

SISTEMA ELECTRÓNICO PARA EL MONITOREO DE BOVINOS HEMBRA EN  
SU CICLO ESTRAL

KEVIN SEBASTIÁN ROA PRIETO  
LUIS CARLOS ROJAS SCARPETTA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
BOGOTÁ D.C.  
2019

SISTEMA ELECTRÓNICO PARA EL MONITOREO DE BOVINOS HEMBRA EN  
SU CICLO ESTRAL

KEVIN SEBASTIÁN ROA PRIETO  
LUIS CARLOS ROJAS SCARPETTA

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO  
ELECTRÓNICO Y DE TELECOMUNICACIONES

Director  
JOSÉ ROBERTO CUARÁN VALENZUELA  
INGENIERO ELECTRÓNICO, MSC.

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
BOGOTÁ  
2019



## Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:  
**Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)**

Para leer el texto completo de la licencia, visita:  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

### Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

hacer obras derivadas

### Bajo las condiciones siguientes:



**Atribución** — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



**No Comercial** — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Bogotá, Noviembre de 2019

*PAGINA DEDICATORIA*

*Le dedico este trabajo a mis papás por haber formado parte del proceso de desarrollo de este, también se lo dedico a toda mi familia, los cuales de una forma u otra aportaron para que este trabajo se hiciera realidad. También agradezco los esfuerzos y apoyos prestados por parte de los ingenieros y laboratoristas de la Universidad Católica de Colombia que hicieron parte del diseño e implementación del dispositivo.*

***Luis.***

*Agradezco el apoyo tanto financiero como emocional prestado por parte de mi madre Claudia Prieto y mi padre Raul Roa quienes hicieron parte del proceso desde el inicio hasta el fin de este trabajo de grado, no se me olvida mencionar a mi hermano Brayan Roa quien presencio todo el evento generando una imagen positiva para continuar con el proceso hasta el fin.*

*Por último, agradezco a mis abuelos, tíos, tías, primas y hermanas que hicieron parte de alguna forma dentro del marco del proyecto.*

***Kevin.***

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a todas aquellas personas que aportaron con su granito de arena para la culminación de este trabajo de grado. También agradecemos nuestro director, ya que gracias a su asesoría logramos mejorar la calidad del trabajo que se realizó.

De antemano agradecemos al Ingeniero Alberto Diaz el cual presto grandes aportes gracias a sus conocimientos para lograr las metas propuestas.

# CONTENIDO

	Pág.
<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>17</b>
<b>2 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA</b> .....	<b>18</b>
<b>3 OBJETIVOS</b> .....	<b>20</b>
3.1 OBJETIVO GENERAL .....	20
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	20
<b>4 JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>21</b>
<b>5 ANTECEDENTES</b> .....	<b>22</b>
<b>6 MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>29</b>
6.1 INTERNET DE LAS COSAS (IoT) .....	29
6.1.1 Una revisión histórica sobre IoT .....	29
6.1.2 Definición de IoT .....	31
6.1.3 Elementos de IoT .....	34
6.2 BOVINOS Y SU MORFOLOGÍA .....	49
6.2.1 Ganado bovino .....	49
6.2.2 Ganado según el clima .....	50
6.2.3 Ciclo estral en bovinos .....	52
6.3 INDICADORES DE CICLO ESTRAL .....	54
6.3.1 Vocalización como indicador .....	54
6.3.2 Temperatura .....	56
6.3.3 Locomoción Diaria .....	57
6.3.4 Desplazamiento .....	57
6.3.5 Frecuencia cardíaca .....	57
6.4 SENSORES .....	58
6.4.1 Sensores de temperatura .....	59
6.4.2 Sensores de desplazamiento .....	64
6.4.3 Sensores de ritmo cardíaco .....	66
<b>7 METODOLOGÍA</b> .....	<b>69</b>
7.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN: .....	70
7.1.1 Tecnologías IOT: .....	70
7.1.2 Ciclo Estral en Bovinos: .....	70
7.1.3 Instrumentación: .....	70
7.1.4 Redes de Comunicación: .....	70
7.1.5 Aplicaciones Móviles: .....	70
7.2 DISEÑO: .....	71
7.2.1 Selección de Instrumentación: .....	71
7.2.2 Planos Eléctricos: .....	71
7.2.3 Diagrama de Flujo del Funcionamiento del Sistema: .....	71
7.2.4 Diseño de la Interfaz de Usuario: .....	71
7.3 IMPLEMENTACIÓN: .....	71
7.3.1 Desarrollo de PCB: .....	71
7.3.2 Interconexión de Diferentes Módulos del Sistema: .....	72
7.3.3 Programación del Sistema: .....	72
7.4 PRUEBAS: .....	72

