



# BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ciencias de la Electrónica

Maestría en Ciencias de la Electrónica,  
Opción Automatización

“Desarrollo de un sistema de monitoreo intra-rumial en tiempo real de variables fisiológicas para ser empleado en estudios sobre adaptación bovina ante el cambio climático en la ganadería tropical del sureste mexicano”

TESIS

Tesis que para obtener el título de:  
Maestro en Ciencias de la Electrónica, opción Automatización

Presenta:  
Ingeniero Alma Nayelli Ibarra Méndez\*

Asesores:  
Dr. Pedro Javier García Ramírez- Instituto de Ingeniería, UV  
Dr. Sergio Vergara Limon- FCE, BUAP

## **Agradecimientos**

*Agradezco a la vida porque puso en mi camino este gran reto el cual hoy puedo concluir y agregar con gran satisfacción a las experiencias de mi vida.*

*Principalmente agradezco a mis amados padres, quienes desde el comienzo me alentaron y apoyaron en esta nueva etapa, porque ellos me han enseñado con su ejemplo y su amor a poder darle frente a la vida, por siempre tener las palabras de aliento en el momento correcto, porque mis logros son también sus logros.*

*Así mismo, agradezco a mis hermanos por su paciencia y comprensión. A mis abuelos Ignacio, Demetria y Onésimo, a mis tíos Bety, Marco y Luz, a mis primos (as) porque todos siempre me han dado su respaldo y sonrisas de apoyo, igualmente sé en mi corazón que mi abuelita Evelia desde donde este, está orgullosa de mi.*

*Agradezco sinceramente a las personas que han compartido conmigo valiosas vivencias en esta etapa de mi vida, agradezco mi compañera Adilene, a mis compañeros Luis, Oscar, Francisco, Ricardo y Alfredo por su amistad y apoyo tanto en la vida académica como en la vida diaria.*

*Agradezco a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, por proporcionarme esta valiosa oportunidad de desarrollo personal y académico, también agradezco a los profesores y compañeros que fueron una parte fundamental de mi desarrollo personal y académico, por las grandes lecciones que quedarán en mi memoria ya que me han enriquecido mi perspectiva para mi desarrollo profesional, personal y académico.*

*Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por su invaluable apoyo al otorgarme la beca que me permitió realizar mis estudios de maestría en el programa "Maestría en Ciencias de la Electrónica".*

*De igual manera deseo expresar mi agradecimiento al Programa de Estudios sobre Cambio Climático de la Universidad Veracruzana donde tuvo inicio mi proyecto de tesis, así como a las personas involucradas en este proyecto.*

*Muchas Gracias.*

## Resumen

El objetivo del presente trabajo de tesis fue el desarrollar un sistema de medición de temperatura y pH, con la finalidad de conocer la capacidad de adaptación y resiliencia de ganado circunscrito a un ambiente de reducido confort.

Dicho prototipo se presenta en forma de un bolo que tiene una forma cilíndrica, con el fin de que al ser introducida será una herramienta de apoyo para que especialistas en ciencias biológico-agropecuarias puedan generar algún tipo de diagnóstico en relación con el bienestar animal, y con ello, considerar acciones preventivas o correctivas ante los cambios climáticos.

El pH del rumen de las vacas es controlado por procesos bioquímicos establecidos para mantener una población de bacterias capaz de digerir una dieta fibrosa voluminosa; entre las principales alteraciones funcionales de los bovinos asociadas al estrés térmico ha sido reconocida la disminución del consumo voluntario de alimentos.

El sistema de medición de temperatura desarrollado cuenta con una precisión de  $0.1479^{\circ}\text{C}$ , se utilizó un sensor de la familia LM35, el cual proporciona una salida lineal así como de una resolución de  $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$  en un rango de  $-55^{\circ}\text{C}$  a  $150^{\circ}\text{C}$ .

El sistema de medición de pH está construido por un electrodo combinado, utilizando soluciones buffer a pH4, pH7 y pH10 y el electrodo combinado opera en un rango de 0-14pH.

Para la adquisición, procesamiento, almacenamiento y transmisión de los datos se escogió trabajar con un Arduino Yun debido a que este incluye la tecnología WiFi™ y su tamaño encaja en el diseño del bolo.

Se consideró pertinente emplear el estándar de comunicación inalámbrica WiFi™ (Wireless Fidelity), ya que entre sus bondades resalta el ser una red de bajo costo. Esta es una tecnología que va en ascenso rápidamente dado que, su principal característica es la portabilidad de la información, esto es, una facilidad de acceso desde casi cualquier punto a la información de interés además de no requerir de línea de visión o un cableado para realizar la comunicación.

El bolo es una carcasa que protege del ambiente bioquímico a la electrónica diseñada y a los sensores.

Las pruebas de campo se realizaron en el rancho ganadero de La Posta Zootécnica "Torreón del Molino" de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootécnica de la Universidad Veracruzana. El animal de estudio es una vaca de la raza Cebú, a la cual previamente se le realizó una cirugía de ruminotomía inmediatamente seguida por la colocación de una fístula ruminal, dicha fístula tiene un diámetro de 10.8cm, motivo por el cual el bolo fue diseñado con un diámetro de 9cm. Se realizaron tres pruebas al sistema: la primera prueba se realizó en laboratorio donde se corroboró la transmisión de la señal y el almacenamiento de los datos, se obtuvo el porcentaje de error del sistema y el rendimiento de la batería; la segunda prueba con una simulación de rumen (Agua forraje) en la cual los médicos veterinarios variaron el pH y temperatura para comparar el comportamiento del sistema; finalmente la tercera prueba se realizó directamente en el rumen de la vaca, igualmente manejada por el personal veterinario del rancho, quienes introdujeron el bolo; la transmisión y almacenamiento de datos se realizó a una distancia de 8 metros.

## Contenido

|   |     |
|---|-----|
| Resumen.....  | 3   |
| INTRODUCCIÓN GENERAL .....  | 9   |
| Antecedentes .....  | 9   |
| OBJETIVO PRINCIPAL.....   | 10  |
| OBJETIVOS PARTICULARES.....   | 10  |
| CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y FISIOLÓGÍA BOVINA .....                                  | 12  |
| 1.1 Vulnerabilidad al cambio ambiental global.....  | 12  |
| 1.2 Producción, vulnerabilidad y estrés en el ganado bovino .....                                       | 12  |
| 1.3 Anatomía y fisiología del rumen .....   | 18  |
| 1.4 Conclusiones.....   | 23  |
| CAPÍTULO 2 SENSORES Y COMUNICACIÓN INALÁMBRICA .....  | 24  |
| 2.1 Sensor de temperatura.....  | 24  |
| 2.2 Medición de pH y tipos de sensores.....   | 24  |
| 2.3 Sistema embebido.....   | 30  |
| Tarjeta Arduino Yun.....  | 31  |
| 2.4 Red de Área Local Inalámbrica .....   | 33  |
| 2.5 Fundamentos básicos del protocolo de transmisión .....  | 37  |
| Ajax .....  | 37  |
| JSON.....   | 38  |
| 2.6 Conclusiones.....   | 39  |
| CAPÍTULO 3 ANÁLISIS, DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA ELECTRÓNICO DE MONITOREO .....                | 40  |
| 3.1 Descripción del sistema.....  | 40  |
| 3.2 Diseño y caracterización del sistema electrónico para el monitoreo de la temperatura corporal ..... | 41  |
| 3.3 Diseño y caracterización del sistema electrónico para el monitoreo de pH ruminal .....              | 44  |
| 3.4 Fuentes de alimentación .....   | 62  |
| 3.5 Diseño y fabricación de la tarjeta de circuito impreso .....  | 64  |
| 3.6 Diseño del bolo .....   | 68  |
| 3.7 Conclusiones.....   | 73  |
| CAPÍTULO 4 DISEÑO DEL FIRMWARE Y SOFTWARE DE MONITOREO .....  | 74  |
| 4.1 Diseño del firmware del sistema.....  | 74  |
| 4.2 Diseño de la interfaz de comunicación .....   | 76  |
| 4.3 Relación entre el hardware y el software.....   | 78  |
| 4.4 Conclusiones.....   | 80  |
| CAPÍTULO 5 PRUEBAS Y RESULTADOS .....   | 81  |
| 5.1 Resultados de la caracterización de temperatura .....   | 81  |
| 5.2 Resultados de la caracterización de pH .....  | 82  |
| 5.3 Resultados del rendimiento de la batería .....  | 85  |
| 5.4 Almacenamiento de datos .....   | 86  |
| 5.5 Resultados de las pruebas de campo.....   | 87  |
| 5.6 Conclusiones.....   | 96  |
| CONCLUSIONES .....  | 97  |
| Trabajo a futuro.....   | 97  |
| APÉNDICE A PUBLICACIÓN DE RESULTADOS.....   | 98  |
| Constancia .....  | 99  |
| Artículo.....   | 100 |
| APÉNDICE B CARACTERIZACIÓN DEL SENSOR DE PH .....   | 101 |
| REFERENCIAS.....  | 106 |



## Índice de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1 Consumo de materia seca como función de la temperatura rectal en animales mantenidos en condiciones de calor. ....  | 14 |
| Figura 1.2 Valores promedio históricos del Índice de confort de 1917 a 2008 en el municipio de Veracruz. ....  | 16 |
| Figura 1.3 Escenarios del Índice de Temperatura y Humedad mensuales normadel de Veracruz y los obtenidos con diferentes modelos climáticos. ....   | 17 |
| Figura 1.4 Relación entre pH ruminal. Producción de saliva y tiempo destinado a la rumia con la composición de la dieta. ....  | 20 |
| Figura 1.5 Tasa de fermentación de los componentes de la alfalfa en el rumen. ....   | 21 |
| Figura 1.6 Variación del pH ruminal en una vaca en lactación temprana alimentada con ración total mezclada 2 veces por día. ....   | 21 |
| Figura 1.6 Aparato digestivo de un bovino. ....  | 22 |
| Figura 2.1 Determinación gráfica del punto cero y la pendiente $UN' = \Delta mV \Delta pH$ . ....  | 26 |
| $pH0' = pH2U1 - pH1U2U1 - U2$ (2.1) ....   | 26 |
| Figura 2.2 Componentes de un electrodo de referencia. ....   | 27 |
| Figura 2.3 Componentes de un electrodo de vidrio. ....   | 28 |
| Figura 2.4 Componentes de un electrodo combinado. ....   | 29 |
| Figura 2.5 Estructura general de un MISFET canal n. ....   | 30 |
| Figura 2.6 Componentes de la tarjeta Arduino Yun. ....   | 32 |
| Figura 2.7 Interconexión interna entre los procesadores ATmega32u4 y AR9331. ....  | 32 |
| Figura 2.8 Redes inalámbricas que soportan comunicación inalámbrica a lo largo de una variedad de dispositivos de cliente. ....  | 34 |
| Figura 2.9 Estandarización del IEEE 802.11 ha llevado a un mayor desempeño. ....   | 34 |
| Figura 2.10 Una red Ad hoc inalámbrica provee conectividad a múltiples clientes dentro del rango de cada una. ....   | 35 |
| Figura 2.11 Una infraestructura inalámbrica LAN interconecta dispositivos cliente a un sistema de distribución por cable y se extiende la cobertura a través del uso de puntos de acceso. .... | 36 |
| Figura 2.12 Una WLAN unida y una separada. ....  | 37 |
| Figura 2.13 Comparación de modelos Web tradicional y Ajax. ....  | 38 |
| Figura 3.1 Diagrama a bloques del hardware implementado. ....  | 41 |
| Figura 3.2 Diagrama a bloques de medición de temperatura. ....   | 42 |
| Figura 3.3 Comparación de sensores LM35 y de Mercurio. ....  | 42 |
| Figura 3.4 Comparación de resultados después del acondicionamiento digital. ....   | 43 |
| (3. ....   | 43 |
| Figura 3.5 Circuito de acondicionamiento de Temperatura. ....  | 44 |
| Figura 3.7 Sensor ISFET 5292-10-079. ....  | 45 |
| Figura 3.8 Curvas características del Sensor ISFET 5292-10-079. ....   | 45 |
| Figura 3.9 Diagrama a bloques para la medición con el ISFET-metro. ....  | 46 |
| Figura 3.10 Esquemático utilizado como ISFET-metro. ....   | 48 |
| Figura 3.11 Sistema implementado para las condiciones: voltaje de referencia ( $V_{ref}$ ) de 0-1.5V y una corriente de drenaje fija de 100uA. ....  | 49 |
| Figura 3.12 Gráficas del circuito de caracterización donde se observa el corrimiento en pH4 y pH7. ....  | 50 |
| Figura 3.13 Diagrama a bloques de medición de pH. ....   | 51 |
| Figura 3.14 Electrodo Combinado Sensores modelo SG200C. ....   | 51 |
| Figura 3.15 Circuito Seguidor de Voltaje. ....   | 53 |
| Figura 3.16 Simulación PSPICE del Circuito Seguidor de Voltaje. ....   | 53 |
| Figura 3.17 Variación del voltaje con respecto del tiempo. ....  | 54 |
| Figura 3.18 Filtro pasa bajas activo de primer orden. ....   | 54 |
| Figura 3.19 Filtro Pasa Bajas a 0.0328Hz. ....   | 55 |
| Figura 3.20 Simulación en PSPICE del Filtro Pasa Bajas a 0.0328Hz. ....  | 56 |
| Figura 3.21 Circuito de calibración con un amplificador operacional. ....  | 57 |
| Figura 3.22 Simulación en PSPICE del circuito de calibración con un amplificador operacional. ....   | 57 |
| Figura 3.23 Rango de acoplamiento. ....  | 58 |
| Figura 3.24 Circuito de acoplamiento de rango. ....  | 59 |
| Figura 3.25 Simulación en PSPICE del circuito de acoplamiento de rango. ....   | 60 |
| Figura 3.26 Circuito de acoplamiento para la medición de pH. ....  | 61 |
| Figura 3.27 Batería LIPO Turnigy 2200MAH, 11.1V, 3S, 25C. ....   | 62 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 3.28 Diagrama electrónico del convertidor PTN78000A.....  | 63 |
| Figura 3.29 Diagrama electrónico del convertidor LM2596. ....  | 63 |
| Figura 3.30 Diagrama electrónico de las tres fuentes de alimentación.....  | 64 |
| Figura 3.31 Tarjeta PCB del hardware. a) Fuente de alimentación voltaje positivo, b) circuito de acondicionamiento de señales de sensores, c) Fuente de alimentación voltaje negativo..... | 66 |
| Figura 3.32 Fuente de alimentación voltaje positivo.....   | 67 |
| Figura 3.33 Circuito de acondicionamiento de señales de pH y temperatura. ....   | 67 |
| Figura 3.34 Fuente de alimentación voltaje negativo. ....  | 68 |
| Figura 3.35 Primer diseño del bolo a introducir en la vaca. ....   | 69 |
| Figura 3.36. Área de ubicación de los sensores.....  | 70 |
| Figura 3.37 Diseño del segundo bolo.....   | 71 |
| Figura 3.38 División interna del bolo (batería, censado, Microcontrolador y electrónica). ....   | 71 |
| Figura 3.39 Dimensiones de la tapa del bolo. ....  | 72 |
| Figura 3.40 Dimensiones de la base del bolo. ....  | 72 |
| Figura 4.1 Diagrama de flujo de funcionamiento del firmware del sistema. ....  | 75 |
| Figura 4.2. Diseño de la interfaz para el usuario. ....  | 76 |
| Figura 4.3 Bloques básicos de la página web. ....  | 77 |
| Figura 4.4 Contenido general de la página web. ....  | 78 |
| Figura 4.5 Comunicación entre la estación de trabajo y el servidor web local. ....   | 79 |
| Figura 4.6 Envío de los datos del servidor web a la estación de trabajo. ....  | 80 |
| Figura 5.1 Desempeño de la batería %/hora.....   | 86 |
| Figura 5.2 Archivo txt generado. ....  | 87 |
| Figura 5.3 Agua forraje para simulación de contenido ruminal.....  | 88 |
| Figura 5.4 a) Lectura de referencia, b) lecturas en la pantalla de usuario. ....   | 89 |
| Figura 5.5 Bolo sellado con silicón rojo. ....   | 90 |
| Figura 5.6 Prueba de transmisión previa a ser introducida en la vaca. ....   | 90 |
| Figura 5.7 Preparación de la vaca para introducirle el bolo.....   | 91 |
| Figura 5.8 Manejo de la vaca para introducir el bolo en el rumen. ....   | 91 |
| Figura 5.9 La vaca cayó dentro de una zanja. ....  | 92 |
| Figura 5.10 Inicio de captura de datos. ....   | 92 |
| Figura 5.11 Extracción del bolo.....   | 93 |
| Figura 5.12 Rendimiento de la batería en prueba de campo.....  | 95 |
| Figura 5.13 Temperaturas muestreadas en prueba de campo.....   | 95 |
| Figura 5.14 pH muestreado en prueba de campo. ....   | 96 |

## Índice de tablas

|   |    |
|---|----|
| Tabla 2.1. Escala simple de pH. ....  | 25 |
| Tabla 2.2. Especificaciones de los procesados ATmega32u4 y AR9331. ....               | 31 |
| Tabla 2.3. Comparación de estándares 802.11.....                                      | 35 |
| Tabla 3.1. Sensibilidad del sensor ISFET 5292-10-079. ....                            | 46 |
| Tabla 3.2. Respuesta del circuito IFET-metro. ....                                    | 47 |
| Tabla 3.3. Mediciones del circuito de caracterización. ....                           | 50 |
| Tabla 3.4. Especificaciones técnicas del SG200C. ....                                 | 52 |
| Tabla 5.1. Lecturas correspondientes a la Temperatura sensada.....                    | 82 |
| Tabla 5.2 Lecturas correspondientes al pH4 censada a una temperatura constante. ....  | 83 |
| Tabla 5.3 Lecturas correspondientes al pH7 censada a una temperatura constante. ....  | 84 |
| Tabla 5.4 Lecturas correspondientes al pH10 censada a una temperatura constante. .... | 85 |
| Tabla 5.5. Lecturas correspondientes al rendimiento de la batería. ....               | 86 |
| Tabla 5.6. Lecturas correspondientes al monitoreo del agua forraje. ....              | 88 |
| Tabla 5.7. Lecturas correspondientes al monitoreo de campo en la vaca. ....           | 94 |



---

# INTRODUCCIÓN GENERAL

---

Los efectos del cambio climático se están viendo día a día en base a los incrementos de intensidad y frecuencia de huracanes, terremotos, tormentas, sequías, entre otros. El incremento de la temperatura afecta directamente en el comportamiento, producción y reproducción de bovinos, así como en sus hábitos, rutinas, consumo, reacción al estrés, entre otros.

La manera tradicional de conocer la condición fisiológica del ganado bovino es mediante la medición de temperatura corporal, por lo general se utiliza termometría rectal utilizando un termómetro veterinario el cual es insertado en el recto del animal; la gran desventaja de este método es que, todo este procedimiento hace que el animal esté bajo una situación de estrés, lo cual puede generar una lectura errónea o bien dicho la lectura sufre de saturación dado que el valor proviene de una región local y no necesariamente está correlacionado con el valor real. Por otro lado, si el termómetro no permanece el tiempo necesario, se tendrá que repetir la medición, sin dejar de mencionar que de no contarse con suficiente experiencia puede llegar a lastimarse al animal, poniendo en riesgo su bienestar.

En cuanto al pH, el método tradicional para la extracción del líquido rumial es a través de una sonda que es introducida mediante una fístula, que permite la extracción de la muestra para su posterior análisis.

Como objetivo de este trabajo se persiguió desarrollar un sistema conformado por un arreglo de sensores (pH y temperatura) responsables de llevar a cabo un monitoreo continuo de ambas variables y ser transmitidos de forma inalámbrica utilizando la tecnología WiFi™ (IEEE 802.11), evitando así emplear todo tipo de cableado. Los datos son desplegados mediante una interface gráfica diseñada a la medida a través de una computadora conectada a la misma red inalámbrica en donde se encuentra el animal de estudio.

---

## Antecedentes

---

En 1998 se desarrolló un sistema ambulatorio a largo plazo de monitoreo de pH y sus aplicaciones clínicas. El sistema completo está compuesto por el catéter gástrico con 2 sensores de pH, un módulo pequeño de registro de datos y una notebook PC. El catéter multi-pH consiste de 2 electrodos de antimonio con un diámetro normal de 2mm y el largo del catéter es de 175cm con un cable de referencia de 200cm. El Sistema de adquisición de datos es un microdatalog de tamaño 145x85x27mm, con un peso de 250 gramos, consiste en un microprocesador (87C552) que contiene un convertidor A/D de 10 bits y una memoria de EPROM de 8kb el módulo es alimentado con baterías alcalinas. Con una exactitud del 1% y un intervalo de muestreo de 6 segundos. Después de la calibración con soluciones a 7.04 pH y 1.0, el proceso de adquisición de datos se llevó a cabo por un periodo de 24 horas, los datos son descargados en la computadora portátil por medio del estándar RS-232. El software utilizado es una herramienta poderosa y versátil que permite examinar, analizar e imprimir los reportes de los datos del paciente. Usó el lenguaje C++, el programa permitió la evaluación gráfica de los datos. Los experimentos clínicos mostraron que el sistema microdatalog es muy útil para detectar las posibles enfermedades en la parte superior del tracto digestivo [1].

En 2004 se realizó una comparación de técnicas de medición del pH del rumen en los días de lactancia de vacas. El pH resultante fue comparado con aquellos obtenidos de las muestras tomadas al mismo tiempo con la rumenocentesis (procedimiento para la obtención de líquido ruminal utilizando una aguja para realizar una punción a la altura del rumen y extraer el líquido) y la sonda oro-rumial (procedimiento para obtener el líquido ruminal se utiliza una sonda que es introducida por la boca hasta llegar al rumen y se aspira el líquido). Un monitoreo continuo del pH fue realizado durante la sexta semana después del parto usando un electrodo Sensorex Combi pH Electrode 450 CD. El electrodo fue protegido por un escudo que tuvo un peso de 0.5kg. Los electrodos fueron conectados a un transmisor digital de pH Jenco modelo 691N. La salida del transmisor fue capturada por una Entrada Analógica Universal multiplexada EXP-16 y una DAS-8 una tarjeta analógica de

entrada. El software utilizado para la captura fue Labtech Note-book versión 10. El periodo de muestreo fue de una vez por segundo, un promedio alrededor de un periodo de 60s, y almacenada. La posición del electrodo de pH fue checado diariamente en cada vaca, y los electrodos y transmisores de pH fueron calibrados con un pH de 4 y 7 una vez por semana. Los datos continuos del pH del rumen se fueron resumiendo por periodos de 24 horas calculando el promedio del pH, y la cantidad de tiempo debajo de un pH 6 y pH 5.6. Después de una semana la sonda fue removida [2].

En 2005 un ISFET de pH basado en un sistema de micro sensor en un chip usando la tecnología CMOS. En este experimento, la estructura emplea un arreglo diferencial que consistió en un ISFET y una referencia FET (REFET). El REFET es insensible a las variaciones de pH. El área de sensado del transistor a través de las áreas de unión abiertas son interconectadas por líneas de metal en las compuertas del chip en el MOSFET de n-canales. Esta estructura sería similar con la estructura “capa sensible/poly-silicón/ compuerta de óxido”. El pH sensado en la membrana Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (100nm) fue depositada en un ambiente Ar/O<sub>2</sub> por el método RF de pulverización de magneto y moldeado con un proceso para encapsular las áreas. Depositando una película delgada de polímero de pH insensible en la capa sensitiva de Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> además forma el REFET. Un PRE común ha sido creado a través de pulverización de magneto de Pt en un estándar de un pad de unión abierto, el cual proveerá un punto abierto para el micro sistema de sensor de pH. Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> es excelente material de sensor de pH. Usando el arreglo diferenciador, la interface de ruido puede ser fácilmente rechazada, y puede fácilmente rechazar ruido común de las luces de iluminación. La última etapa de encapsulado con una alta viscosidad de epoxy, la cual se esparce con calentamiento a bajas temperaturas. El área total del chip es de 2x2.5mm<sup>2</sup>, y el chip opera a 3.3V. El pH responde a -55.56mV/pH (para el ISFET) y -1.98 mC/pH(para el REFET) han sido obtenidos respectivamente usando un rango de pH de 4.01 a 12.45. La salida diferencial demostró una correcta operación del sistema con una sensibilidad de 53.67 mV/pH, un valor que compara bien con los resultados encontrados en el tradicional pH-ISFET [3].

En 2008 un bolo telemétrico inalámbrico que mide y graba el pH continuamente fue implementado para monitoreo diario de acidosis clínica en vacas. Los datos son presentados de manera que se muestra una correlación muy cercana entre los instrumentos de calibración del laboratorio y el bolo en los intervalos de tiempo cuando el instrumento fue introducido. La exactitud el bolo graba las variaciones de pH del rumen. Los datos son presentados para mostrar el cambio diurno del pH del rumen a través de un periodo de 6 semanas. El sensor de pH con la celda de referencia llenada con gel en el espacio anular alrededor del bulbo del electrodo de vidrio y la junta de referencia con un teflón poroso [4].

El bienestar animal del ganado bovino se ve afectado recientemente debido a los cambios climáticos lo cual afecta su capacidad de adaptación y reproducción. Esto tiene un efecto negativo en la ganadería debido a que la calidad de los productos derivados decrece. Es por esto que el desarrollo de un sistema que pueda monitorear las variables fisiológicas del ganado bovino en tiempo real apoyará a los especialistas en la toma de decisiones preventivas o correctivas.

---

## OBJETIVO PRINCIPAL

---

***“Desarrollar un sistema de monitoreo Intra-Rumial en tiempo real de variables fisiológicas (temperatura y pH) para ser empleado en estudios sobre adaptación bovina”.***

---

## OBJETIVOS PARTICULARES

---

- Análisis de las distintas tecnologías de sensores de pH y temperatura para seleccionar la mejor opción para las especificaciones del diseño.
- Caracterización del sensor de temperatura.

- Caracterización del sensor de pH.
- Diseño de hardware del sistema.
- Diseño del sistema de comunicación inalámbrica.
- Diseño del firmware.
- Diseño del software de monitoreo.
- Pruebas del sistema diseñado.
- Publicación de resultados.

El presente documento describe el diseño e implementación de un sistema de monitoreo intra-rumial mediante 5 capítulos en los cuales se aborda el principio de operación, instrumentación, diseño y pruebas experimentales mediante hardware, firmware y software. A continuación se presenta un breve resumen de los aspectos que contemplan cada capítulo.

En el capítulo 1 se establece la metodología y consideraciones químicas y fisiológicas necesarias para la implementación del bolo que será introducido a la vaca de estudio.

En el capítulo 2 se describen los tipos de sensores, el sistema embebido utilizado, el tipo de transmisión inalámbrica seleccionado y los fundamentos del protocolo de transmisión empleado para el despliegue de datos en la interfaz del usuario.

En el capítulo 3 se describe el análisis, caracterización y diseño de las partes de hardware involucradas con el sistema, tales como el LM35 para la medición de temperatura, el SG200C para la medición del pH, el Arduino Yun como tarjeta de adquisición; se describe el firmware del sistema, se muestra el funcionamiento del sistema mediante un diagrama de flujo, así como su estructura de funcionamiento; en el software del sistema se muestra y describe la interfaz de usuario empleada para el monitoreo de la información proporcionada por el hardware y firmware; e igualmente el diseño del bolo.

En el capítulo 4 se describen el firmware del sistema utilizado en el sistema embebido Arduino, y además el diseño de la página web del usuario.

En el capítulo 5 se abordan los resultados experimentales obtenidos mediante las pruebas realizadas en el hardware, firmware y software. Se muestran los resultados de cada etapa. Así como también se presentan las conclusiones y trabajo a futuro que quedó pendiente.

En el apartado de apéndice se muestran las hojas técnicas del hardware empleado en el proyecto, también se encuentra como parte de los resultados la publicación del artículo "Development of a Intra-Rumial monitoring system in realtime of physiological variables", al igual que la constancia de una ponencia oral en el 11° Congreso Internacional de Ingeniería que tuvo sede en la ciudad de Querétaro.

---

# **CAPÍTULO 1**

## **ANTECEDENTES DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y FISIOLOGÍA BOVINA**

---

---

### **1.1 Vulnerabilidad al cambio ambiental global**

---

El término cambio climático se ha situado en el tope de la agenda de las discusiones científicas; sin embargo, al lado de este tema ha evolucionado en la discusión científica el concepto de cambio ambiental global, el cual a menudo se ha mezclado o confundido con el de cambio climático. Muchos cambios en el sistema terrestre implican directamente cambios en clima, sin embargo, algunos cambios pueden tener consecuencias significativas sin afectar el clima. Se entiende por cambio ambiental global a la integración de los problemas ambientales causados por hechos que tiene su origen en las actividades humanas y que dependen de la cantidad de la población planetaria, su nivel de consumo – en particular energético – y la elección de las tecnologías. Estos cambios a nivel local o regional contribuyen también al calentamiento terrestre, el adelgazamiento de la capa de ozono, a la modificación de la biodiversidad, a la degradación de las tierras y/o disminución de agua, aire, minerales, tierras [5].

La temperatura media de la Tierra parece haberse mantenido estable durante los últimos 10000 años, con una variación de menos de 1°C, lo que permitió a la civilización humana prosperar en lo que hoy son unos confortables 15°C. El problema que se tiene ahora es que, desde que comenzó la revolución industrial hace unos 250 años, las emisiones de gases de efecto invernadero han hecho más denso ese manto a un ritmo sin precedentes. Esto ha causado el cambio más espectacular en la composición de la atmósfera desde hace al menos 650000 años. La razón por la que estas emisiones artificiales son un problema de tal envergadura es que, a la larga, la Tierra tiene que liberar energía al mismo ritmo que la recibe del Sol. Dado que un manto de gases de efecto invernadero más denso contribuye a reducir la pérdida de energía al espacio, el régimen climático debe ajustarse de alguna manera para restablecer el equilibrio entre la energía entrante y la saliente [6].

Al referirse al clima de la región de Veracruz la distribución anual de la temperatura muestra que desde el nivel del mar hasta 1000m de altitud, los climas son cálidos (con temperatura media anual mayor de 22°C) y dentro de estas áreas las temperaturas pueden ser muy cálidas (mayores de 26°C) [7].

---

### **1.2 Producción, vulnerabilidad y estrés en el ganado bovino**

---

En México, la carne de bovino es el producto pecuario de mayor importancia económica, social y política. Esto debido a que en su producción, procesamiento y comercialización se involucra más de la mitad de la superficie del territorio nacional, miles de productores, proveedores de insumos, prestadores de servicios profesionales y empresarios. En el contexto nacional el Estado de Veracruz es el más importante en relación a la cadena productiva de carne bovina. Este estado aporta el 15% del total de la carne que se produce en México, La importancia de la producción de carne de bovino significa el 38.5 % del valor de la producción estatal y la generación de 350 mil empleos directos e indirectos distribuidos en todo el Estado. El sistema de producción bovina más importante del estado de Veracruz es el de doble propósito (leche y becerros). Se desarrolla predominantemente de manera extensiva con animales de diferentes cruces de razas cebuínas con europeas. La alimentación está basada fundamentalmente en el pastoreo de diversas gramíneas y en menor escala de algunas leguminosas. El ordeño se realiza de manera manual con el apoyo del becerro para facilitar el descenso de la leche. La leche tiene básicamente tres destinos: consumo como leche bronca, elaboración de derivados lácteos y procesamiento en empresas agroindustriales. Debido a la producción estacional de los forrajes y a la carencia de una cultura de conservación de estos, el

comportamiento productivo de los hatos se ve drásticamente afectado durante la sequía. Lo anterior, se ha agudizado en los últimos años debido al cambio climático. La fertilización de los pastos es una actividad que muy pocos productores llevan a cabo, lo que ha traído como consecuencia el deterioro de los suelos. La carencia de macro y micro minerales en el suelo y por ende en los pastos tropicales, tiene un efecto negativo en el comportamiento animal, particularmente en la fertilidad anual de los hatos ganaderos [8].

En Mayo de 2007, el Presidente de la República Felipe Calderón Hinojosa presentó públicamente la Estrategia Nacional de Cambio Climático, y publicó un Programa Especial de Cambio Climático 2008 – 2012. El gobierno del Estado de Veracruz ha tenido una participación activa en el trabajo que sustenta este Programa desde la recién creada Secretaría de Protección Civil y su Centro Estatal de Estudios del Clima. Así, el Programa Veracruzano ante el Cambio Climático (PVCC) surge de estudios realizados por expertos que analizaron el impacto climático en el medio natural y en los sectores sociales, económicos, políticos y culturales. Las emisiones de GEI (Gases de Efecto Invernadero) de los sectores estimado en el Estado de Veracruz han tenido un crecimiento total, en el periodo 2000-2004, de 11.2%. De los sectores considerados en el Inventario de Emisiones de GEI de Veracruz, el que más aportó a las emisiones fue el sector eléctrico, seguido del agropecuario y, por último, de los sectores industrial, petrolero y residuos [9].

El análisis en el estado de Veracruz con relación a la vulnerabilidad de la ganadería bovina considera el diseño de procedimientos de planeación regional a corto, mediano y largo plazo. La producción agropecuaria estará directamente afectada por cambios en factores climáticos como temperatura, precipitación pluvial, frecuencia y severidad de fenómenos extremos como sequías, inundaciones o tormentas. El cambio climático también podría alterar el tipo, la frecuencia y la intensidad de varias enfermedades de las plantas y los animales; por otro lado, se podría ver afectada la disponibilidad y la distribución de los suministros de agua para riego, incrementando la severidad de la erosión del suelo. Sin embargo, la naturaleza de estos sucesos bio-físicos y la respuesta humana hacia ellos son complejas y todavía inciertas. El análisis muestra que la temporada de sequías representa el mayor impacto negativo, particularmente en las zonas norte y centro del estado, mientras que las lluvias afectan principalmente a la zona sur. Para las tres zonas, las principales pérdidas ganaderas se concentraron en el rubro de animales y pastizales; en la zona sur, además de estas afectaciones, los daños a la infraestructura se consideran importantes. La especie más afectada será la bovina y la principal causa de pérdida, por la muerte de los animales. El número de hectáreas afectadas por zona fue superior en la parte norte del estado de Veracruz [9].

Los escenarios proyectados a 2020 muestran un serio compromiso, durante el verano, para las zonas centro y sur, en tanto que para el invierno, en la zona centro, el efecto primordial sería debido a la disminución de las lluvias. En el verano, un posible beneficio, a partir de estos escenarios, sería la mayor precipitación pluvial en la zona norte; en contraparte, menor precipitación pluvial disminuiría el riesgo de inundaciones en la zona sur, los productores perciben que para atenuar los posibles efectos del cambio climático deben organizarse y capacitarse. La vulnerabilidad de la ganadería involucra, entonces, los cambios en la cantidad y calidad de los pastizales; expresados como un decremento en la biomasa debido al aumento en la temperatura y las precipitaciones; se ha proyectado que los cambios en la biomasa de las plantas, a razón de un diez por ciento por el cambio en las precipitaciones, es mucho mayor que el valor debido a los cambios en cada grado Celsius de incremento de la temperatura, al mismo tiempo que las modificaciones indicadas del clima afectarán el aporte de nutrientes de los rumiantes al reducir su capacidad de ingesta. Mediciones de los efectos del estrés por calor durante periodos prolongados, tanto en el ganado europeo como en Cebú y sus cruza demuestran que ambas especies son afectadas en su fisiología, aunque los mecanismos homeostáticos de estos animales son capaces de compensar las alteraciones funcionales que resultan comprometidas; frecuencia cardíaca y respiratoria, volumen de paquete celular y la acidosis metabólica asociada al cambio del pH sanguíneo, entre estas especies bovinas el Bos indicus y sus cruza han demostrado un mejor desempeño ante el aumento de la temperatura. Además es posible demostrar que existen variaciones en los parámetros bioproductivos y en la fertilidad en las vacas de acuerdo a su capacidad de tolerancia al estrés por calor, resultando con una mejor respuesta productiva y reproductiva los animales no estresados y de estrés bajo cuando se compraran dichos indicadores con los de los animales estresados, los cuales resultaron con un bajo comportamiento en su productividad [9].

La tolerancia al calor en el ganado puede ser definida como la habilidad de mantener una estabilidad térmica a temperaturas elevadas. La resistencia al calor es determinada por la relación entre la capacidad de disipación del calor y la producción de calor metabólico. La disipación de calor es

determinada por el área de superficie, tasas de sudor, aislamiento externo y pérdida respiratoria de calor. El término “estrés” es parte de cada discusión de los efectos inmediatos del entorno de un animal, y la adaptación a esos efectos. Una definición de estrés es cualquier condición o agente que altera el sistema en estado de reposo. Por ejemplo: un cambio término en el ambiente externo puede causar cambios en la piel o cambios en la temperatura corporal interna. Sin embargo, la temperatura corporal provocará una serie de respuestas fisiológicas, tales como redirección del flujo sanguíneo, alteración del ritmo respiratorio, o cambios metabólicos que afectarán su producción [10].

Un ambiente con temperaturas elevadas, humedad relativa y radiación de energía afectan negativamente la eficiencia de la producción y reproducción de animales en regiones con temperaturas tropicales y subtropicales. El desempeño de los animales de granja es afectado por las altas temperaturas del ambiente, y estos factores en el ambiente, combinados con una producción de calor metabólico y la dificultad en perder calor crean dificultades en mantener un balance térmico. Llevándolo a un incremento en la temperatura corporal. Para mantener la temperatura corporal dentro de un rango normal, los animales necesitan incrementar la pérdida de calor y reducir la producción endógena de calor para reestablecer la homeoterma y homeostasis. Para reducir la ganancia de calor, las repentinas respuestas de los animales al calor incluyen incrementar la disipación de calor (principalmente por evaporación), reducción de la ingesta, y el rendimiento de la producción de leche, incrementar el consumo de agua y la subsecuente reducción del ritmo metabólico. Estas respuestas son esenciales para la supervivencia de los animales pero pueden llevar a alteraciones del balance fisiológico normal, y un equilibrio endócrino. Entonces la salud, fertilidad y productividad son afectadas negativamente. Las condiciones ambientales afectan el consumo de materia seca, en todas las especies. Exponerse al calor reduce el consumo voluntario por la alimentación y está relacionada a la duración y severidad del estrés por calor, para las especies y sus crías, para la fase fisiológica y al nivel de producción [10].

En la lactancia y en la engorda, el consumo de materia seca empieza a decaer en temperaturas ambiente alrededor de 25-27°C, y cae más rápidamente alrededor de 30°C-40°C, el consumo de la dieta decae hasta en un 40 al 60% como se muestra en la Figura 1.1. El efecto del índice de temperatura y humedad es probablemente el medido a través de los efectos de incrementar la temperatura corporal y el desempeño de la vaca. Nardone et al, encontraron una relación negativa de la temperatura rectal y el consumo de materia seca en vacas mantenidas bajo condiciones de calor [10].

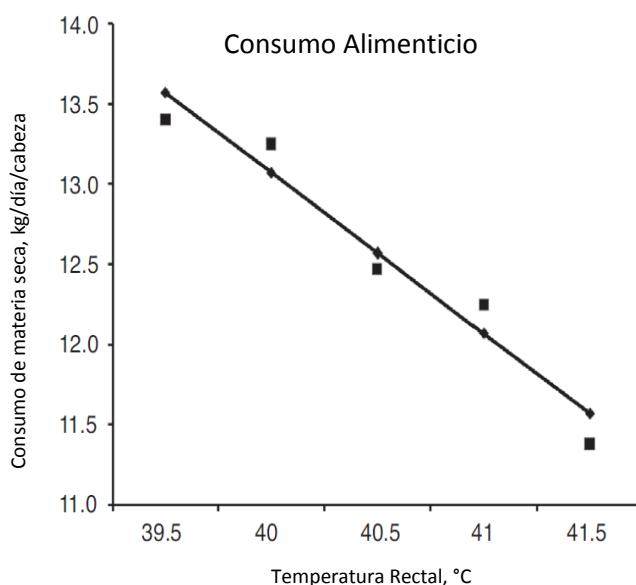


Figura 1.1 Consumo de materia seca como función de la temperatura rectal en animales mantenidos en condiciones de calor.

