ISE por sus siglas en inglés). Es un estándar a nivel industrial y de laboratorio. Su principio de funcionamiento se conoce desde principios de siglo XX, su uso está generalizado y sus resultados ampliamente validados, al punto que el patrón de la medida de pH se basa en un electrodo de vidrio.

En la realización de estudios prologados, la deriva que presentan ambas tecnologías es un parámetro crítico. Como la característica pH-Voltaje va variando con el tiempo es necesario calibrar, y por lo tanto suspender el estudio, para mantener las medidas dentro de una precisión aceptable.

El ISFET por un lado es mucho más chico que el sensor de vidrio, característica muy deseable para estudios invasivos. Por otro lado, los sensores de vidrio son más baratos, de fácil acceso y están consolidados. Por estos motivos se escogió trabajar con un sensor de vidrio.

Para la elección del sensor adecuado se analizaron los siguientes aspectos: ángulo de orientación, costo y dimensiones, que soportase un funcionamiento continuo y que trabajase en los rangos de pH necesarios (entre 4 y 7).

El sensor de pH utilizado es el PHE-7353 de Omega. En la Tabla 1 se presentan sus principales características:

Tabla 1: Principales características del PH-7353 de Omega

Rango pH	0 a 14
Rango temperatura (°C)	0 a 80
Rango presión (psi)	0 a 100
Precisión	0, 1% sobre fondo de escala
Impedancia de salida (MΩ)	150
Tiempo de respuesta (s)	10
Deriva (mV/semana)	2
Dimensiones (mm)	152(L) x 22(D)
Tipo de Referencia	Doble juntura de KNO ₃ y KCl – AgCl
Ángulo de orientación	Cualquiera
Costo (USD)	150

1.7 Sensor de temperatura

Para la elección del sensor adecuado para la presente aplicación se analizaron 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 y complejidad para integrar el sensor al DIR.

Se debía asegurar una incertidumbre de 0,1 °C entre los 36 y 41°C, con lo cual era necesario realizar una calibración. Esto hacía que no fuera conveniente utilizar los sensores que traen integrados los sensores de vidrio de pH ya que éstos se cambian periódicamente y cada vez que ello ocurriera habría que recalibrar el sensor de temperatura.

La oferta de sensores de estado sólido es muy amplia. Muchos de estos ofrecen una salida digitalizada, tienen 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 una precisión de 1 °C.

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

El sensor seleccionado es el LM95071 de Nacional Semiconductor. Se trata de un sensor de bajo consumo, alta resolución (14 bits), con salida digital a través del protocolo SPI² y disponible en un empaque muy pequeño (SOT23 de 5 pines).

Tabla 2: Principales características del LM95071 de Nacional Semiconductor

Voltaje de alimentación (V)	2,4 a 5,5
Consumo típico en operación (µA)	280
Consumo típico en modo "shutdown" (µA)	6
Precisión (entre 0°C y 70°C)	1 °C
Resolución (°C)	0,03125
Tiempo típico de conversión	0,13 s
Costo (USD)	2

1.8 DIR: Dispositivo Intra-Rumial

El DIR está constituido por un microcontrolador PIC de Microchip como elemento central, el cual se comunica con los periféricos de medida y almacenamiento externo mediante un protocolo serial SPI.

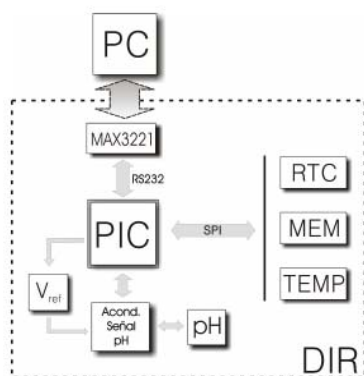


Figura 2: Diagrama de bloques del DIR

Entre los periféricos se encuentra un reloj de tiempo real (RTC), con el que se mantiene la base temporal y se programan los momentos en los que se toman las medidas. Para el almacenamiento de datos se utilizó una memoria SPI de Microchip.

El circuito de adquisición de pH es esencialmente un amplificador de instrumentación, diseñado para trabajar con alimentación asimétrica y presentar una resistencia de entrada de 1 TΩ, necesaria para manejar la alta impedancia de salida del sensor de pH. Además se implementó un filtro pasabajos para

² Serial Protocol Interface. Protocolo desarrollado por Motorola

eliminar los ruidos que pudiesen ingresar por los puntos de alta impedancia.

El firmware cargado en el microcontrolador fue diseñado para que el DIR trabaje en tres modos: Conectado, Activado y Suspendido.

En el modo Conectado el DIR intercambia información con el PC para descargar datos y ser configurado utilizando el protocolo RS232, esta comunicación se realiza mediante un intérprete de comandos lo que permite acceder al manejo del DIR sin necesitar un software específico, alcanzando con una terminal para el puerto serial.