7.4.1	<i>Calibración de Sensores:</i>	72
7.4.2	<i>Pruebas de Comunicación:</i>	72
7.4.3	<i>Interfaz del Usuario:</i>	72
7.4.4	<i>Aplicación en Campo de todo el Sistema:</i>	72
<b>8</b>	<b>RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN</b>	<b>73</b>
8.1	DESCRIPCIÓN DEL LUGAR DE APLICACIÓN	73
8.2	SENSORES DISPONIBLES EN EL MERCADO	76
8.2.1	<i>Sensores de ritmo cardíaco</i>	76
8.2.2	<i>Sensores de desplazamiento</i>	81
8.2.3	<i>SENSORES DE TEMPERATURA</i>	85
8.2.4	<i>UNIDAD DE CONTROL Y UNIDAD DE COMUNICACIÓN</i>	88
<b>9</b>	<b>DISEÑO</b>	<b>92</b>
<b>10</b>	<b>IMPLEMENTACIÓN</b>	<b>95</b>
10.1	CAPTURA DE VARIABLES	95
10.2	CARACTERIZACIÓN DE SENSORES	98
10.3	TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	102
10.4	SISTEMA DE TRANSMISIÓN	103
10.5	RECEPCIÓN Y VISUALIZACIÓN DE DATOS	103
<b>11</b>	<b>PRUEBAS DEL PROTOTIPO</b>	<b>105</b>
11.1	PRUEBAS DEL SISTEMA DE MONITOREO EN EL CAMPO	105
11.1.1	<i>Pruebas iniciales del sistema de monitoreo en el campo</i>	105
11.1.2	<i>Segunda prueba del sistema de monitoreo en el campo</i>	110
11.1.3	<i>Tercera prueba del sistema de monitoreo en el campo recepción y visualización de la información</i>	113
11.2	RECEPCIÓN Y VISUALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN	115
<b>12</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>121</b>
<b>13</b>	<b>RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS</b>	<b>122</b>
<b>14</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>123</b>
<b>15</b>	<b>ANEXOS</b>	<b>132</b>

## LISTADO DE CUADROS

Cuadro 1. Construcción de bloques y tecnologías de IoT.	34
Cuadro 2. Sistemas operativos comunes utilizados en entornos IoT.	42
Cuadro 3. Tipos de termopares comerciales.	59
Cuadro 4. Dispositivos de temperatura.	64
Cuadro 5. Sensores para estimación del desplazamiento.	66
Cuadro 6. Indicadores del ciclo estral.	67
Cuadro 7. Características de los diferentes sensores mencionados y sus rasgos de medición.	68
Cuadro 8. Sensores de pulso cardíaco.	80
Cuadro 9. Sensores de desplazamiento.	85
Cuadro 10. Sensores de temperatura.	88
Cuadro 11. Comparación placas de desarrollo Arduino UNO R3 y RaspBerry PI 3 Model B.	89
Cuadro 12. Comparación módulos de comunicación.	90

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de Internet de las Cosas que muestra los usuarios finales y las áreas de aplicación en función de los datos.....	32
Figura 2. Los elementos de IoT.....	35
Figura 3. Tecnologías de comunicación inalámbrica para internet de las cosas...	40
Figura 4. Recopilación placas de desarrollo usadas en IoT. ....	43
Figura 5. Hogar Inteligente.....	45
Figura 6. Ejemplo de automatización de edificios. ....	46
Figura 7. Tipos de Ganado.....	49
Figura 8. Ganado adaptado al clima cálido. ....	50
Figura 9. Ganado adaptado al clima frío. ....	51
Figura 10. Morfología de los productores de carne y leche.....	51
Figura 11. Fases del ciclo Estral. ....	52
Figura 12. Duración de cada fase del ciclo estral.....	53
Figura 13. Frecuencia de mugidos Vs Comportamientos.....	55
Figura 14. Puntos térmicos del ganado bovino. ....	56
Figura 15. Ciclo estral vs Latidos por minuto.....	58
Figura 16. Ficha técnica termopares. ....	60
Figura 17. Sensor RTD. ....	61
Figura 18. Curva de resistencia vs temperatura, RTD de platino.....	61
Figura 19. Tipos de termistores.....	62
Figura 20. Sensor bimetálico.....	63
Figura 21. Acelerómetro mecánico.....	64

Figura 22. Estructura interna acelerómetro capacitivo. ....	65
Figura 23. Estructura acelerómetro piezoeléctrico. ....	65
Figura 24. Sensor de ritmo cardíaco por oxígeno. ....	67
Figura 25. Metodología propuesta.....	69
Figura 26. Medidas aproximadas de la finca en donde se realizarán las pruebas. ....	73
Figura 27. Casa con el acceso a internet para subir los datos a la nube. ....	74
Figura 28. Finca en la cual se realizarán las pruebas de campo.....	74
Figura 29. Ganado bovino a cuál se le harán las pruebas de monitoreo estral.....	75
Figura 30. Los dos terneros más jóvenes actualmente en la finca.....	76
Figura 31. Los tres terneros más adultos de la finca. ....	76
Figura 32. Gráfica de pulso cardíaco. ....	77
Figura 33. Sensor SEN-11574. ....	78
Figura 34. Esquema del sensor MAX30100. ....	79
Figura 35. Sensor MAX30105. ....	80
Figura 36. Especificaciones técnicas ADXL321JCP. ....	81
Figura 37. Vista del ADXL32JPC sin el módulo. ....	82
Figura 38. Módulo LSM303C.....	82
Figura 39. Sensor SEN-13944. ....	83
Figura 40. Sensor MPU6050.....	84
Figura 41. Sensor DS1922L.....	86
Figura 42. Sensor KS103J2. ....	87
Figura 43. Sensor MLX90614.....	87
Figura 44. Comparación NodeMCU y ESP8266. ....	91