La reducción del consumo de alimento en ganado con estrés por calor es también acompañado por un cambio en su comportamiento de alimentación, Schneider et al y Nardone et al, encontraron que las vacas con estrés térmico comen un 12% más durante la noche cuando las temperaturas son más frías, comparado con el consumo durante el día. Bajo condiciones de estrés térmico el ganado reduce

el consumo de forraje. Lo cual deja un cambio en la concentración del forraje y su frecuencia en la ingesta diaria. Este comportamiento es considerado una respuesta de adaptación para reducir la producción de calor en la fermentación del rumen, la reducción de consumo de forraje puede contribuir a decrementar la producción de ácidos grasos volátiles y puede provocar alteraciones en el acetato y propionato e incrementar el pH del rumen [10].

El programa veracruzano ante el cambio climático expone los siguientes puntos:

- El cambio climático en la región ganadera dentro del área de influencia del puerto de Veracruz de 1917 al 2008; los escenarios previstos por diversos modelos para los años 2020, 2050 y 2080 y su relación con el confort bovino, expresado por el indicador Índice de Temperatura y Humedad (ITH), para lo cual se consideraron los valores expresados con las calificaciones numéricas  $\leq 74$  (normal), 75-78 (alerta), 79-83 (peligroso)  $\geq 84$  (emergencia).
- La respuesta fisiológica de los bovinos al calor elevado en la región, según la raza y su efecto sobre algunos indicadores productivos.
- El empleo de marcadores bioquímicos y moleculares para reconocer la capacidad termo tolerante en estas razas, con miras a futuras selecciones.

Con respecto a los tres puntos antes señalados se enfatiza que con los datos de las temperaturas ( $^{\circ}\text{C}$ ) y la humedad relativa (%) combinados para obtener el ITH, en diversos periodos climáticos (1917-1960, 1961-1990 y 1991-2008), obtenidos del Centro de Previsión del Golfo del Servicio Meteorológico Nacional (CPG-SMN), se pudo mostrar variabilidad en el clima de la región, expresado como un aumento en el ITH, de 83,85 y 86 (todos de no confort) respectivamente, para los periodos indicados y de forma horaria (06:00-08:00, 13:00-15:00 y 17:00-19:00), considerando las temperaturas máximas para el mes de mayo (Figura 1.2 ) [11].

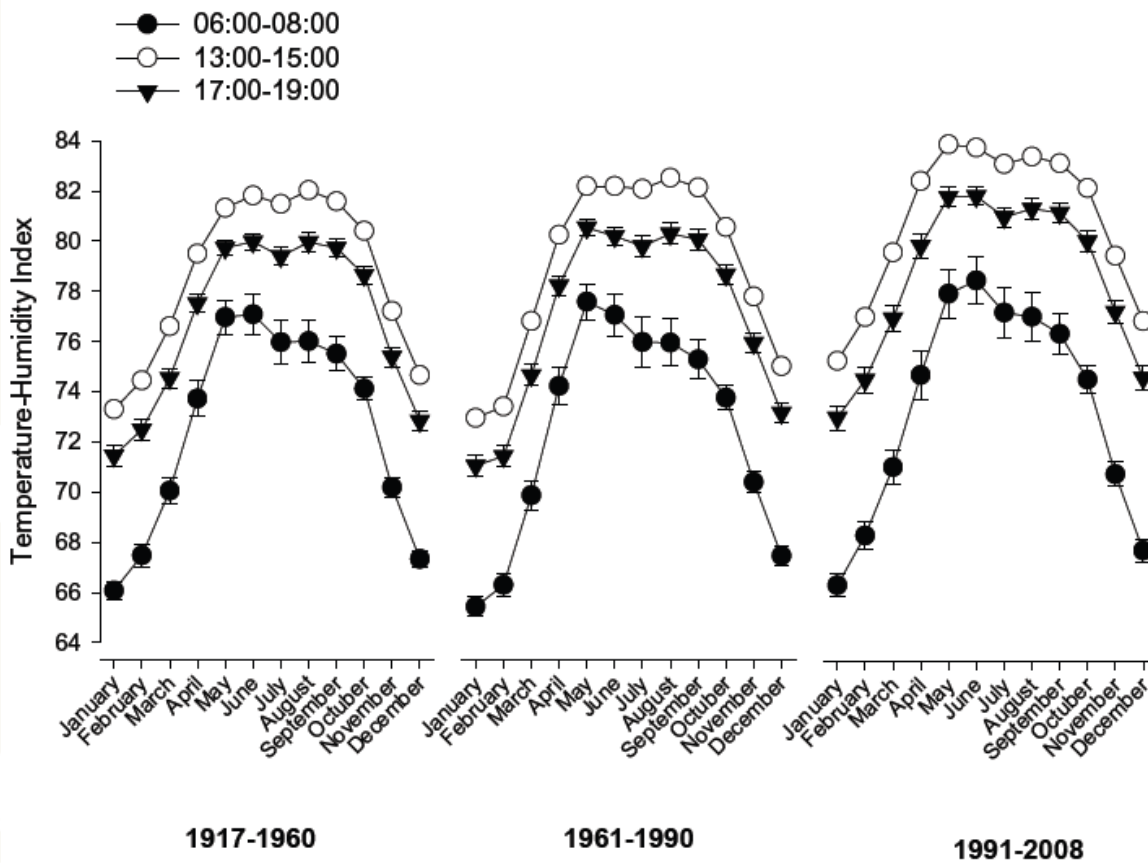


Figura 1.2 Valores promedio históricos del Índice de confort de 1917 a 2008 en el municipio de Veracruz.

La práctica en la ganadería de la región de Veracruz, no se lleva a cabo en un clima que ofrece un margen de reducido confort para los animales, una condición que se ha agravado con el tiempo y que se ha hecho más evidente con los años (1990-2008). Según el modelo de cambio climático PRECIS-HADCM2, utilizado para estimar los modelos regionales, los escenarios hechos para el índice de humedad y temperatura entre tres modelos diferentes que la situación se tornara más crítica en un futuro, de modo que para el año 2020 en el mes de agosto, se prevé una humedad relativa de 79% y una temperatura ambiente de 29.2°C, lo que será suficiente para superar el índice de humedad y temperatura de 80 que es considerado peligroso (82). De igual manera para 2050 y 2080 el valor crítico del índice de humedad y temperatura se supera con temperaturas de 30.5 y 32.3°C y con una humedad relativa de 83 y 85 respectivamente. Cabe resaltar que a pesar de las diferencias en los modelos de cambios climáticos los resultados son altamente coincidentes para las estimaciones futuras hacia 2020 y 2050 como se observa en los modelos de la Figura 1.3.

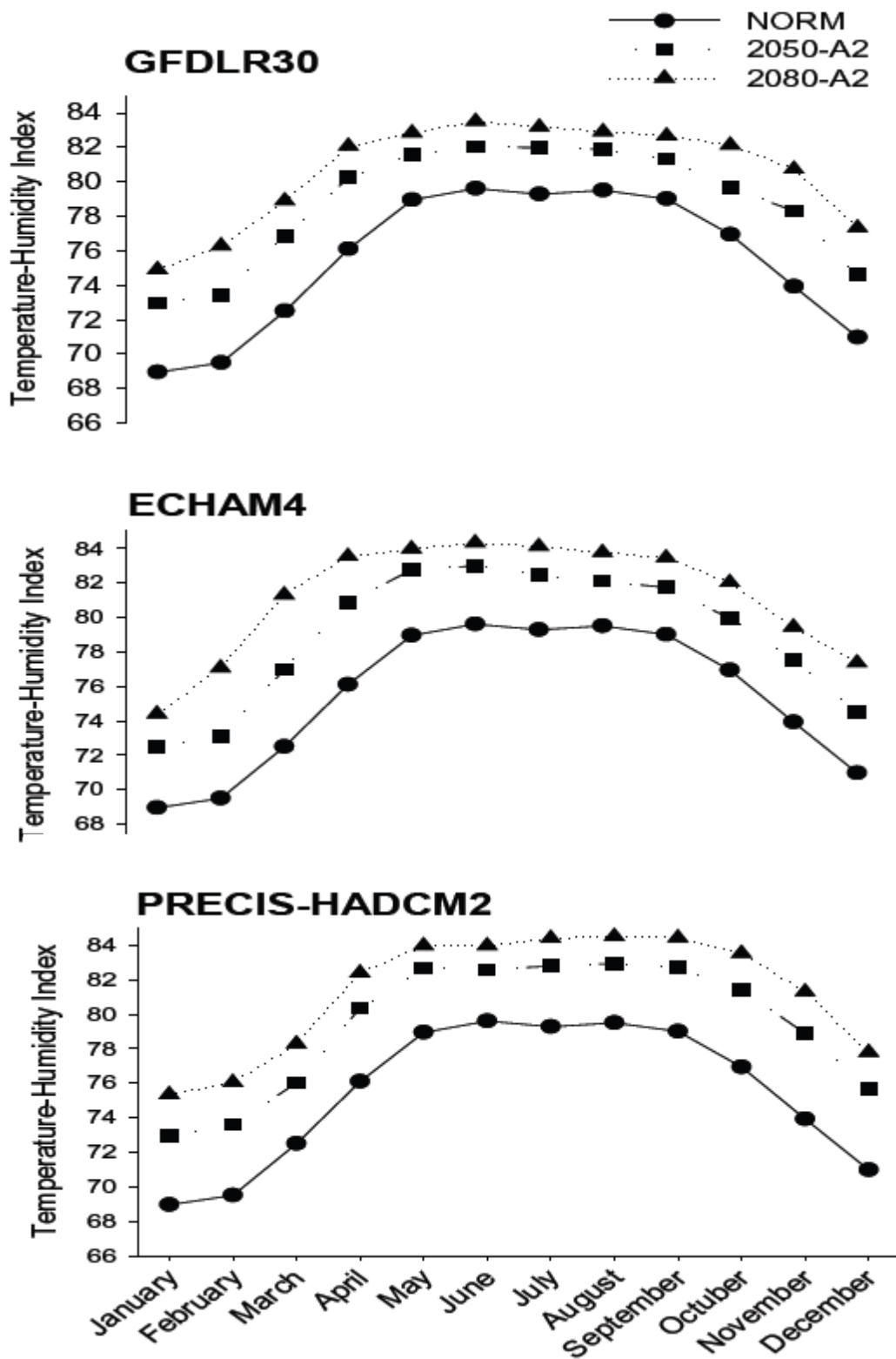


Figura 1.3 Escenarios del Índice de Temperatura y Humedad mensuales normal de Veracruz y los obtenidos con diferentes modelos climáticos.

La información obtenida permite reconocer una tendencia a la alza en la reducción del confort térmico para esta especie, de una manera sostenida a lo largo del periodo estudiado y establece un escenario

complicado para la producción bovina en la región estudiada con respecto al confort futuro de los animales, situación que reduciría el bienestar de los bovinos, así como su capacidad bioproductiva.

---

## 1.3 Anatomía y fisiología del rumen

---

El sistema digestivo en los rumiantes posee el beneficio de tener una cámara fermentativa pre-gástrica, formada por tres compartimientos: el retículo, el rumen, el omaso y el abomaso. Estos compartimientos, también llamados pre-estómagos, se caracterizan por tener un epitelio no secretor, a diferencia de lo que es la cavidad gástrica propiamente dicha (el abomaso) cuya mucosa es secretora y cumple prácticamente las mismas funciones que el estómago de los monogástricos. A pesar de que los pre-estómagos carecen de enzimas propias para degradar los alimentos ingeridos por el rumiante, en esta cámara que se realiza la mayor parte de la digestión del alimento debido a la fermentación microbiana (principalmente por hidrólisis y oxidación anaeróbica) [10].

La fermentación ruminal es la actividad metabólica de los microorganismos presentes en el rumen. En los rumiantes, la degradación de los sustratos moleculares por la acción de bacterias y otros microorganismos se realiza por la hidrólisis enzimática igual que en la digestión glandular. Esta digestión fermentativa es más lenta y los sustratos son alterados en mayor grado que en la digestión glandular. Además la fermentación ocurre en un medio anaerobio. Estos sitios son el ciego y/o colon por un lado y por otro lado en el retículo-rumen [10].

El proceso digestivo inicia cuando el alimento ingresa al aparato digestivo, sin embargo este no está disponible directamente para ser utilizado por el animal. El alimento consiste de macromoléculas que deben ser degradadas a compuestos más simples para que puedan ser absorbidas a partir del Tracto Gastrointestinal. Previo a la digestión glandular el alimento sufre acción mecánica en la masticación cuando el animal ingiere los alimentos. En los rumiantes el alimento sufre una transformación adicional en el retículo-rumen por acción de la rumia y de los microorganismos presentes. Los rumiantes presentan la particularidad de remasticar su alimento, lo que se llama rumia. El material vegetal consumido por los rumiantes posee poco valor energético por lo que deben comer grandes cantidades para satisfacer sus necesidades energéticas pero con la limitante de que el llenado del retículo-rumen impide que el animal pueda seguir ingiriendo alimento. En el retículo-rumen ingresa alimento, agua y saliva, que se mezcla continuamente por las contracciones de las paredes del órgano. Como resultado de la fermentación se producirá proteína microbiana, productos finales del metabolismo microbiano, residuos alimenticios y gases. Lo que no se absorbe pasa al omaso y abomaso junto con las proteínas microbianas y los residuos alimenticios [12].

La mayoría de los microorganismos ruminales que se encuentran en el retículo rumen son anaerobios estrictos aunque existen algunos facultativos. Estos microorganismos son principalmente bacterias, protozoarios, y hongos del tipo de levaduras. Las bacterias adheridas a la pared hidrolizan la urea y consumen el poco oxígeno que pueda llegar con el alimento ingerido o que difunde a través de la pared del rumen; las bacterias asociadas a partículas atacan sustratos no solubles, hidrófobos mientras que las que flotan en el líquido ruminal atacan sustratos solubles e hidrófilos. Las bacterias se clasifican generalmente según el sustrato que utilizan o según los productos finales de la fermentación que realizan como: bacterias celulolíticas, hemicelulíticas, pectinolíticas, amilolíticas, bacterias que utilizan ácidos intermedios, proteolíticas, ureolíticas, lipolíticas, bacterias productoras de metano; en el caso de las bacterias celulolíticas y las productoras de metano se inhiben con pH bajo 6.5 o menos [12].

Para que se produzca una correcta fermentación bacteriana se cuenta con parámetros y condiciones ruminales que deben considerarse, que fuera de sus rangos normales provocan alteraciones de la digestión. Las condiciones del medio ruminal deben estar en un rango compatible con el crecimiento de micro-organismos que son adecuados para la fermentación y es por ello que es muy importante tener en cuenta los siguientes parámetros: [12]

**Ecosistema abierto y continuo:** Para que una población de microorganismos pueda desarrollarse y mantenerse en un medio, este debe permitir una entrada continua de sustratos y también una salida permanente de desechos y de microorganismos muertos.

**Aporte constante de sustratos:** Los microorganismos necesitan nutrientes para poder desarrollarse, multiplicarse y mantenerse como población. Por lo tanto la ingesta que realiza el rumiante provee a los microorganismos los sustratos para su sustento.

**Tiempo de retención:** Los procesos fermentativos son más lentos que la digestión tal como ocurre en el estómago e intestino delgado. Para que esa fermentación sea eficiente, el contenido ruminal debe ser retenido en el retículo-rumen tiempo suficiente para permitir la acción microbiana. La conformación del rumen, el diámetro pequeño del orificio-retículo-ruminal, la función de selección del retículo y el ciclo motor del retículo-rumen garantizan un tiempo adecuado de retención.

**Medio acuoso:** Las reacciones bioquímicas se realizan en el medio acuoso. Gran parte de las enzimas bacterianas son extracelulares y actúan en el líquido ruminal.

**Anaerobiosis:** El ambiente ruminal es anaerobio. En presencia de oxígeno en lugar de obtener productos que se utilizan como fuente de energía disponible para el animal, como los ácidos grasos volátiles, obtendríamos  $CO_2$  y  $H_2O$ .

**Osmoralidad:** La fermentación normal se lleva a cabo con una osmoralidad entre 260 y 340mOsm. Este parámetro se ve alterado tras la ingestión de concentrados. Con alta osmoralidad se inhibe la digestión del almidón y fibra y se altera la rumia.

**pH:** Puede variar entre 5.8 y 7.0. Luego de la ingesta de concentrados el pH baja considerablemente (por la rápida fermentación producida lo cual genera un medio ácido). Las bacterias celulolíticas se inhiben a pH menor de 6.0. A pH menor de 5.5 suelen ser anormales tanto la función ruminal como la del animal como consecuencia de la acidosis.

**Temperatura:** Debido a la enorme cantidad de procesos metabólicos que se producen en el rumen la temperatura suele ser 1 o 2 grados por encima de la temperatura corporal del animal (38 a 42 °C). Se pueden lograr descensos de la temperatura ruminal con ingesta de agua o forraje frío.

El pH del rumen varía entre 5.8 y 7.0, el cual surge de la propia fermentación. Por un lado tenemos producción de una base como el amoníaco relacionada a la fermentación proteica, mientras que por otro lado tenemos la producción de ácidos como los ácidos grasos volátiles, resultantes de la fermentación de carbohidratos. El balance entre las cantidades de ácidos y bases producidas, la velocidad con que ocurre esa producción, y a eficiencia de absorción de los mismos, forman la base del pH del rumen. Sobre esto operan los mecanismos fisiológicos que regulan el pH tendiendo a que no se excedan los límites fisiológicos. La dieta afecta el pH ruminal por diferentes vías. Los alimentos no inducen todos por igual a la rumia. La forma física de los alimentos es importante para inducir una adecuada rumia. El forraje tosco estimula mucho a la rumia mientras que los concentrados prácticamente no lo hacen. Durante la rumia se secreta gran cantidad de saliva que llega al rumen con la deglución del bolo alimenticio o de la rumia. La saliva contiene bicarbonato y fosfato que le dan un pH alcalino a la saliva y que en el rumen actúan como tampón frente a la producción de ácidos. Cuando el rumiante consume concentrados la rumia disminuye y por lo tanto disminuye también la producción de saliva. Esto hace descender el pH ruminal Figura 1.4. La forma química de los alimentos también afecta al pH ruminal. Los carbohidratos de fácil digestión son fermentados mucho más rápido que los carbohidratos estructurales. Esto lleva a una producción más rápida de ácidos volátiles grasos acompañada por una baja producción de saliva, lo cual hace descender el pH ruminal. Como se aprecia en la Figura 1.5, primero se fermentan los carbohidratos solubles, seguidos por la pectina, como consecuencia baja el pH del rumen lo que retarda la fermentación de la celulosa debido a la inhibición de la flora celulolítica. Recién cuando se fermentó la mayor parte de los carbohidratos de fácil digestión y el pH sube, se reanuda la degradación de la celulosa, debido a la estructura física y química de los alimentos, el pH varía durante el día. Otro factor que afecta al pH es el régimen de alimentación, o sea la distribución de las distintas comidas en el día. La Figura 1.6 muestra un ejemplo de una vaca de alta producción alimentada dos veces por día con ración total mezclada esta es una práctica en sistemas de estabulación donde se ofrece el alimento fibroso picado y mezclado con el concentrado. Se nota claramente como el pH ruminal desciende luego de cada comida y que lleva varias horas para volver a su estado inicial. Esta variación diaria del pH

ruminal impacta sobre las poblaciones microbianas ya sea inhibiéndolas o estimulándolas. Sin embargo, estas variaciones, cuando están dentro del rango normal de pH, no matan a la totalidad de las poblaciones microbianas [12].

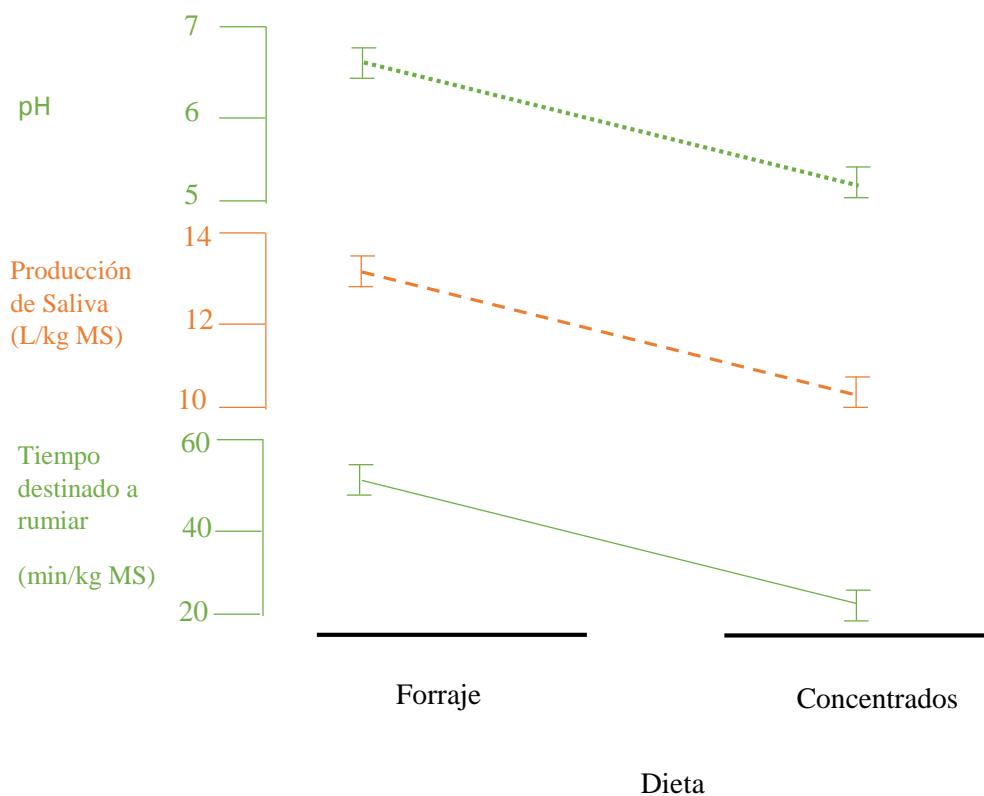


Figura 1.4 Relación entre pH ruminal, Producción de saliva y tiempo destinado a la rumia con la composición de la dieta.

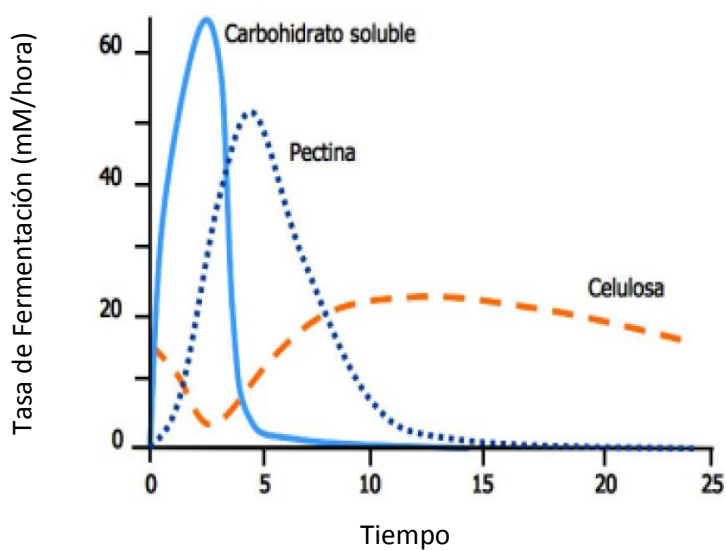


Figura 1.5 Tasa de fermentación de los componentes de la alfalfa en el rumen.

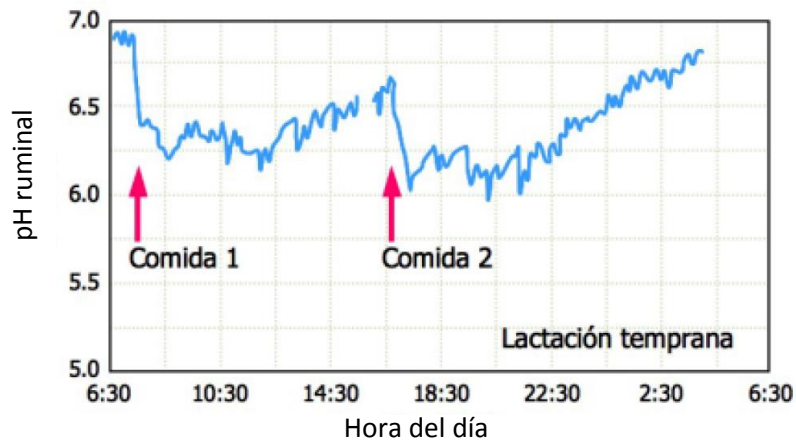


Figura 1.6 Variación del pH ruminal en una vaca en lactación temprana alimentada con ración total mezclada 2 veces por día.

Es muy importante tener en cuenta la anatomía y fisiología del aparato digestivo de los rumiantes ya que presentan cuatro compartimientos gástricos: Rumen, Retículo, Omaso y Abomaso (Figura 1.6) [13].

Retículo: la función del retículo es movilizar el alimento digerido hacia el rumen o hacia el omaso en la regurgitación del bolo alimenticio después de la rumia [14].

El órgano más importante en la digestión es el rumen, ya que de él depende en gran parte, el ataque que sufren los alimentos para ser digeridos el retículo y el omaso, también ejercen funciones mecánicas en la digestión, mientras que el abomaso o estómago glandular, realiza una parte importante de la digestión enzimática. Rumen: es un saco musculoso que se extiende desde el diafragma hasta la pelvis. Ocupa el 100% del lado izquierdo de la cavidad abdominal. Está dividido en diferentes compartimientos, separados entre sí por columnas musculares denominadas pilares, que dan al órgano un aspecto de surcos. Dichos pilares se proyectan al interior y su función, es la motilidad del órgano para permitir el libre paso de la ingesta entre los compartimientos y estimular la fermentación [13].

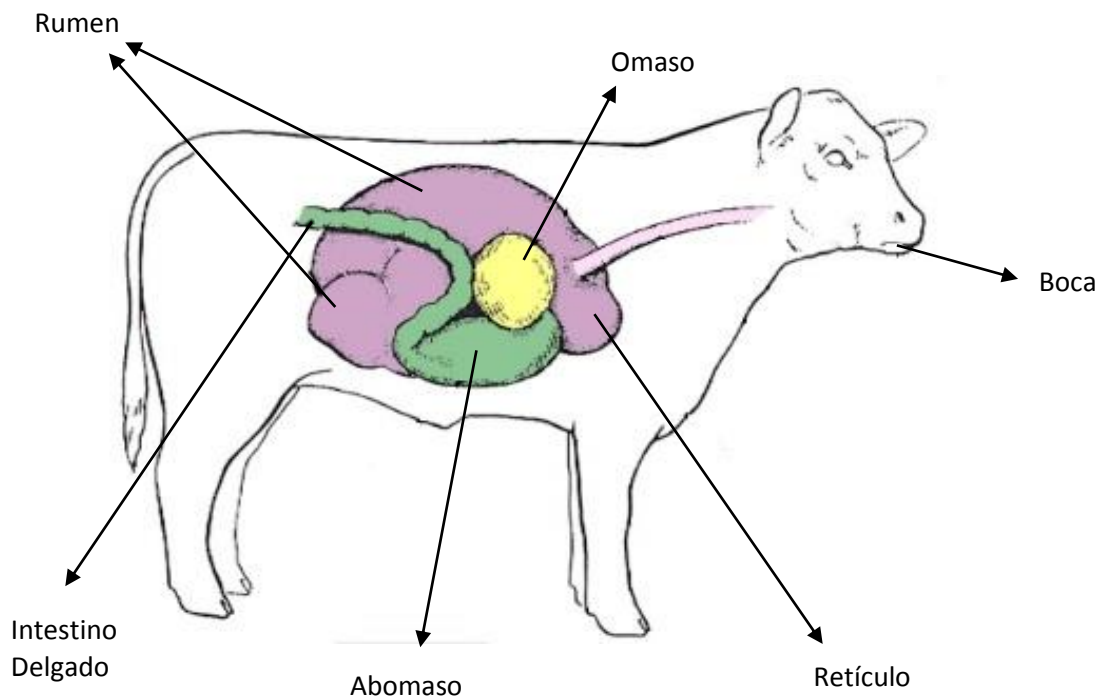


Figura 1.6 Aparato digestivo de un bovino.

El rumen es un órgano hueco que constituye una cámara de fermentación cuyas funciones son:

- Favorecer la mezcla y humidificación de la ingesta permitiendo el contacto íntimo e la microfibras con los sustratos.
- Favorecer el libre tránsito de la ingesta a través de los diferentes compartimientos digestivos, lo que facilita el eructo y la regurgitación.
- Proveer el medio adecuado para el desarrollo de la microfibras ruminal, responsable de la digestión de compuesto como celulosa y hemicelulosa, además de la síntesis de proteína microbiana y ácidos grasos volátiles que constituyen la fuente más importante de energía para la vaca.
- Permitir la absorción de compuestos como ácidos grasos y agua a través de la mucosa ruminal [13].

Para que se efectúen las funciones ruminales de manera adecuada, se requiere de ciertas condiciones que deben mantenerse en forma constante:

- Presencia continua de sustrato alimenticio para los diversos sistemas enzimáticos microbianos.
- Abastecimiento constante de líquidos, agua de bebida y saliva secretada.
- Ambiente adecuado: pH constante, condiciones de anaerobiosis y temperatura adecuada que favorezcan la sobrevivencia de los microorganismos ruminales.
- Funcionalidad óptima de la mucosa ruminal para la absorción de los productos finales de la fermentación microbiana ruminal [13].

Omaso: es una estructura de forma elipsoidal, situado enteramente a la derecha del plano medio. Ayuda en la unión de reducir el tamaño de las partículas del alimento digerido, además de que interviene en el control del paso del bolo alimenticio hacia el tubo digestivo inferior y extraer los líquidos retenidos en la ingesta. Abomaso: la función del abomaso es similar al estómago de los no – rumiantes, con la secreción de ácido clorhídrico y pepsina, mismas que inicial el proceso de degradación de las proteínas tanto de sobrepeso como microbianas [14].

El contenido ruminal constituye el medio en el cual habita una población muy importante de bacterias y protozoarios. Estos organismos, sus metabolitos, la saliva, agua y el sustrato alimenticio, determinan la naturaleza de la ecología del rumen. El contenido de materia seca es del 10-15% y varía de acuerdo al consumo de alimento y agua de bebida. La temperatura ruminal es de 39-40°C y está determinada por el proceso de fermentación bacteriana y la actividad metabólica propia del animal. El alimento en base a granos y concentrados induce un pH ácido y puede causar acidosis ruminal si no es equilibrado eficientemente por la saliva. Las dietas ricas en proteína inducen un pH alcalino, que puede causar alcalosis ruminal sino es amortiguada por los ácidos orgánicos y la misma fermentación ruminal. En ambos casos la integridad de la microfibra ruminal está en peligro, dado que su equilibrio puede romperse fácilmente por alteraciones de la dieta, lo que puede implicar serios trastornos digestivos. Algunos de los trastornos funcionales del rumen son: la indigestión, acidosis o alcalosis ruminal, impactación de omaso, lesión vagal, atonía ruminal, entre otros [13].

---

## **1.4 Conclusiones**

---

El cambio climático ocasionado directamente por el calentamiento global, afecta directamente al sector ganadero en cuanto a la reproducción, producción, comercialización de sus productos. Ya que esto afecta el entorno donde se encuentra el ganado, provocando cambios en el comportamiento alimenticio lo cual repercute en el sistema digestivo del bovino. Este capítulo es de suma importancia ya que es necesario conocer los principios básicos del medio en el cual se va a trabajar, en este caso se aborda la fisiología y anatomía del rumen bovino, ya que de este punto parte el diseño del sistema, los sensores a utilizar, las consideraciones de funcionamiento a la temperatura.

---

## CAPÍTULO 2

# SENSORES Y COMUNICACIÓN INALÁMBRICA

---

En este capítulo se describen a detalle los tipos de sensores que se utilizan en la aplicación de este proyecto para la medición de las variables fisiológicas dentro del rumen. Las variables fisiológicas a monitorear en el rumen son la temperatura y el pH; el rumen se encuentra en un rango de temperatura entre 38°C a 42°C, por lo que se eligió como sensor de temperatura un circuito integrado LM35 que cubre el rango necesitado, y la otra variable fisiológica a monitorear es el pH ruminal, el cual se encuentra en un rango de 5.8 y 7, por lo que se eligió un electrodo combinado que cubre el rango que se necesita monitorear; también se explica el protocolo elegido para realizar la comunicación inalámbrica con el estándar 802.11 y sus ventajas al incorporarse a la estructura ya existente. Finalmente se describe un poco del software utilizado y la tecnología aplicada para agilizar la transmisión de los datos.

---

### 2.1 Sensor de temperatura

---

El sensor de temperatura de semiconductor dispone de funciones de transferencia que son proporcionales a la temperatura en K, °C o °F. En la mayor parte de las aplicaciones, la señal de salida alimenta un comparador o un convertidor A/D para convertir los datos de temperatura a un formato digital. Los sensores desarrollados en este campo son analógicos o digitales con voltaje de salida proporcional a la temperatura absoluta o a la temperatura en °C o °F [15].

---

### 2.2 Medición de pH y tipos de sensores

---

El término pH es la abreviación de latín *Pondus Hydrogenni* que significa **peso de hidrógeno**. Este término fue introducido en 1909 por el bioquímico danés S.P.L. Sorensen (1868-1939). La escala de pH cubre la concentración activa de iones  $H^+$ , de iones  $OH^-$  y por tal motivo su valor de pH es definido como **el común logaritmo negativo de la concentración de iones de hidrógeno en una solución acuosa** [16], esto es:

$$pH = -\log[H^+] \quad (2.1)$$

Es importante reconocer el hecho de que la medición de pH sólo determina la concentración de iones de hidrógenos activos en una solución, y no la concentración total de iones de hidrógeno. Debido a este hecho se observan los cambios de pH en agua pura con temperatura. Si la temperatura aumenta en el agua pura, la disociación de iones de hidrogeno e hidróxido se incrementa de igual manera. Como el pH está relacionado con la concentración y disociación solo de iones de hidrogeno, el valor de pH en realidad se reduce a pesar de que el agua sea neutra. Por tal motivo es importante conocer la relación entre la constante de disociación y la temperatura, de otra manera no es posible predecir el valor de pH de una solución a una temperatura deseada respecto a una lectura conocida de pH a otra temperatura conocida [16].

Algunos puntos importantes a considerar son los siguientes:

- Si la concentración de iones activos de hidrogeno e hidróxido en una solución es la misma cantidad, entonces la solución es neutra (valor de pH=7).

- Si la solución tiene una mayor concentración de iones activos de hidrogeno que de iones activos de hidróxido, entonces la solución es ácida (valor de pH por debajo de 7).
- Si la solución tiene un mayor concentrado de iones activos de hidróxido que de iones activos de hidrógeno, entonces la solución es base (valor de pH por arriba de 7).

La escala de pH se puede expresar como la concentración de iones de hidrógeno de una solución acuosa en relación con su valor molecular se deriva de 1 ( $10^0$ ) por  $10^{-7}$  hasta  $10^{-14}$  moles/litro, dichos valores numéricos son una fracción muy pequeña, por lo que esta escala no es práctica. Motivo por el cual se estableció una escala más simple que utiliza el logaritmo negativo de la concentración de iones de hidrógeno, con la cual se obtiene una escala que va desde 0 a 14. La escala de pH se muestra en la Tabla 2.1 [16].

| Concentración de H+<br>(mol/litro) | Concentración de OH-<br>(mol/litro) | pH |
|------------------------------------|-------------------------------------|----|
| 1                                  | 0.00000000000001                    | 0  |
| 0.1                                | 0.00000000000001                    | 1  |
| 0.01                               | 0.00000000000001                    | 2  |
| 0.001                              | 0.00000000000001                    | 3  |
| 0.0001                             | 0.00000000000001                    | 4  |
| 0.00001                            | 0.00000000000001                    | 5  |
| 0.000001                           | 0.00000000000001                    | 6  |
| 0.0000001                          | 0.00000000000001                    | 7  |
| 0.00000001                         | 0.00000000000001                    | 8  |
| 0.000000001                        | 0.00000000000001                    | 9  |
| 0.0000000001                       | 0.00000000000001                    | 10 |
| 0.00000000001                      | 0.00000000000001                    | 11 |
| 0.000000000001                     | 0.00000000000001                    | 12 |
| 0.0000000000001                    | 0.00000000000001                    | 13 |
| 0.00000000000001                   | 0.00000000000001                    | 14 |

Tabla 2.1. Escala simple de pH.

Los estándares en las soluciones buffer deben mantener sus valores de pH aun cuando se contaminan con pequeñas cantidades de ácidos o bases. Las soluciones Buffer poseen esta propiedad [17].

El punto cero del electrodo de vidrio ( $pH_0$ ) solo aplica a un tipo particular de electrodo de referencia y solo puede ser determinado en conjunto con éste. La correcta determinación involucra la medición en mV de todos los estándares primarios de pH que se encuentran dentro del rango de pH del electrodo de vidrio. La temperatura se debe mantener constante a  $25 \pm 0.2^\circ\text{C}$ . Los potenciales medidos son entonces trazados en un sistema de coordenadas como se ilustran en la Figura 2.1. La región lineal:

$$U = U'_N pH'_0 - U'_N pH \quad (2.4)$$

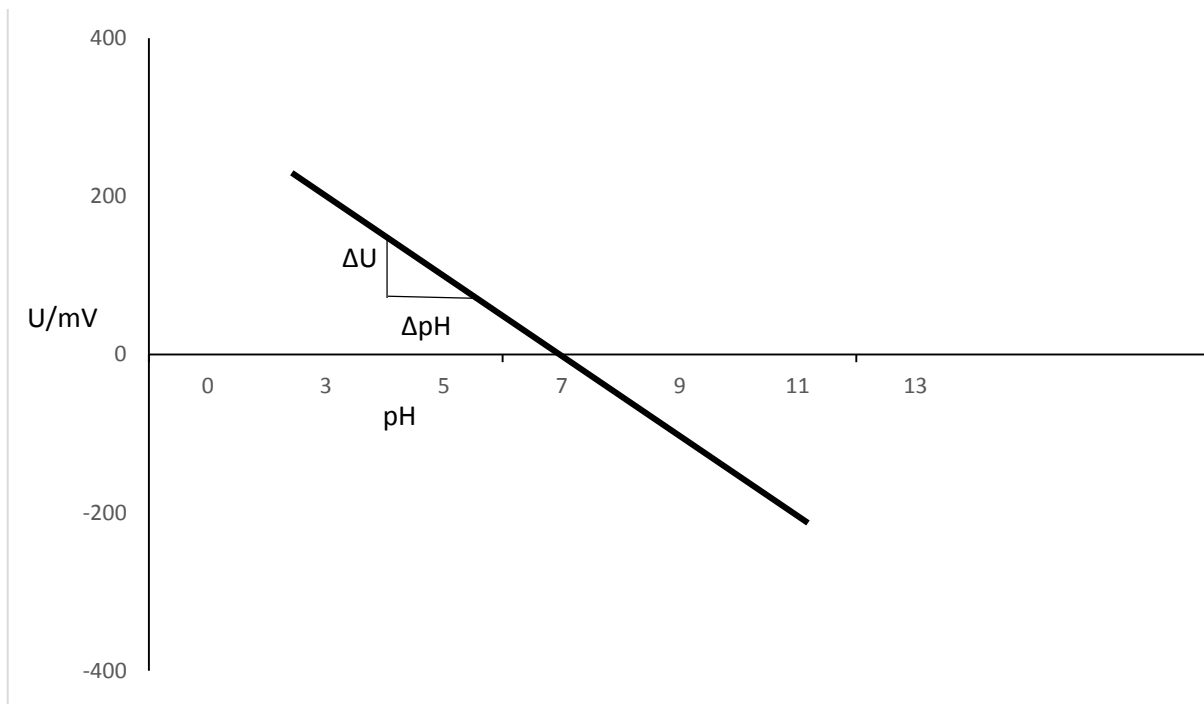


Figura 2.1 Determinación gráfica del punto cero y la pendiente  $U'_N = \Delta mV / \Delta pH$ .