Cuando se encuentra en el modo Activado, el DIR espera en bajo consumo hasta que el RTC marca el tiempo de tomar medidas. En cualquier otro caso el DIR se halla en modo Suspendido.

1.9 Encapsulado

El encapsulado del DIR debía adecuarse a las condiciones internas del rumen: una mezcla acuosa en permanente movimiento. Para ello, debía ser hermético y biocompatible tanto en su forma y tamaño (largo mínimo 15,2 cm y un diámetro máximo de 13 cm), como en los materiales utilizados.

En función de estos requerimientos se adoptó una forma cilíndrica de 24 cm de largo y 9,6 cm de diámetro con los vértices suavizados. Como se puede apreciar en la Figura 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.

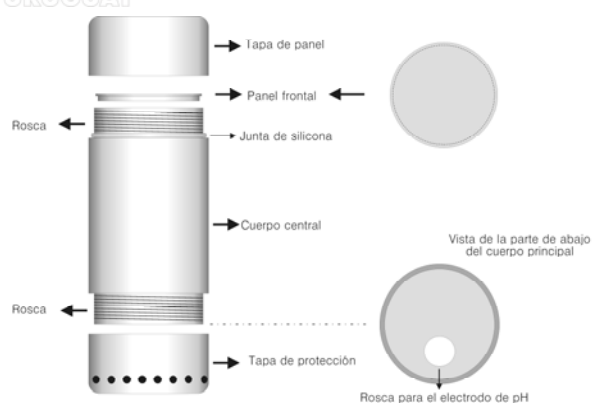


Figura 3: Esquema del encapsulado del DIR

Dentro del cuerpo central van colocados la electrónica, el sensor de pH y el sensor de temperatura.

El material escogido fue APM (Polímero de Alto Peso Molecular) por sus muy buenas características, totalmente compatibles con la aplicación.

El sensor de temperatura es un chip, y no puede estar en contacto con agua y tampoco debe quedar expuesto a humedad. Por estos motivos se lo encapsuló en resina poliéster y la salida 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.

1.10 Software de Usuario.

AnubisLAB es el software desarrollado para procesar los datos una vez extraído el DIR del rumen. Éste es capaz de descargar, procesar y almacenar los datos extraídos.

AnubisLAB permite la configuración del DIR, la calibración del sensor de temperatura y visualizar las medidas en tiempo real.

Resultados

1.11 Consumo

El consumo del DIR se midió para los diferentes modos de funcionamiento. Para esto se utilizó un picoamperímetro (HP4155 de Hewlett Packard) del IIE.

A partir de estas mediciones, considerando un uso estándar del sistema, se estimó que funcionaría (con dos pilas AA alcalinas) durante aproximadamente 5 años.

El mayor consumo se registra cuando se conecta el DIR al PC ya que la adaptación de niveles lógicos se hace a costa de la batería del sistema.

1.12 Caracterización del sensor temperatura

Como se mencionó en la sección 1.7, el sensor de temperatura no brinda la precisión requerida por la aplicación. Para solucionar este problema se lo comparó con un sensor de laboratorio perteneciente al IIE cuya precisión es de 5 mK. Luego se calculó una curva de corrección que se aplica en AnubisLAB a los datos obtenidos. Las medidas obtenidas se grafican en la Figura 4, donde puede observarse que la relación es lineal.

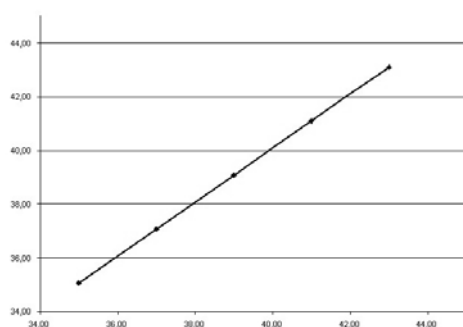


Figura 4: Caracterización del sensor de temperatura.

Con este sistema se logra una incertidumbre de $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$ con factor de cobertura 3.

1.13 Caracterización del sensor de pH

Para caracterizar el sensor de pH se lo comparó con un pH-imetro del Instituto de Ingeniería Química de

la Facultad de Ingeniería. Se calcularon las incertidumbres de los dos aparatos en diferentes puntos de la escala y el resultado fue coherente en todos los casos (ver Figura 5).

Para este sensor la incertidumbre en los extremos de la escala (pH 4 y pH 7) fue de $\pm 0,1$ pH con factor de cobertura 3, como se exigía en los requerimientos.