Figura 45. Diagrama de componentes del sistema de monitoreo. ....	92
Figura 46. Diseño PCB sistema de monitoreo (Vista superior). ....	93
Figura 47. Diseño PCB sistema de monitoreo (Vista inferior). ....	93
Figura 48. Diseño de caja contenedora del sistema de monitoreo.....	94
Figura 49. Ubicación del sistema de monitoreo en el bovino hembra. ....	95
Figura 50. Esquema básico de conexión del sensor SEN-11574.....	96
Figura 51. Esquema básico de conexión para el sensor DS18B20.....	97
Figura 52. Esquema básico de conexión del sensor SEN-MPU6050.....	98
Figura 53. Gráfica de caracterización del sensor de ritmo cardíaco.....	99
Figura 54. Curvas de caracterización del sensor de temperatura. ....	100
Figura 55. Mediciones del Podómetro Huawei versus MPU-6050. ....	101
Figura 56. ThingSpeak formato PC. ....	104
Figura 57. ThingSpeak formato móvil.....	104
Figura 58. Toma de medidas de temperatura y ritmo cardíaco a la altura de la axila. .....	106
Figura 59. Gráfica ritmo cardíaco con medición hecha a la altura de la axila. ....	107
Figura 60. Grafica de temperatura con medición hecha a la altura de la axila. ....	107
Figura 61. Toma de medidas de temperatura y ritmo cardíaco en el cuello.....	108
Figura 62. Grafica de ritmo cardíaco con medición hecha en el cuello. ....	109
Figura 63. Grafica de temperatura con medición hecha en el cuello.....	109
Figura 64. Elementos usados para realizar la prueba. ....	110
Figura 65. Dispositivo ensamblado vista superior. ....	111
Figura 66. Dispositivo ensamblado vista frontal. ....	111

Figura 67. Adaptación del dispositivo.....	112
Figura 68. Bovino hembra con el dispositivo después de 2 horas.....	113
Figura 69. Ajuste de dispositivo sobre el lomo de la vaca.....	114
Figura 70. Prueba con dispositivo en PCB.....	115
Figura 71. Datos temperatura de la plataforma ThingSpeak.....	116
Figura 72. Datos desplazamiento de la plataforma ThingSpeak.....	117
Figura 73. Datos de temperatura visualizados en la ampliación móvil de ThingSpeak. .....	118
Figura 74. Datos de desplazamiento visualizados mediante la aplicación móvil de ThingSpeak.....	118
Figura 75. Datos de ritmo cardíaco visualizados en la aplicación de ThingSpeak. .....	119
Figura 76. Dispositivo en etapa final.....	119
Figura 77. Prototipo final funcional.....	120

## LISTADO DE ANEXOS

Anexo A. Comparación de los protocolos de Bluetooth, UWB, ZigBee y Wi-Fi...	132
Anexo B. Componentes asociados basados en características del trabajo que se vaya a realizar. ....	133
Anexo C. Tratamiento de datos sensor ritmo cardíaco (SEN-11574).....	134
Anexo D. Tratamiento de datos sensor de temperatura (SEN DS18B20). ....	135
Anexo E. Cuadro de especificaciones UDOO x86. ....	136
Anexo F. Cuadro de especificaciones Tessel 2.....	137
Anexo G. Cuadro de potencia, E / S y costo de las placas desde Arduino UNO Rev 3 hasta STM32L476-RG. ....	137
Anexo H. Cuadro de detalles audiovisuales de las placas desde Arduino UNO Rev 3 hasta STM32L476-RG. ....	138
Anexo I. Cuadro de redes / almacenamiento de las placas desde Arduino UNO Rev 3 hasta STM32L476-RG. ....	138
Anexo J. Cuadro de conjunto de chips / software de las placas desde Arduino UNO Rev 3 hasta STM32L476-RG. ....	139
Anexo K. Manual de Usuario (ver archivo).....	139

## GLOSARIO

**UBIQUITOUS COMPUTING (UBICOM):** En español significa Computación Ubicua y es un concepto de ingeniería de software cuya finalidad es la integración de la informática en torno a la persona.<sup>1</sup>

**MIDDLEWARE:** También conocido como logística de intercambio de información entre aplicaciones, es un software que asiste a una aplicación para interactuar o comunicarse con otras aplicaciones o paquetes de programas, redes, hardware o sistemas operativos.<sup>2</sup>

**ARDUINO:** Es una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo, diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios.<sup>3</sup>

**TEMPERATURA:** Magnitud física que hace referencia al movimiento de las partículas de un cuerpo, las cuales están directamente relacionadas con la sensación de calor y frío.<sup>4</sup>

**ESTRO:** Periodo durante el cual las hembras (mamíferas) están receptivas sexualmente, es decir, están listas para procrear.<sup>5</sup>

**HATO:** Conjunto de animales; generalmente mamíferos y productores de algún bien para el ser humano.

---

<sup>1</sup> Uwe Hansmann, Lothar Merk, Martin S Nicklous y Thomas Stober, *Pervasive computing: The mobile world* (Springer Science & Business Media, 2003).

<sup>2</sup> Toni A Bishop y Ramesh K Karne, «A Survey of Middleware.», 2003, p. 255.

<sup>3</sup> «Arduino UNO», *Arduino.cl - Plataforma Open Source para el desarrollo de prototipos electrónicos* (blog), accedido 31 de marzo de 2019, <http://arduino.cl/arduino-uno/>.

<sup>4</sup> Juan A Conesa, «Mecanismos de transmisión de calor (conducción, convección, radiación)», *Experimentación en Ingeniería Química I*, 2013.

<sup>5</sup> RAE- ASALE, «“Diccionario de la lengua española” - Edición del Tricentenario», «Diccionario de la lengua española» - Edición del Tricentenario, accedido 10 de septiembre de 2019, <https://dle.rae.es/?id=H05vNCx>.