La representación gráfica produce el punto cero como la intersección con los ejes  $U=0$ . El cálculo se realiza utilizando un par de valores

$$pH'_0 = \frac{pH_2 U_1 - pH_1 U_2}{U_1 - U_2} \quad (2.1)$$

La desviación media del punto cero  $pH'_0$  no debe diferir de la definición electroquímica de  $pH_0$  por más de  $\Delta pH = \pm 0.5$ .

donde  $U'_N$  es la pendiente actual.

Ya que los electrodos tanto el de vidrio como el de referencia pueden ser la fuente de desviaciones, las determinaciones deben repetirse de ser necesario usando un electrodo de referencia estándar [17].

A continuación se describen algunos equipos para la medición de pH:

**Electrodos de hidrógeno:** En 1983 LeBlanc descubrió que algunos metales se comportaban como electrodo de hidrógeno cuando el hidrógeno burbujeaba sobre ellos. Más tarde se demostró teóricamente que actuaban como un electrodo selectivo de iones de hidrógeno. El electrodo de hidrógeno es en realidad usado para todas las determinaciones fundamentales de la actividad de protones [17].

**Electrodos de Referencia:** El electrodo de referencia representa una conexión eléctrica entre el medio a medir y el pHmetro. La precisión de la medición de pH es normalmente determinada por el electrodo de referencia y por tal motivo la elección del electrodo de referencia es muy importante. Un electrodo de referencia consiste en un electrodo interno el cual es sumergido en un electrolítico definido. Este electrolítico debe estar en contacto con el medio a medir. Solo dos sistemas, los electrodos de referencia de mercurio-cloruro de mercurio (calomel) y el de plata-cloruro de plata se encontraron confiables con respecto a un preciso y estable potencial. El electrodo interno de uno

electrodo de referencia de Ag/AgCl consiste en un alambre recubierto de cloruro de plata el cual es sumergido en KCl de 3 moles de concentración situado en una cámara larga formada por el cuerpo de vidrio del electrodo de referencia. El diafragma está equipado en el fondo de la cámara para permitir que el cloruro de potasio se difunda o se filtre en el medio a medir. Para completar el circuito eléctrico el alambre de plata-cloruro de plata es conectado por medio de un cable coaxial al pHMetro [16].

Los componentes de un electrodo de referencia se observan en la Figura 2.2.

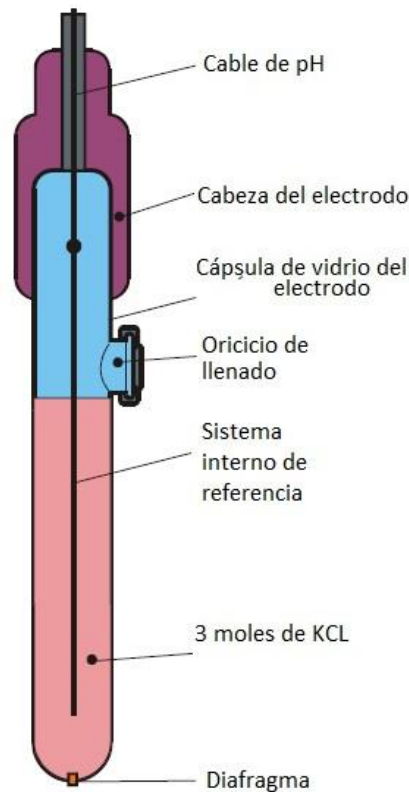


Figura 2.2 Componentes de un electrodo de referencia.

**Electrodos de Vidrio:** El electrodo de pH usa un vidrio sensible a pH que en contacto con una solución produce un potencial (voltaje) proporcional al pH en la solución. Un electrodo de vidrio consiste en un conducto hecho de vidrio que debe ser altamente resistente a soluciones alcalinas elevadas y su resistencia eléctrica debe ser mucho mayor que la de la membrana de vidrio. La parte sensible del electrodo de vidrio es la que normalmente en la punta tiene una forma cilíndrica, la cual es la membrana de vidrio. La membrana está hecha de vidrio especialmente sensible a iones de hidrógeno y se fusiona con el cuerpo del electrodo. El electrodo de vidrio está parcialmente lleno de una solución buffer, la cual normalmente tiene un valor de pH7. Una cantidad definida de cloruro de potasio (KCl) es agregada a ese buffer interno. Un alambre de plata recubierto con cloruro de plata (Ag/AgCl) es inmerso en el electrodo de vidrio directamente dentro de la solución buffer interna, sirviendo como conductor del electrodo. A través del núcleo del cable coaxial, el alambre Ag/AgCl es conectado a una terminal del pHMetro. Los componentes previamente descritos se observan en la Figura 2.3 [16].

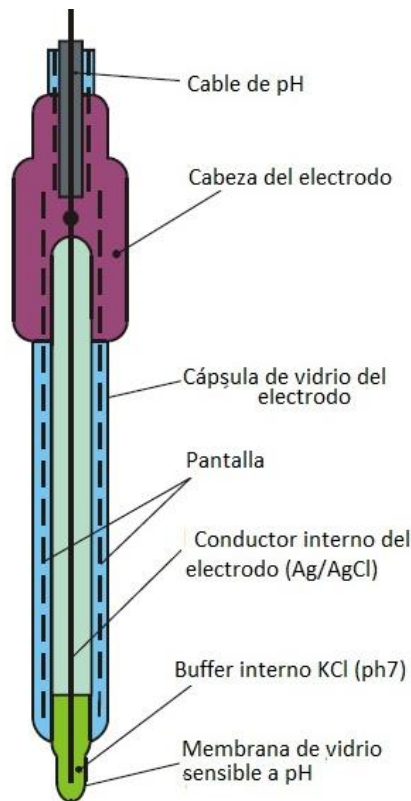


Figura 2.3 Componentes de un electrodo de vidrio.

**Impedancia del Electrodo de Vidrio:** La impedancia del electrodo de vidrio para pH está en el rango de  $10\text{ M}\Omega$  a  $100\text{ M}\Omega$  y es fuertemente dependiente de la temperatura. Una grieta o ruptura en el electrodo de vidrio crea un corto, lo que resulta en una impedancia de  $1\text{ M}\Omega$  o menos [18].

**Membrana de Vidrio:** Todos los tipos de vidrio poseen la propiedad de producir una diferencia de potencial relativa a la concentración de iones de hidrógeno en soluciones acuosas. Sin embargo solo tipos especiales, tales como el vidrio convencional de Mc-Innes, produce potencial galvánico el cual satisface la ecuación de Nerst en un amplio rango de escalas de pH. Cuando la membrana de vidrio de un electrodo de medición entra en contacto con una solución acuosa, forma una delgada capa de gel de aproximadamente  $10^{-4}\text{ mm}$  de espesor entre la superficie de vidrio y la solución. El espesor de la capa de gel depende en la calidad y composición de la membrana de vidrio, la temperatura y el valor de pH de la solución medida. Como la parte interna de la membrana de vidrio está en contacto con el buffer interior (una solución acuosa de pH7) una capa de gel también se forma en la parte interna de la membrana de vidrio [16].

**Electrodos Combinados:** Desde 1947 los fabricantes de electrodos han combinado el electrodo de medición y el electrodo de referencia en una sola unidad, por tal motivo el nombre de **electrodo combinado**. En un electrodo combinado el espacio concéntrico que lo rodea al electrodo de medición es llenado con el electrolítico de referencia y contiene el sistema interno de referencia. Un diafragma cerca del fondo de la cámara del electrolítico sirve de unión entre la solución KCL y el medio a medir. Como el electrolítico de referencia es un medio conductivo, este actúa como una pantalla para el

electrodo de medición. Los componentes de un electrodo de referencia se observan en la Figura 2.4 [16].

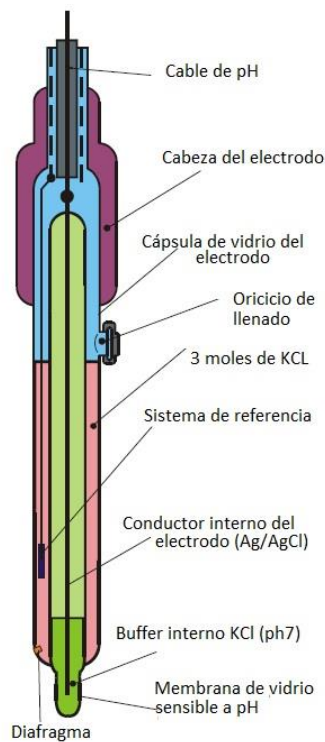


Figura 2.4 Componentes de un electrodo combinado.

**Transistores de Efecto de Campo Sensible a Iones:** El transistor de efecto de campo sensible a iones introducido por Bergveld tiene una estructura esencial de metal aislante transistor semiconductor de efecto de campo (MISFET) la compuerta de metal del electrodo la cual es sustituido por una solución analítica con un electrodo de referencia en los parámetros Eléctricos del ISFET como un dispositivo electrónico son muy similares a los dispositivos MISFET. La estructura general de un MISFET de n-canales se muestra en la Figura 2.5 la cual está formada por un sustrato p-Si en el cual se doparon 2 zonas con conductividad tipo n, llamadas drenador y fuente. Estas 2 zonas  $n^+$  están separadas por un canal tipo p, que en conjunto con la capa dieléctrica y un electrodo de metal conforman la compuerta del MISFET. El aislante de la compuerta normalmente se forma por una capa delgada crecida térmicamente de óxido de silicio (este dispositivo normalmente se conoce como MOSFET). Entonces, la compuerta de metal y el silicón forman 2 placas, por lo que al variar el potencial en la compuerta es posible controlar la concentración y tipo de cargas en la superficie de silicón. Para los dispositivos tipo p, cuando el voltaje aplicado en la compuerta ( $V_{GS}$ ) varía de negativo a positivo, el canal debajo del aislante de la compuerta será acumulado, reducido o invertido con mayor cantidad de portadores, así se modulará la conductancia del canal. Por lo tanto si se aplica un voltaje de polarización entre el drenador y la fuente ( $V_{DS}$ ), la corriente de drenador ( $I_D$ ) controlada por el voltaje de la compuerta pasara entre los 2 electrodos. El voltaje de umbral ( $V_{th}$ ) denota el valor del voltaje de la compuerta en el inicio de la inversión. Idealmente para  $V_{GS} < V_{th}$  no pasa corriente entre drenador y fuente. Dependiendo del punto de operación del MISFET puede funcionar en el régimen lineal o de saturación [16].

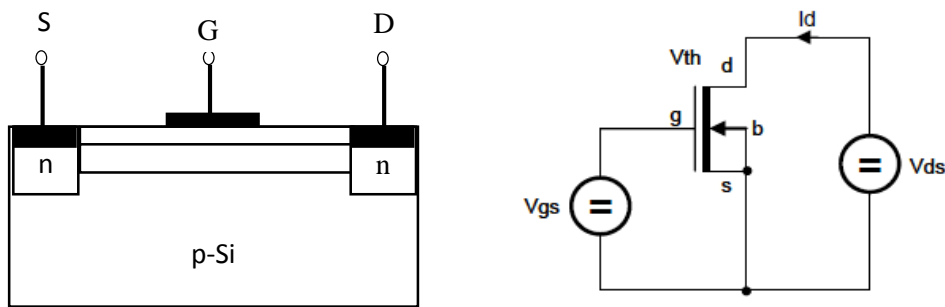


Figura 2.5 Estructura general de un MISFET canal n.

## 2.3 Sistema embebido

Un sistema embebido se define como un sistema electrónico diseñado específicamente para realizar unas determinadas funciones, habitualmente formando parte de un sistema de mayor entidad. La característica principal es que emplea para ello uno o varios procesadores digitales en formato microprocesador, o Microcontrolador lo que le permite aportar inteligencia al sistema anfitrión al que ayuda a gobernar y del que forma parte.

El campo de aplicación de los sistemas embebidos ha crecido notablemente en los últimos años. Abarca los ámbitos de procesos industriales, telecomunicaciones, electrónica de consumo y las áreas de aeronáutica y del sector automotriz, entre otras. Su gran diversidad y éxito se debe, en gran medida al bajo costo y versatilidad de las modernas unidades de procesamiento digital [19].

Para fines de estudio, un Sistema Embebido es un sistema computarizado especializado que es parte de un dispositivo o máquina mayor, que cumple funciones de monitoreo o control. Típicamente, un sistema integrado está armado en una tarjeta única con un microprocesador y memoria ROM. En la práctica muchos sistemas embebidos incluyen un sistema operativo, pero muchos son tan especializados que toda la lógica puede implementarse en un solo programa. Hoy en día, un sistema integrado puede constar de cientos de miles de líneas de código de programación. Cada vez más frecuentemente, los productores incluyen sistemas integrados complejos, lo que implica capacidad para integrar mejores prácticas y el desarrollo de plataformas de productos. Actualmente, los sistemas integrados suelen formar parte de redes distribuidas refinadas, esto es, se integran numerosos dispositivos complejos por medio de buses de campo. La necesidad de conectar diferentes aplicaciones en los sistemas para asegurar la información y los servicios en los dispositivos de campo está impulsando la implementación de tecnologías estándar, como Ethernet y los servicios Web [20].

El hardware de un Sistema Embebido consiste en uno o más procesadores programables que permiten hacer funcionar la parte software de la aplicación, un subsistema de memoria y bloques específicos para el funcionamiento dependiendo de la aplicación, incluyendo todas las interfaces de entrada y salida así como sensores y actuadores que establecen la conectividad con el dispositivo en que se encuentran embebidos o con el entorno. Una tendencia en cuanto a hardware es que tenderá a ser abierto (con diseño e interfaces abiertos y modificables por el usuario), de forma que se pueda utilizar para todo tipo de aplicaciones. Otro tema destacable de este apartado es el que hace referencia a la evolución de los chips ligada a su uso en Sistemas Embebidos. Se prevé que entre el 2015-2020 los chips tendrán integrados métodos de autoconfiguración y autodiagnóstico que

les permitirá adaptarse de forma óptima a las tareas en cada situación y trabajar en estado degradado [21].

---

## Tarjeta Arduino Yun

---

El sistema embebido Arduino es una plataforma física de computación de fuente abierta basada en una tarjeta simple de entrada/salida y de un ambiente de desarrollo que implementa el procesamiento de lenguaje ([www.processing.org](http://www.processing.org)). Arduino puede ser usado para desarrollar objetos interactivos autónomos o puede conectarse a software de la computadora (tales como Flash, Processing, VVVV, o Max/MSP). Arduino es diferente a otras plataformas del mercado por las siguientes características:

- Es un ambiente de multiplataforma; puede utilizarse en Windows, Macintosh y Linux.
- Basado en programación de procesamiento IDE, un ambiente de desarrollo de fácil uso, usado por artistas y diseñadores.
- Su programación es por cable USB o inalámbricamente.
- Es una fuente abierta de hardware y software.
- El hardware es de bajo costo.
- Hay una comunidad activa de usuarios.

El software IDE de Arduino es el ambiente de desarrollo integrado el cual contiene un editor de texto para la redacción de código, una área de mensajes, una consola de texto, una barra de herramientas con botones para funciones comunes y una serie de menús. Arduino está compuesto por dos partes principales: la tarjeta Arduino, que es la pieza de hardware donde se construyen los proyectos; y el Arduino IDE, la pieza de software que se utiliza en la computadora. Se utiliza el IDE para crear un sketch (un programa de computadora) que se carga a la tarjeta de Arduino. El sketch le dice a la tarjeta lo que debe de hacer [22].

A continuación de explicaran algunas especificaciones técnicas del Arduino Yun, la principal es que cuenta con dos procesadores y sus características se muestran en la Tabla 2.2. El AR9331 de Atheros es un sistema altamente integrado y rentable en un sistema en un chip de IEEE 802.11n 1x1 2.4 GHz para puntos de acceso de redes de área local inalámbricas y plataformas de ruteo. Soporta canales de operación arriba de 72 Mbps de 20MHz y 150 Mbps de 40MHz y una tasa de datos del IEEE 802.11b/g [23].

| Microcontrolador Arduino AVR |            | Microcontrolador Arduino AVR |                       |
|------------------------------|------------|------------------------------|-----------------------|
| Microcontrolador             | ATmega32U4 | Microcontrolador             | Atheros AR9331        |
| Voltaje de operación         | 5V         | Arquitectura                 | MIPS @400MHz          |
| Voltaje de entrada           | 5          | Voltaje de operación         | 3.3V                  |
| Pines digitales I/O          | 20         | Ethernet                     | IEEE802.3 0/100Mbit/s |
| Canales PWM                  | 7          | WiFi                         | IEEE802.11b/g/n       |
| Pines analógicos de entrada  | 12         | USB                          | 2.0 Host              |
| Corriente por pin I/O        | 40mA       | Lector de Tarjeta            | Solo Micro SD         |
| Corriente de Pin para 3.3V   | 50mA       | RAM                          | 64 MB DDR2            |
| Memoria Flash                | 32K        | Memoria Flash                | 16MB                  |
| SRAM                         | 2.5KB      | SRAM                         | 2.5KB                 |
| EEPROM                       | 1kB        | EEPROM                       | 1KB                   |
| Velocidad de reloj           | 16MHz      | Velocidad de reloj           | 16MHz                 |

Tabla 2.2. Especificaciones de los procesados ATmega32U4 y Atheros AR9331.

Arduino Yun es una placa electrónica basada en el ATmega32u4 y Atheros AR9331. El procesador Atheros es compatible con Linux ya que está basado en OpenWrt. La tarjeta fue construida para soportar Ethernet y Wi-Fi; cuenta con: un puerto USB, ranura para tarjeta micro-SD, 20 pines digitales de entradas/salida( de las cuales 7 pueden ser usadas como PWM y 12 como entradas analógicas), un conector micro USB, conector ICSP y 3 botones de reinicio, los cuales se muestran en la Figura 2.6.

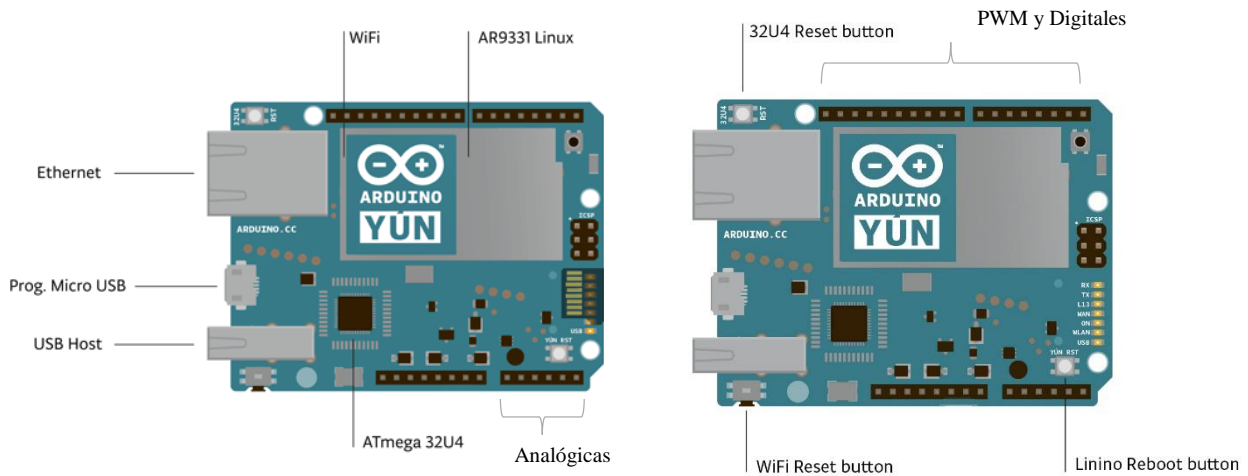


Figura 2.6 Componentes de la tarjeta Arduino Yun.

La librería Bridge facilita la comunicación entre los dos procesadores, dándole a los sketches de Arduino la habilidad de correr scripts, se comunica con interfaces de red, y recibe información del procesador AR9331. El Host USB, las interfaces de red y la tarjeta SD no están conectadas al 32U4, pero el AR9331, y la librería Bridge habilita al Arduino para comunicarse con esos periféricos. Estas conexiones se muestran en la Figura 2.7 [23].

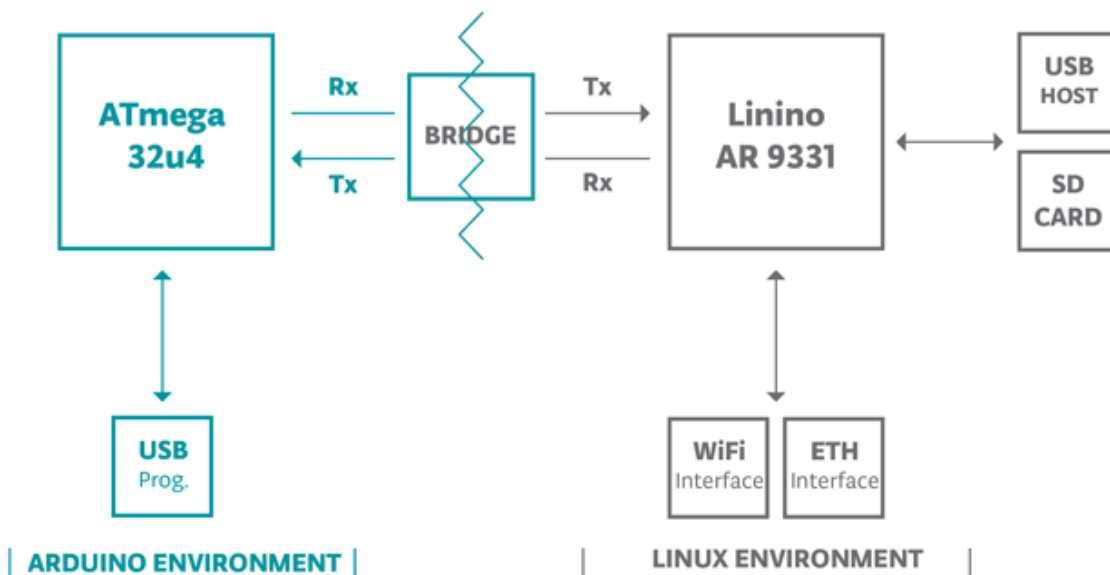


Figura 2.7 Interconexión interna entre los procesadores ATmega32u4 y AR9331.

---

## 2.4 Red de Área Local Inalámbrica

---

En general las WLANs (Red de Área Local Inalámbrica) se aplican a todos los mercados con la necesidad de movilidad de los usuarios o cuando la instalación de medios físicos no es factible. Las conexiones inalámbricas hacen posible el uso de computadoras portables en las manos para los usuarios móviles, como los médicos, enfermeras, inspectores. La implementación de dispositivos portables con conectividad inalámbrica facilita el acceso bases de datos comunes y aplicaciones para las necesidades de los usuarios, elimina el papeleo innecesario, decremento de errores, reduce costos de procesamiento y mejora la eficiencia global [24].

Hoy en día Wi-Fi es un término utilizado para describir una red de área local inalámbrica basada en las series estándar 802.11, la cual es una serie de técnicas inalámbricas usadas por el Instituto de Ingenierías Eléctrica y Electrónica (IEEE). La IEEE es una organización profesional internacional para ingenieros electrónicos y eléctricos, con lazos formales con Organización Internacional de Estandarización (ISO). El estándar IEEE 802.11 especifica una interface “sobre el aire” la cual consistente en tecnología de Radio Frecuencias (RF) para transmitir y recibir datos entre un cliente inalámbrico y una estación base o punto de acceso, así como entre dos o más clientes inalámbricos que resultan estar dentro de un rango de comunicación uno del otro (una configuración “ad hoc”) [25].

El estándar IEEE 802.11 resuelve problemas de compatibilidad entre productores de equipos de redes inalámbricas operando en bandas de frecuencia específicas dentro de un espectro libre de 2.4 GHz y 5 GHz. El término Wi-Fi comenzó hace algunos años como una alta tasa del estándar IEEE 802.11, que más tarde se convirtió en el conocido estándar IEEE 802.11b. Originalmente “Wi-Fi” se usó para tomar el lugar del estándar IEEE 802.11b (operando a 2.4 GHz y 11 Mbps). Sin embargo, en Octubre del 2002, la alianza Wi-Fi extendió la marca para incluir ambos el 802.11b y su hermano mayor de ancho de banda el 802.11a (54 Mbps) [25].

Las tecnologías WLAN ofrecen conectividad inalámbrica dentro de un edificio, campus o en ambientes de ciudad. La Figura 2.8 ilustra el concepto básico de las redes WLAN. El estándar 802.11 ha estado evolucionando por más de una década, resultando en el hoy 802.11n y muchos estándares legales (Figura 2.9) [24].

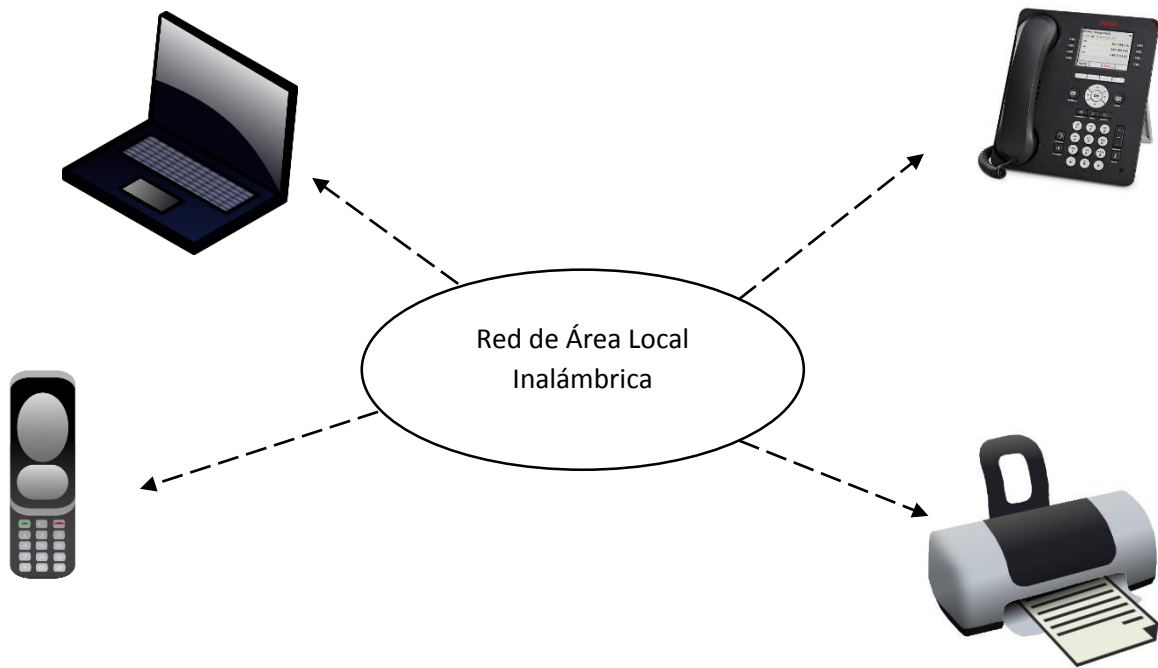


Figura 2.8 Redes inalámbricas que soportan comunicación inalámbrica a lo largo de una variedad de dispositivos de cliente.

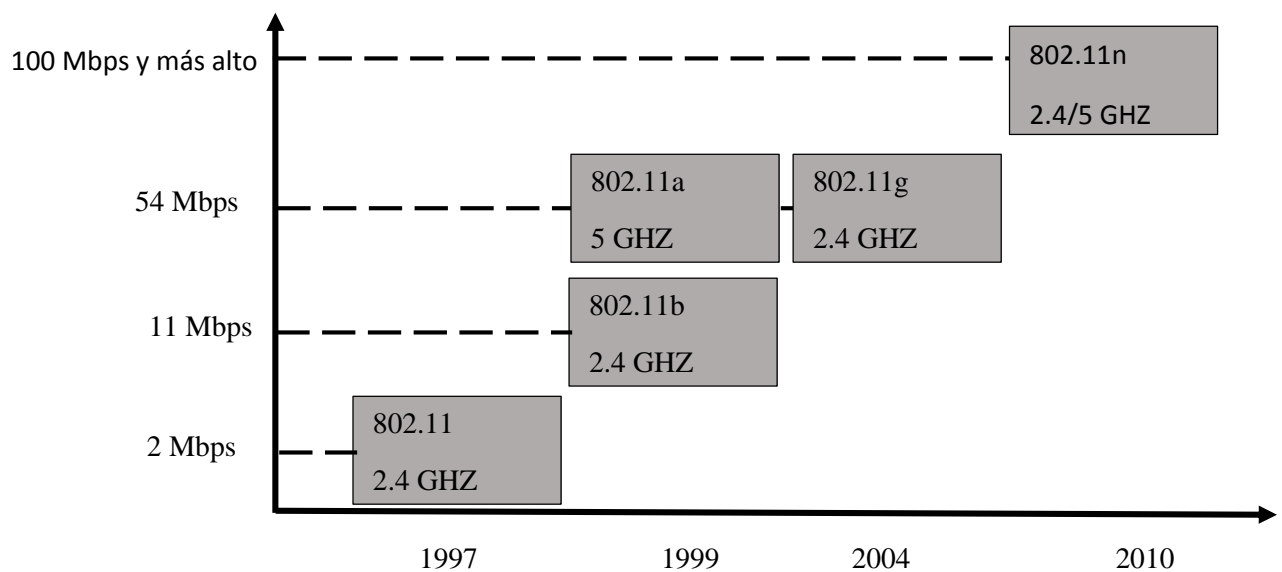


Figura 2.9 Estandarización del IEEE 802.11 ha llevado a un mayor desempeño.

Una comparación de los estándares anteriormente mencionados se muestra en la Tabla 2.3 [24].

| Espectro RF | Velocidad Max | Compatibilidad | Impacto de Interferencia RF | Fecha de ratificación |
|-------------|---------------|----------------|-----------------------------|-----------------------|
|-------------|---------------|----------------|-----------------------------|-----------------------|

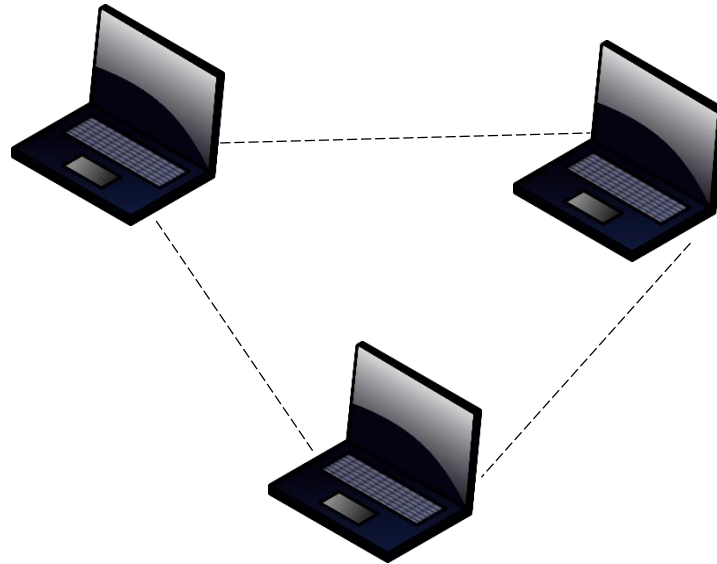
|         |                         |   |                                  |          |      |
|---------|-------------------------|---|----------------------------------|----------|------|
| 802.11a | 5-GHz                   | 54 Mb/s   | No trabaja con 802.11b o 802.11g | Leve     | 1999 |
| 802.11b | 2.4-GHz                 | 11 Mb/s   | trabaja con 802.11g              | Moderado | 1999 |
| 802.11g | 2.4-GHz                 | 54 Mb/s   | trabaja con 802.11b              | Moderado | 2004 |
| 802.11n | 2.4-GHz<br>Y<br>2.5-GHz | Cientos de Mb/s dependiendo de la configuración | trabaja con 802.11g              | Leve     | 2009 |

Tabla 2.3. Comparación

de estándares 802.11.

Existen tres tipos de de área local y es WLAN en diferentes dependiendo de los sistema. Las incluyen las

- Ad hoc como "punto muestra en requiere del 802.11 en los clientes conectados que no hay



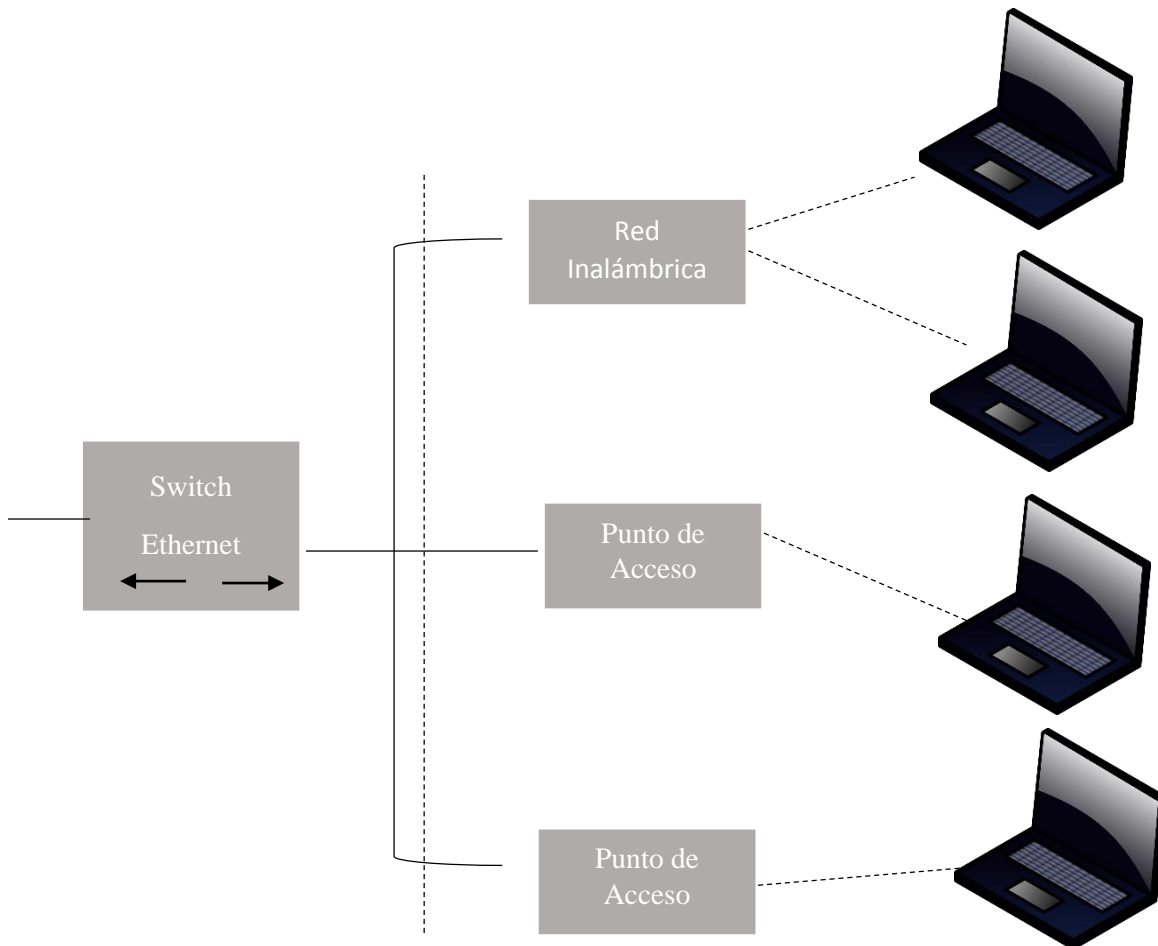
redes inalámbricas posible configurar la arquitecturas, requerimientos del estructuras físicas siguientes [24]:

(también conocidas a punto"), como se la Figura 2.10, solo radio de cliente los dispositivos de que están a la red. Debido a puntos de acceso o controladores de

WLAN y las estaciones están dentro del rango de cada uno, los datos transmitidos por una estación de origen en particular viaja directamente a la estación de destino aplicable. La razón de ser de la forma de red Ad hoc es habilitar a los usuarios una configuración espontanea de la WLAN. Los puntos de acceso no son necesarios, lo que hace que las redes punto a punto sean más fáciles de establecer y desconectar [24].

Figura 2.10 Una red Ad hoc inalámbrica provee conectividad a múltiples clientes dentro del rango de cada una.

- **Infraestructura.** Una Infraestructura WLAN es lo que la mayoría de las compañías, punto cliente y propietarios implementan, como se muestra en la Figura 2.11, ofrece un medio para extender la red cableada. En esta configuración uno o más puntos de acceso inalámbricos de interfaz de dispositivos móviles a un sistema de distribución. Cada punto de acceso forma un radio, también llamado un conjunto de servicios básico (BSS), que habilita a los usuarios inalámbricos localizados dentro de una célula a tener conectividad al punto de acceso. Esto permite a los usuarios comunicarse con otros usuarios inalámbricamente, y con aplicaciones de servidores y red conectados a un sistema de distribución [24].



*Figura 2.11 Una infraestructura inalámbrica LAN interconecta dispositivos cliente a un sistema de distribución por cable y se extiende la cobertura a través del uso de puntos de acceso*

- **Malla.** Hace uso de las mallas de nodos, que son similares a los puntos de acceso, excepto que las mallas de nodos se conectan uno al otro de forma inalámbrica como se muestra en la Figura 2.12. Por tanto se evitan las conexiones Ethernet. Este tipo de red es útil para áreas donde no es factible instalar una WLAN tradicional que consiste en puntos de acceso. Cada malla de nodos utiliza sus propios protocolos de malla, implementa un protocolo de ruteo que enruta paquetes entre los dispositivos del cliente y las conexiones alámbricas a los servidores de Internet [24].

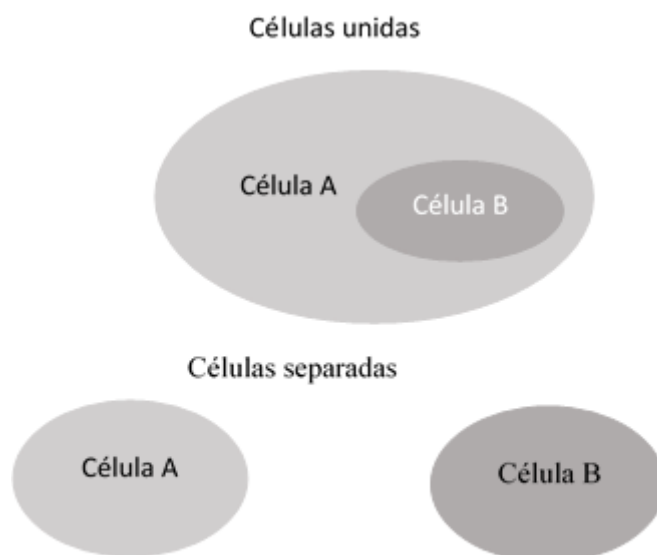


Figura 2.12 Una WLAN unida y una separada.

---

## 2.5 Fundamentos básicos del protocolo de transmisión

---

La base para alcanzar un buen conocimiento de las técnicas Ajax es el protocolo de transmisión de hipertexto (HTTP), el protocolo que sirve para transmitir páginas Web, imágenes y otros tipos de archivos a través de Internet entre el navegador Web y el servidor. Siempre que escribimos una dirección URL en el navegador, la precedemos del término `http://`, indicando que queremos utilizar el protocolo HTTP para acceder a la información de una ubicación determinada. HTTP está formado por dos partes: una petición y una respuesta. Cuando escribimos una dirección URL en un navegador Web, ésta crea y envía una petición en nuestro nombre. Esta petición contiene la dirección URL que hemos escrito, así como alguna información sobre el navegador en sí. El servidor recibe esta petición y envía de vuelta una respuesta. La respuesta contiene información sobre la petición, así como los datos que se encuentran en dicha dirección URL. El navegador se encarga de interpretar la respuesta y mostrar la página Web [26].