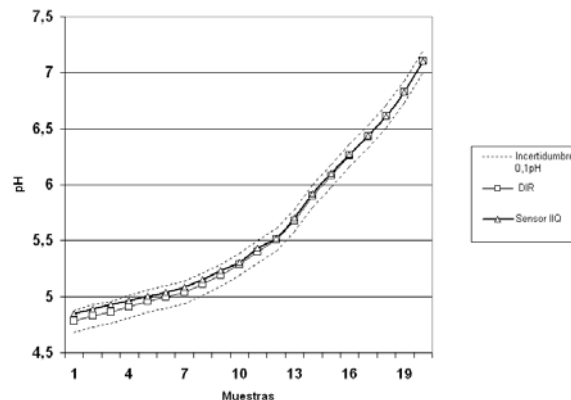


Figura 5: Caracterización del sensor de pH

1.14 Pruebas de campo

Se realizaron dos pruebas de validación en la Estación Experimental Mario Cassinoni (EEMAC) en Paysandú. 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 las gráficas de la Figura 6 se muestran los resultados obtenidos del experimento de 24 horas tanto en pH (arriba) y temperatura (abajo).



Figura 6: Datos de pH y Temperatura en el experimento de 24 horas

Discusión

Según las medidas realizadas, el consumo del DIR es excelente. Aún así, se presenta un problema si el usuario permanece mucho tiempo con el sistema conectado al PC. Para eliminar este consumo futuras implementaciones podrían utilizar el puerto USB para la comunicación con el PC.

Las gráficas de la Figura 6 permiten realizar varias observaciones. A partir de las 5 PM las vacas van al campo y pastan. 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 que se aprecia en la Figura 6 puede estar indicando el balance entre estos dos fenómenos.

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 de 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.

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 ordeño 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.

Conclusiones

Los requerimientos de incertidumbre fueron cumplidos. En particular, la incertidumbre que se asegura en la temperatura es excelente gracias a la calibración efectuada.

La autonomía depende de dos factores: el consumo y el mantenimiento que debe efectuarse al sensor de pH. El consumo depende del tipo de uso que se le de al DIR, si se utiliza correctamente el DIR puede funcionar durante años usando pilas AA alcalinas. El mantenimiento del sensor consiste en: a) la limpieza de la membrana de vidrio para evitar la sedimentación de líquido ruminal; y, b) la calibración. De la limpieza dependen el tiempo de vida útil y la precisión en la medida obtenida. Las 72 horas requeridas por la aplicación se cubren ampliamente, experimentos más largos permitirán analizar la verdadera autonomía del aparato debido a la descalibración del sensor de pH.

El tiempo de vida del sensor de pH es difícil de cuantificar ya que el mismo depende de las características de la solución donde se mide pH. Por esta razón los fabricantes no informan al respecto y

debido a la falta de experiencia previa en la medición continua de pH en el rumen bovino, no se tienen bases sólidas para realizar una estimación. A lo sumo, en base a 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 encapsulado es Bio-compatible, tiene la robustez adecuada y con la utilización de las juntas apropiadas es totalmente hermético.

El período de muestreo mínimo es de 10 segundos.

El sistema posee una gran flexibilidad a la hora de aumentar las prestaciones implementadas e introducir nuevas para medir otras variables de interés dentro del rumen.



Figura 7: Fotografía del DIR

1.15 Principales aportes

Actualmente el método utilizado para medir las variables de pH y temperatura consiste en la extracción directa de líquido ruminal por medio de una bomba de vacío manual. 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 fistula 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 fistula. 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 en la actividad cotidiana de la vaca.

Por último, 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.

1.16 Trabajo a futuro

Los resultados de las prueba de campo son muy buenos y 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.

El tamaño del sensor de pH de vidrio y la necesidad de mantenimiento periódico impiden pensar en una aplicación que tome muestras por largos períodos de tiempo. La introducción de Anubis en la producción primaria requiere de un dispositivo con un tamaño adecuado para el ingreso por vía oral y así poder utilizar vacas no fistuladas.

Agradecimientos

Los autores quieren reconocer especialmente la ayuda brindada por: Raúl Arbiza, María de los Ángeles Bruni, BUANLIR, Gabriel Cebey, Juan Carlos Cedrés, Rafael Canetti, Pedro Curto, Droguería Montevideo, EEMAC, Francisco Elizondo, Rafaella Fiorelli, Adrián Ferrari, Fiorella Haim, Guillermo Katzenstein, IIQ, Jorge Martínez, PRANASYNS, Conrado Rossi, Fernando Silveira.

Referencias

- [1] M. Cebey, J. Curto, J. Oreggioni, P. Aguirre, P. Chilbroste. "Monitoreo del rumen bovino". Tesis de grado, IIE, Facultad de Ingeniería, UdelaR, Montevideo, Uruguay, Marzo 2006.
- [2] C. M. Graf, M. Kreuzer y F. Dohme. "Effects of Supplemental Hay and Corn Silage Versus Full-Time Grazing on Ruminant pH and Chewing Activity of Dairy Cows". Journal of Dairy Science, 2005. <http://jds.fass.org/>
- [3] T. Mutsvangwa - Research Associate/University of Guelph; T. Wright - Acting Dairy Cattle Nutritionist/OMAF. "Sub-Acute Ruminant Acidosis (SARA) in Dairy Cows". OMAFRA 2003. <http://www.omafra.gov.on.ca/english/livestock/dairy/facts/03-031.htm>