## RESUMEN

Este trabajo de grado presenta el desarrollo de un sistema de monitoreo del ciclo estral en hembras bovinas o vacas. Para el desarrollo de este se vio la necesidad de aportar a los ganaderos un método que les permita monitorear la temperatura, el ritmo cardíaco y la velocidad de movimiento de las vacas. Estas variables mencionadas son algunas de las principales a tener en cuenta en el ciclo estral. El problema radica en que el monitoreo de este ciclo se hace de forma empírica y por lo general siempre se debe tener un observador humano registrando los comportamientos del animal durante lapsos de tiempo que abarcan todo el día, sin mencionar que el ganadero pierde los registros de la actividad del bovino hembra durante la noche. Si se hace un mal registro durante estos días se puede incurrir en que se altere el ciclo de reproducción del animal, lo cual hace que los intervalos entre partos sean muy grandes y esto de paso altera la producción de leche, que a su vez puede llegar a acarrear pérdidas económicas.

Durante el proceso de investigación se realiza el análisis de requerimientos, diseño e implementación del sistema de monitoreo. Esto se hace partiendo de la investigación de las tecnologías existentes para llevar control de las diferentes fases que tiene el ciclo estral. Así mismo, se determina el uso de sensores de temperatura, ritmo cardíaco y acelerómetros. Por otra parte, se diseña el sistema de monitoreo, el cual permite llevar el registro de las variables antes mencionadas. Así mismo, estas variables se envían a una aplicación que permite llevar el control y ver los cambios de las mismas. Para finalizar se realiza la implementación del sistema con sus respectivas pruebas y se establece la eficacia de este.

### **PALABRAS CLAVES:**

- Ciclo estral.
- IoT
- Monitoreo.

## 1 INTRODUCCIÓN

En este trabajo de grado se presenta el desarrollo de un sistema de monitoreo de variables indicadoras del ciclo estral en las hembras de ganado bovino. Todo esto basado en comportamientos específicos en las hembras de ganado bovino durante dicho ciclo. Por lo general estos comportamientos son: disposición para la monta del toro, pero solo por unos segundos, mayor desplazamiento, mayor frecuencia de mugidos, entre otras.

De esta forma, con este sistema se busca capturar y enviar datos a la nube sobre variables como la distancia recorrida, la temperatura del animal y el ritmo cardíaco. El análisis de estas variables permitirá a futuro predecir el ciclo estral de los bovinos hembra.

Los elementos presentados para el diseño de un sistema de monitorización del ciclo estral comprenden:

Un sistema de red inalámbrica de área extensa o en inglés denominada “Wireless Wide Area Network” (WWAN), el cual permite enviar datos a la nube; un sensor de temperatura, el cual se encarga de medir la temperatura corporal de la hembra; un sensor de ritmo o pulso cardíaco, que se encarga de monitorizar el corazón, con el fin de detectar alguna variación durante la etapa del ciclo estral y, por último, un módulo de control que se encarga de administrar todos los sensores. Además de esto, también se cuenta con una aplicación, en donde el usuario puede observar y llevar registro de los datos del ciclo estral de cada una de las hembras que cuenten con el dispositivo.

## 2 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El ciclo estral en el ganado bovino, más específicamente en las hembras, es un tema muy importante para tener en cuenta, ya que este determina cuando la hembra está lista para aparearse. Generalmente este ciclo dura 18 a 24 días en los cuales en el lapso de unas horas ocurre lo que se denomina el “**estro**”, y es el momento en el cual la hembra acepta ser montada por el toro. El problema radica en que el monitoreo de este ciclo se hace de forma empírica y por lo general siempre se debe tener un observador humano registrando los comportamientos del animal durante lapsos de tiempo que abarcan todo el día, sin mencionar que el ganadero pierde los registros de la actividad del bovino hembra durante la noche. Si se hace un mal registro durante estos días, se puede incurrir en que se altere el ciclo de reproducción del animal, lo cual hace que los intervalos entre partos sean muy grandes y esto de paso altera la producción de leche, que a su vez conlleva a pérdidas económicas.

La detección de estro en los bovinos hembra es crítica para el rendimiento productivo de leche debido a que los tiempos de inseminación natural se ven afectados por el control visual realizado por el obrero cada día; una de cada diez bovinos hembra pierde la ventana de inseminación natural porque pasan desapercibidas las señales que predicen el inicio del ciclo estral<sup>6</sup>; y todo porque el obrero no puede mantener un control constante sobre toda la muestra de vacas lecheras, ya que se debe mantener un control de aproximadamente 20 a 30 minutos sobre un grupo de 4 bovinos hembra. Suponiendo que la muestra es grande, los costos de personal aumentan en proporción al tamaño de bovinos hembra que estén presentes en la muestra, lo que representa un problema para el sector ganadero.

Existen diversos tipos de dispositivos que proporcionan un monitoreo de este ciclo, pero se concentran en medir solo una variable como el “standing” que consiste en medir el momento en el cual el toro se prepara para montar a la hembra; otros miden cuando la hembra se levanta, se acuesta y camina. Por supuesto, hay otros dispositivos mucho más sofisticados que analizan los fluidos de la hembra para determinar su ciclo estral, pero ninguno integra todas las variables antes mencionadas. Lo ideal es que los sensores capaces de medir las diferentes variables sean de tipo no invasivo para que no afecte el estado del bovino<sup>7</sup>, ya que, si el estrés se ve involucrado, el ciclo estral cambia.

---

<sup>6</sup> G.S. Lewis y S.K. Newman, «Changes Throughout Estrous Cycles of Variables That Might Indicate Estrus in Dairy Cows», *Journal of Dairy Science* 67, n.º 1 (enero de 1984), p. 150, [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(84\)81278-3](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(84)81278-3).

<sup>7</sup> Rosa Angélica Sanmiguel Plazas, Fernely Augusto Plazas Hernández, Dunia Yisela Trujillo Piso, María del Rocío Pérez Rubio y Lina María Peñuela Sierra, «Requerimientos para la medición de indicadores de estrés invasivos y no invasivos en producción animal», *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú* 29, n.º 1 (2018), p. 20.