---

### Ajax

---

En el artículo "Ajax: A New Approach to Web Applications" [26] Garrett mencionaba varias tecnologías que él veía como componentes de una solución Ajax. Estas son:

HTML/XHTML. Lenguajes para la representación del contenido principal.

CSS. Proporciona formato y estilo a XHTML.

DOM. Actualización dinámica de una página cargada.

XML. Formato para intercambio de datos.

XSLT. Transforma XML en XHTML (dando estilos con CSS).

XMLHttp. El principal medio de comunicación.

JavaScript. Lenguaje de script que se utiliza para programar un motor Ajax.

En realidad, todas estas tecnologías se pueden utilizar para construir soluciones Ajax, pero sólo tres de ellas son obligatorias: HTML/XHTML, DOM y JavaScript. XHTML es, obviamente, necesario para mostrar la información, mientras que DOM es necesario para cargar fragmentos de una página. XHTML sin necesidad de recargarla. La última parte, JavaScript es necesaria para iniciar la comunicación cliente-servidor y manipular el modelo DOM para actualizar la página Web [26].

Ajax no es más que un método de aproximación para la interacción en la Web. Esta metodología implica transmitir solamente una pequeña cantidad de información desde y hacia el servidor para que el usuario obtenga una respuesta lo más rápida posible. Cuando el motor Ajax recibe la respuesta del servidor, para a la acción a menudo analizando los datos y realizando varios cambios a la interfaz de usuario en función de la información que se ha proporcionado. Ya que este proceso implica transferir menos información que en el modelo de aplicaciones Web tradicional, las interfaces de usuario se actualizan más rápidamente y el usuario puede trabajar con mayor comodidad. La Figura 2.13 es una adaptación de la figura que incluía Garrett en su artículo, mostrando la diferencia entre Ajax y los modelos de aplicaciones Web tradicionales [26].

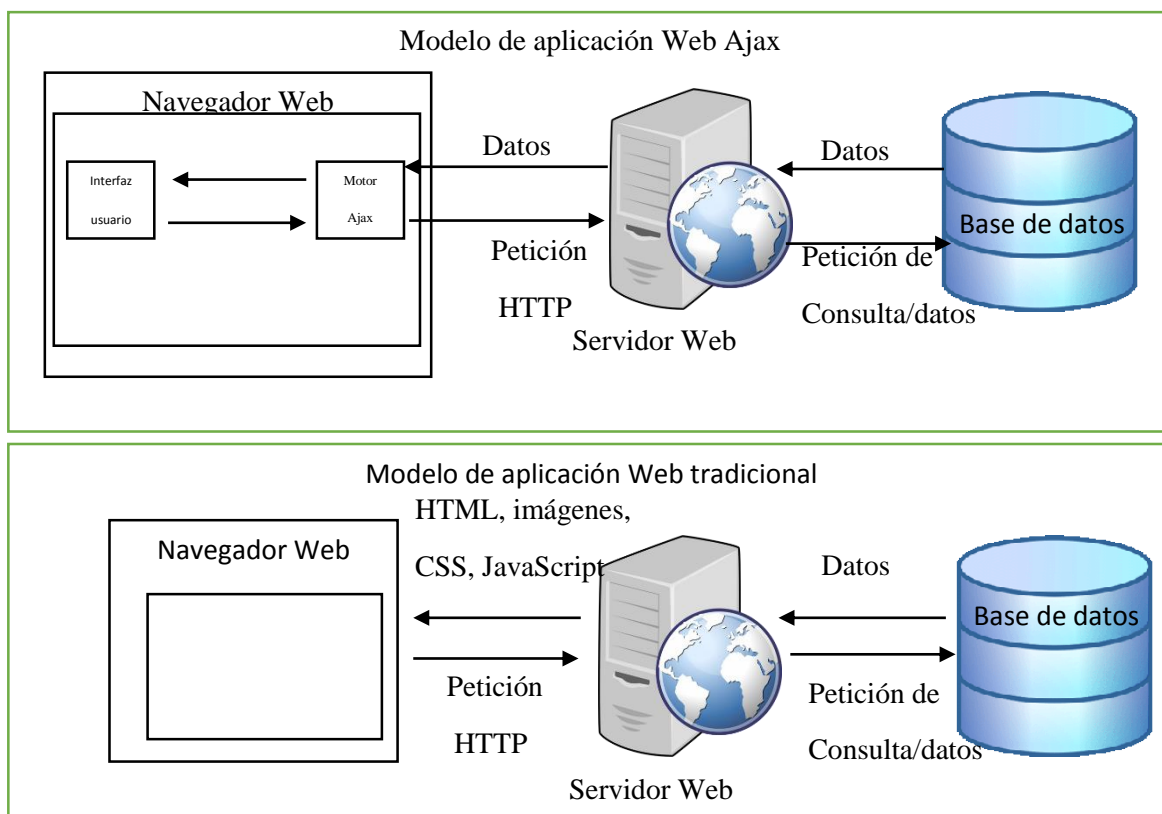


Figura 2.13 Comparación de modelos Web tradicional y Ajax.

## JSON

Con la creciente popularidad de los servicios Web, XML se ha convertido prácticamente en el estándar para transmisiones de datos. Por ejemplo, algunos lo consideran demasiado ampuloso para los propósitos de la transmisión de datos, necesitando transmitir a través de Internet muchos más bytes de información para realizar una tarea que se podría llevar a cabo con un flujo de información mucho más pequeño. Para tener esto en consideración, se han desarrollado nuevas formas de

compresión XML e incluso, nuevos formatos XML completos. Douglas Crockford, un experimentado ingeniero de software, propuso un nuevo formato de datos construido sobre JavaScript llamado JSON, JavaScript Object Notation (notación de objetos JavaScript).JSON es un formato de datos muy ligero basado en un subconjunto de la sintaxis de JavaScript, en concreto, literales de matrices y objetos. Dado que utilizan la sintaxis JavaScript, las definiciones JSON pueden incluirse dentro de archivos JavaScript y acceder a ellas sin ningún análisis adicional como los necesarios con lenguajes basados en XML [26].

---

## 2.6 Conclusiones

---

En este capítulo se abordan las características de los materiales seleccionados para ser implementados en el sistema, para el caso del sensor de pH el sensor de tipo electrodo combinado presenta gran ventaja para su implementación; ya que selecciono para la transmisión inalámbrica el protocolo 802.11, se seleccionó un sistema embebido Arduino, ya que consta con un módulo Wi-Fi integrado; y finalmente como el objetivo es realizar un monitoreo de las variables fisiológicas en tiempo real se analizaron las ventajas de utilizar una motor de búsqueda Ajax, ya que el despliegue del intercambio de información se realiza más rápidamente.

---

# **CAPÍTULO 3**

## **ANÁLISIS, DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA ELECTRÓNICO DE MONITOREO**

---

---

### **3.1 Descripción del sistema**

---

El presente trabajo está dirigido al desarrollo de un prototipo experimental para apoyar un conjunto de estudios dirigidos a reconocer la capacidad de adaptación y resiliencia de los bovinos circunscritos a un ambiente de reducido confort que vulnera su bienestar animal limita su capacidad productiva y restringe la oportunidad de integrarlos a sistemas productivos sustentables.

Se diseñó un bolo que es una carcasa para recubrir toda la electrónica necesaria para realizar las mediciones de pH, temperatura y transmisión de datos, dicho bolo es introducido al rumen de la vaca a través de la fistula ruminal, una vez ahí se realiza un monitoreo constante de los sensores de pH y temperatura. Este monitoreo de los sensores arroja un par de señales que son acondicionadas para ser introducidas al ADC del microprocesador. En el microprocesador se crea un servidor web local para la transmisión inalámbrica utilizando el estándar IEEE802.11n; se cuenta también con una tarjeta de memoria micro SD en la cual se almacenaran los datos de temperatura, pH y batería, igualmente se aloja la página web creada; en la estación de trabajo del usuario se utiliza un navegador web para hacer una petición al servidor y se inicie la transmisión inalámbrica de los datos y su almacenamiento en la memoria SD.

El diagrama general a nivel de bloques del sistema implementado se observa en la Figura 3.1 el cual consta de tres fases fundamentalmente, en la primera fase se encuentran los elementos sensores de las variables fisiológicas por estudiar, la segunda fase es la circuitería que forma parte del condicionamiento de las señales y finalmente la tercera fase es la etapa de adquisición de datos y base de datos.

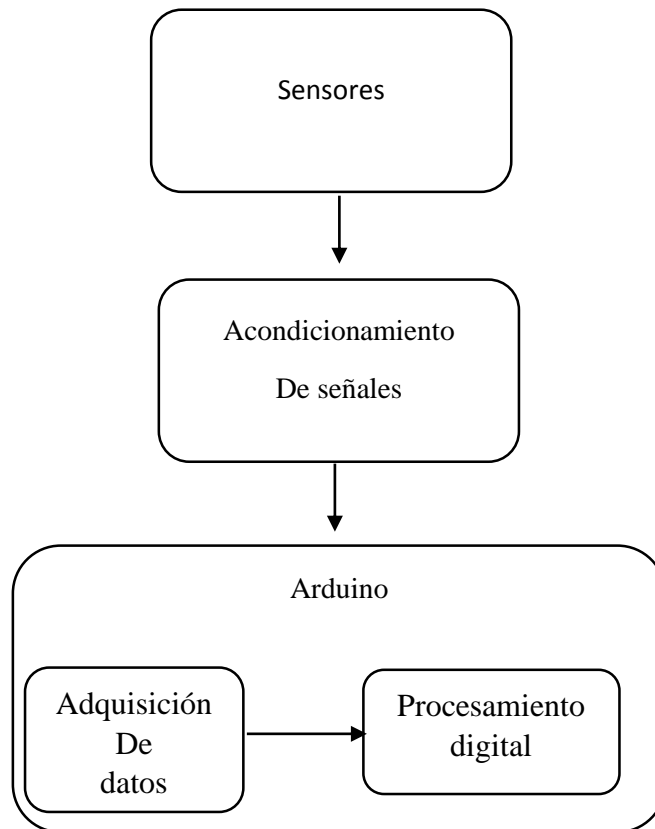


Figura 3.1 Diagrama a bloques del hardware implementado.

Las señales eléctricas provenientes de los sensores pasan posteriormente a la etapa de acondicionamiento de la señal, este bloque está conformado por elementos tales como fuente de alimentación que polariza a la totalidad del sistema, así como aquellos relacionados con el sensado de temperatura y pH, lo anterior mencionado se montó en una tarjeta de circuito impreso de la cual el diseño se realizó en Altium.

Finalmente las señales procesadas del acondicionamiento de las señales son enviadas a la tarjeta Arduino utilizada para la adquisición de datos de este sistema, ya que cuenta con un dispositivo WiFi, en esta tarjeta se almacenan los datos en la memoria externa SD.

---

## 3.2 Diseño y caracterización del sistema electrónico para el monitoreo de la temperatura corporal

---

El sensor LM35 es un Sensor de Precisión de Temperatura en Grados Centígrados. Presenta una configuración tal que proporciona una salida de voltaje lineal proporcional a la temperatura en centígrados de  $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ , siendo una de sus principales características el no necesita calibración externa. Una característica importante es que la lectura se expresa en grados centígrados, a diferencia de otro que la lectura se muestra en grados kelvin, lo que para muchos usuarios no es tan común. El LM35 puede funcionar con una alimentación simple o conmutada ( $\pm$ ), su consumo de potencia es de aproximadamente  $60\mu\text{A}$ , tiene un bajo auto-calentamiento de  $0.1^{\circ}\text{C}$  en aire estático. El LM35 puede operar en un rango entre  $-55^{\circ}\text{C}$  hasta  $+150^{\circ}\text{C}$  y una exactitud de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  [27].

En la Figura 3.2 se observa el diagrama a bloques para la adquisición de la temperatura. El cual se realizó con un sensor LM35, al cual se le acopló una etapa de acondicionamiento para poder ser adquirida por el ADC del Arduino.

Como ya se mencionó, el sensor de temperatura LM35 presenta una resolución  $10\text{mV}/^\circ\text{C}$ , además de una respuesta lineal. De lo anterior, sólo fue necesario considerar en el diseño una amplificación del rango de la señal, lo cual se implementó con un amplificador operación en configuración no inversor con una ganancia de seis.

Tomando en consideración el medio ambiente donde se alojara el bolo (rumen) y que este se encuentra a una temperatura entre  $39\text{-}40^\circ\text{C}$ , se estableció un rango de pruebas que varía en una temperatura mínima de  $20^\circ\text{C}$  a una temperatura máxima de  $45^\circ\text{C}$ .

Por lo que el rango efectivo después del acondicionamiento de la señal de temperatura antes de ser introducido al ADC del Arduino se encuentra en un rango de  $1.2\text{V}$  a  $2.7\text{V}$

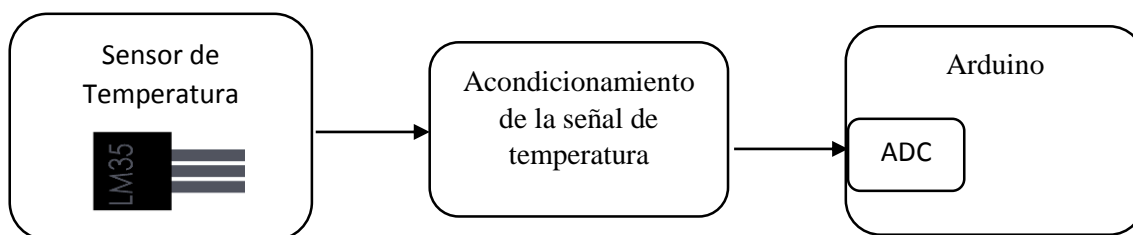


Figura 3.2 Diagrama a bloques de medición de temperatura.

El proceso de caracterización del sensor de temperatura se realizó mediante un arreglo experimental donde se contó con el sensor LM35, un sensor de mercurio y un elemento calefactor. Posteriormente se realizó un control de temperatura para establecer una temperatura constante. Se realizaron las mediciones de ambos sensores, las cuales se observan en la Figura 3.3.

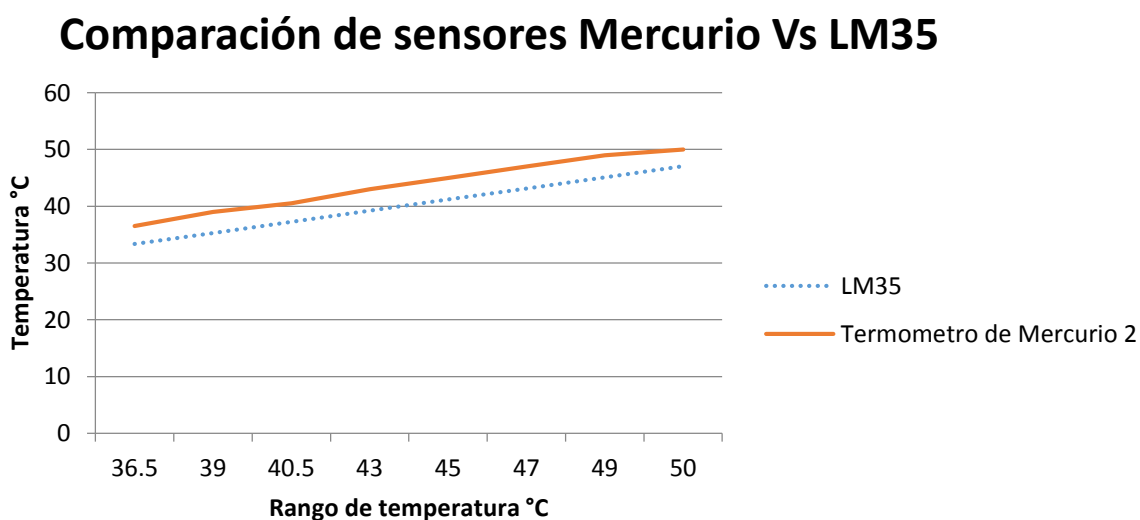


Figura 3.3 Comparación de sensores LM35 y de Mercurio.

Se toma como patrón de referencia el sensor de mercurio y se realiza un ajuste para que la señal del sensor LM35 se modifique y genere la temperatura del sensor de mercurio, dicha modificación se muestra en la Figura 3.4.

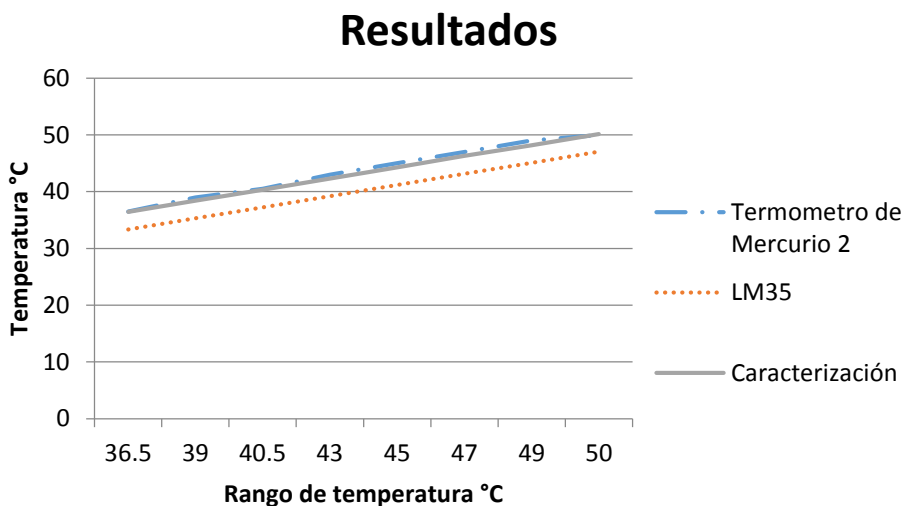


Figura 3.4 Comparación de resultados después del acondicionamiento digital.

Como era de esperarse, el sensor bajo estudio presentó una sensibilidad de 10mV/°C, esto implica que por cada cambio de grado centígrado se tiene aproximadamente un cambio de 2 bits; el regulador que alimenta al Arduino otorga una fuente de alimentación de 4.9V y el ADC del Arduino es de 10 bits, por lo que se tiene una resolución de 4.9V/1023bits= 4.78mV/bit. Para aumentar la relación °C/bits se realizó una amplificación de la salida del sensor de temperatura.

Se utilizó un Amplificador Operacional en configuración No Inversor en voltaje de 6. La ecuación que describe esa configuración es:

$$V_{out} = V_{in} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (3.1)$$

Llevando a cabo la manipulación algebraica de la ecuación 3.1 y asignando un valor de  $R_1 = 1k\Omega$ , se implementa el circuito mostrado en la Figura 3.5, y su ecuación descriptiva es:

$$V_{o5(Temperatura)} = V_{LM35} \left( 1 + \frac{R_{16}}{R_{15}} \right) \quad (3.2)$$

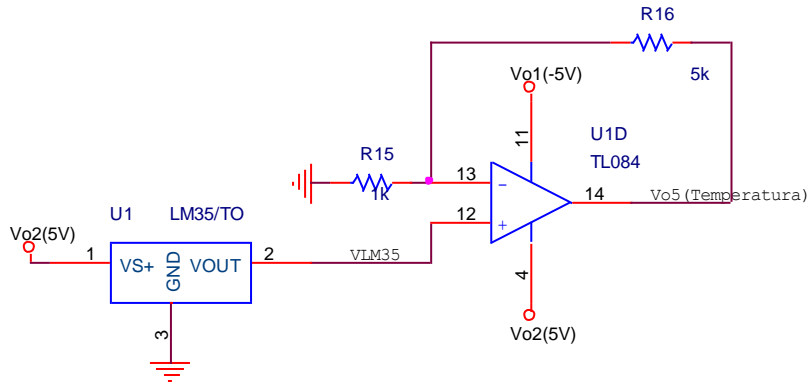


Figura 3.5 Circuito de acondicionamiento de Temperatura.

Para corroborar el previo funcionamiento del circuito se realizó una simulación PSCICE, la cual se observa en la Figura 3.6 , en donde aplicando un voltaje de entrada de 0.23V se obtiene un voltaje de salida de 1.38V, lo cual confirma la ganancia de 6.

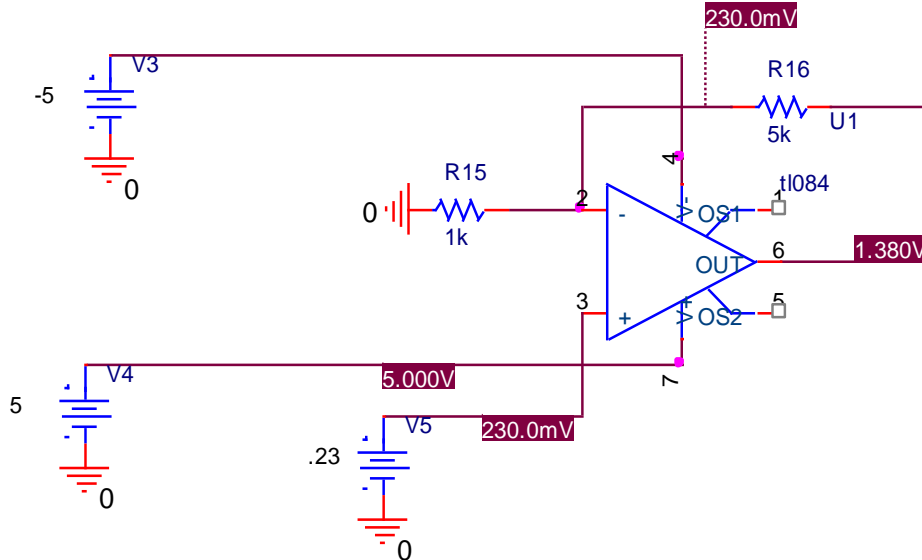


Figura 3.6 Simulación PSPICE del circuito seguidor.

### 3.3 Diseño y caracterización del sistema electrónico para el monitoreo de pH ruminal

A continuación se muestra la caracterización con un sensor para medir el pH del tipo de transistores de efecto de campo sensible a iones. En sensor ISFET utilizado para esas pruebas se adquirió en el Instituto de Microelectrónica de Barcelona Centro Nacional de Microelectrónica (CNM). El ISFET tiene una clave 5292-10-079 para su fácil identificación, el cual se puede observar en la Figura. 3.7.



Figura 3.7 Sensor ISFET 5292-10-079.

Las pruebas para la caracterización electroquímica del sensor ISFET 5292-10-079 se realizaron en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), en Santa María Tonanzintla, Puebla. En colaboración con el estudiante de doctorado M.C. Berni Manolo Pérez Ramos. Mediante la configuración del equipo Analizador de Parámetros para Semiconductores Agilent, se realizó un barrido de voltaje en el electrodo de referencia de 0 a 1.5V con un intervalo de muestreo de 0.005V; se aplicó un voltaje drenaje a fuente  $V_{DS}$  de 500mV; las soluciones buffer que se utilizaron fueron pH10, pH7 y pH4, respectivamente. La respuesta del sensor se observa en la Figura. 3.8.

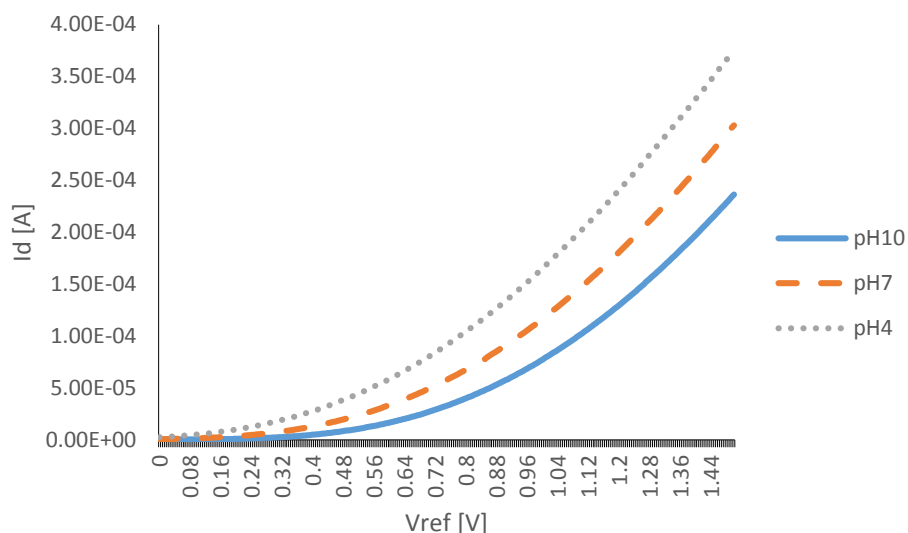


Figura 3.8 Curvas características del Sensor ISFET 5292-10-079.

Analizando los datos de las curvas características en el punto de operación establecido se obtuvo la Tabla 3.1 con la cual se obtiene el valor de la sensibilidad del sensor; de la tabla se observa que en promedio la sensibilidad del sensor está en 50.9420 mV/pH lo cual concuerda con lo presentado en la teoría.

| Sensibilidad |          |         |          |          |           |           |
|--------------|----------|---------|----------|----------|-----------|-----------|
| [mV/pH]      | pH10-pH7 | pH7-pH4 | pH10-pH4 | pH4-pH7* | pH7-pH10* | pH4-pH10* |
| @100 $\mu$ A | 50.864   | 52.104  | 51.484   | 50.425   | 50.375    | 504.001   |

Tabla 3.1. Sensibilidad del sensor ISFET 5292-10-079.

El siguiente paso fue la implementación de un ISFET-metro para medir el pH. Las pruebas para el ISFET-metro se realizaron en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), en Santa María Tonanzintla, Puebla. En colaboración con el estudiante de doctorado M.C. Luis Antonio Carrillo Martínez.

El diagrama a bloques del sistema se muestra en la Figura 3.9. Para la generación de  $-V_{cc}$  se usó el circuito integrado ICL7660 para generar un voltaje  $-V_{cc} = -5V$ . Con respecto a la generación de  $V_{ds} = 500mV$  e  $I_{ds} = 100\mu A$  se utilizaron fuentes de corrientes LM334. El circuito calibración y de protección consistió en un divisor de voltaje de  $+V_{cc}$  y  $-V_{cc}$  conectado a dos diodos.

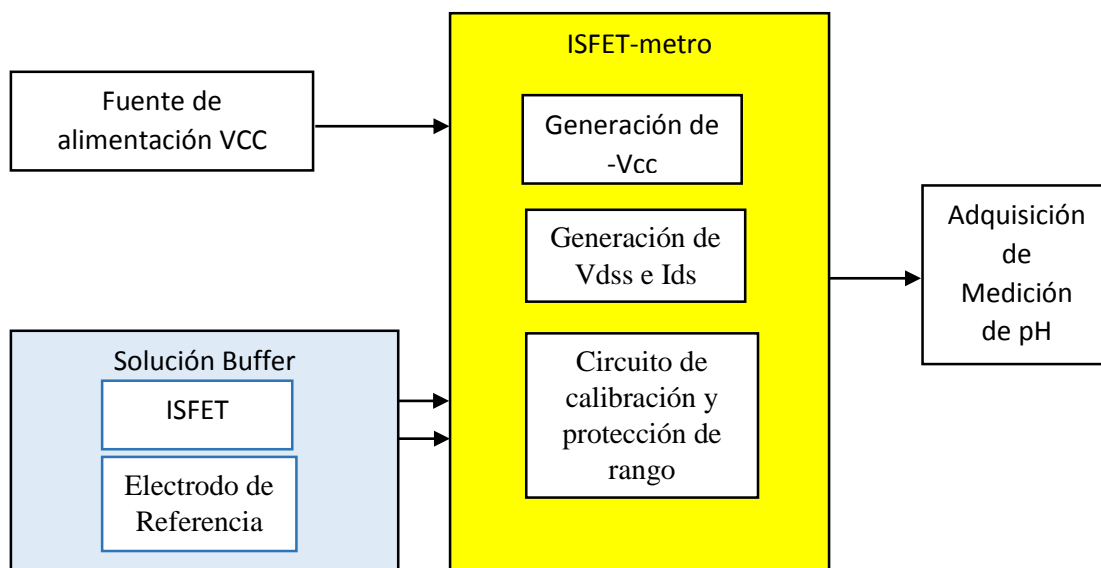


Figura 3.9 Diagrama a bloques para la medición con el ISFET-metro.

Finalmente el sistema implementado se muestra en la Figura 3.10.

El cual arrojó los datos mostrados en la Tabla 3.2.

Temperatura [°C]

|             |    |                   |                    | 28       | 40    | 60    |
|-------------|----|-------------------|--------------------|----------|-------|-------|
| Sensor      | pH | VrefElectrodo [V] | VoutCalibración[V] | Vout [V] |       |       |
| 5292-10-079 | 7  | 1                 | 0.92               |          |       |       |
| 5292-10-079 | 10 | 1                 |                    | 0.923    | 0.904 | 0.887 |
| 5292-10-079 | 7  | 1                 |                    | 0.919    | 0.913 | 0.902 |
| 5292-10-079 | 4  | 1                 |                    | 0.919    | 0.917 | 0.906 |
| 5292-10-079 | 7  | 1                 |                    | 0.922    | 0.92  | 0.909 |
| 5292-10-079 | 10 | 1                 |                    | 0.92     | 0.914 | 0.899 |

Tabla 3.2. Respuesta del circuito IFET-metro.

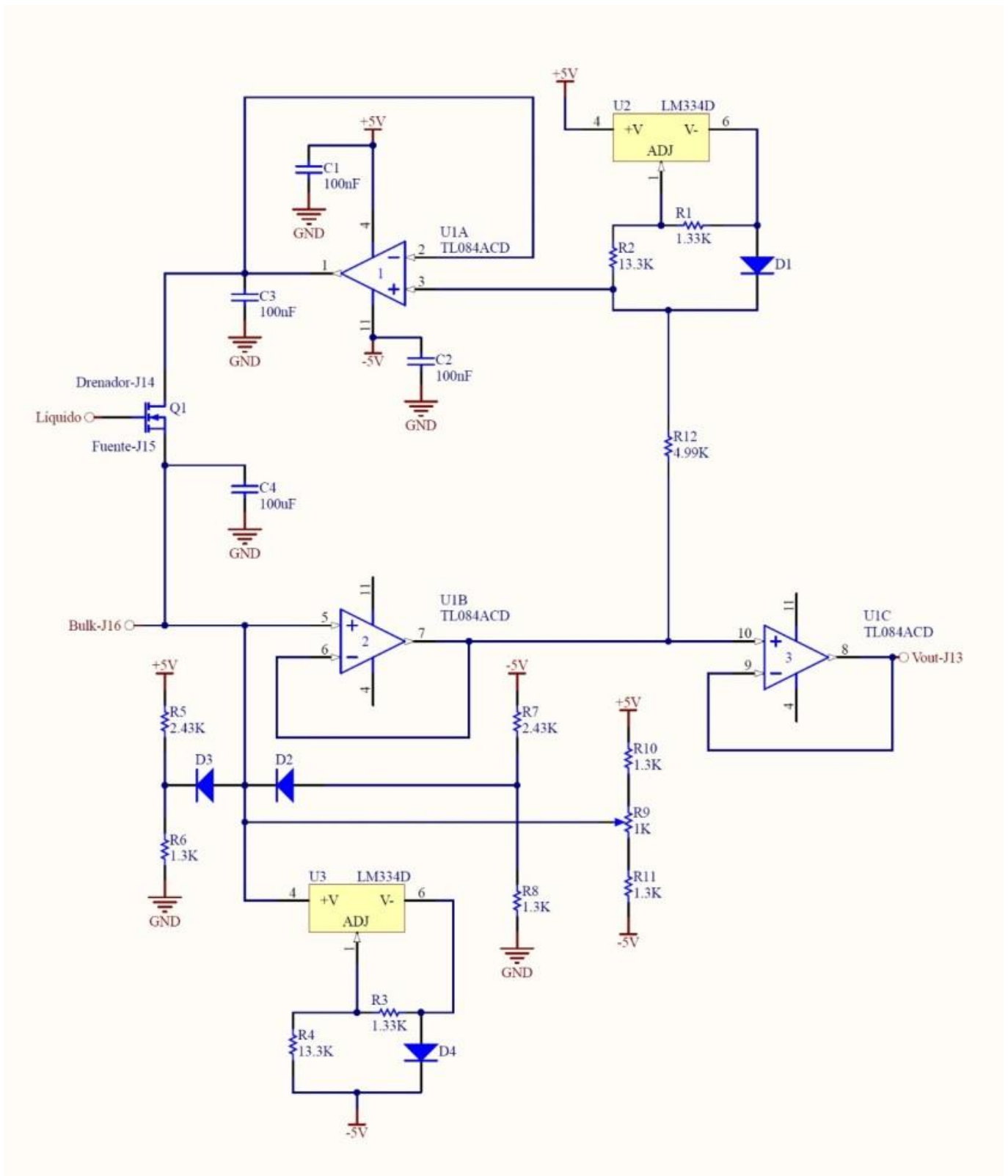


Figura3.10 Esquemático utilizado como ISFET-metro.

De la Tabla 3.2 se observa que los datos arrojados en lazo de histéresis ya no permanecieron iguales. Para la primera medición de pH10 se tiene una sensibilidad promedio de 1.18611 mV/°C. Para la primera medición de pH7 se tiene una sensibilidad promedio de 0.5270 mV/°C. Para la medición de pH4 se tiene una sensibilidad promedio de 0.3743 mV/°C.

Se ha evidenciado que existe en los ISFET inestabilidad térmica que puede afectar la veracidad de la medida. Esta variabilidad varía según la fuente consultada de 1mV/°C a 12 mV/°C. Esta inestabilidad es debida básicamente a 4 causas [28]:

La dependencia térmica del potencial que se genera en la interface dieléctrico-electrolito o potencial electroquímico.

El comportamiento térmico del electrodo de referencia.

Las características térmicas del electrolito.

Las características térmicas del semiconductor.

Debido a la baja sensibilidad que presentó el circuito se consultó la teoría para implementar otra opción.

Partiendo de las curvas características del sensor mostradas en la Figura 3.8, se busca reproducir las condiciones: a) variación del voltaje de referencia ( $V_{ref}$ ) de 0–1.5V y b) una corriente de drenaje fija ( $I_d$ ) de 100µA. El circuito implementado se muestra en la Figura 3.11.

Las mediciones arrojadas por el circuito se observan en la Tabla 3.3 y en la Figura 3.12, se continúan observando variaciones muy pequeñas, pero el mayor problema es el corrimiento de las curvas de pH4 y pH7.

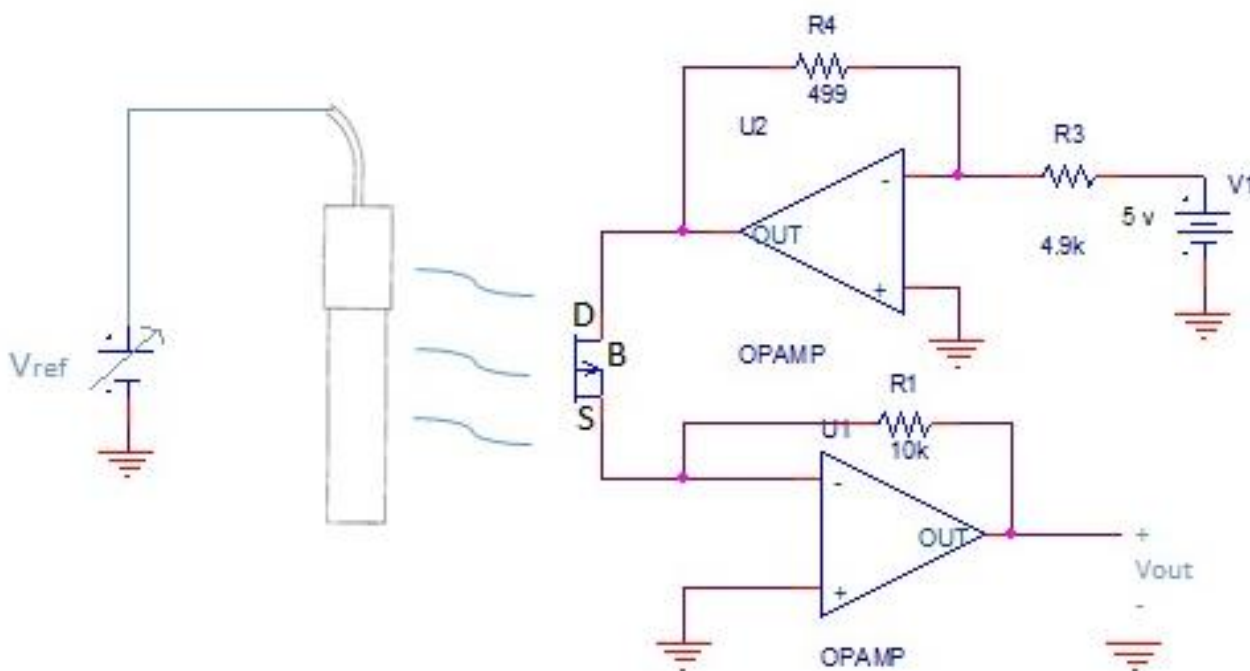


Figura 3.11 Sistema implementado para las condiciones: voltaje de referencia ( $V_{ref}$ ) de 0-1.5V y una corriente de drenaje fija de 100µA.

| pH | Vref [mV] |     |     |     |     |
|----|-----------|-----|-----|-----|-----|
|    | GND       | 0.5 | 1   | 1.5 | 2   |
| 10 | 825       | 812 | 803 | 794 | 786 |
| 7  | 848       | 838 | 827 | 820 | 812 |
| 4  | 835       | 824 | 814 | 805 | 798 |

Tabla 3.3. Mediciones del circuito de caracterización.

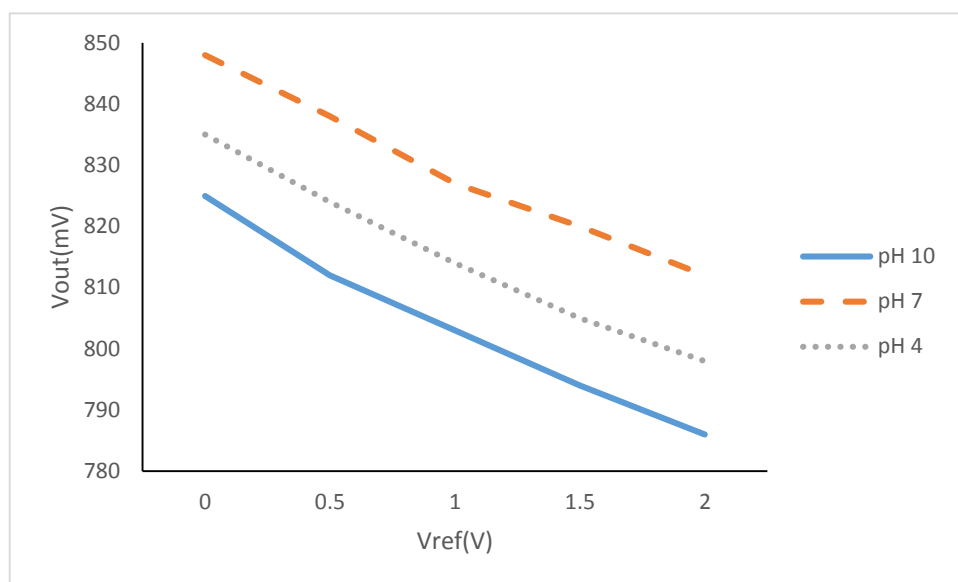


Figura 3.12

circuito de caracterización donde se observa el corrimiento en pH4 y pH7.

Gráficas del

De los datos mostrados de los dos circuitos implementados para reproducir el comportamiento que el sensor presentó en la caracterización electroquímica, se observa la tabla 3.3, en la cual se obtiene una sensibilidad promedio no mayor a los 0.6mV por grado de pH. Y es por tal motivo que se decidió no utilizar este tipo de sensor para la implementación del sistema.