Para tener un monitoreo mucho más preciso se necesita vigilar los cambios que se producen en la hembra cuando está en este ciclo, como, por ejemplo: cambio en el nivel de temperatura, pulso y ritmo cardíaco y distancia recorrida durante el día. Los dispositivos actuales sólo se centran en tomar datos que sirven para llevar a cabo el monitoreo del ciclo estral, pero al no tener en cuenta las variables antes mencionadas (temperatura, ritmo y pulso cardíaco, etc.) se está desaprovechando la oportunidad de brindar datos acerca de la salud del animal y de paso mejorar la calidad de los productos producidos por el mismo (carne, leche, cuero, etc.).

Otra problemática en Colombia es que las tecnologías que permiten llevar el monitoreo del ciclo estral de forma continua y sin necesidad de la intervención humana no están muy implementadas y esto se debe a la brecha digital presente en el país<sup>8</sup>, lo cual hace que la recolección de los datos del ciclo en su mayoría siga siendo hecho por humanos. Este tipo de monitoreo se puede llevar a cabo muy fácilmente en lugares donde la cantidad de cabezas de ganado no supera las 5 (todas hembras, excluyendo a los toros) ya que con una sola persona experta en el tema bastaría para llevar un registro de los datos de cada una de las hembras, pero, por ejemplo en los Llanos Orientales, en donde se tienen fincas o incluso haciendas con cientos o miles de cabezas de ganado, esta labor se vuelve tediosa y muy costosa, ya que se necesitaría una cantidad excesiva de personal experto para poder recopilar los datos de todas y cada una de las hembras que se tengan en dichas fincas o haciendas y siempre estaría la posibilidad de que alguno de los trabajadores tome un registro errado.

En este orden de ideas, en este trabajo se busca resolver la pregunta de investigación: ¿Cómo diseñar un sistema electrónico para el monitoreo de variables indicadoras del ciclo estral en bovinos hembra? La solución a esta pregunta permitiría luego llevar a cabo un análisis de los datos para enfocarse a la detección del ciclo estral de dichos animales.

---

<sup>8</sup> Alma Rosa Alva de la Selva, «Los nuevos rostros de la desigualdad en el siglo XXI: la brecha digital», *Revista mexicana de ciencias políticas y sociales* 60, n.º 223 (2015), p. 90.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar un sistema electrónico para el monitoreo de variables indicadoras del ciclo estral de bovinos hembra.

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Recopilar información sobre el ciclo estral en bovinos, tecnología IOT y aplicaciones móviles.
- Identificar la instrumentación requerida para la medición de temperatura, ritmo cardíaco y posición de bovinos.
- Diseñar un sistema electrónico que permita monitorear constantemente la temperatura, ritmo cardíaco y desplazamiento de bovinos hembra, desde cualquier lugar mediante una aplicación móvil.
- Implementar el prototipo en una finca del municipio de Cáqueza-Cundinamarca para verificar su correcto funcionamiento.

## 4 JUSTIFICACIÓN

La mayoría de campesinos determinan el estado de sus animales por la observación presencial que durante años han ido perfeccionando; en el caso de los bovinos este método es bastante eficaz y útil cuando se tienen no más de 5 cabezas de ganado (sin contar a los machos); pero en el caso que el campesino base su economía en la ganadería, en donde sus cabezas de ganado ascienden a más de cientos o miles, el método de observación presencial se quedará corto para tantas cabezas de ganado, de manera que el ciclo estral se prolongará sin ser detectado, provocando pérdidas en la natalidad de más cabezas de ganado.

Por estas razones ya no basta con tener personal humano realizando la tarea que un sensor puede ejecutar todo el tiempo, las 24 horas del día. Existen varios dispositivos como el Celotor o el Afi-Act<sup>9</sup>, que basan sus medidas en una sola variable para detectar el ciclo reproductivo del bovino, pero al no captar más variables perfectamente medibles pierden la oportunidad de determinar el estado de salud del animal o perder precisión al momento de determinar el ciclo estral de los bovinos hembra.

Otro dispositivo es el llamado “Nedap Smarttag” capaz de determinar el estado de salud externo del bovino además de predecir su ciclo estral, pero nuevamente solo toma en cuenta una variable la cual es la motricidad<sup>10</sup> animal, de manera que pierde precisión además de que solo determina el estado de salud externo del bovino en cuestión; en cambio sí un solo dispositivo tuviera la capacidad de sensar varias variables al mismo tiempo las cuales pueden ser usadas no solo para predecir el ciclo estral del bovino sino también para conocer el estado de salud del animal tanto externo como internamente; este es el principal objetivo de medir varias variables presentes en el bovino como lo son la temperatura, desplazamiento y pulso cardíaco de esta manera se abre un gran abanico de aplicaciones futuras con solo conocer el estado físico del bovino en cuestión.

Otros factores determinantes para el desarrollo de dispositivos como los mencionados anteriormente son las estadísticas expuestas por Fedegan el 13 de septiembre del 2019 en un boletín informativo llamado “Pacto por la ganadería sostenible”, en un lapso de 5 años, el sector agropecuario contribuye con el 6% del PIB (producto interno bruto) nacional; y la ganadería contribuye con el 1.4% del PIB nacional. En términos generales, la ganadería representa el 21.8% del PIB agropecuario, esto genera una idea general de que alrededor de 40 municipios son productores de ganado en una cantidad superior a 100.000 cabezas de ganado entonces el control del ciclo estral se masifica por el abundante ganado en el territorio colombiano según índices de Fedegan.

---

<sup>9</sup> Afimilk, «El collar Silent Herdsman de Afimilk», Afimilk, 7 de febrero de 2016, <https://www.afimilk.com/es/products/cows/sensors/afimilk-silent-herdsman-neck-collar>.

<sup>10</sup> Rey, Emilia Z., «Más que sólo detección de celo.», Más que sólo detector de celo, 15 de julio de 2018, <https://docplayer.es/amp/84291985-Mas-que-solo-deteccion-de-celo.html>.

## 5 ANTECEDENTES

Los indicadores del ciclo estral pueden presentarse de muchas maneras, estas incluyen temperatura, vocalización, ritmo cardíaco, desplazamiento y liberación de ovocitos entre otras. Por lo tanto, se debe identificar de manera acertada cuales son los indicadores de ciclo estral que pueden llegar a ser medidos de manera óptima por medio de sensores, y en donde sus datos pueden llegar a ser tratados de forma correcta para obtener un resultado acercado a los estudios que se mostraran a continuación:

El tema del ciclo estral Arias et al.<sup>11</sup> Presenta un artículo en el que menciona como los factores climáticos pueden afectar tanto la producción de leche como de carne en el ganado bovino, de los cuales según Hann et al.<sup>12</sup> corresponden a una compleja interacción de la temperatura del aire, humedad relativa, radiación, velocidad del viento, precipitación, presión atmosférica, luz ultravioleta y polvo. De todas estas, la más investigada es y utilizada como indicador de estrés es la temperatura ambiental.

Además de lo mencionado en el párrafo anterior Catalano y Callejas<sup>13</sup> mencionan en su artículo la importancia que tiene la detección del celo en el ganado bovino si se quiere o utilizan programas de inseminación artificial ya que existen una serie de factores que afectan dichos programas y producen importantes pérdidas económicas. Dependiendo de cómo sea la técnica de detección de los celos y la calidad de esta, afectan la eficiencia y/o exactitud del diagnóstico (conocimiento de los signos y síntomas de una hembra en celo, elección del lugar de detección, momento y tiempo de observación y frecuencia de observación, entre los más importantes).

Siguiendo con la temática presentada por Catalano y Callejas<sup>14</sup>, Nelson et al.<sup>15</sup> presentan un reporte sobre la interacción sexual entre un grupo de 300 vacas mestizas, las cuales fueron ordeñadas manualmente dos veces al día, las mismas fueron reproducidas bajo la técnica de inseminación artificial con toros receladores cuya función era la monitorización del celo lo cual permitía una observación de cuatro veces al día. En todas se detectaron los mismos signos: Flehmen

---

<sup>11</sup> R A Arias, T L Mader, y P C Escobar, «Factores climáticos que afectan el desempeño productivo del ganado bovino de carne y leche Climatic factors affecting cattle performance in dairy and beef farms», *Arch Med Vet* 40, n.º 1 (2008), p. 19, <https://doi.org/10.4067/S0301-732X2008000100002>.

<sup>12</sup> G.L. Hahn, Terry Mader, y R.A. Eigenberg, *Perspective on development of thermal indices for animal studies and management*, vol. 7, 2003.

<sup>13</sup> Rodolfo Catalano y Santiago Callejas, «DETECCION DE CELOS EN BOVINOS. FACTORES QUE LA AFECTAN Y METODOS DE AYUDA», *Medicina Veterinaria* 82 (2001), p. 20.

<sup>14</sup> *Ibid*, p. 19.

<sup>15</sup> Lílido Nelson, Viera Rosales, Freddy Boxell, Martinez Jesús Alexander y Díaz de Ramírez, «CONDUCTA SEXUAL Y SIGNOS DEL CELO EN GANADO MESTIZO DE DOBLE PROPÓSITO (Sexual behaviour and estrus signs in crossbred dual purpose cattle)», 2002.

(Movimiento de retracción de los labios), lamidos y olfateos muy frecuentes en la interacción toro-vaca, sin embargo, los bramidos y la micción (Eliminación de la orina contenida en la vejiga cuando esta está llena) no fueron signos evidentes en la conducta estral.

Por ejemplo, Jiménez et al.<sup>16</sup> Presentan un artículo en donde se enfocan en la importancia que tiene la eficiencia de monitorización del celo si se tiene un programa de inseminación artificial. También dicen que el éxito de detección del celo se encuentra por debajo del 50% en la mayoría de los grupos de ganado bovino.

Por otra parte, concluyendo con el del tema de la inseminación artificial Rippe<sup>17</sup> presenta un artículo el cual está dirigido hacia el ciclo estral y lo esencial que es saber acerca de este, si se quiere llevar a cabo un programa reproductivo en una explotación lechera, el éxito de dicho programa depende del completo entendimiento del ciclo estral, su fisiología, los mecanismos hormonales que lo controlan, así como el funcionamiento de los productos usados para la sincronización.

Además, Colazo y Mapletoft<sup>18</sup> explican cómo una mejor comprensión de la fisiología del ciclo estral y función ovárica resulta muy útil a la hora de manipular su control. También mencionan el alto interés que se ha generado sobre la manipulación del ciclo estral en los últimos años, ya que se publicaron varias revisiones sobre el tema en cuestión, entre las cuales se puede encontrar publicaciones hechas por Odde<sup>19</sup>, Larson y Ball<sup>20</sup>, Macmillan et al.<sup>21</sup> quienes mencionan la sincronización del ciclo estral en el posparto, la regulación de este en ganado lechero y la manipulación de modelos de desarrollo y fertilidad respectivamente.