En la Figura 3.13 se observa el diagrama a bloques para la adquisición de pH, el cual cuenta con las siguientes etapas:

- Acoplamiento de impedancias. El electrodo combinado de pH presenta una impedancia de entrada en el rango de  $10\text{M}\Omega$  a  $100\text{M}\Omega$  por lo que se decidió hacer uso de amplificadores operacionales TL084 que cuentan con una impedancia de entrada de  $10^{12}\ \Omega$  [29]. Utilizando el amplificador operacional en configuración de seguidor de voltaje el consumo de corriente es casi despreciable con lo cual se logró el acoplamiento de impedancias entre el sensor y el resto del circuito.
- Calibración del punto equipotencial. Una vez ajustada la impedancia del electrodo, es necesario el ajuste del voltaje que corresponda a un pH neutro, en el caso del electrodo combinado este punto neutro se presenta en un pH7 a 0V. Este objetivo se logra con la utilización de un amplificador operacional en configuración de diferenciador con una ganancia unitaria, en el cual el voltaje en la terminal inversora es regulado por un potenciómetro el cual hará el ajuste de cero.
- Ajuste del rango de la señal. Para que la señal sea introducida al ADC del Arduino se establece un rango de operación de 0V a 4V. Para ello se utilizaron dos amplificadores operacionales, el primero en configuración de amplificador inversor y el segundo como sumador inversor.
- Filtro pasa bajas. Ya que el medio a medir es un componente electroquímico, este medio presenta fluctuaciones de la señal. Para eliminar el ruido que pudiera afectar la señal

adquirida se diseñó un filtro pasa bajos con frecuencia de corte de 0.0328Hz. El filtro activo se conformó de un capacitor, una resistencia y un amplificador operacional.

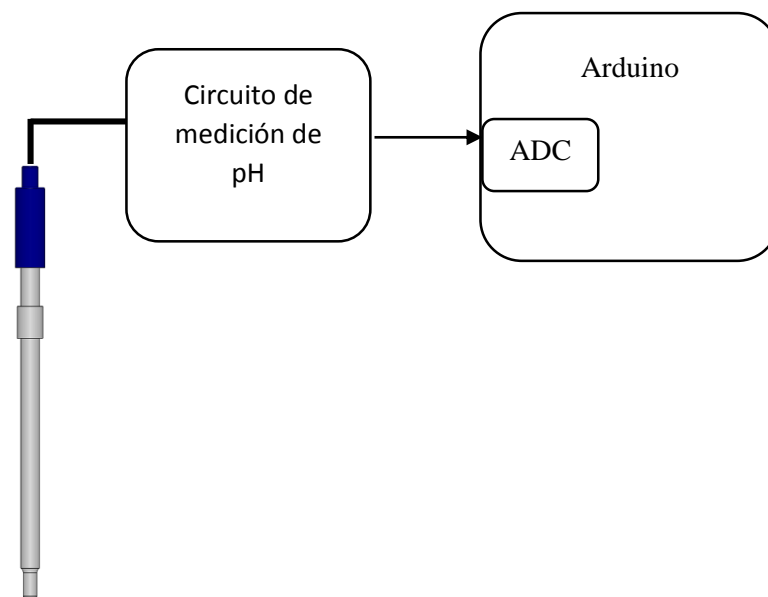


Figura 3.13 Diagrama a bloques de medición de pH.

Una vez analizadas las grandes prestaciones que aporta un electrodo de vidrio para la medición de pH se adquirió un electrodo de medición de la marca Sensorex, el modelo SG200C que se observa en la Figura 3.14 el cual cuenta con las siguientes especificaciones de rendimiento se muestran en la Tabla 3.4 [30].



Figura 3.14 Electrodo Combinado Sensores modelo SG200C

| SG200C                 |                   |
|------------------------|-------------------|
| Rango de pH            | 0-14              |
| Respuesta              | 95% en 1 segundo  |
| Punto equipotencial    | pH 7.00 (0mV)     |
| Offset                 | ±0.2 pH           |
|                        | 97% del teórico o |
| Rango                  | mayor             |
| Rango de temperatura   | 0-100°C           |
| Diámetro               | 12mm              |
| Largo                  | 150mm             |
| Referencia             | sellado           |
| Material               | vidrio            |
| Referencia             | Ag/AgCl           |
| Solución de Referencia | 3,5 M KCl         |
| Forma de vidrio        | Hermi             |

*Tabla 3.4. Especificaciones técnicas del SG200C.*

Como primer paso es el recordar una característica elemental del electrodo de vidrio, y esta es que la impedancia del electrodo de vidrio está en el rango de 10 MΩ a 100 MΩ; motivo por el cual se va a trabajar con amplificadores operacionales que tengan una alta impedancia de entrada.

El amplificador operacional TL084 cuenta con una impedancia de entrada del orden de  $10^{12}\Omega$  y trabaja con una alimentación dual de máximo  $\pm 18V$  [29].

Para conocer la respuesta natural del sensor el primer paso que se realizó fue la implementación de un circuito seguidor, utilizando el circuito integrado TL084 por la alta impedancia de entrada. El circuito implementado se observa en la Figura 3.15.

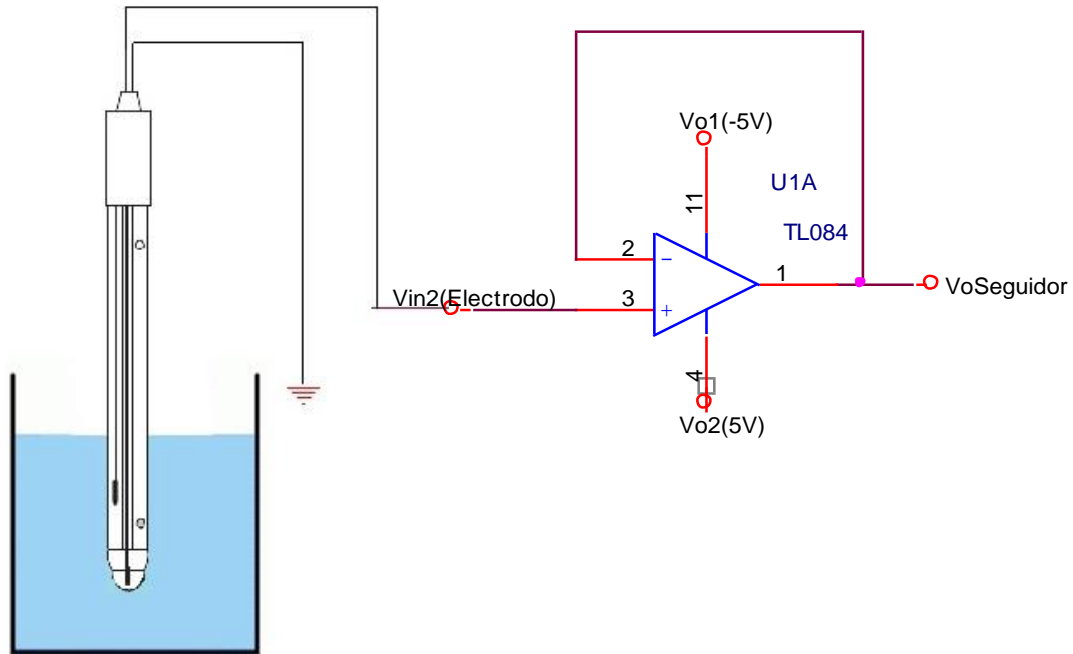


Figura 3.15 Circuito Seguidor de Voltaje.

Para corroborar el previo funcionamiento del circuito seguidor se realizó una simulación PSCICE, la cual se observa en la Figura 3.16, en donde aplicando un voltaje de entrada de  $-0.150\text{V}$  simulando un pH de 4 y se obtiene un voltaje de salida de  $-150\text{mV}$ , lo cual confirma el funcionamiento del circuito en configuración seguidor de voltaje.

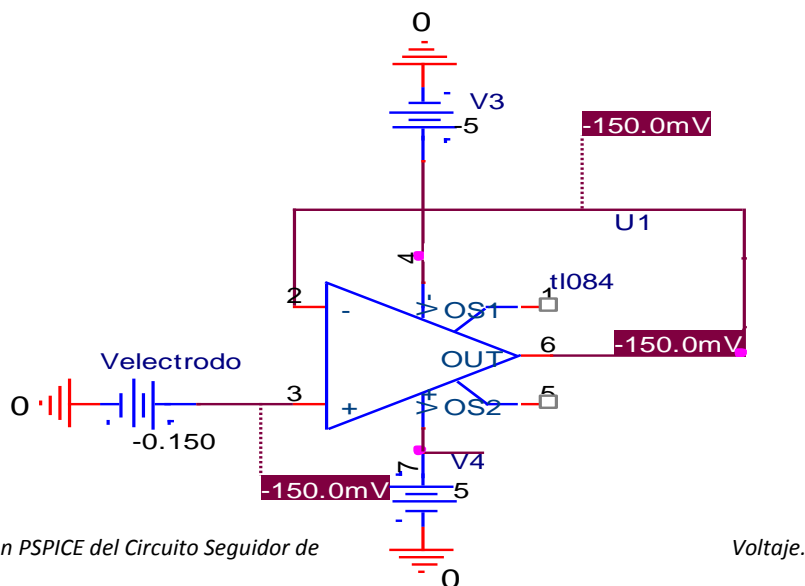


Figura 3.16 Simulación PSpice del Circuito Seguidor de

Voltaje.

Los datos obtenidos a la salida del seguidor de voltaje fluctuaban con respecto del tiempo, esto se aprecia en la Figura 3.17. Motivo por el cual fue necesario implementar un filtro pasa bajas.

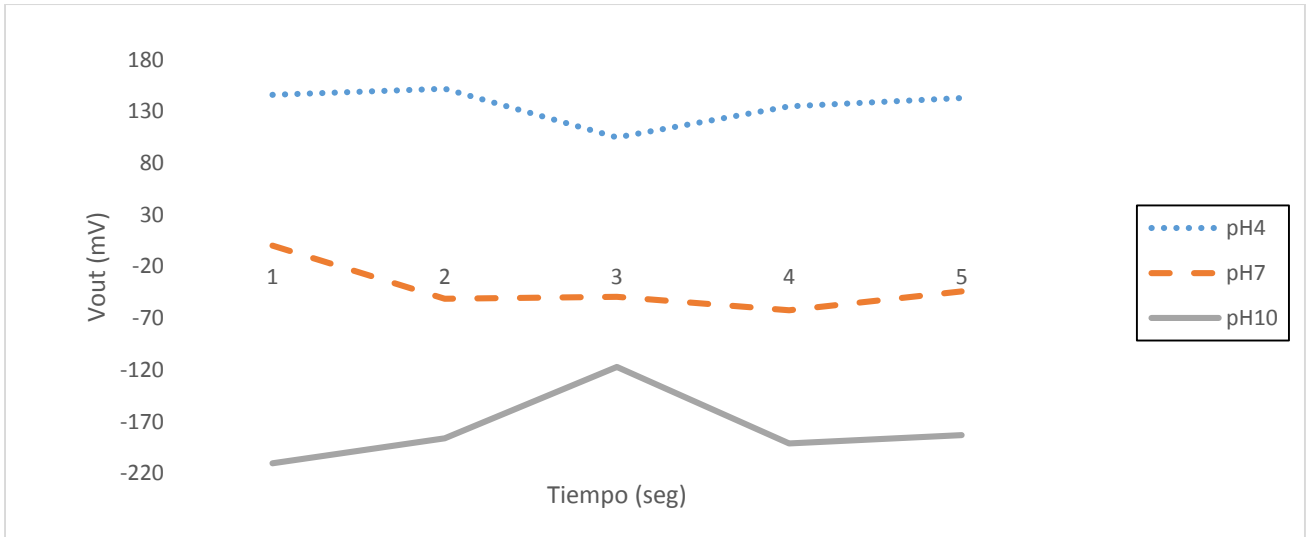


Figura 3.17 Variación del voltaje con respecto del tiempo.

El objetivo de un filtro pasa bajas es permitir el paso de frecuencias bajas y bloquear frecuencias altas. Este circuito se implementó con una frecuencia de corte de 0.0328 Hz para eliminar interferencias externas. Un filtro pasa bajas activo de primer orden consta de una resistencia, un capacitor y un amplificador operacional como se muestra en la Figura 3.18.

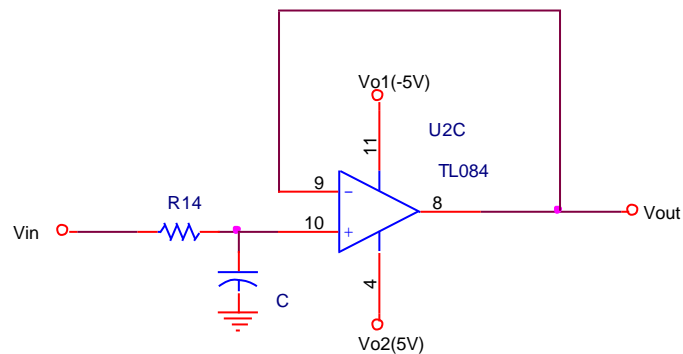


Figura 3.18 Filtro pasa bajas activo de primer orden.

Analizando el voltaje a la salida del filtro se obtiene:

$$V_{out} = \frac{V_{in}Z_c}{R+Z_c} = \frac{V_{in}\frac{1}{sC}}{R+\frac{1}{sC}} = \frac{V_{in}}{RSC+1} \quad (3.3)$$

Ahora bien se obtiene la función de transferencia del filtro pasa bajas:

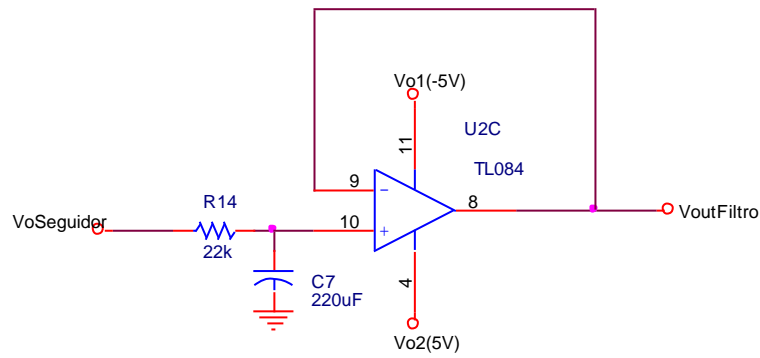
$$H(s) = \frac{1}{RSC+1} \quad (3.4)$$

Pasando al dominio de la frecuencia con  $s=j\omega$  la función de transferencia es:

$$H(j\omega) = \frac{1}{1+j\omega RC} \quad (3.5)$$

Siendo  $\omega_c = \frac{1}{RC}$  la frecuencia de corte

$$H(j\omega) =$$



$$\frac{1}{1+j\frac{\omega}{\omega_c}} \quad (3.6)$$

$$\omega_c = \frac{1}{T} = 0.0328\text{Hz} \quad (3.7)$$

$$\omega_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.8)$$

Considerando el capacitor de valor de 220 $\mu$ F.

$$R = \frac{1}{2\pi\omega_c C} = \frac{1}{2\pi(0.0328\text{Hz})(2200\mu\text{f})} = \frac{1}{0.000045} \approx 22222.22\Omega \quad (3.9)$$

Por lo que el valor comercial más cercano es de 22K $\Omega$ .

Y el circuito implementado se muestra en la Figura 3.19.

Figura 3.19 Filtro Pasa Bajas a 0.0328Hz.

Para corroborar el previo funcionamiento del filtro pasa bajas se realizó una simulación PSCICE, la cual se observa en la Figura 3.20, en donde se observa una frecuencia de corte de 32mHz.

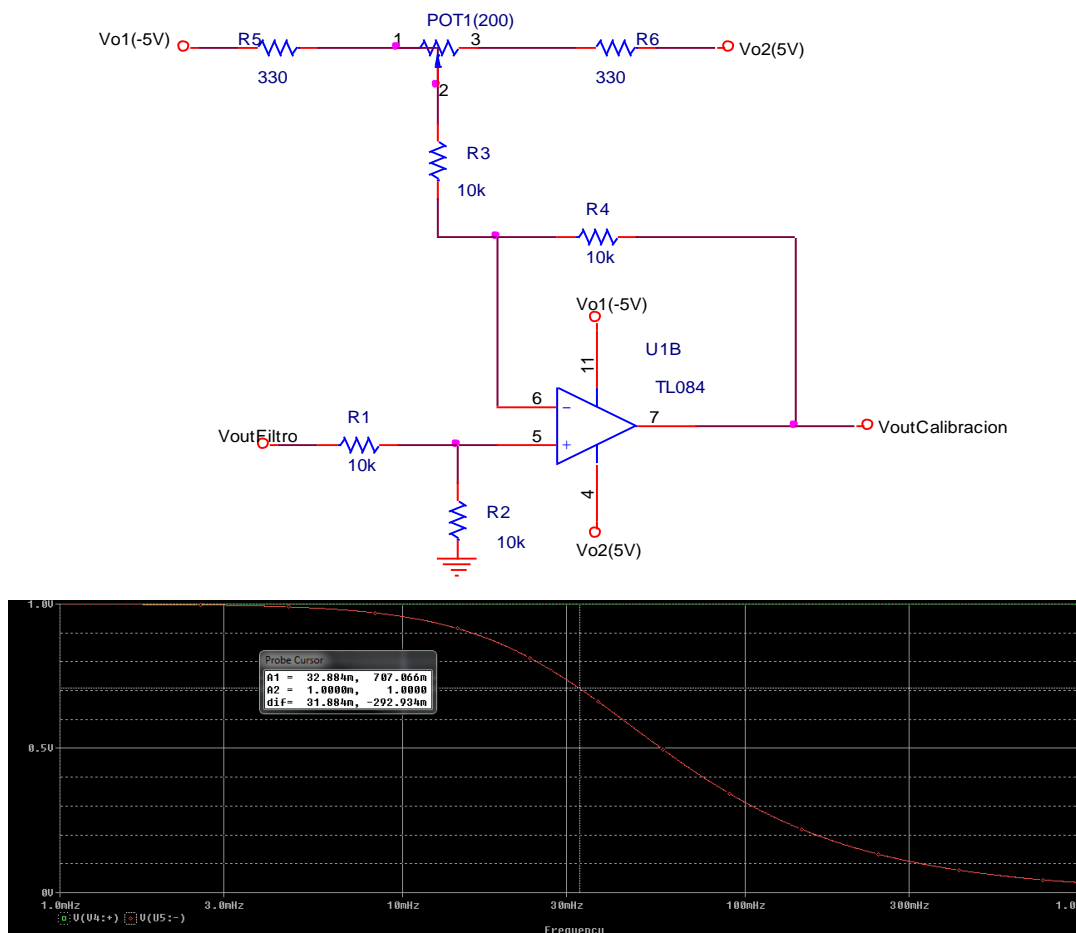


Figura 3.20 Simulación en PSPICE del Filtro Pasa Bajas a 0.0328Hz.

De las especificaciones del electrodo de vidrio SG200C se especifica que el punto equipotencial se encuentra a pH 7.00 (0 mV). Motivo por el cual se implementó un circuito de calibración en donde el objetivo es que a una solución de pH7 se obtenga un valor lo más cercano a 0V.

Para lograr este objetivo se utiliza un amplificador operacional en configuración de diferenciador con una ganancia unitaria.

El circuito diferenciador se observa en la Figura 3.21 y su ecuación descriptiva es:

$$Vout_{calibración} = Vout_{filtro} - V_{potenciometro1} \quad (3.10)$$

Figura 3.21 Circuito de calibración con un amplificador operacional.

Para corroborar el previo funcionamiento del circuito de calibración se realizó una simulación PSCICE, la cual se observa en la Figura 3.22, en donde se aplica un voltaje de entrada de 0V para simular un pH7, en el potenciómetro de calibración se sustituyó por una fuente para ejemplificar un offset en el punto equipotencial, como se observa a la salida del circuito implementado un voltaje de -300mV. Es por ello que es muy importante siempre verificar que se obtenga un voltaje de 0V en una solución de pH7.

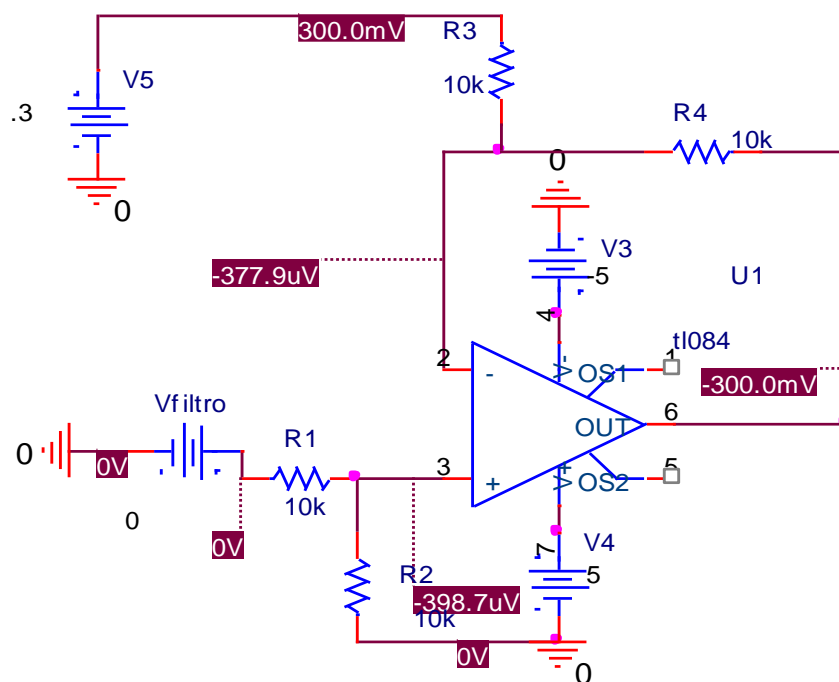


Figura 3.22 Simulación en PSPICE del circuito de calibración con un amplificador operacional.

Hasta este punto el rango de la señal se encuentra entre -150mV a 150mV. Este rango de voltaje no es el óptimo para hacer una conversión digital. Por tal motivo lo que se busca es trabajar en un rango de voltaje de 0-4V. Figura 3.23.

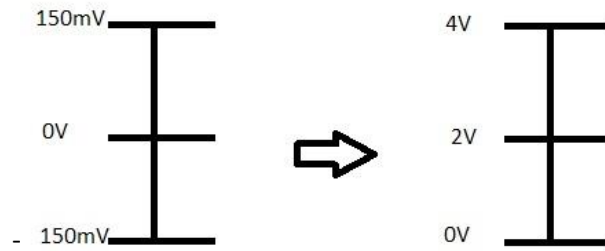


Figura 3.23 Rango de acoplamiento.

Haciendo un poco de desarrollo matemático se obtiene:

$$4 = 0.150a + b \quad (3.11)$$

$$0 = -0.150a + b \quad (3.12)$$

$$b = 0.150a \quad (3.13)$$

$$a = \frac{4}{0.3} = 13.33 \quad (3.14)$$

$$b = 0.150 * 13.3 = 2 \quad (3.15)$$

Utilizando la ecuación de la recta:

$$y = ax + b = 13.3x + 2 \quad (3.16)$$

Para implementar esta ecuación se utilizan dos amplificadores operacionales, el primero como amplificador inversor y el segundo como sumador inversor.

Para el amplificador inversor su ecuación de salida es:

$$V_{out_{amp}} = -V_{in_{cal}} \frac{R_8}{R_7} \quad (3.17)$$

Y se busca una ganancia de 13.3 por lo que los valores de las resistencias son los siguientes:

$$13.33 = \frac{R_8}{R_7} \quad (3.18)$$

$$R_8 = 10k\Omega \quad (3.19)$$

$$R_7 = \frac{10k\Omega}{13.33} = 751\Omega \quad (3.20)$$

El valor de  $R_7$  se deja en una resistencia de  $860\Omega$ .

Para el sumador inversor se tiene una ganancia unitaria y es la suma del amplificador inversor más un offset de 2V.

Para el sumador inversor su ecuación de salida es:

$$V_{out_{sumador}} = -R_{10} \left( \frac{V_{out_{amp}}}{R_9} + \frac{V_{out_{2v}}}{R_{11}} \right) \quad (3.21)$$

Finalmente el circuito de acoplamiento de rango se observa en la Figura 3.24. El cual tiene una función de transferencia de:

$$V_{out_{rango}} = 13.33 \left( (V_{out_{calibración}}) + (V_{out_{2v}}) \right) \quad (3.22)$$

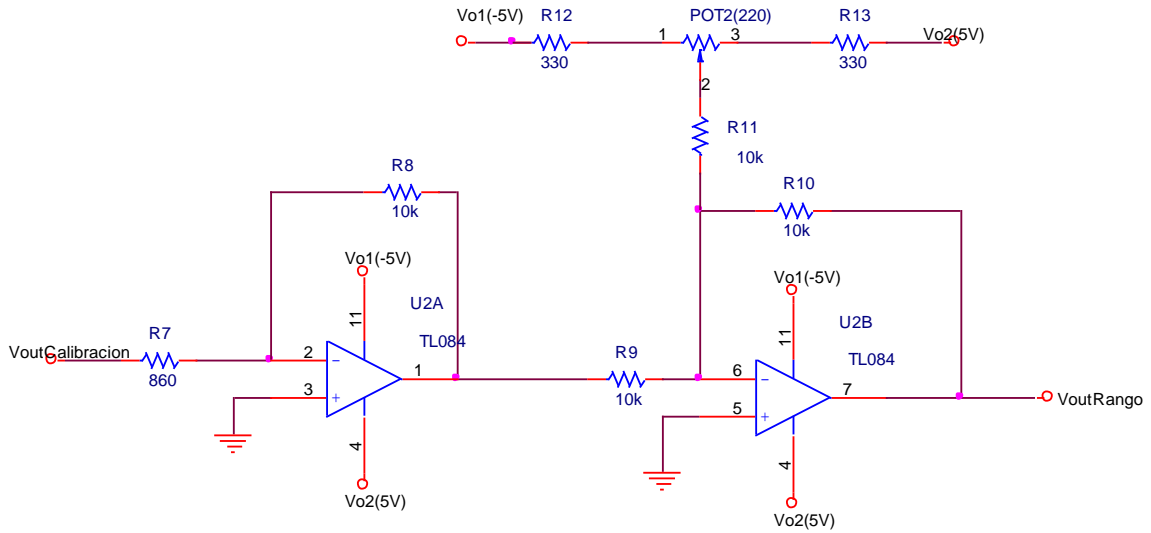


Figura 3.24 Circuito de acoplamiento de rango.

Para corroborar el previo funcionamiento del circuito de ajuste de rango se realizó una simulación PSCICE, la cual se observa en la Figura 3.25, en donde aplicando un voltaje de entrada de calibración de 0V emulando un pH7 y se obtiene un voltaje de salida de 2V, lo cual confirma el funcionamiento del circuito.

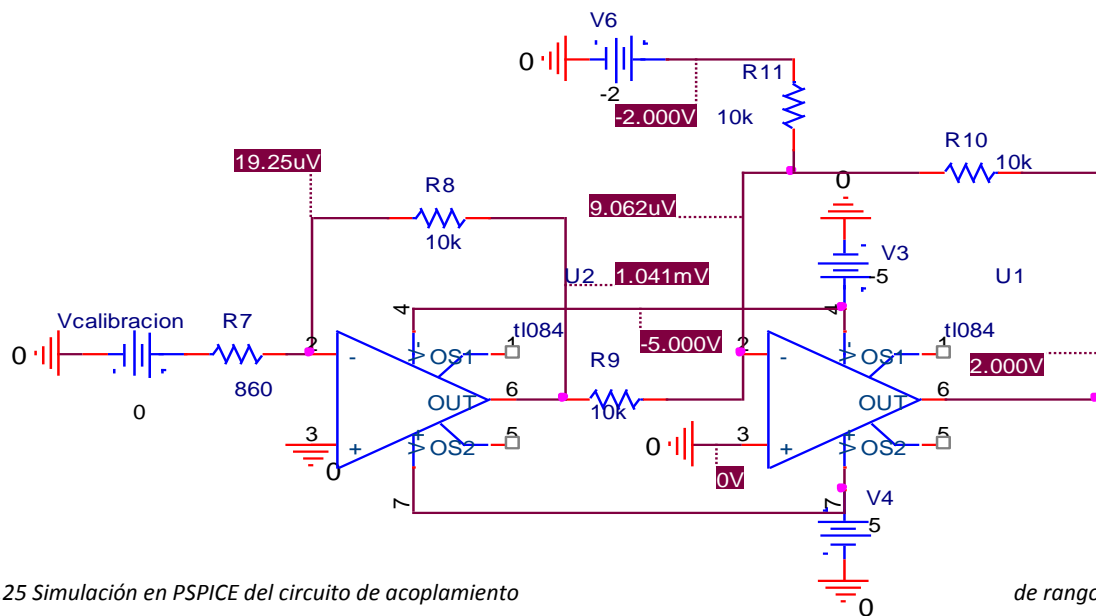


Figura 3.25 Simulación en PSpice del circuito de acoplamiento

de rango.

Después de la etapa de acoplamiento, la señal es adquirida por el ADC de la tarjeta Arduino. El circuito eléctrico diseñado para esta etapa de medición de pH se muestra en la Figura 3.26.

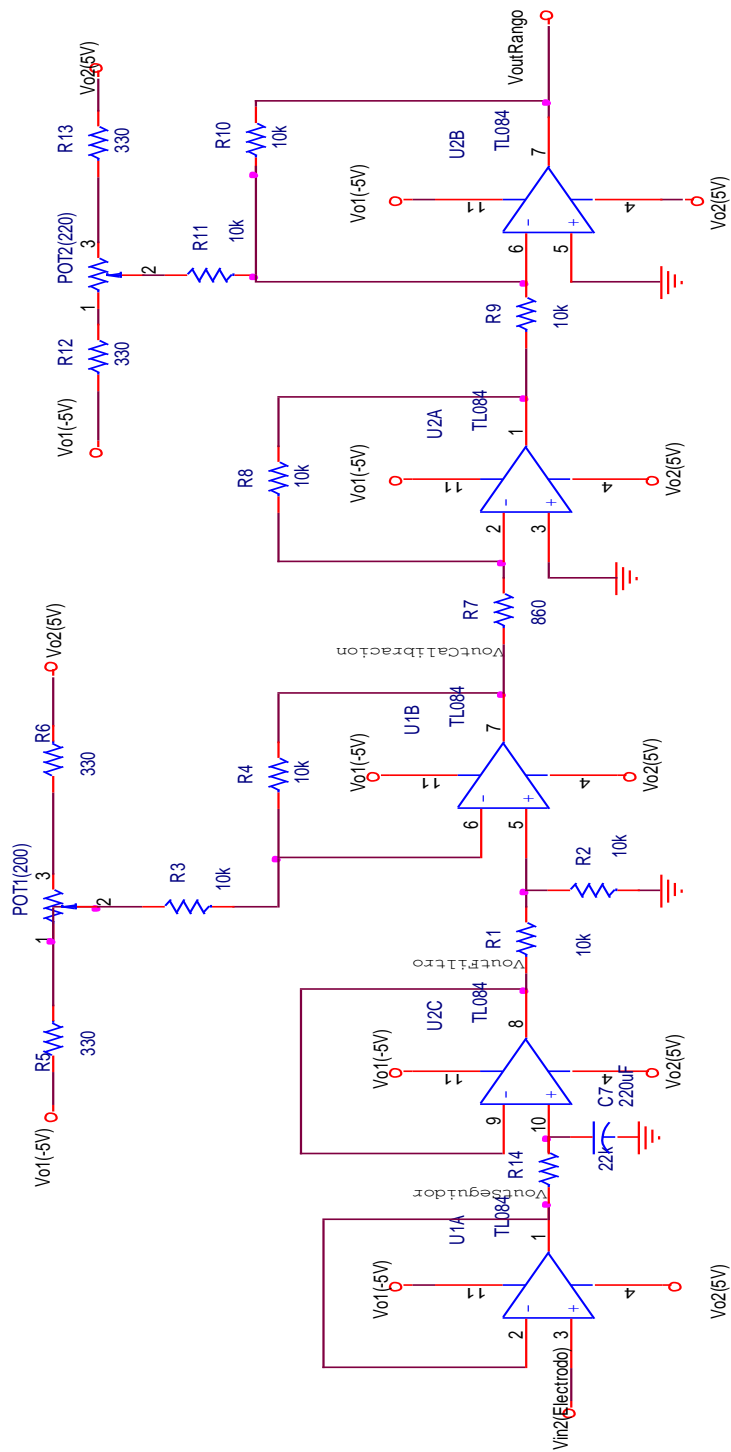


Figura 3.26 Circuito de acoplamiento para la medición de pH.

---

## 3.4 Fuentes de alimentación

---

Tomando en cuenta las características del proceso, el sistema no puede ser alimentado externamente de un tomacorriente, motivo por el cual es necesario utilizar una batería, para este sistema se seleccionó una batería de polímero de litio (LIPO) con una capacidad de 2200mAh, de 3 celdas, con un voltaje de 11.1V que se muestra en la Figura 3.27 y su asignación de pines por color. Esta pila alimentara todo el circuito.



Figura 3.27 Batería LIPO Turnigy 2200MAH, 11.1V, 3S, 25C.

Debido a que en el proyecto se utilizan los amplificadores operaciones TL084 por su alta impedancia de entrada, es necesario contar con fuentes duales de  $\pm 5V$ . Para la alimentación de energía hacia la tarjeta Arduino Yun se necesita contar con una fuente de alimentación máxima de 5V regulada. Una vez tomados en cuenta los requerimientos del sistema, se emplearon los circuitos PTN78000A para generar una fuente de alimentación de -5V regulada y el LM259SX-5.0 para generar una fuente de alimentación de 5V regulada.

El PTN78000A es un regulador de alta eficiencia el cual opera en una amplio rango de voltaje de entrada de 7V hasta 29V, opera en un rango de temperatura de  $-40^{\circ}C$  hasta  $85^{\circ}C$ , ofrece una alta eficiencia, para la conversión de voltaje positivo a negativo para cargas de hasta 1.5 A. el voltaje de salida se ajusta con una sola resistencia de salida y puede obtenerse cualquier valor en el rango de -15V a -3V. Siguiendo las especificaciones del fabricante se tomaron en cuenta los siguientes requerimientos: un capacitor electrolítico de 100uF y dos capacitores cerámicos de 4.7uF son necesarios entre el voltaje de entrada y tierra para un funcionamiento apropiado, los capacitores cerámicos deben colocarse lo más cercanos al integrado PTN78000A. Se necesita a la salida una capacitancia de 100uF para un funcionamiento adecuado. Para el ajuste de un voltaje de salida de 5V se debe conectar una resistencia directamente entre el voltaje entre el Pin2 que el del voltaje de salida ajustable y el Pin 4 que es el del voltaje de salida, este valor se calculó siguiendo la fórmula [31]:

$$R_{set} = 54.9 K\Omega \frac{1.25V}{|V_o|} - 5.62K\Omega$$

La elección de los componentes utilizados para este circuito (Figura 3.28) están basados en generar un voltaje de salida de -5V.

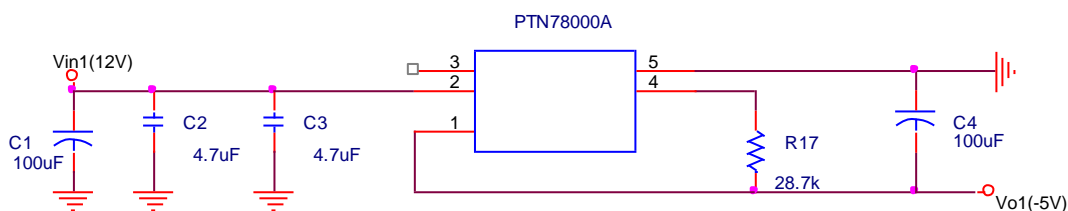


Figura 3.28 Diagrama electrónico del convertidor PTN78000A.

El LM259SX-5.0 es un regulador monolítico que ofrece la capacidad de conducir una carga de 3 A con una excelente regulación de carga. Estos dispositivos están disponibles en voltajes de salida fija y hay una versión en salida ajustable. Trabaja con un voltaje de entrada de hasta 40V, en un rango de temperatura de  $-40^{\circ}\text{C}$  hasta  $125^{\circ}\text{C}$ . Su funcionamiento se divide en dos partes: la de encendido y la de apagado. En el periodo de encendido el voltaje de entrada se conecta a la entrada del inductor, el diodo se polariza inversamente y esto hace que la corriente del inductor incremente linealmente, la energía almacenada es suficiente para el periodo de apagado. Durante el periodo de apagado el voltaje a través del inductor revierte la polaridad, la corriente ahora fluye a través del cátodo del diodo lo que mantiene la carga de corriente en el lazo, esto elimina la energía almacenada en el inductor. La función del capacitor de entrada es la de prevenir largos periodos transitorios de voltaje que pudieran aparecer a la entrada y para estabilizar la operación de conversión. El diodo debe tener una corriente igual o mayor al límite de corriente del LM2596 para ser capaz de resistir una salida continua. Y la estabilidad de salida está definida por el capacitor de salida. La elección de los componentes utilizados para este circuito (Figura 3.29) está basados en generar un voltaje de salida de 5V y una capacidad de corriente de 3A, un capacitor electrolítico de aluminio 680uF colocado entre el voltaje de entrada y tierra. Para obtener un sistema robusto se seleccionó un Diodo Schottky 1N5824 a 30V. Tomando en cuenta un voltaje de entrada de 12V, un voltaje de salida de 5V el inductor sugerido es de 33uH. Y para el caso del capacitor de salida se sugiere un rango entre 220-470uF, pero debido a la restricción de espacio dentro del bolo un capacitor de 470uF no era viable así que se optó por un capacitor de 220uF. [32].

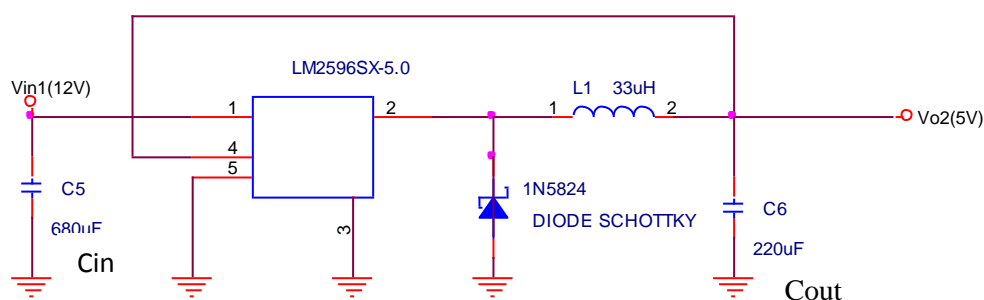


Figura 3.29 Diagrama electrónico del convertidor LM2596.

En la Figura 3.30 se muestra el diagrama electrónico de las tres fuentes de alimentación que se implementaron siguiendo las especificaciones de las hojas técnicas.

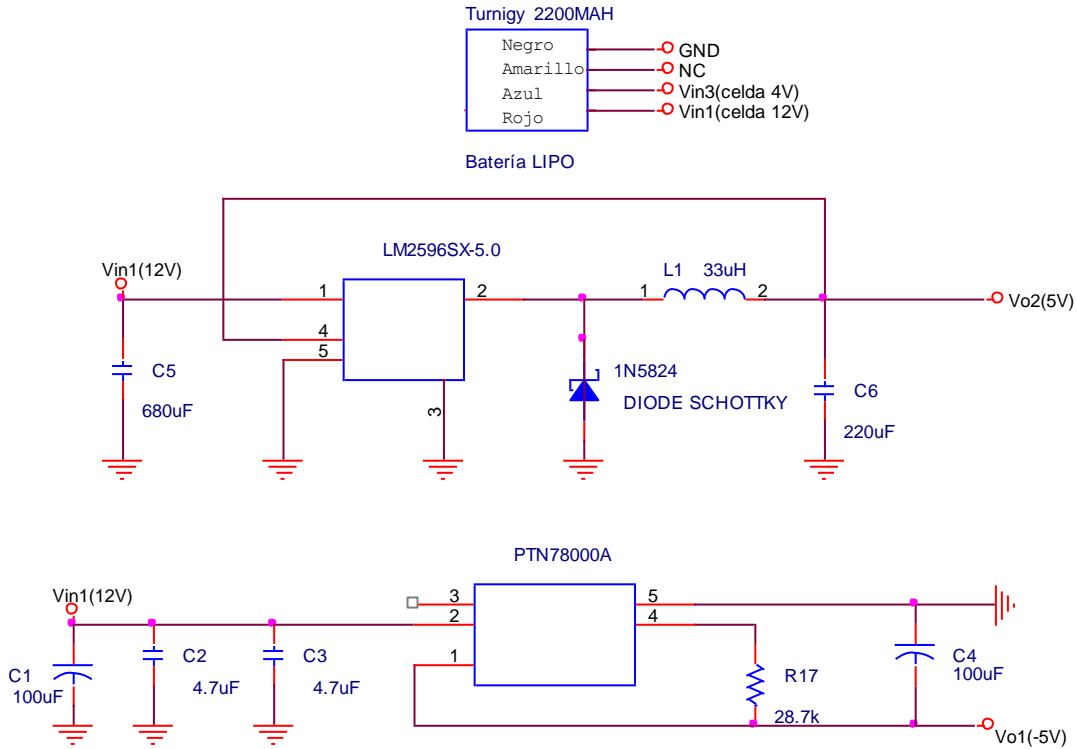


Figura 3.30 Diagrama electrónico de las tres fuentes de alimentación.

## 3.5 Diseño y fabricación de la tarjeta de circuito impreso

Altium Designer proporciona un entorno de desarrollo de productos electrónicos, para todos los aspectos del proceso de desarrollo electrónico incluyendo:

- Diseño frontal y la captura.
- Diseño físico del PCB.
- Diseño de hardware FPGA.
- Desarrollo de software embebido.
- Simulación de circuitos.
- Análisis de integridad de señal.
- Fabricación de PCB.

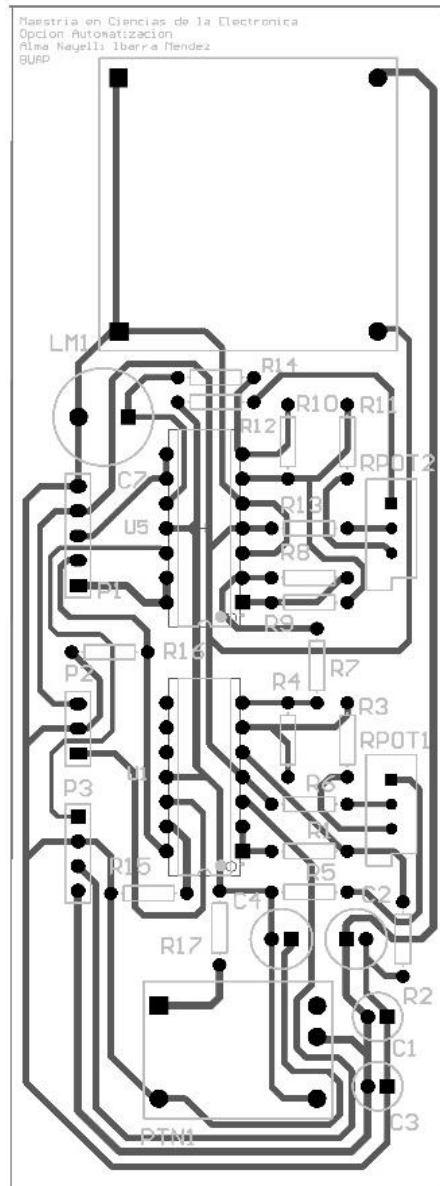
Altium Designer incluye todos los editores y los motores de software necesarios para llevar a cabo todos los aspectos del proceso de desarrollo de productos electrónicos. Toda la edición de

documentos, la compilación y el procesamiento se realiza en el entorno Altium Designer, también interactúa a la perfección [33].

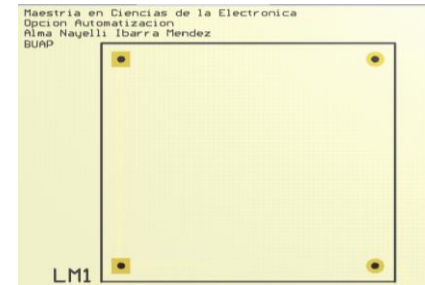
El circuito para la adquisición y procesamiento de los datos fue maquilado en una placa de circuito impreso (PBC, Printed Circuit Board) con la ayuda del programa Altium Designer 13. Se implementó el diseño y se imprimió la placa que se muestra en la Figura 3.31, dicha placa tiene una dimensión de 4.35cm de ancho, 12.14cm de largo, el diseño se realizó en una capa, y será alojado en el interior del bolo.

Para realizar la tarjeta PCB el diseño se dividió en tres diagramas principales:

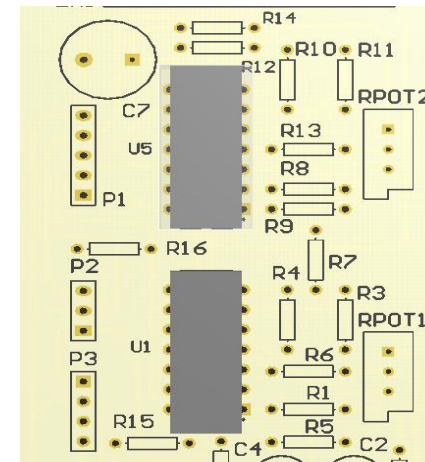
- Fuente de alimentación de voltaje positivo.
- Circuitos de acondicionamiento para las señales de pH y temperatura.
- Fuente de alimentación de voltaje negativo.



a)  
LM2596SX-5.0



b)  
Acondicionamiento  
de señales de pH  
y temperatura



c)  
PTN78000A

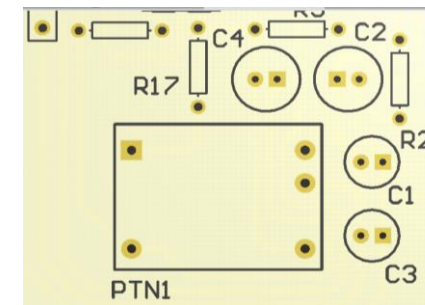


Figura 3.31 Tarjeta PCB del hardware. a) Fuente de alimentación voltaje positivo, b) circuito de acondicionamiento de señales de sensores, c) Fuente de alimentación voltaje negativo.

A continuación se muestran los diagramas que integran el diseño de la tarjeta. En la Figura 3.32 se observan la fuente de alimentación para generar un voltaje positivo de 5V. En la Figura 3.33 se observa el circuito del acondicionamiento del sensado de las variables fisiológicas. En la Figura 3.34 se observa la fuente de alimentación para generar un voltaje negativo de -5V.

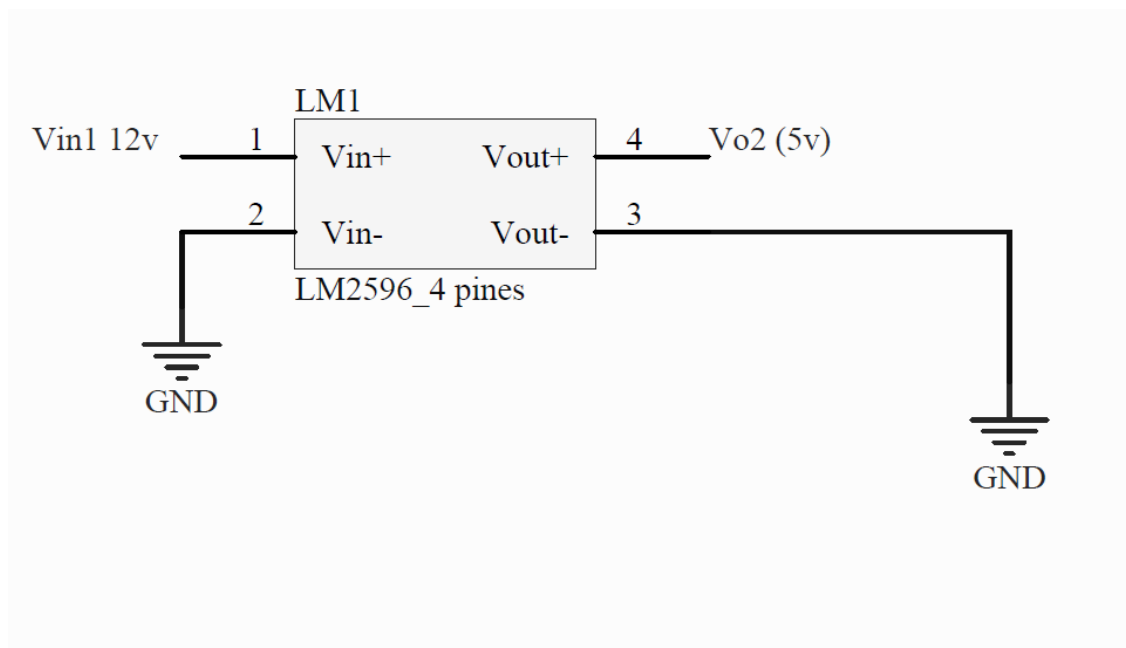


Figura 3.32 Fuente de alimentación voltaje positivo.

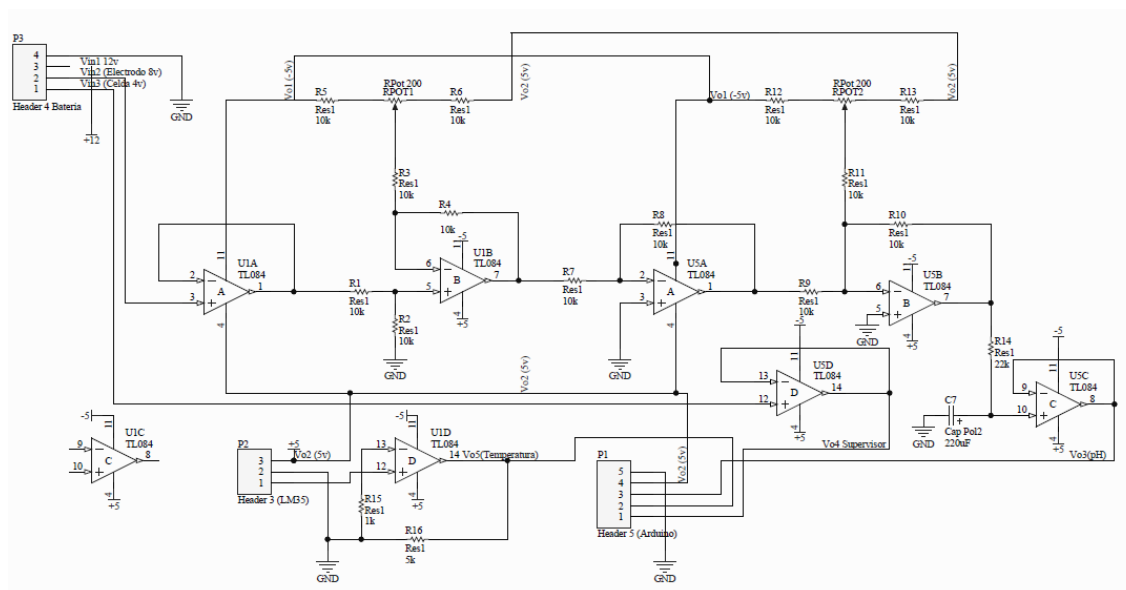


Figura 3.33 Circuito de acondicionamiento de señales de pH y temperatura.

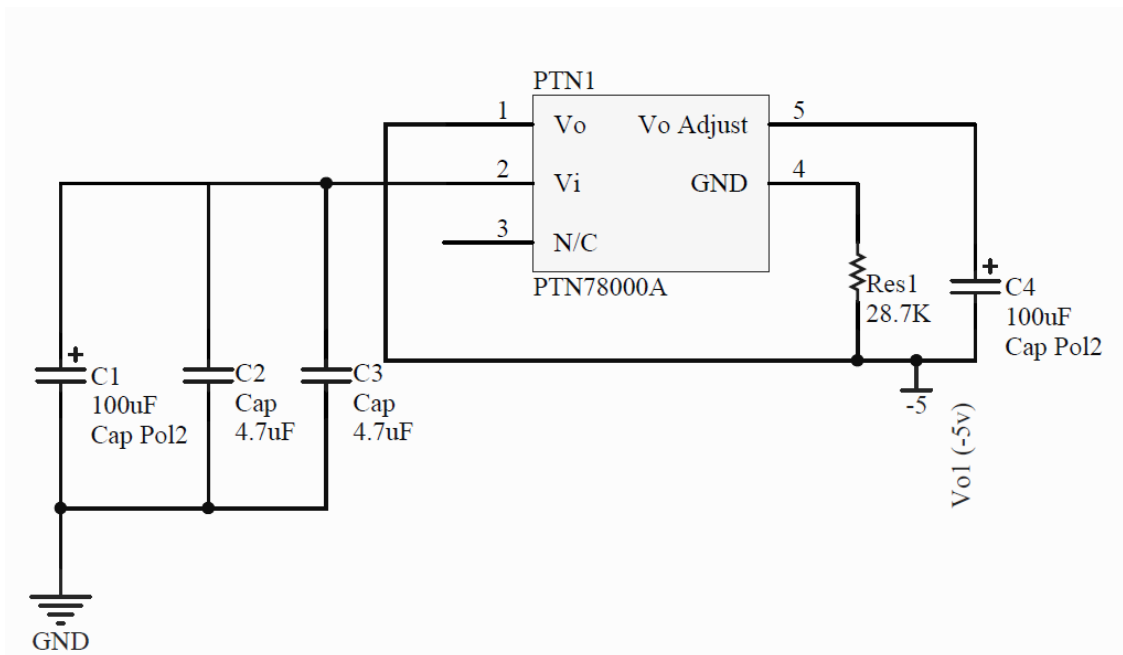


Figura 3.34 Fuente de alimentación voltaje negativo.

### 3.6 Diseño del bolo

En este apartado se muestran los resultados correspondientes al diseño del bolo, el cual será introducido en el rumen de una vaca previamente fistulada.

El bolo es una carcasa que sirve para proteger al sistema electrónico del ambiente bioquímico así como de proporcionar un soporte mecánico.

El cuidado y manejo del animal se realizará en apego a la norma oficial mexicana NOM-062-ZOO-1999; de acuerdo al Reglamento de Bioética de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootécnica de la Universidad Veracruzana (UV).

Las pruebas serán realizadas en el rancho ganadero de La Posta Zootécnica “Torreón del Molino” de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootécnica de la Universidad Veracruzana (FMVZ-UV). Se encuentra paralela a la carretera 140 en el tramo Veracruz-Xalapa a la altura del kilómetro 14.5 ubicada al Noroeste de la congregación de Tejeria, en el municipio de Veracruz. Su superficie es de 250-63-00 hectáreas, en las que se incluyen pastizales, instalaciones y caminos internos.

Para las pruebas se cuenta con el apoyo de investigadores de la Facultad de Veterinaria y Zootecnia de la UV, así también de personal capacitado en el manejo del animal.

#### a) Primer diseño

El diseño del primer prototipo de bolo se realizó en colaboración con el estudiante de Ingeniería Mecatrónica Héctor Díaz del IT de Veracruz.

Uno de los principales factores tomados en cuenta para la realización del diseño del bolo es el recorrido que realiza el alimento por el estómago de un bovino, el cual inicia por la boca del animal el cual ingiere el alimento casi sin previa masticación, este se conduce hacia el rumen para luego dirigirse hacia el retículo y finalmente ser regurgitado para volverse a masticar, este procedimiento se repite hasta que el alimento sea lo bastante pequeño para dirigirse hacia el retículo para pasar por el omaso para finalmente pasar al intestino.

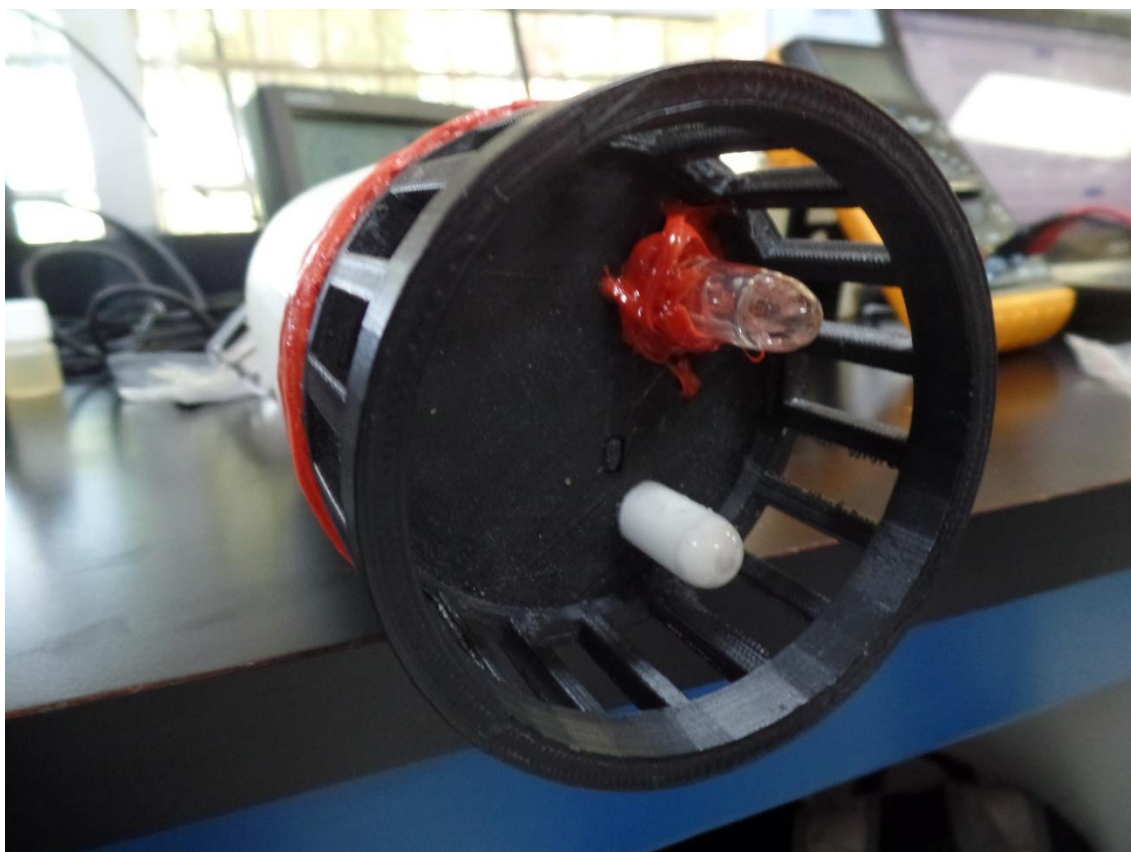
Es debido a este proceso que el diámetro y longitud en el diseño son un factor fundamental para que el bolo no avance o regrese entre los compartimientos.

En la Figura 3.35 se observa el primer diseño del bolo. La cánula de la fistula por donde se introduce el bolo tiene un diámetro de 10.8 cm, por lo que el diseño actual del bolo tiene un diámetro de 9cm y una longitud de 22cm.



*Figura 3.35 Primer diseño del bolo a introducir en la vaca.*

Los sensores de pH (electrodo combinado de vidrio) y de temperatura (LM35) se encuentran ubicados en el extremo del bolo, justo donde se localiza una tapa por donde se tiene acceso al interior de la carcasa. Los sensores deberán estar expuestos directamente al medio que se encuentra en el rumen del estómago del bovino como se muestra en la Figura 3.36.



*Figura 3.36. Área de ubicación de los sensores.*

#### b) Segundo diseño

El segundo diseño del bolo se realizó utilizando el software en SolidWorks™. La estructura de este diseño se observa en la Figura 3.37. Para la realización de este se cuenta con la restricción del diámetro de la cánula (10.8cm) y la dimensión del conducto al omaso (20cm); tomando en consideración lo anterior el segundo diseño tiene un diámetro de 10 cm y una longitud de 25 cm.

En la parte de la tapa se le realizó un cajeadó el cual favorece (la parte morada del diseño) la extracción del bolo de manera más sencilla del interior del rumen. Este detalle no fue considerado en el primer diseño. En la parte interior se realizó un roscado para abrir y cerrar el bolo. Los sensores harán contacto con el exterior a través de unos orificios colocados en el fondo del bolo.

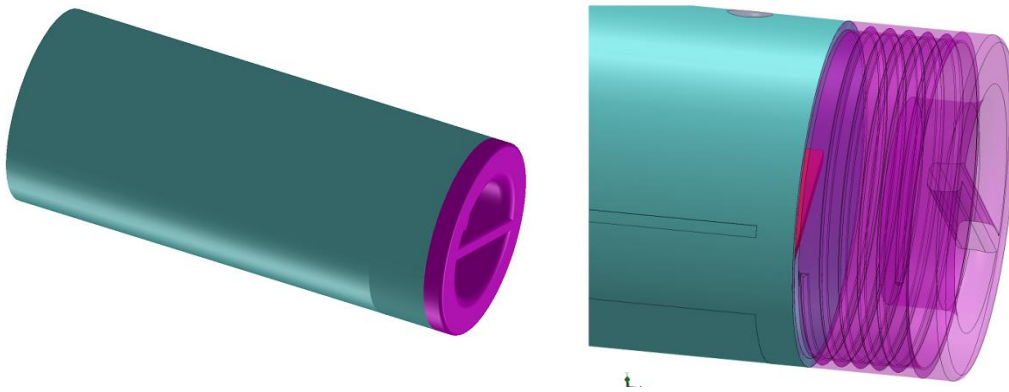


Figura 3.37 Diseño del segundo bolo.

La parte interna del bolo se divide en 4 áreas. La parte de la batería (1), área para los sensores (2), el área para el microcontrolador (3) y finalmente la parte de la electrónica (4). Como se observa en la Figura 3.38.

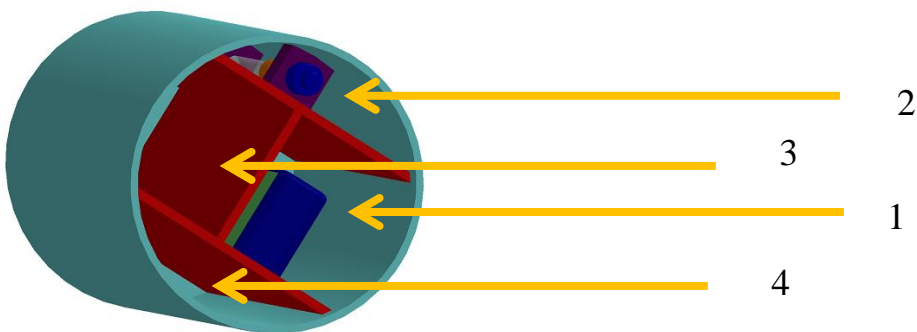


Figura 3.38 División interna del bolo (batería, censado, Microcontrolador y electrónica).

En la Figura 3.39 se pueden observar las dimensiones (en centímetros) de la tapa.

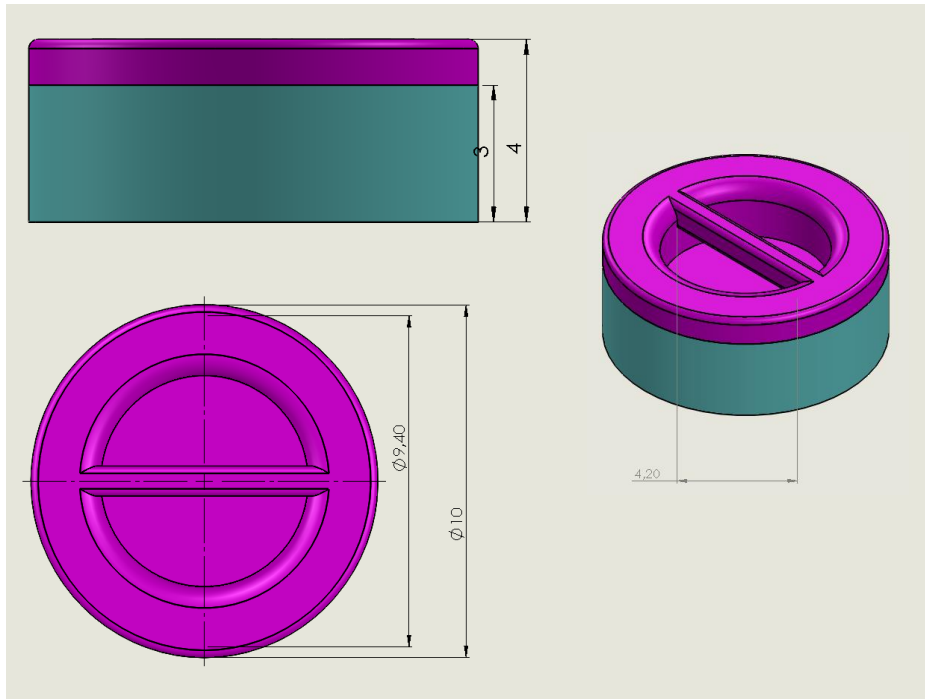


Figura 3.39 Dimensiones de la tapa del bolo.

En la Figura 3.40 se pueden observar las dimensiones (en centímetros) de la base del bolo.

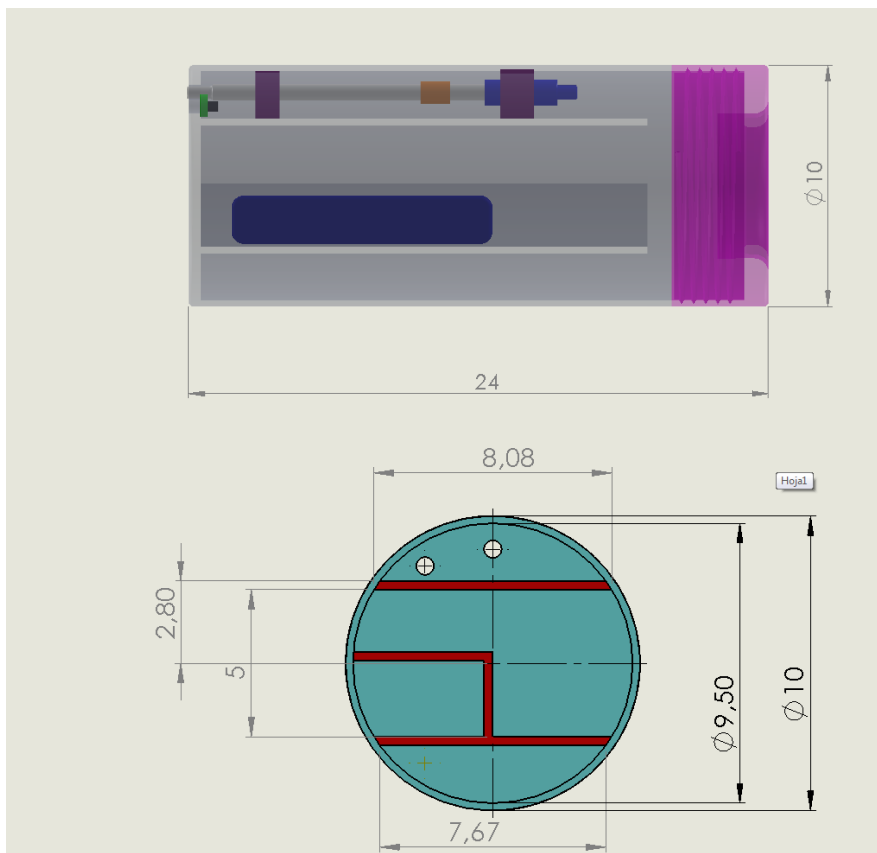


Figura 3.40 Dimensiones de la base del bolo.

---

## 3.7 Conclusiones

---

El sensor de temperatura presentó una respuesta lineal como se esperaba con una resolución de  $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ , por lo que se realizó un acondicionamiento a la señal para ser introducida al ADC del sistema embebido Arduino. Como primera prueba se adquirió para el sensado de pH un sensor de tipo ISFET, el sensor presentó una respuesta similar a la teoría en la caracterización electroquímica cuando se realizó con un analizador de parámetros, desafortunadamente en el siguiente paso que es la implementación electrónica la topología utilizada para reproducir el comportamiento de la caracterización electrónica los resultados arrojados por dicho sistema no cumplieron con los estándares estudiados en la teoría de este tipo de sensores. Motivo por el cual se eligió realizar el sistema con un electrodo combinado de la marca SENSOREX el cual presentó una resolución de  $49\text{mV}/\text{pH}$ , lo cual concuerda con la teoría de este tipo de sensores de pH. La respuesta natural del electrodo combinado presenta una impedancia de entrada alta, por lo que se seleccionó utilizar amplificadores operacionales TL084, la desventaja de ellos es que necesitan una alimentación dual, lo que conllevó a el diseño de dos circuitos para la alimentación de dichos operacionales. Todo el sistema en funcionamiento (adquisición, procesamiento, transmisión y almacenamiento de datos) consume una corriente aproximada de  $350\text{mA}$ . Con el uso del primer bote diseñado en colaboración con el estudiante de la Universidad Veracruzana se observaron inconvenientes en las pruebas de campo, por tal motivo se sugirió un segundo diseño para evitar esos problemas.

---

# CAPÍTULO 4

## DISEÑO DEL FIRMWARE Y SOFTWARE DE MONITOREO

---

---

### 4.1 Diseño del firmware del sistema

---

Para la adquisición de datos se programó el Arduino Yun, haciendo uso de las librerías Bridge, YunServer, YunClient y FileIO. La librería Bridge simplifica la comunicación entre los dos procesadores del Arduino Yun, se hereda de Stream, y muchos de los métodos deben ser familia del Serial. Los comandos de la librería Bridge son interpretados por Python en el procesador AR9331. Su función es la de ejecutar programas en el lado de GNU/Linux cuando se le pregunta por Arduino, provee un espacio de almacenamiento compartido para compartir datos como lecturas de sensores entre el Arduino y el Internet, y recibir comandos desde el Internet y pasáros directamente al Arduino. La librería YunClient es la clase base para todos los clientes basados en llamadas al Yun. No se llama directamente a esta librería, pero se invoca cuando se hace uso de una función que se basa en esta. La librería YunServer es una clase base para todos los clientes basados en llamadas al Yun. No se llama directamente a esta librería, pero se invoca cuando se hace una de una función que se basa en esta. La Librería FileIO es una clase base para escribir y leer de una tarjeta SD montada en el Yun. Es parte de la librería Bridge. No se llama directamente a esta librería, pero se invoca cuando se hace una de una función que se basa en esta. Para preparar la tarjeta SD para lectura y escritura, se debe crear un folder vacío en la raíz de la SD llamado "Arduino". Esto asegura que el Yun creea un enlace a la siguiente ruta "/mnt/sd" [23].

En la Figura 4.1 se muestra el diagrama de flujo del funcionamiento del prototipo. El programa inicia creando un Servidor Web (por default el puerto 5555) y a este se enviaran todas las solicitudes http; inicia la comunicación serial ; inicia comunicación OpenWrt-Yun para poder almacenar los datos y crear un archivo directamente en la SD; inicia un servidor local ya que ninguna conexión externa se podrá conectar; pregunta si hay una conexión entrante; si hay una conexión pregunta si hay un nuevo cliente conectado, si el comando que el cliente envía es "inputs" entonces inicializa una sintaxis para almacenar e intercambiar datos, toda la información se envía en formato JSON; a las variables almacenadas se les realiza una acondicionamiento digital; manda las nuevas variables a ser almacenadas en un archivo .txt; finalmente cierra la conexión para liberar recursos.

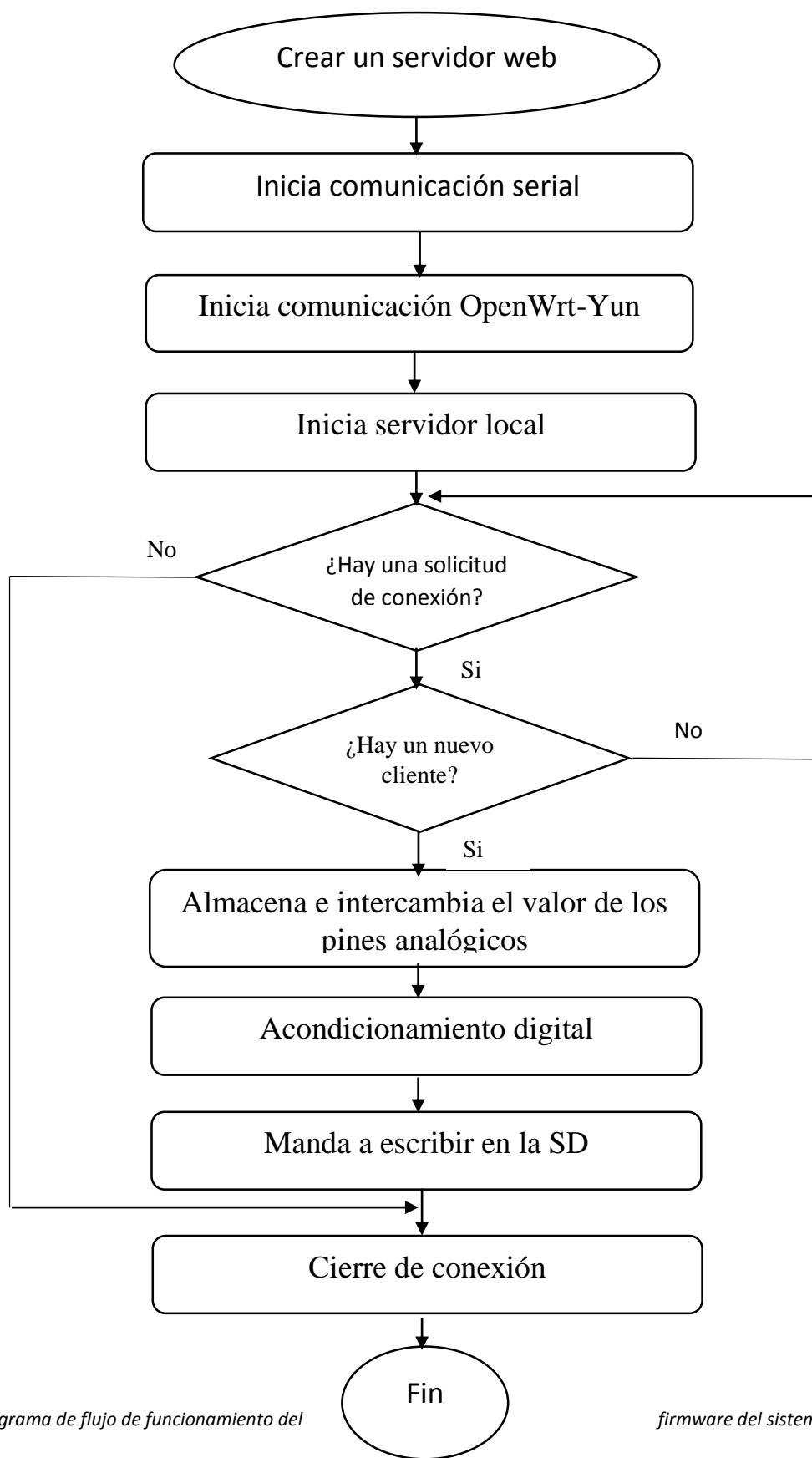


Figura 4.1 Diagrama de flujo de funcionamiento del

firmware del sistema.

## 4.2 Diseño de la interfaz de comunicación

La interfaz de comunicación tiene la función de monitorear los sensores.

En el navegador de nuestra preferencia escribimos la dirección URL: <http://almita.local/monitoreo/sd/> con lo que se hace una petición, la cual es recibida por el servidor web creado en Arduino, una vez establecida la conexión el servidor envía una respuesta que contiene el valor de los pines analógicos. Esta transmisión de datos del servidor al navegador se realiza con formato JSON, a través de un motor de búsqueda Ajax el cual al transferir menos cantidad de datos, la interfaz del usuario se actualiza rápidamente. En la Figura 4.2 se muestra la página web creada para el sistema de monitoreo.



Diseño de la interfaz para el usuario.

Figura 4.2.

Como se observa en la Figura 4.3 la página cuenta con los siguientes elementos:

- Encabezado.
- Contenido adicional.
- Contenido principal.

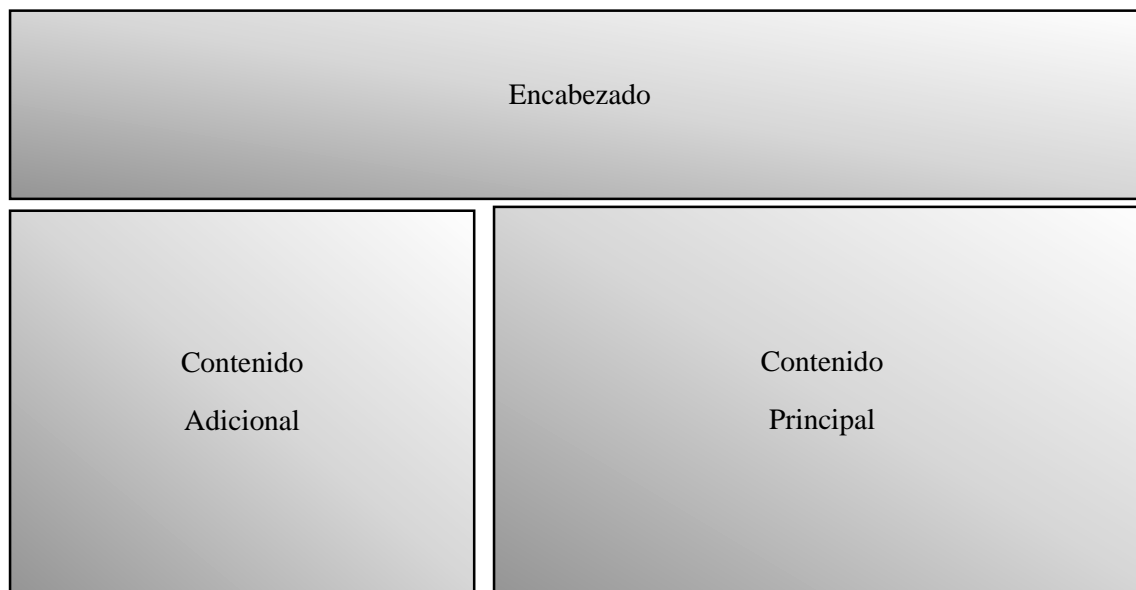


Figura 4.3 Bloques básicos de la página web.

La página se puede subdividir en elementos div, como se muestra en la Figura 4.4, y se describe brevemente cada uno de ellos.

El primer bloque `<head>`, en él se detalla el estilo del contenido de la página, como los tamaños de cada bloque, el color de fondo, el tipo de letra, los márgenes y la alineación.

En el bloque `<div id="titulo" >`, es el texto del contenido de la página.

En el bloque `<div id="clara" >`, es el área de contenido secundario con una imagen del animal de estudio.

En el bloque `<div id="container" >`, es el área en donde se desplegarán los datos.

En el bloque `<script type="text/javascript">`, es la sección donde se hace la petición al Yun y se utilizan los datos JSON para cambiar los atributos en el bloque `<div id="container" >`, además se tiene una instrucción para volver a correr el script cada cinco minutos.

```
Body id="Monitoreo Intra-rumial"
<head>
<div id="titulo">
<p></p>
<img clara/>
<h1></h1>
<div id="clara">
<img/>
<div id="container">
<h1></h1>
<div class="pin" id="A0">
<p class="label"></p>
<svg> <rect> </svg>
<p class="val"></p>
<p class="label"></p>
<div class="pin" id="A3">
<p class="label"></p>
<svg> <rect> </svg>
<p class="val"></p>
<p class="label"></p>
<div class="pin" id="A5">
<p class="label"></p>
<svg> <rect> </svg>
<p class="val"></p>
<p class="label"></p>
<script type="text/javascript">
Function setVal0(pin,value)
Function setVal3(pin,value)
Function setVal8(pin,value)
Function refreshWindow.setInterval(refresh,300000)
```

Figura 4.4 Contenido general de la página web.

---

## 4.3 Relación entre el hardware y el software

---

Es necesario puntualizar algunos elementos para entender la relación entre el hardware y el software del sistema.

- La página web creada se encuentra alojada en la tarjeta micro SD en el Arduino.
- En el firmware se crea un servidor local al que llegan las peticiones de conexión.
- El sistema no permite el acceso de estaciones que no se encuentren en la misma red.