Así mismo, Gascón<sup>22</sup> explica cómo las redes de sensores inalámbricas permiten monitorizar cualquier entorno independientemente de si es un lugar de fácil acceso

---

<sup>16</sup> Florencio A Jiménez-pérez, María Urdaneta, Rumualdo González y Jorge Sandoval, «DEL CELO EN NOVILLAS DE DOBLE PROPÓSITO Evaluation of Four Methods for Heat Detection in Dual Purpose Heifers» XIX (2009), p. 335.

<sup>17</sup> Rippe, A Christian, «EL CICLO ESTRAL», *Dairy Cattle Reproduction Conference*, 2009, 112, [https://www.researchgate.net/profile/Christian\\_Rippe2/publication/265116863\\_EL\\_CICLO ESTRAL/links/55143dd70cf2eda0df308475/EL-CICLO-ESTRAL.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Christian_Rippe2/publication/265116863_EL_CICLO ESTRAL/links/55143dd70cf2eda0df308475/EL-CICLO-ESTRAL.pdf).

<sup>18</sup> M.G. Colazo y R.J. Mapletof, «Fisiología del Ciclo Estral Bovino», *Revista Ciencias Veterinarias* 16 (2014), p. 34, <http://dx.doi.org/10.19137/cienvet2014-1623>.

<sup>19</sup> Ken Odde, *A review of synchronization of estrus in postpartum cattle*, vol. 68, 1990, <https://doi.org/10.2527/1990.683817x>.

<sup>20</sup> L.L. Larson y P.J.H. Ball, *Regulation of estrous cycles in dairy cattle: A review*, vol. 38, 1992, [https://doi.org/10.1016/0093-691X\(92\)90234-l](https://doi.org/10.1016/0093-691X(92)90234-l).

<sup>21</sup> Keith Macmillan, Basiamisi Segwagwe, y C.S. Pino, *Association between the manipulation of patterns of follicular development and fertility*, vol. 78, 2003, [https://doi.org/10.1016/S0378-4320\(03\)00098-8](https://doi.org/10.1016/S0378-4320(03)00098-8).

<sup>22</sup> David Gascón, «Redes de Sensores Inalámbricos, la tecnología invisible», *Tecnología y Sociedad*, 2010, p. 54, <http://www.libelium.com/libelium-downloads/libelium-bit-coit.pdf>.

o no ya que las redes se distribuyen en nodos sensoriales por el terreno y trabajan de forma coordinada para monitorizar los parámetros elegidos. La ventaja de estos nodos es que pueden ser utilizados con una placa solar, lo cual permite que estos funcionen durante años sin recargar la batería o incluso, sufrir algún tipo de interrupción.

Por su parte, Ruiz<sup>23</sup> presenta un trabajo en el cual estudia variables fisiológicas del ganado bovino, como lo son la temperatura y ritmo cardíaco, a su vez presenta un sistema de monitoreo tecnológico que permite ubicar geográficamente y en tiempo real a los animales. Este sistema es capaz de enviar información a través de mensajes de texto a un terminal móvil o teléfono celular con el fin de mejorar los procesos de manejo de los hatos ganaderos a nivel nacional.

Teniendo en cuenta el sistema de geolocalización presentado en el párrafo anterior Espejo et al.<sup>24</sup> basándose en IoT (Internet de las Cosas) presentan la instrumentación de un dispositivo capaz de rastrear el ganado bovino, el cual almacena los datos recolectados en un servidor con el fin de obtener en tiempo real los datos de geolocalización complementado con datos de fecha y hora. La información se almacena en el servidor gracias a la utilización del programa MySQL y para la parte del dispositivo GPS se utilizó un microcontrolador Arduino, un módulo GPS y un módulo con conectividad Wifi.

Siguiendo con la temática de los sistemas de geolocalización, se encuentran estudios de Carpio et al.<sup>25</sup> sobre la importancia de la ganadería en el sector económico ya que el ganado ofrece diversos derivados de materia prima como el cuero, la carne y la leche. Por lo cual es muy frecuente los robos de ganado. Para solucionar este problema, se planteó la utilización de un sistema GPS que monitoreará en tiempo real la ubicación del ganado, este sistema a su vez permitirá determinar cuando el ganado está fuera de los límites del terreno o saber su temperatura. También pretenden diseñar un sistema que permita llevar registro de más variables de cada res como lo son el peso, color, etc.

Concluyendo con la temática enfocada en ciclo estral, indicadores del evento y tipos de sensores para su identificación. Se da inicio a las temáticas relacionadas con la comunicación y tratados de información existentes.

Las redes son fundamentales para la comunicación de información ya que

---

<sup>23</sup> Javier Andres Ruiz Somoyar, «Monitoreo en la ganaderia bovina a traves de redes gsm/gprs», *Mmum*, 2016, p. 108.

<sup>24</sup> Luis Alberto Espejo Ponce, Yareny Rivera García, José Miguel Méndez Alonso, Abelino Lobato González y Hugo Alberto Flores Vargas, «DISPOSITIVO DE RASTREO GPS PARA GANADO BOVINO», 2017.

<sup>25</sup> Lisi Katherine, Carpio Santos, Ing Miguel Ángel y Zúñiga Sánchez, «Sistema móvil para controlar la posición en tiempo real del ganado de la Finca Sartenejal del Cantón Baba.», 2018.

establecen la ruta por la cual se desea transmitir la información, Areed et al.<sup>26</sup> aplicaron conocimientos básicos para el uso de la tecnología de Arduino y el módulo Wi-Fi aplicado a un problema simple pero que converge en la utilización de las redes WAN para lograr una solución creativa y efectiva de manera que genera una idea base para diseñar cualquier tipo de red en interiores por medio de módulos interconectados que transmiten señales de sensores o dispositivos pasivos.