En la Figura 4.5 se muestra la primera etapa, donde la estación del cliente ingresa a un buscador y en la barra de dirección ingresa la URL del proyecto <http://almita.local/monitoreo/sd/> cuando realiza esto lo que pasa internamente es que el cliente hace una petición HTTP común su al servidor local que se creó en el Arduino, el servidor recibe la petición y establece la conexión con el cliente, y es en este momento donde comienza la adquisición de datos y su almacenamiento en la SD.

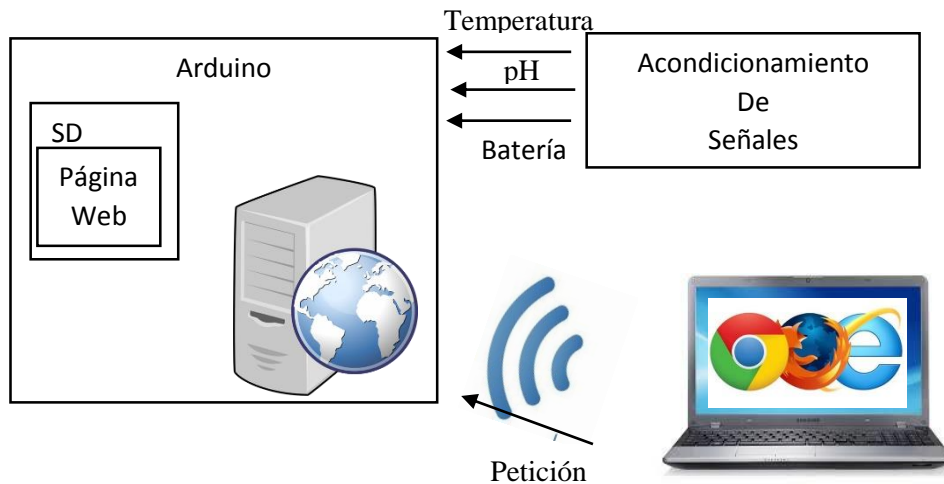


Figura 4.5 Comunicación entre la estación de trabajo y el servidor web local.

En la Figura 4.6 se muestra la segunda etapa, una vez establecida la conexión, y que se almacenaron los datos en la SD, el servidor web creado por el Arduino, realiza el envío de los datos hacia la estación del cliente, en donde la página ya fue cargada. Como ya se mencionó esta transmisión de datos se realiza cada quince minutos.

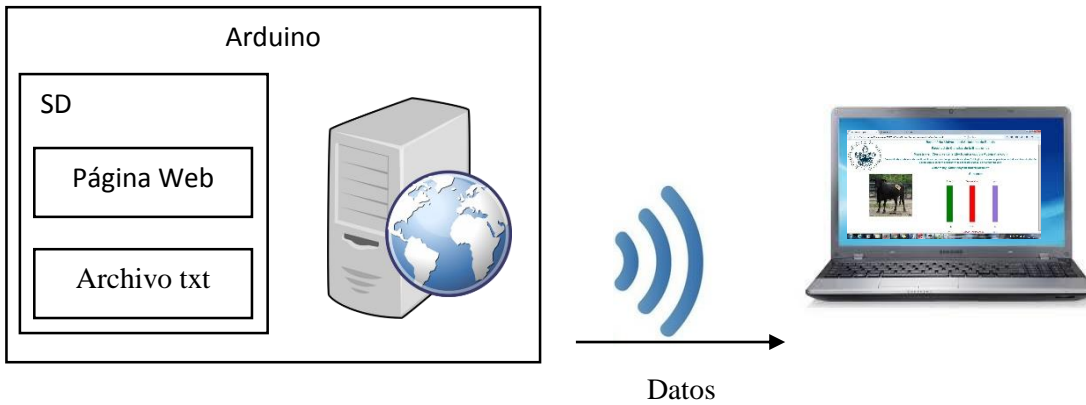


Figura 4.6 Envío de los datos del servidor web a la estación de trabajo.

---

## 4.4 Conclusiones

---

El firmware es la electrónica que para el caso del sistema embebido Arduino corresponde a un circuito lógico programable para llevar a cabo una tarea específica. En este caso realiza la adquisición de las señales en los pines analógicos, para ser transmitidas inalámbricamente y realizarles un procesamiento digital para que esos datos sean almacenados en la memoria SD. El software es una interfaz para el usuario de fácil uso que sirve de intermediaria para que se realice el monitoreo de las variables fisiológicas, para ello se realizó el diseño de una página Web, una de las principales funciones de almacenar la página web en el sistema embebido Arduino y utilizar el motor de búsqueda AJAX es que se evita que la página deba ser recargada continuamente cuando los valores cambian.

---

# CAPÍTULO 5

## PRUEBAS Y RESULTADOS

---

---

### 5.1 Resultados de la caracterización de temperatura

---

Una vez realizada la caracterización del sensor de temperatura, en el control de temperatura se introdujeron una serie de valores deseados de temperatura, y a continuación se observan en la Tabla 5.1 los resultados arrojados por el sensor ya caracterizado.

Los datos de la temperatura actual se extrajeron de la memoria SD insertada en el Arduino, que son los mismos datos que se desplegaron en la interfaz del usuario.

Analizando los datos de la Tabla 5.1 se obtiene:

$$Error = Dato\ esperado - Dato\ aceptado \quad (5.1)$$

$$Porcentaje\ de\ error = \frac{error}{valor\ aceptado} * 100 \quad (5.2)$$

$$La\ media\ del\ porcentaje\ de\ error = \frac{\Sigma(porcentajes\ de\ error)}{Num\ de\ elementos} = \frac{4.14}{28} = 0.1479 \quad (5.3)$$

| Temperatura Actual (°C) | Temperatura Deseada (°C) | Error | Porcentaje de error |
|-------------------------|--------------------------|-------|---------------------|
|-------------------------|--------------------------|-------|---------------------|

|       |      |       |             |
|-------|------|-------|-------------|
| 25,1  | 25   | -0,1  | -0,39840637 |
| 25,54 | 25,5 | -0,04 | -0,15661707 |
| 26,06 | 26   | -0,06 | -0,23023791 |
| 26,46 | 26,5 | 0,04  | 0,15117158  |
| 27,02 | 27   | -0,02 | -0,07401925 |
| 27,6  | 27,5 | -0,1  | -0,36231884 |
| 27,94 | 28   | 0,06  | 0,21474588  |
| 28,59 | 28,5 | -0,09 | -0,31479538 |
| 29,13 | 29   | -0,13 | -0,44627532 |
| 29,41 | 29,5 | 0,09  | 0,30601836  |
| 30,33 | 30   | -0,33 | -1,08803165 |
| 30,33 | 30,5 | 0,17  | 0,56050115  |
| 31,33 | 31   | -0,33 | -1,05330354 |
| 31,29 | 31,5 | 0,21  | 0,67114094  |
| 31,92 | 32   | 0,08  | 0,25062657  |
| 33,33 | 33   | -0,33 | -0,99009901 |
| 37,25 | 37   | -0,25 | -0,67114094 |
| 39,02 | 39   | -0,02 | -0,05125577 |
| 41,17 | 41   | -0,17 | -0,41292203 |
| 43,13 | 43   | -0,13 | -0,30141433 |
| 45,09 | 45   | -0,09 | -0,1996008  |
| 47,05 | 47   | -0,05 | -0,10626993 |
| 49,01 | 49   | -0,01 | -0,020404   |
| 52,94 | 53   | 0,06  | 0,11333585  |
| 54,9  | 55   | 0,1   | 0,18214936  |
| 58,82 | 59   | 0,18  | 0,30601836  |
| 60,78 | 61   | 0,22  | 0,36196117  |
| 62,74 | 62,5 | -0,24 | -0,38253108 |

Tabla 5.1. Lecturas correspondientes a la Temperatura sensada.

---

## 5.2 Resultados de la caracterización de pH

---

Una vez realizada la caracterización del sensor de pH, se realizaron las mediciones utilizando soluciones buffer de pH4, pH7 y pH10.

El primer paso siempre es la calibración del punto equipotencial a 0V en una solución de pH7.

Para el análisis de los datos de pH se agruparon en tres grupos con respecto a cada solución buffer.

Los datos de pH se extrajeron de la memoria SD insertada en el Arduino, que son los mismos datos que se desplegaron en la interfaz del usuario.

A continuación se observan en la Tabla 5.2 los resultados arrojados por el sensor ya caracterizado a una solución buffer de referencia de pH4.

| Fecha             | pH Sensor (pH) | ph Ref (pH) | Error | Porcentaje de error |
|-------------------|----------------|-------------|-------|---------------------|
| 10/23/15-14:31:47 | 3,95           | 4           | 0,05  | 1,265822785         |
| 10/23/15-14:43:04 | 3,95           | 4           | 0,05  | 1,265822785         |
| 10/23/15-14:48:03 | 3,94           | 4           | 0,06  | 1,52284264          |
| 10/23/15-14:53:03 | 3,94           | 4           | 0,06  | 1,52284264          |
| 10/23/15-14:58:03 | 3,94           | 4           | 0,06  | 1,52284264          |
| 10/23/15-15:03:03 | 3,94           | 4           | 0,06  | 1,52284264          |
| 10/23/15-15:08:03 | 3,96           | 4           | 0,04  | 1,01010101          |
| 10/23/15-15:10:44 | 3,94           | 4           | 0,06  | 1,52284264          |
| 10/23/15-15:13:03 | 3,95           | 4           | 0,05  | 1,265822785         |

Tabla 5.2 Lecturas correspondientes al pH4 censada a una temperatura constante.

Analizando los datos de la Tabla 5.2 se obtiene:

$$Media = \frac{\Sigma(\text{datos})}{\text{Num de elementos}} = \frac{35.51}{9} = 3.9455 \quad (5.4)$$

$$Moda = \text{El \# que más se repite} = 3.94 \quad (5.5)$$

$$Error = \text{Dato esperado} - \text{Dato aceptado} \quad (5.6)$$

$$\text{Porcentaje de error} = \frac{\text{error}}{\text{valor aceptado}} * 100 \quad (5.7)$$

$$\text{La media del porcentaje de error} = \frac{\Sigma(\text{porcentajes de error})}{\text{Num de elementos}} = \frac{12.42}{9} = 1.38 \quad (5.8)$$

A continuación se observan en la Tabla 5.3 los resultados arrojados por el sensor ya caracterizado a una solución buffer de referencia de pH7.

| Fecha             | pH Sensor (pH) | ph Ref (pH) | Error | Porcentaje de error |
|-------------------|----------------|-------------|-------|---------------------|
| 10/23/15-15:18:03 | 7,1            | 7           | -0,1  | -1,428571429        |
| 10/23/15-15:23:03 | 7,08           | 7           | -0,1  | -1,142857143        |
| 10/23/15-15:28:03 | 7,07           | 7           | -0,1  | -1                  |
| 10/23/15-15:33:03 | 7,07           | 7           | -0,1  | -1                  |
| 10/23/15-15:38:03 | 7,08           | 7           | -0,1  | -1,142857143        |
| 10/23/15-15:43:03 | 7,06           | 7           | -0,1  | -0,857142857        |
| 10/23/15-15:48:03 | 7,05           | 7           | -0    | -0,714285714        |

|                   |      |   |      |              |
|-------------------|------|---|------|--------------|
| 10/23/15-15:53:03 | 7,04 | 7 | -0   | -0,571428571 |
| 10/23/15-15:58:03 | 7,06 | 7 | -0,1 | -0,857142857 |
| 10/23/15-16:03:03 | 7,06 | 7 | -0,1 | -0,857142857 |
| 10/23/15-16:08:03 | 7,05 | 7 | -0   | -0,714285714 |
| 10/23/15-16:13:03 | 7,04 | 7 | -0   | -0,571428571 |
| 10/23/15-16:18:03 | 7,09 | 7 | -0,1 | -1,285714286 |
| 10/23/15-16:23:03 | 6,94 | 7 | 0,06 | 0,857142857  |
| 10/23/15-16:24:02 | 6,94 | 7 | 0,06 | 0,857142857  |
| 10/23/15-16:28:03 | 6,94 | 7 | 0,06 | 0,857142857  |
| 10/23/15-16:29:02 | 6,94 | 7 | 0,06 | 0,857142857  |

Tabla 5.3 Lecturas correspondientes al pH7 censada a una temperatura constante.

Analizando los datos de la Tabla 5.3 se obtiene:

$$Media = \frac{\Sigma(\text{datos})}{\text{Num de elementos}} = \frac{119,61}{17} = 7,0358 \quad (5.9)$$

$$Moda = \text{El \# que más se repite} = 6,94 \quad (5.10)$$

$$Error = \text{Dato esperado} - \text{Dato aceptado} \quad (5.11)$$

$$\text{Porcentaje de error} = \frac{\text{error}}{\text{valor aceptado}} * 100 \quad (5.12)$$

$$\text{La media del porcentaje de error} = \frac{\Sigma(\text{porcentajes de error})}{\text{Num de elementos}} = \frac{8,71}{17} = 0,5126 \quad (5.13)$$

A continuación se observan en la Tabla 5.4 los resultados arrojados por el sensor ya caracterizado a una solución buffer de referencia de pH10.

| Fecha             | pH Sensor (pH) | ph Ref (pH) | Error | Porcentaje de error |
|-------------------|----------------|-------------|-------|---------------------|
| 10/23/15-16:34:05 | 10,17          | 10          | -0,17 | -1,67158309         |
| 10/23/15-16:39:05 | 10,17          | 10          | -0,17 | -1,67158309         |
| 10/23/15-16:39:07 | 10,16          | 10          | -0,16 | -1,57480315         |
| 10/23/15-16:44:05 | 10,14          | 10          | -0,14 | -1,38067061         |
| 10/23/15-16:49:05 | 10,15          | 10          | -0,15 | -1,47783251         |
| 10/23/15-16:54:05 | 10,13          | 10          | -0,13 | -1,28331688         |
| 10/23/15-16:59:05 | 10,15          | 10          | -0,15 | -1,47783251         |
| 10/23/15-17:04:05 | 10,14          | 10          | -0,14 | -1,38067061         |
| 10/23/15-17:09:05 | 10,14          | 10          | -0,14 | -1,38067061         |
| 10/23/15-17:14:05 | 10,17          | 10          | -0,17 | -1,67158309         |

|                   |       |    |       |             |
|-------------------|-------|----|-------|-------------|
| 10/23/15-17:19:05 | 10,12 | 10 | -0,12 | -1,18577075 |
| 10/23/15-17:24:05 | 10,13 | 10 | -0,13 | -1,28331688 |
| 10/23/15-17:29:05 | 10,13 | 10 | -0,13 | -1,28331688 |
| 10/23/15-17:34:05 | 10,11 | 10 | -0,11 | -1,08803165 |
| 10/23/15-17:39:05 | 10,11 | 10 | -0,11 | -1,08803165 |
| 10/23/15-17:44:05 | 10,12 | 10 | -0,12 | -1,18577075 |

Tabla 5.4 Lecturas correspondientes al pH10 censada a una temperatura constante.

Analizando los datos de la Tabla 5.4 se obtiene:

$$\text{Media} = \frac{\Sigma(\text{datos})}{\text{Num de elementos}} = \frac{162,24}{16} = 10,14 \quad (5.14)$$

$$\text{Moda} = \text{El \# que más se repite} = 10,17, 10,15 \text{ y } 10,13 \quad (5.15)$$

$$\text{Error} = \text{Dato esperado} - \text{Dato aceptado} \quad (5.16)$$

$$\text{Porcentaje de error} = \frac{\text{error}}{\text{valor aceptado}} * 100 \quad (5.17)$$

$$\text{La media del porcentaje de error} = \frac{\Sigma(\text{porcentajes de error})}{\text{Num de elementos}} = \frac{22,084}{16} = 1,38 \quad (5.18)$$

## 5.3 Resultados del rendimiento de la batería

Los datos del rendimiento de la batería se extrajeron de la memoria SD insertada en el Arduino, que son los mismos datos que se desplegaron en la interfaz del usuario.

El fabricante recomienda nunca cargar la batería si el voltaje por elemento es menor de 3.3V, esto para que la vida útil de la batería sea mayor. Por tal razón en el software se diseñó un monitoreo del porcentaje de la vida útil de la batería colocando un punto de referencia de 0% a un voltaje de celda de 3.3V.

A continuación se observan en la Tabla 5.5 los resultados del rendimiento de la batería, con un intervalo de muestreo de 10 minutos.

| Hora  | Batería (%) | Hora  | Batería (%) |
|-------|-------------|-------|-------------|
| 13:24 | 82,78       | 16:24 | 58,02       |
| 13:34 | 78,37       | 16:34 | 56,75       |
| 13:44 | 77,07       | 16:44 | 55,49       |
| 13:54 | 75,8        | 16:54 | 53,58       |
| 14:04 | 74,53       | 17:04 | 52,95       |
| 14:14 | 72,63       | 17:14 | 50,61       |
| 14:24 | 70,72       | 17:24 | 49,77       |
| 14:34 | 69,45       | 17:34 | 49,04       |
| 14:44 | 67,55       | 17:44 | 44,69       |

|       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|
| 14:54 | 66,91 | 17:54 | 41,52 |
| 15:04 | 66,28 | 18:04 | 40,25 |
| 15:14 | 65,64 | 18:14 | 38,88 |
| 15:24 | 64,72 | 18:24 | 32,63 |
| 15:34 | 63,1  | 18:34 | 29,46 |
| 15:44 | 61,83 | 18:44 | 24,38 |
| 15:54 | 61,2  | 18:54 | 19,3  |
| 16:04 | 59,93 | 19:04 | 15,49 |
| 16:14 | 58,66 | 19:14 | 12,95 |

Tabla 5.5. Lecturas correspondientes al rendimiento de la batería.

Extrapolando los datos de la Tabla 5.5 se obtiene la Figura 5.1, se observa que la batería tiene un desempeño promedio del 10%/hora.

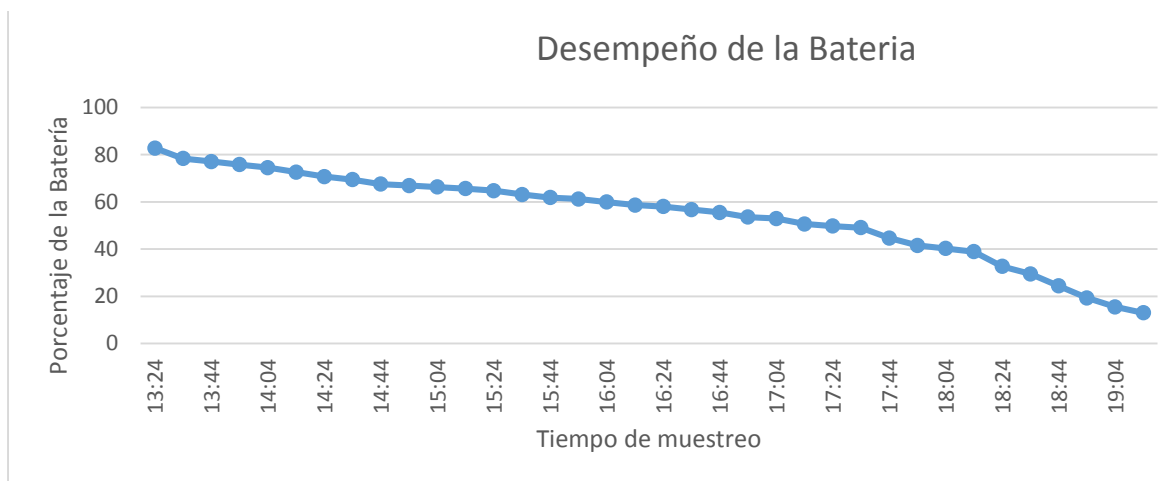


Figura 5.1 Desempeño de la batería %/hora.

## 5.4 Almacenamiento de datos

Las variables fisiológicas antes mencionadas (pH y Temperatura) y el rendimiento de la batería además de ser desplegadas en la estación del cliente, también son almacenadas en la tarjeta SD insertada en el Arduino Yun. El archivo de texto que contiene los datos se puede abrir en cualquier PC que soporte archivos de texto. En la Figura 5.2 se muestra un ejemplo del archivo generado.

| datalog-bien: Bloc de notas |          |          |              |                            |                |
|-----------------------------|----------|----------|--------------|----------------------------|----------------|
| Archivo                     | Edición  | Formato  | Ver          | Ayuda                      |                |
| 10/23/15-14:31:47;          | Bateria: | 76.43(%) | Temperatura: | 26.10(Grados Centigrados); | pH:4.15 (pH);  |
| 10/23/15-14:43:04;          | Bateria: | 80.24(%) | Temperatura: | 27.06(Grados Centigrados); | pH:4.15 (pH);  |
| 10/23/15-14:48:03;          | Bateria: | 78.97(%) | Temperatura: | 26.82(Grados Centigrados); | pH:4.14 (pH);  |
| 10/23/15-14:53:03;          | Bateria: | 78.34(%) | Temperatura: | 26.58(Grados Centigrados); | pH:4.14 (pH);  |
| 10/23/15-14:58:03;          | Bateria: | 76.43(%) | Temperatura: | 26.90(Grados Centigrados); | pH:4.14 (pH);  |
| 10/23/15-15:03:03;          | Bateria: | 73.89(%) | Temperatura: | 26.66(Grados Centigrados); | pH:4.13 (pH);  |
| 10/23/15-15:08:03;          | Bateria: | 75.80(%) | Temperatura: | 27.14(Grados Centigrados); | pH:4.16 (pH);  |
| 10/23/15-15:10:44;          | Bateria: | 75.80(%) | Temperatura: | 26.90(Grados Centigrados); | pH:4.14 (pH);  |
| 10/23/15-15:13:03;          | Bateria: | 73.26(%) | Temperatura: | 27.14(Grados Centigrados); | pH:4.15 (pH);  |
| 10/23/15-15:15:44;          | Bateria: | 73.26(%) | Temperatura: | 26.98(Grados Centigrados); | pH:5.40 (pH);  |
| 10/23/15-15:18:03;          | Bateria: | 73.89(%) | Temperatura: | 27.06(Grados Centigrados); | pH:7.30 (pH);  |
| 10/23/15-15:23:03;          | Bateria: | 74.53(%) | Temperatura: | 27.06(Grados Centigrados); | pH:7.28 (pH);  |
| 10/23/15-15:28:03;          | Bateria: | 71.36(%) | Temperatura: | 27.38(Grados Centigrados); | pH:7.27 (pH);  |
| 10/23/15-15:33:03;          | Bateria: | 73.26(%) | Temperatura: | 27.30(Grados Centigrados); | pH:7.27 (pH);  |
| 10/23/15-15:38:03;          | Bateria: | 71.99(%) | Temperatura: | 27.22(Grados Centigrados); | pH:7.28 (pH);  |
| 10/23/15-15:43:03;          | Bateria: | 70.09(%) | Temperatura: | 27.54(Grados Centigrados); | pH:7.26 (pH);  |
| 10/23/15-15:48:03;          | Bateria: | 70.72(%) | Temperatura: | 27.38(Grados Centigrados); | pH:7.25 (pH);  |
| 10/23/15-15:53:04;          | Bateria: | 68.18(%) | Temperatura: | 27.14(Grados Centigrados); | pH:7.24 (pH);  |
| 10/23/15-15:58:03;          | Bateria: | 68.82(%) | Temperatura: | 27.30(Grados Centigrados); | pH:7.26 (pH);  |
| 10/23/15-16:03:03;          | Bateria: | 64.37(%) | Temperatura: | 27.14(Grados Centigrados); | pH:7.26 (pH);  |
| 10/23/15-16:08:03;          | Bateria: | 68.18(%) | Temperatura: | 27.46(Grados Centigrados); | pH:7.25 (pH);  |
| 10/23/15-16:13:03;          | Bateria: | 68.18(%) | Temperatura: | 27.46(Grados Centigrados); | pH:7.24 (pH);  |
| 10/23/15-16:18:03;          | Bateria: | 68.18(%) | Temperatura: | 27.62(Grados Centigrados); | pH:7.29 (pH);  |
| 10/23/15-16:23:03;          | Bateria: | 67.55(%) | Temperatura: | 26.30(Grados Centigrados); | pH:7.14 (pH);  |
| 10/23/15-16:24:02;          | Bateria: | 65.64(%) | Temperatura: | 26.54(Grados Centigrados); | pH:7.14 (pH);  |
| 10/23/15-16:28:03;          | Bateria: | 66.91(%) | Temperatura: | 26.70(Grados Centigrados); | pH:7.14 (pH);  |
| 10/23/15-16:29:02;          | Bateria: | 67.55(%) | Temperatura: | 26.86(Grados Centigrados); | pH:7.14 (pH);  |
| 10/23/15-16:34:05;          | Bateria: | 66.28(%) | Temperatura: | 27.10(Grados Centigrados); | pH:10.57 (pH); |
| 10/23/15-16:39:05;          | Bateria: | 66.28(%) | Temperatura: | 26.86(Grados Centigrados); | pH:10.57 (pH); |
| 10/23/15-16:39:07;          | Bateria: | 65.64(%) | Temperatura: | 26.78(Grados Centigrados); | pH:10.56 (pH); |
| 10/23/15-16:44:05;          | Bateria: | 66.28(%) | Temperatura: | 26.70(Grados Centigrados); | pH:10.54 (pH); |
| 10/23/15-16:49:05;          | Bateria: | 63.10(%) | Temperatura: | 26.62(Grados Centigrados); | pH:10.55 (pH); |
| 10/23/15-16:54:05;          | Bateria: | 66.28(%) | Temperatura: | 26.78(Grados Centigrados); | pH:10.53 (pH); |
| 10/23/15-16:59:05;          | Bateria: | 63.74(%) | Temperatura: | 26.86(Grados Centigrados); | pH:10.55 (pH); |
| 10/23/15-17:04:05;          | Bateria: | 61.83(%) | Temperatura: | 26.70(Grados Centigrados); | pH:10.55 (pH); |
| 10/23/15-17:09:05;          | Bateria: | 62.47(%) | Temperatura: | 27.10(Grados Centigrados); | pH:10.54 (pH); |
| 10/23/15-17:14:05;          | Bateria: | 62.47(%) | Temperatura: | 26.94(Grados Centigrados); | pH:10.57 (pH); |
| 10/23/15-17:19:05;          | Bateria: | 64.37(%) | Temperatura: | 27.02(Grados Centigrados); | pH:10.52 (pH); |
| 10/23/15-17:24:05;          | Bateria: | 60.56(%) | Temperatura: | 26.94(Grados Centigrados); | pH:10.53 (pH); |
| 10/23/15-17:29:05;          | Bateria: | 59.29(%) | Temperatura: | 26.54(Grados Centigrados); | pH:10.53 (pH); |
| 10/23/15-17:34:05;          | Bateria: | 57.39(%) | Temperatura: | 26.78(Grados Centigrados); | pH:10.51 (pH); |
| 10/23/15-17:39:05;          | Bateria: | 56.12(%) | Temperatura: | 26.38(Grados Centigrados); | pH:10.51 (pH); |
| 10/23/15-17:44:05;          | Bateria: | 56.12(%) | Temperatura: | 26.78(Grados Centigrados); | pH:10.72 (pH); |

Figura 5.2 Archivo txt generado.

## 5.5 Resultados de las pruebas de campo

Las pruebas de campo se realizaron en el rancho ganadero de La Posta Zootécnica “Torreo del Molino” de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootécnica de la Universidad Veracruzana.

### a) Primera prueba

La primera prueba de campo consistió en probar el bolo en un agua forraje, esta agua forraje simula las condiciones de temperatura y consistencia del contenido ruminal, consta de pastura, agua a diferentes temperaturas y un ácido para variar el pH. El agua forraje resultante se observa en la Figura 5.3. Para esta prueba dentro del agua forraje se introdujo al centro el bolo, a un lado un medidor de pH de bolsillo de la marca Hanna el cual muestra en pantalla los valores de pH y temperatura simultáneamente. El monitoreo en tiempo real se muestra en la Figura 5.4.

En la Tabla 5.6 se muestran los datos obtenidos durante el tiempo de muestro, variando la temperatura del agua forraje y variando la acidez.



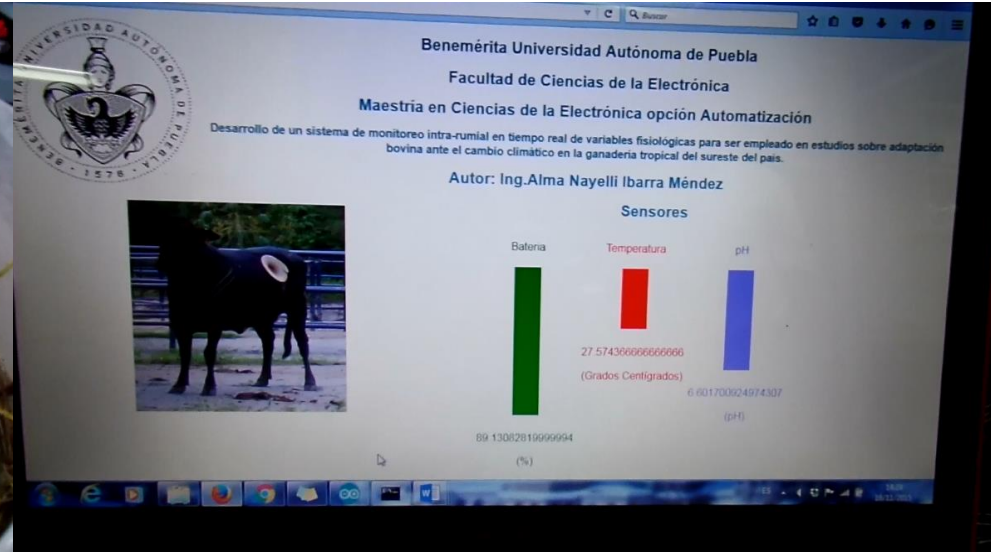
Figura 5.3 Agua forraje para simulación de contenido ruminal.

| REFERENCIA     |                  |        | DATOS DE LA SD    |             |                  |        |
|----------------|------------------|--------|-------------------|-------------|------------------|--------|
| Fecha y Hora   | Temperatura (°C) | pH(pH) | Fecha y Hora      | Batería (%) | Temperatura (°C) | pH(pH) |
|                |                  |        | 11/16/15-13:53:17 | 96,74       | 24,7             | 4,96   |
| 11/16/15-14:25 | 25,9             | 7,9    | 11/16/15-14:21:58 | 86,59       | 25,82            | 7,51   |
| 11/16/15-14:40 | 29               | 6,5    | 11/16/15-14:43:53 | 84,69       | 31,49            | 5,49   |
| 11/16/15-14:48 | 31,3             | 5,8    | 11/16/15-14:46:47 | 86,68       | 31,08            | 5,73   |
| 11/16/15-14:48 | 31,2             | 7,2    | 11/16/15-14:48:23 | 84,49       | 31,31            | 5,31   |
| 11/16/15-14:50 | 31               | 6,4    | 11/16/15-14:50:36 | 84,05       | 31,21            | 6,44   |
| 11/16/15-15:03 | 31,5             | 5,9    | 11/16/15-15:09:20 | 78,34       | 31,24            | 5,94   |
| 11/16/15-15:20 | 29,5             | 5,9    | 11/16/15-15:21:19 | 77,7        | 29,25            | 5,96   |
| 11/16/15-17:01 | 26               | 5,2    | 11/16/15-17:05:24 | 61,51       | 26,33            | 5,07   |
| 11/16/15-17:11 | 26               | 5      | 11/16/15-17:11:23 | 61,24       | 26,07            | 5,08   |
| 11/16/15-17:14 | 31,8             | 5,5    | 11/16/15-17:17:38 | 61,07       | 32               | 5,46   |

Tabla 5.6. Lecturas correspondientes al monitoreo del agua forraje.



a)



b)

Figura 5.4 a) Lectura de referencia, b) lecturas en la pantalla de usuario.

## b) Segunda prueba

La segunda prueba consistió en introducir el bolo directamente en el rumen de la vaca.

El manejo de la vaca se realizó en apego a la norma oficial mexicana NOM-062-ZOO-1999, y los encargados de esta actividad la realizaron los investigadores de la Facultad de Veterinaria y Zootecnia bajo la supervisión del Doctor Antonio Hernández Beltrán.

Como se muestra en la Figura 5.5 se selló completamente la unión entre la tapa y el cuerpo de bolo con silicón rojo que es resistente a altas temperatura, de igual manera se colocó silicón alrededor de los sensores.



Figura 5.5 Bolo sellado con silicón rojo.

Antes de ser introducido al rumen de la vaca se confirmó que el dispositivo estuviera transmitiendo, lo cual se observa en la Figura 5.6.

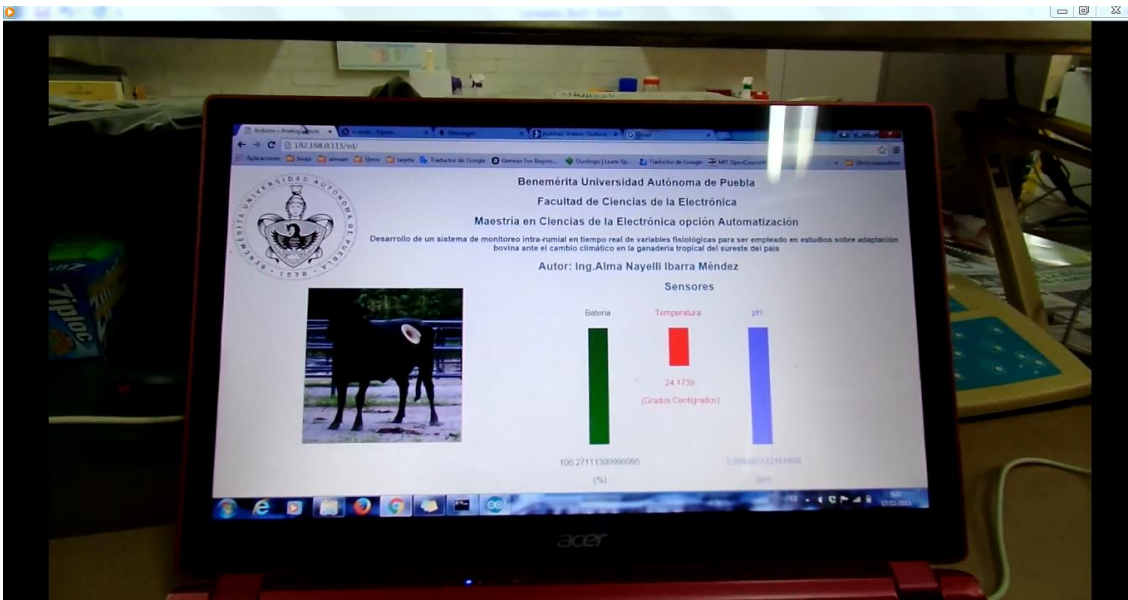


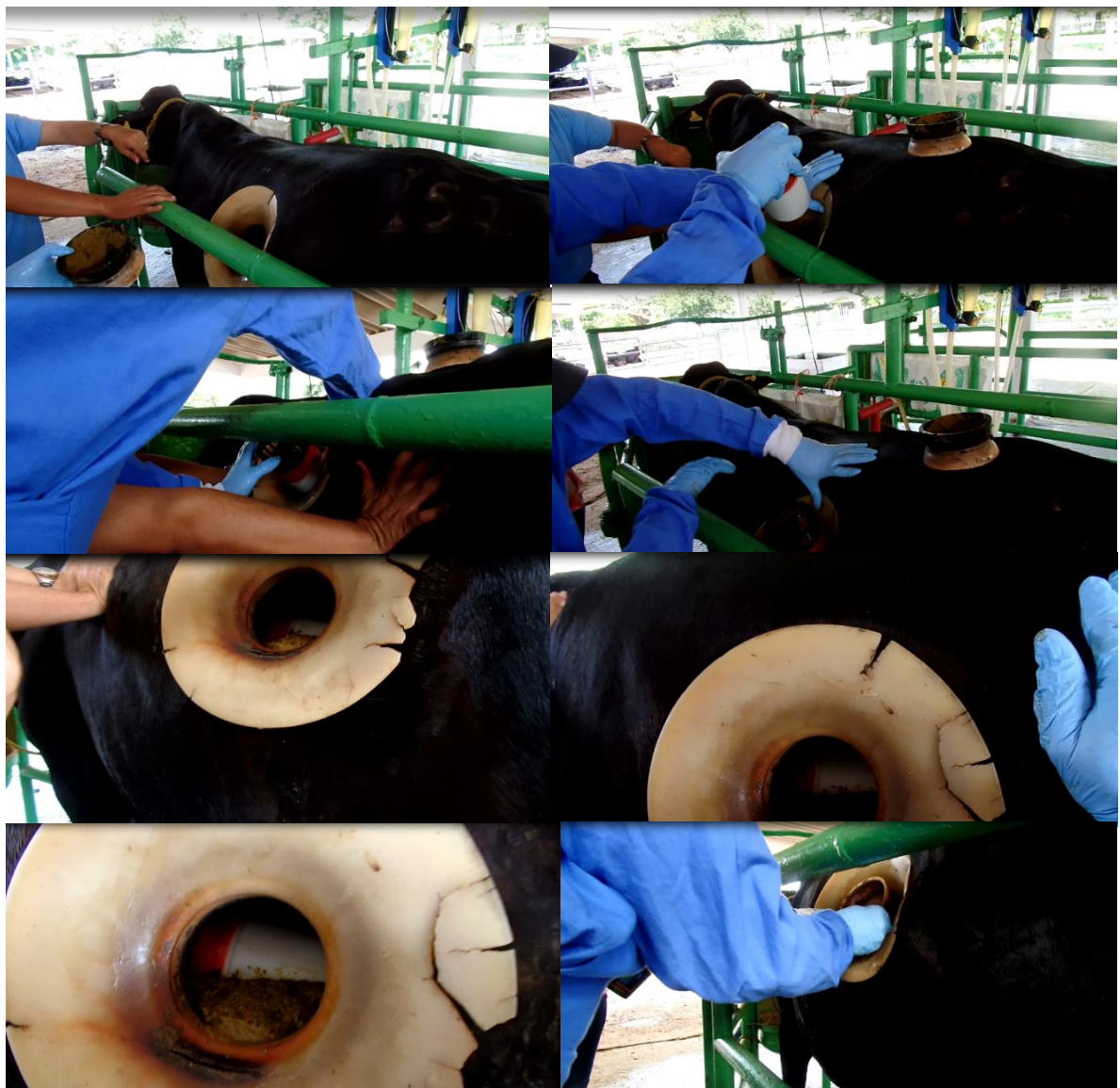
Figura 5.6 Prueba de transmisión previa a ser introducida en la vaca.

Posteriormente todo el equipo se trasladó al área de manejo donde se colocó a la vaca para introducirle el bolo al rumen a través de la fistula, que se observa en la Figura 5.7.



*Figura 5.7 Preparación de la vaca para introducirle el bolo.*

A continuación se muestra en la Figura 5.8 una secuencia de imágenes donde se muestra cuando se remueve la tapa de la fistula, se introduce el bolo, y se observa el bolo ya dentro del rumen de la vaca.



*Figura 5.8 Manejo de la vaca para introducir el bolo en el rumen.*

Se prosiguió a trasladar a la vaca del área de manejo hacia el corral donde se realizaría el monitoreo, desafortunadamente se tuvieron muchos percances durante el proceso de traslado, entre ellos uno fue que la vaca cayó dentro de una zanja como se observa en la Figura 5.9, lamentablemente la vaca sufrió algunos raspones y golpes en el intento de salida, pero a pesar de todo ello el bolo se mantuvo intacto.



Figura 5.9 La vaca cayó dentro de una zanja.

Una vez que finalmente se ubicó a la vaca en el establo se corroboró que el bolo se encontrara en buen estado dentro de la vaca y se comprobó la transmisión de datos inalámbricamente por medio de la interfaz de usuario como se muestra en la Figura 5.10.



Figura 5.10 Inicio datos.

de captura de

Finalmente se extrajo el bolo del rumen de la vaca (Figura 5.11), se desensambló el sistema para poder remover la tarjeta de memoria SD y leer los datos que se grabaron durante aproximadamente 8 horas de muestreo desde el ensamble del sistema, sellado, traslado, monitoreo y extracción.



Figura 5.11 Extracción del bolo.

Los datos obtenidos en esta prueba de campo se muestran en la Tabla 5.7.

| Actividad | Fecha y Hora | Batería (%) | Temperatura (°C) | pH (pH) |
|-----------|--------------|-------------|------------------|---------|
|-----------|--------------|-------------|------------------|---------|

|   |                    |        |       |      |
|---|--------------------|--------|-------|------|
| Inicia el sellado del bolo  | 11/17/15-09:30:32; | 114,52 | 26    | 7,99 |
| Sellado del bolo completamente seco   | 11/17/15-09:46:14; | 110,08 | 24,49 | 5,08 |
| Ultimo muestreo dentro del laboratorio  | 11/17/15-10:14:17; | 101,19 | 25,69 | 5,08 |
| La vaca finalmente se encuentra en el establo asignado para las mediciones. La vaca estuvo expuesta bajo los rayos del sol por más de 4 horas. Y en una condición de estrés extremo debido al manejo para introducir el bolo, después de los incidentes durante el trayecto hacia el establo. |                    |        |       |      |
| Inicio de la transmisión  | 11/17/15-13:46:53; | 73,26  | 41,1  | 5,46 |
|   | 11/17/15-14:09:05; | 65,64  | 39,78 | 5,84 |
|   | 11/17/15-14:18:03; | 60,56  | 40,01 | 6,01 |
|   | 11/17/15-14:31:47; | 56,12  | 39,47 | 6,13 |
|   | 11/17/15-14:48:03; | 52,95  | 40,1  | 6,05 |
|   | 11/17/15-15:03:03; | 49,77  | 39,57 | 6,17 |
|   | 11/17/15-15:15:44; | 39,61  | 39,08 | 6,24 |
|   | 11/17/15-15:33:03; | 35,81  | 41,25 | 6,28 |
|   | 11/17/15-15:48:03; | 26,28  | 39,69 | 5,96 |
|   | 11/17/15-16:03:03; | 18,67  | 40,11 | 5,89 |
|   | 11/17/15-16:14:05; | 14,22  | 39,27 | 6,15 |
|   | 11/17/15-16:39:07; | 8,67   | 40,06 | 6,32 |
| Muestreo cada 15 minutos  | 11/17/15-16:42:19; | 0,89   | 40,22 | 6,22 |
| Finalmente el bolo se extrajo   |                    |        |       |      |
| Como se observa la batería ya se había  | 11/17/15-16:44:01; | -6,09  | 39,26 | 7,07 |
| terminado y las mediciones almacenadas ya no  | 11/17/15-17:11:03; | -5,46  | 29,52 | 5,05 |
| son confiables  |                    |        |       |      |

Tabla 5.7. Lecturas correspondientes al monitoreo de campo en la vaca.

Como se observa en la Figura 5.12 la batería presentó un rendimiento aproximado de 12%/Hora.

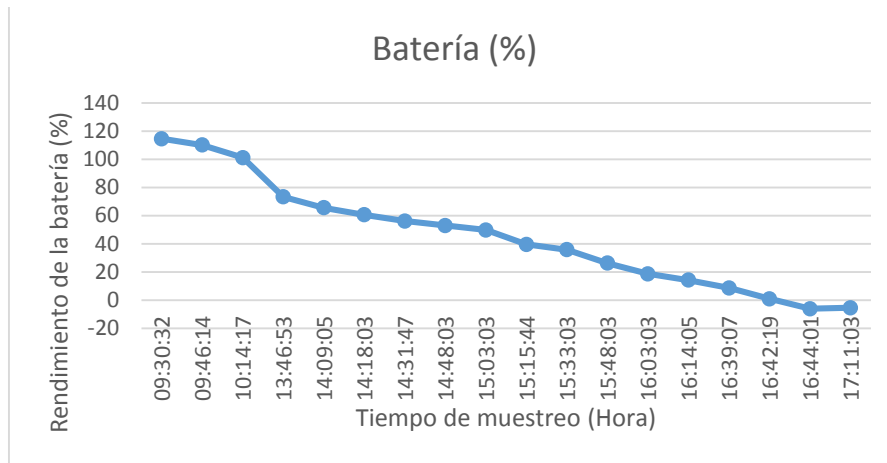


Figura 5.12 Rendimiento de la batería en prueba de campo.

Como ya se observó en la Tabla 5.7, cuando la batería se encuentra con un valor de menor al establecido (3.3V) los datos almacenados ya no son confiables.

Se observa en la Figura 5.13 las temperaturas muestreadas en la prueba de campo, tomando en cuenta que la primera muestra se realizó dentro del laboratorio mientras se sellaba el bolo con el silicón.

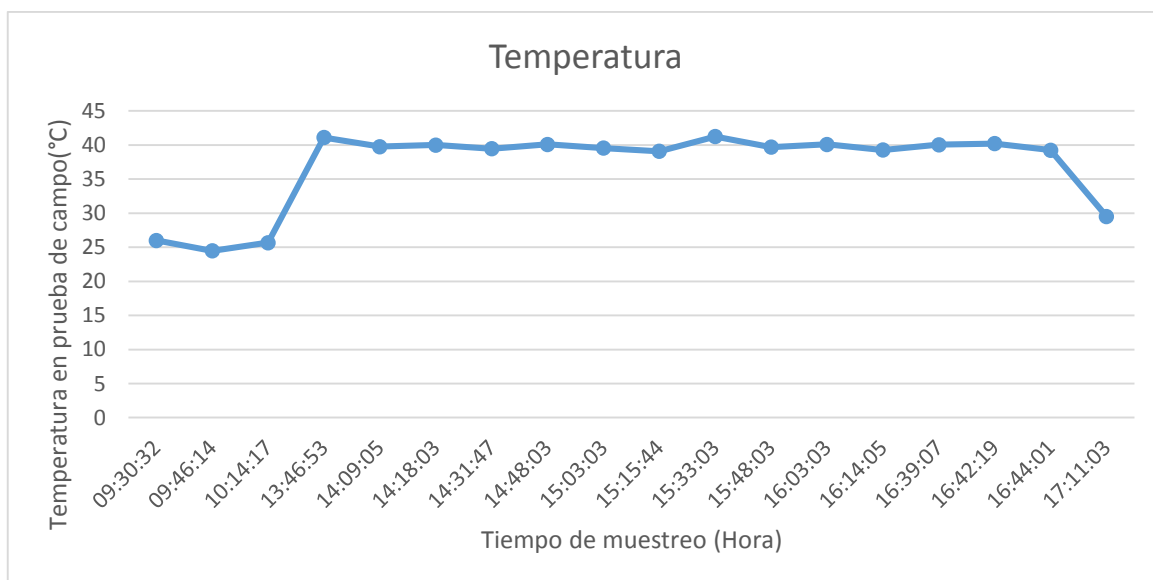


Figura 5.13 Temperaturas muestreadas en prueba de campo.

Finalmente se observa en la Figura 5.14 el pH muestreado en esta prueba de campo, cabe recalcar que la primera medición se realizó dentro del laboratorio.

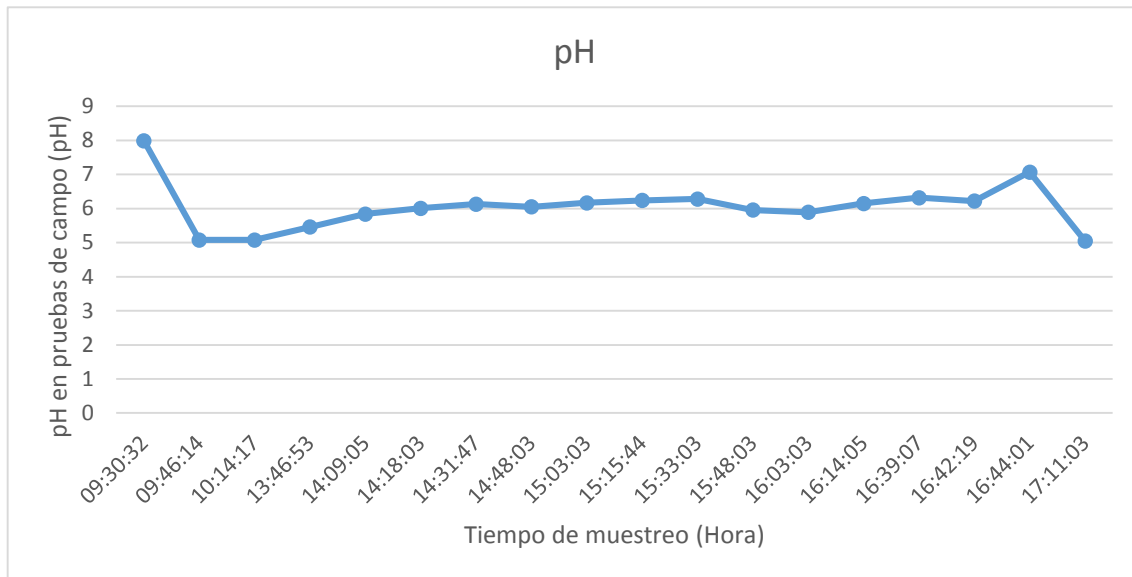


Figura 5.14 pH muestreado en prueba de campo.

## 5.6 Conclusiones

Se desarrolló un sistema para el monitoreo de las variables fisiológicas del rumen de la vaca.

Para la medición de temperatura se realizó un muestreo en el rango de 25°C a 62.5°C ya que la temperatura esperada en el rumen se encuentra entre 39°C a 40°C. Se observó una media del porcentaje de error de 0.1479°C.

Para la medición de pH se dividieron los datos de acuerdo a la solución buffer de referencia. Para este caso se realizaron mediciones con soluciones buffer pH4, pH7 y pH10. En los resultados se observa la media del porcentaje de error en pH y pH10 de 1.38pH, sin embargo en pH7 se observa de 0.512. Esto se debe a que el diseño se realizó para obtener el menor error alrededor del rango de pH7 ya que el pH esperado en el rumen de la vaca se encuentra en el rango de pH5 a pH7.

Con respecto a la batería, presento una descarga lineal, por lo que su desempeño se encuentra alrededor del 10%/hora.

Para la transmisión inalámbrica, como ya se mencionó se crea un servidor local, por lo que la estación cliente debe encontrarse en la misma red local, se realizaron pruebas de transmisión y el sistema mantiene la transmisión hasta donde el alcance de la red local a la que nos conectamos, en el laboratorio de la Maestría en Electrónica se alcanzó un radio de transmisión de 20 metros.

En la prueba de transmisión con el agua forraje se alcanzó una distancia de hasta 40 metros, sin embargo cuando el bolo fue introducido al rumen de la vaca esta distancia se degradó a un máximo de 8 metros.

---

# CONCLUSIONES

---

El sistema aquí presentado se orientó para generar un instrumento electrónico para apoyar los estudios dirigidos a reconocer la capacidad de adaptación de los bovinos en ambientes de reducido confort térmico.

Se trabajó primero con un sensor ISFET pero debido al bajo desempeño en las pruebas realizadas se optó por cambiarlo por un electrodo combinado de la marca SENSOREX.

El electrodo combinado presentó una respuesta similar a la teórica, motivo por el cual se continuo desarrollando un circuito de acondicionamiento, se realizaron pruebas con tres diferentes soluciones buffer de pH, y el sistema presentó la misma tendencia y repetitividad, cabe mencionar que este sensor cuenta con una compensación de temperatura, por lo que las mediciones de pH se mantiene a diferentes temperaturas.

Para la integración de todo el proyecto se utilizó el diseño del primer bolo, el cual fue proporcionado por el Doctor Pedro Javier García Ramírez de la Universidad Veracruzana.

Con respecto a la transmisión inalámbrica de los datos, se tiene la restricción del rango de la red local.

La interfaz de usuario se probó en los navegadores Chrome, Mozilla e Internet Explorer con los mismos resultado, el diseño de la página es simple y la pantalla no se encuentra saturada de información.

En los objetivos del proyecto solo se solicitaba el desligue de los datos muestreado, pero se optó por también almacenarlos como un respaldo de información.

---

## Trabajo a futuro

---

El diseño del primer prototipo presentó unos pequeños inconvenientes como fueron: el radio del bolo, la exposición del electrodo y el tipo de muestra (contenido del rumen). Para resolver estos inconvenientes se propone:

- Reducir 0.5cm o 1cm el diámetro del bolo, el reducir el diámetro conlleva a reubicar la distribución de los sensores, y a reconsiderar el hardware.
- Para la extracción del bolo hace falta un cajeado ergonómico para facilitar la manipulación del bolo.
- Ya que se trabajó con un electrodo de vidrio, se propone dejar un espacio reducido para exponer la membrana de vidrio, o adquirir uno de base plana.

---

# **APÉNDICE A**

## **PUBLICACIÓN DE RESULTADOS**

---

Como parte de la publicación de resultados, se realizó un artículo y a continuación se muestran: la publicación del artículo, la carta de aceptación y la constancia de la ponencia presentada en el 11° Congreso Internacional de Ingeniería CONIIN 2015



La UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO  
a través de la  
FACULTAD DE INGENIERÍA,  
otorga la presente

# CONSTANCIA

a

**A. Ibarra, P. García, S. Vergara, A. Palomino, M. A. Vargas**

Por haber impartido la ponencia oral

*Development of a Intra-Rumial monitoring  
system in realtime of physiological variables*

en el Congreso Internacional de Ingeniería  
en su undécima edición  
realizado del 11 al 15 de Mayo del 2015  
en la ciudad de Santiago de Querétaro, México.

Dr. Aurelio Domínguez González  
Director



UNIVERSIDAD  
AUTÓNOMA DE  
QUERÉTARO

creando**conciencia**

# Development of a Intra-Ruminal monitoring system in realtime of physiological variables

A. Ibarra<sup>#1</sup>, P. García<sup>\*2</sup>, S. Vergara<sup>#3</sup>, A. Palomino<sup>#4</sup>, M. A. Vargas<sup>#5</sup>

<sup>#</sup>Facultad de Ciencias de la Electrónica, Maestría en Ciencias de la Electrónica opción Automatización, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Av. San Claudio y 18 Sur. Puebla, México

<sup>1</sup>almiux\_150385@gmail.com

<sup>3</sup>svergara2@hotmail.com

<sup>\*</sup>Instituto de Ingeniería, Universidad Veracruzana

Juan Pablo S/N, Veracruz, México

<sup>2</sup>jagarcia@uv.mx

**Abstract**—In the following work an experimental prototype desing (bolus) is implemented, based on the electronic instrumentation point of view, for real time detection of physiological variables (pH and temperature) on cattle's for being measured in the rumen. A desirable behavior in the cow's health is when the rumen is between 5.5 and 7.0 pH and temperature between 38-40 Celcius degrees. The temperature measuring was implemented using a LM35 IC which presents a linear response of 10 mV/°C and an accuracy of 1°C; in the other hand, for pH measurement a combine electrode SG200C was used which presents a linear response of 41.39 mV/pH and an error of 2.2 mV. The prototype monitoring system was made through IEEE 802.11 wireless technology protocol instrumented with the RN-171-XV module. The obtained data will allow veterinarians to research in the cattle population's ability to adapt to the southeast tropical Mexican weather due to reduced thermal comfort environments.

**Keywords**—temperature; pH; bovine; acquisition system.

## I. INTRODUCTION

In the following work an experimental prototype design is implemented, focused from the electronic instrumentation point of view, for real time detection of physiological variables (pH and temperature) on cattle's for being measured in the rumen. The obtained data will allow veterinarians to research in the cattle population's ability to adapt to the southeast tropical Mexican weather due to reduced thermal comfort environments.

Analyses for cattle bovine vulnerability in Veracruz City; located on the southeast Mexican coast, where there is a tropical weather and most of the year with a temperature around 40°C with a relative humidity of 90%; in front of climate changes shows that the biggest negative impact is during drought season on the north and center of the city, while raining season affects the south. The main species that will be affected is the bovine. Measures about heat stress for long periods of time affects European cattle (*Bos Taurus*), Cebu and the mixes demonstrate affectations in the physiology, heart and respiratory rates, cell packed volume, metabolic acidosis associate to pH sanguine change [1].

In the bovine digestive system the most important organ is the rumen, due in here the food is digested. Some of the features in the rumen are: mixing and wetting of the intake, provide the appropriate environment for the development of ruminal microfiber. The rumen content consists of dry matter on 10-15%, the inside temperature is on 39-40°C, pH is 5.5-7.1 and main variations of pH are due to presence of organic acid on the diet and on the spittle [2].

The traditional method for pH measuring consists on the ruminal fluid extraction across the fistula for a later analyzes. In the other hand, for temperature measurement a thermometer is introduced into the rectal area and these procedures create a stress situation in the cow.

As a solution to early problematic, an experimental prototype design is implemented to be introduced into a rumen's cows with a fistula, the system integrated with: for pH measurement a combine glass electrode was used; temperature measuring was implemented with an LM35 IC; the prototype monitoring systems is made in real time by wireless technology through IEEE 802.11 protocol; the bolus that is a housing that its aim is to protect the electronics of the biochemical environment was realized on SolidWorks™ with a diameter of 9.5 cm and a length of 25 cm; finally transmitted data will be displayed on a workstation display interface designed with LabVIEW2012™.

## II. MEXICAN COW CATTLE PRODUCTION

### A. Climate impact

Bovine meat is the one with the most economical, social and politic importance in Mexico. Due its productions, processing and marketing which involves more than half of national territory, thousands of producers, providers and business. Veracruz is the most important bovine meat producer city in the country, produces the 15% of the total consumption in Mexico and generates 350 thousands of direct and indirect employees [3].

Climatic changes affect all over the world, and consequences are reflected on forest areas with an increase of

---

## APÉNDICE B

# CARACTERIZACIÓN DEL SENSOR DE PH

---

A continuación se describe la metodología necesaria que se necesita llevar a cabo para la caracterización del sensor de pH.

En la Figura 3.13 se observa el diagrama a bloques para la adquisición de pH, el cual cuenta con las siguientes etapas:

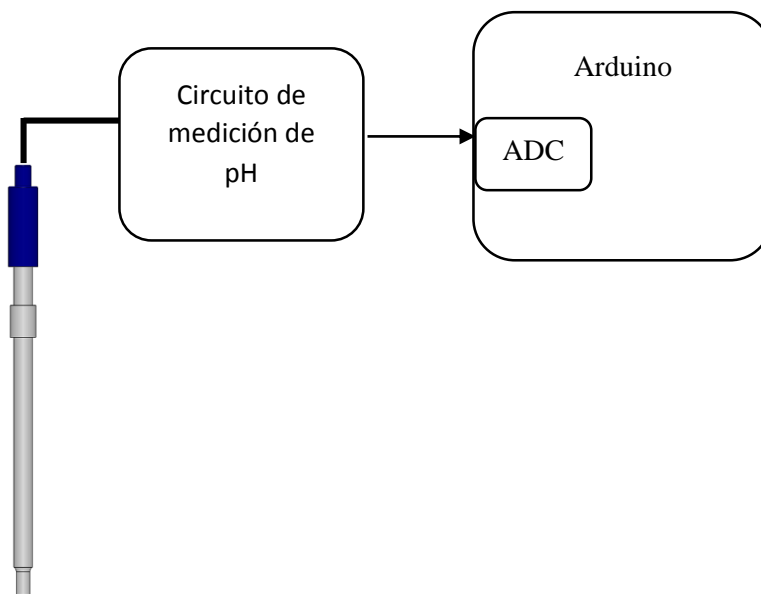


Figura 3.13 Diagrama a bloques de medición de pH.

- Acoplamiento de impedancias. El electrodo combinado de pH presenta una impedancia de entrada en el rango de  $10\text{M}\Omega$  a  $100\text{M}\Omega$  por lo que se recomienda hacer uso de amplificadores operacionales TL084 que cuentan con una impedancia de entrada de  $10^{12}\ \Omega$  [29]. Utilizando el amplificador operacional en configuración de seguidor de voltaje el consumo de corriente es casi despreciable con lo cual se logra el acoplamiento de impedancias entre el sensor y el resto del circuito.

El circuito sugerido se observa en la Figura 3.15.

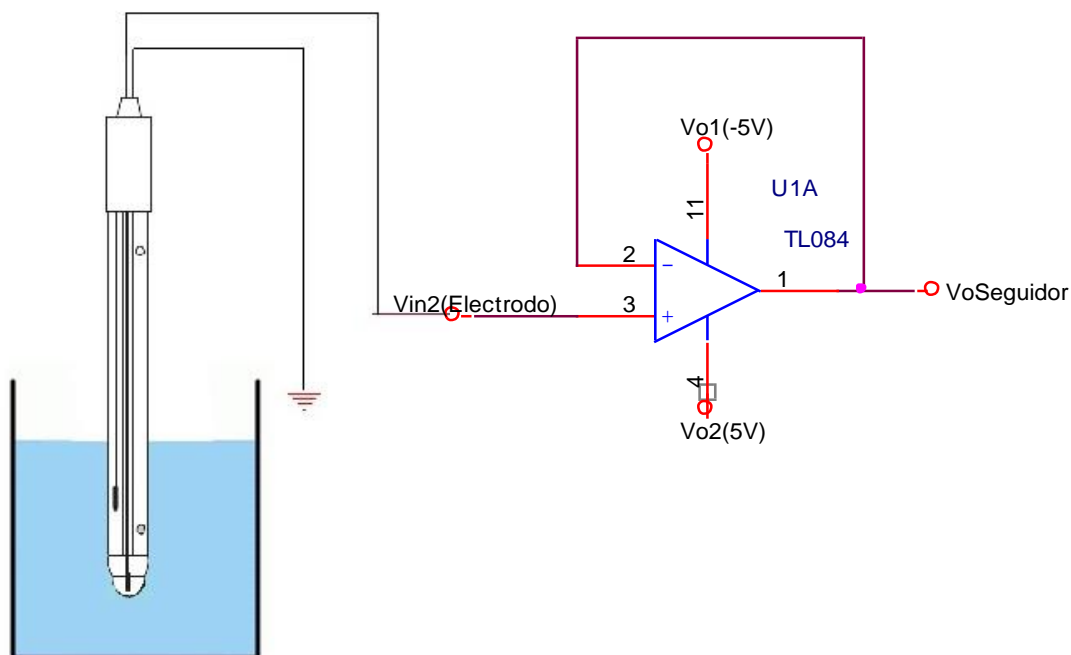


Figura 3.15 Circuito Seguidor de Voltaje.

- Filtro pasa bajas. Ya que el medio a medir es un componente electroquímico, este medio presenta fluctuaciones de la señal. Para eliminar el ruido que pudiera afectar la señal adquirida se recomienda diseñar un filtro pasa bajas con frecuencia de corte de 0.0328Hz. Un filtro pasa bajas activo de primer orden consta de una resistencia, un capacitor y un amplificador operacional como se muestra en la Figura 3.18.

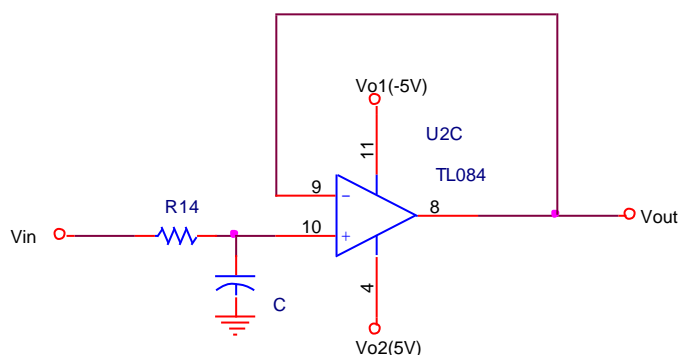


Figura 3.18 Filtro pasa bajas activo de primer orden.

- Calibración del punto equipotencial. Una vez ajustada la impedancia del electrodo, es necesario el ajuste del voltaje que corresponda a un pH neutro, en el caso del electrodo combinado este punto neutro se presenta en un pH7 a 0mV. Este objetivo se logra con la utilización de un amplificador operacional en configuración de diferenciador con una ganancia unitaria, en el cual el voltaje en la terminal inversora es regulado por un potenciómetro el cual hará el ajuste de cero.

El circuito diferenciador sugerido se observa en la Figura 3.21 y su ecuación descriptiva es:

$$V_{out_{calibración}} = V_{out_{filtro}} - V_{potenciómetro1} \quad (3.10)$$

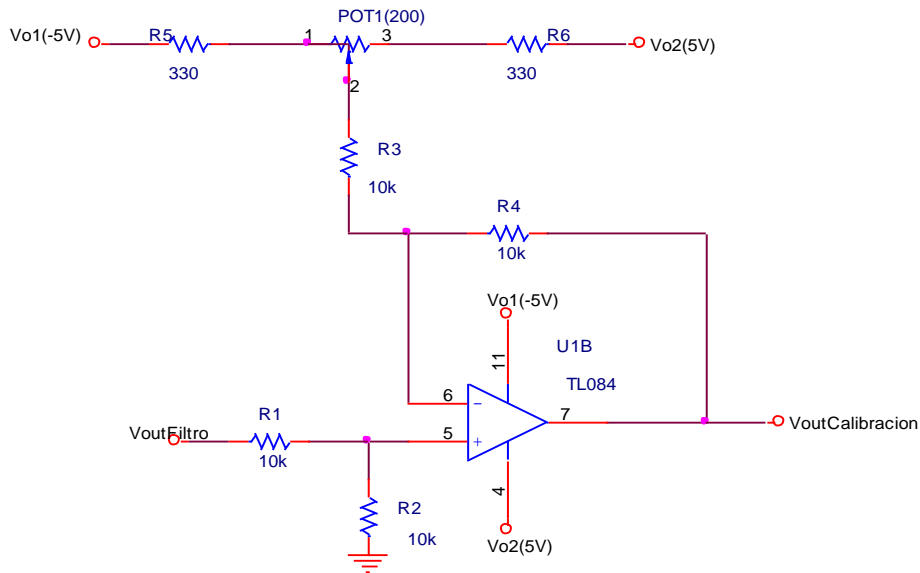


Figura 3.21  
Circuito de calibración  
amplificador operacional.

con un

- Ajuste del rango de la señal. Para que la señal sea introducida al ADC del Arduino se establece un rango de operación de 0V a 4V. Para ello se utilizaron dos amplificadores operacionales, el primero en configuración de amplificador inversor y el segundo como sumador inversor.

Finalmente el circuito de acoplamiento de rango se observa en la Figura 3.24. El cual tiene una función de transferencia de:

$$Vout_{rango} = 13.33((Vout_{calibración}) + (Vout_{-2v})) \quad (3.22)$$

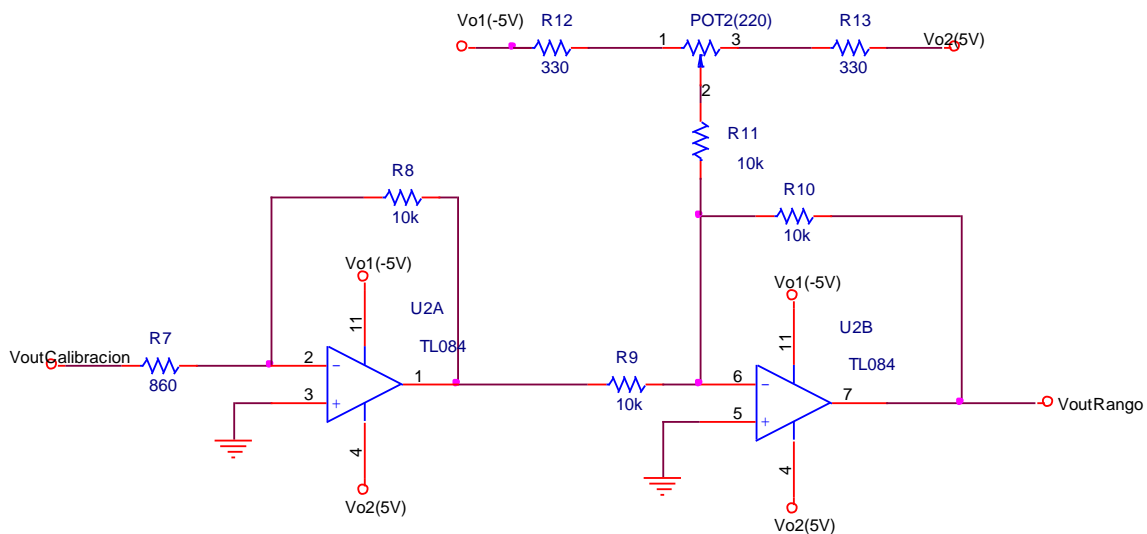


Figura 3.24 Circuito de acoplamiento de rango.

Después de la etapa de acoplamiento, la señal es adquirida por el ADC de la tarjeta Arduino.

El circuito eléctrico diseñado para esta etapa de medición de pH se muestra en la Figura 3.26.

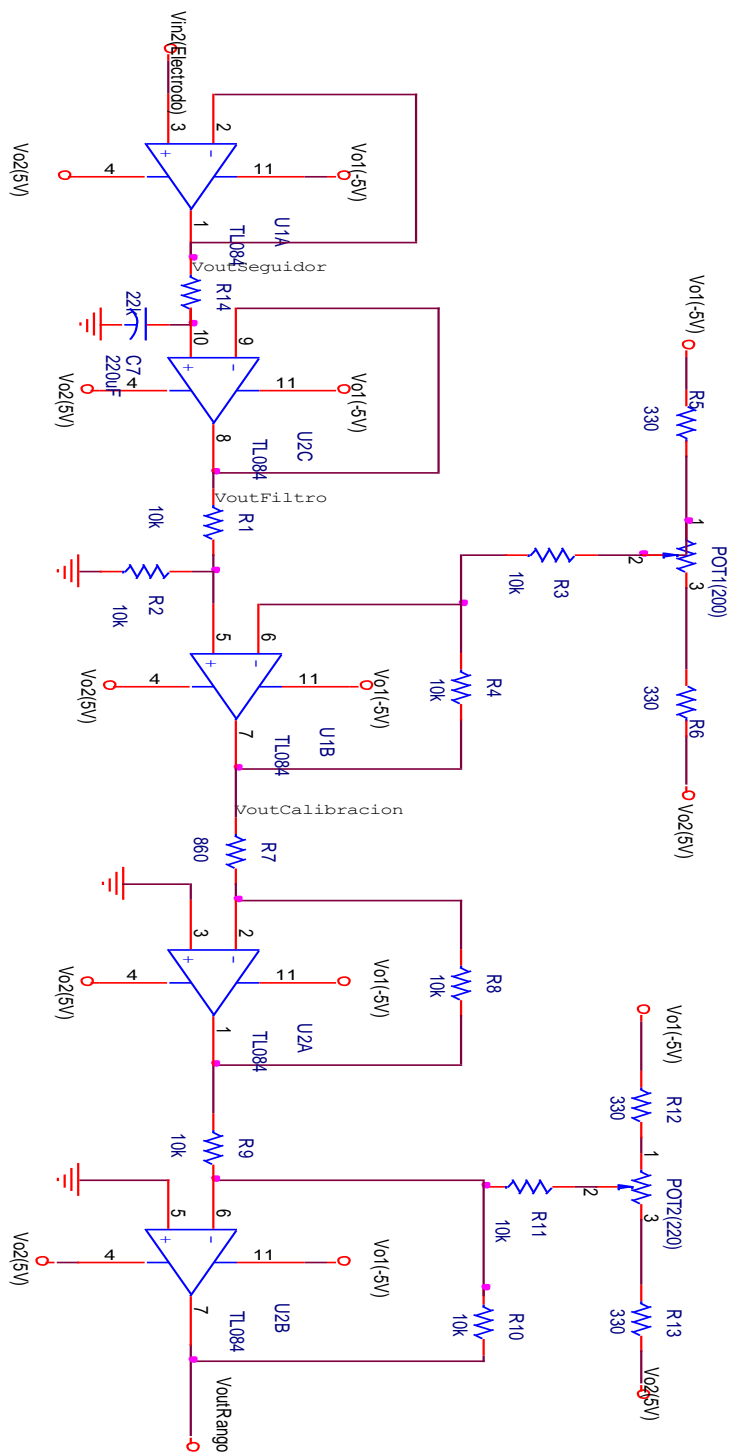


Figura 3.26 Circuito de acoplamiento para la medición de pH.

En el trabajo anteriormente mencionado se utilizó un electrodo combinado de vidrio de la marca Sensores modelo SG200C.

Sin embargo se recomienda reemplazarlo por un S350CD o un S450DC que son de cuerpo de plástico y de superficie plana, esto para que el sensor no quede expuesto por fuera del bote. Ambos electrodos son

combinado por lo que no será necesario añadir un electrodo de referencia, trabajan en un rango de 0-14pH, con un punto equipotencial de pH7.0 a 0mV; se podrían adquirir las versiones HF pero cabe tomar en cuenta que el rango de pH cambia de 0-12, al igual que el rango de temperatura de 0 a 50°C.

---

# REFERENCIAS

---

- [1] K. Fanliang, P. Gui-tang, X. Zhiwei y a. et, «The developoment of a long-term ambulatory pH monitoring system and its clinical application,» 1998.
- [2] T. Duffield, J. Plaizier y a. et, «Comparison of Techniques for Measurement of Rumen pH in Lactating Dairy Cows,» 2004.
- [3] H. Yang, H. Sun y a. et, «A pH ISFET based Micro Sensor System on Chip Using Standart CMOS Technology,» *International Database Engineering & Application Symposium*, 2005.
- [4] T. Mottram, J. Lowe, M. McGowan y N. Philips, «A wirelles telemetric method of monitoring clinical acidosis in dairy cows,» *Computers and electronics in agriculture*, 2008.
- [5] D. Perczyk, M. Bormioli, H. Carlino y M. P. Gonzáles, Manual del cambio climático., Unidad de Cambio Climático de la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable del Ministerio de Salud y Ambiente de la República Argentina, 2004.
- [6] «Portal de la labor del sistema de las naciones unidas sobre el cambio climático,» [En línea]. Available: <http://www.un.org/es/climatechange/causes.shtml>. [Último acceso: 30 Nov 2015].
- [7] R. Vidal-Zepeda, «Las regiones climáticas de México,» Instituto de Geografía, UNAM, México, 2005.
- [8] H. Román Ponce, «Producción y Comercialización de Ganado y Carne de Bovino en el Estado de Veracruz,» Comité Nacional del Sistema Producto Bovinos Carne, Veracruz, Veracruz., 2012.
- [9] A. Tejeda Martínez y e. all, «Programa Veracruzano ante el Cambio Climático,» Gobierno del Estado de Veracruz, Veracruz, 2009.
- [10] C. R.J. y C. J.L., *Enviromental Physiology of Livestock*, UK: Wiley-Blakwell, 2012.
- [11] A. Hernández, P. Cervantes, B. Domínguez, S. Muñoz-Melgarejo, S. Salazar-Lizán y A. Tejeda-Martínez, «Temperature-humidity indez (THI) 1917-2008 and future scenarios of livestock confort in Veracruz,» *Atmosfera*, pp. 24,89-102, 2011.
- [12] E. Van Lier y M. Regueiro, «Digestión en Retículo-Rumen,» Montevideo , Uruguay, 2008.
- [13] Laboratorios Virbac México S.A. de C.V., «Virbac México,» [En línea]. Available: <http://www.virbac.mx/index.php/especiesanimales/bovinoscarne/publicaciones/224-aspectos-generales-sobre-el-rumen-y-su-fisiologia>. [Último acceso: 4 Septiembre 2015].
- [14] I. A. García Galicia , «Sistema digestivo en rumiantes: Anatomofisiología,» UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE CHIHUAHUA, [En línea]. Available: <http://www.angelfire.com/ar/iagg101/docum/digrum.PDF>. [Último acceso: 04 Septiembre 2015].
- [15] A. Creus, *Instrumentación Industrial*, Mexico: Alfaomega 8a Ed, 2010.
- [16] E. K. Spinger, «pH Measurement Guide,» [En línea]. Available: <http://www.hamiltoncompany.com/~media/Files/Sensors/pH%20Measurement%20Guide.ashx>. [Último acceso: 29 Octubre 2015].

- [17] H. Galster, pH Measurement: Fundamentals, Methods, Applications, Instrumentation, New York: VCH Publishers, Inc., 1991.
- [18] Sensorex, «General Use Plastic and Glass pH and Reference Electrodes,» [En línea]. Available: [http://www.sensorex.com/products/more/plastic\\_body\\_ph\\_electrodes](http://www.sensorex.com/products/more/plastic_body_ph_electrodes). [Último acceso: 29 Octubre 2015].
- [19] U. j. d. Guadalajara, «Especialidad en sistemas embebidos,» Posgrados ITESO, [En línea]. Available: [http://posgrados.iteso.mx/documents/134886/0/Folleto\\_Especialidad\\_Sistemas\\_Embebidos.pdf/a6bfa0d5-fbae-4397-b840-c6fee4a180dc](http://posgrados.iteso.mx/documents/134886/0/Folleto_Especialidad_Sistemas_Embebidos.pdf/a6bfa0d5-fbae-4397-b840-c6fee4a180dc). [Último acceso: 30 Nov 2015].
- [20] S. d. E. y. d. I. F. M.-E. U. p. I. C. a.C., «Programa Innovación Orientada al sector de Sistemas Embebidos,» [En línea]. Available: <http://fumec.org/v6/htdocs/embebidos.pdf>. [Último acceso: 30 Nov 2015].
- [21] G. d. España, «Tendencia y aplicaciones de los Sistemas Embebidos en España,» Fundación OPTI, Madrid, 2009.
- [22] M. Banzi, Getting Started with Arduino, Make: Books, 2008.
- [23] «Arduino Yún,» Ardiono.cc, [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardYun>. [Último acceso: 04 Noviembre 2015].
- [24] J. Geier, Designing and Deploying 802.11 n Wireless Networks, Indianapolis: Sisco Systems, Inc, 2010.
- [25] J. Reynolds, Going Wi-Fi: A practical guide to planning and building an 802.11 network, New York: CMP Books, 2003.
- [26] N. C. Zakas, J. MacPeak y J. Fawcett, Professional Ajax, Madrid: Anaya Multimedia, 2007.
- [27] «LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors,» [En línea]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>. [Último acceso: 18 Septiembre 2015].
- [28] V. A. Miró, «Diseño y desarrollo de un equipo de caracterización de ISFET para la medida de analitos iónicos,» 2010. [En línea]. Available: [http://www.recercat.net/bitstream/handle/2072/151834/PFC\\_AntonioMiroVicente.pdf?sequence=1](http://www.recercat.net/bitstream/handle/2072/151834/PFC_AntonioMiroVicente.pdf?sequence=1). [Último acceso: 10 10 2015].
- [29] STMicroelectronics, «General Purpose J-FET quad Operational Amplifiers,» 1999. [En línea]. Available: [http://www.datasheetcatalog.com/datasheets\\_pdf/T/L/0/8/TL084.shtml](http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/T/L/0/8/TL084.shtml). [Último acceso: 04 Noviembre 2014].
- [30] Sensorex, «Genal Use Plastic and Glass pH and Refrence Electrodes,» 2006. [En línea]. Available: [http://www.sensorex.com/products/more/plastic\\_body\\_ph\\_electrodes](http://www.sensorex.com/products/more/plastic_body_ph_electrodes). [Último acceso: 04 Noviembre 2014].
- [31] T. I. Incorporated, «Texas Instruments,» Ene 2006. [En línea]. Available: <http://www.ti.com/product/ptn78000a>. [Último acceso: 19 Nov 2015].
- [32] N. S. Corporation, «Digi-Key Electronics,» Dic 1997. [En línea]. Available: <http://www.digikey.com/product-detail/es/LM2596SX-5.0%2FNOPB/LM2596SX-5.0%2FNOPBCT-ND/3767457>. [Último acceso: 19 Nov 2015].
- [33] A. Designer, «The Altium Designer Environment,» 24 Jul 2014. [En línea]. Available: <http://techdocs.altium.com/display/ADOH/The+Altium+Designer+Environment>. [Último acceso: 19 Nov 2015].
- [34] F. L. LaMotte, W. R. Kenny y A. B. Reed, pH and its practical application, Baltimore: The Williams & Wilkins Company, 1932.