Continuando con las redes, es importante tener en cuenta el tráfico de la red; en caso de que este tenga fluctuaciones fuera de lo normal, por tal razón Boushaba et al.<sup>27</sup> describen un nuevo método para la interconexión de los nodos de una red que podría ser útil al momento de usar módulos Wi-Fi o dispositivos externos como routers configurables; la red puede verse afectada por fluctuaciones e interferencias causadas por la inestabilidad de la misma y la necesidad de un gran ancho de banda que demandan los recursos, por tal razón el método “Node Stability-based Routing (NSR)”, en donde se basa en la probabilidad de que un nodo quedará libre en un futuro cercano para utilizarlo como vía rápida; en el hipotético caso de que la red esté compuesta por varios equipos los cuales generan varios datos al mismo tiempo; el método NSR permite controlar ese exceso de datos para una red de tipo mediana o grande.

Las redes también presentan problemas en el caso de que el número de equipos aumente de manera desproporcional a lo habitual por tal razón, Chai y Zeng<sup>28</sup> tienen en cuenta el uso de módulos Wi-Fi y el nuevo método de interconexión se puede relacionar el protocolo de enrutamiento híbrido que por lo general funciona de una manera eficaz en zonas regionales, pero la redundancia puede verse afectada por el algoritmo del mismo protocolo por tal razón se puede utilizar RCA-HRP como medida contra la pérdida de datos, la latencia y la tasa de paquetes perdidos, en caso de que aumente el número de equipos que la red soporta es necesario contener las solicitudes de cada equipo por medio de protocolos que creen un orden o jerarquía dentro de la red para mantener estable la red para una cantidad de equipos excesiva dentro del país.

Concluyendo las temáticas relacionadas con los tipos de redes y sus topologías, se procede a explicar temas relacionados con sensores y la manera más acertada de comunicar la información generada por los mismos, además de algunos dispositivos que logran la monitorización de los indicadores de forma efectiva y están a la venta dentro del territorio colombiano.

---

<sup>26</sup> Marwa F. Areed, «A keyless Entry System based on Arduino board with Wi-Fi technology», *Measurement* 139 (2019), p. 35.

<sup>27</sup> Mustapha Boushaba, Abdelhakim Hafid, y Michel Gendreau, «Node stability-based routing in wireless mesh networks», *Journal of Network and Computer Applications* 93 (2017), p. 13.

<sup>28</sup> Yuan Chai y Xiao-Jun Zeng, «Regional condition-aware hybrid routing protocol for hybrid wireless mesh network», *Computer Networks* 148 (2019), p. 39.

Uno de los indicadores más efectivos es la temperatura, por tal razón, Kwak et al.<sup>29</sup> demostraron la utilidad de un sensor que mide tensión en un dispositivo portátil para captar las pulsaciones cardiacas por medio de una galga extensométrica hecha a base de polímero y metal de doble cara, es decir níquel y cromo; lo interesante de este sensor es su naturaleza flexible lo que le da una amplia gama de aplicación “posee una relación lineal para una fuerza detectable mínima de 6.25 Pa”<sup>30</sup>; su radio de curvatura de 5 mm a 100mm, para mayor maleabilidad; uno de los puntos más fuertes para su uso es su propiedad compacta y económica, permite detectar no solo el latido cardíaco sino también la forma de la señal captada.

Luego de obtener conocimientos sobre sensores básicos; Lian et al.<sup>31</sup> plantean una integración de la plataforma ZigBee y el módulo Wi-Fi de Arduino por medio de una red capaz de tomar datos a través de sensores en la plataforma de ZigBee que se comunica inalámbricamente al sistema de control de Arduino por medio de un módulo Wi-Fi con el protocolo TCP/IP el cual permite múltiples aplicaciones en el territorio de IOT para dispositivos de interiores.

Pero en donde se encuentra el gran problema de la mayoría de proyectos con comunicación remota radica en el uso del ancho de banda y los tiempos que requiere la transferencia por esa razón Soewito et al.<sup>32</sup> realizaron un estudio para reducir el uso del ancho de banda de las redes WAN (Wireless Area Network); por medio de una optimización que cumple las funciones de optimizar datos, optimizar el transporte y optimizar aplicaciones; este análisis se pudo realizar gracias a la herramienta Wireshark, la reducción en el uso del ancho de banda fue del 12.4%.

Además hay que tener en cuenta que la tecnología avanza y los sensores se fabrican con nuevos materiales como la fibra óptica; entonces Wang et al.<sup>33</sup> proponen y demuestran un nuevo sensor basado en un interferómetro Mach-Zehnder; el cual se compone de una pieza de fibra monomodo con el núcleo desplazado lo cual permite captar el haz a 62.85  $\mu\text{m}$ , cuando se sumerge en agua la longitud de onda cambia al aumentar la temperatura de manera que es un sensor bastante sensible, pero con poco rango de trabajo.

También hay que tener en cuenta el problema demográfico y social que existe en el

---

<sup>29</sup> Yeon Hwa Kwak, Wonhyo Kim, Kwang Bum Park, Kunnyun Kim y Sungkyu Seo, «Flexible Heartbeat Sensor for Wearable Device», *Biosensors and Bioelectronics* 94 (agosto de 2017), p. 69, <https://doi.org/10.1016/j.bios.2017.03.016>.

<sup>30</sup> Yeon Hwa Kwak, Wonhyo Kim, Kwang Bum Park, Kunnyun Kim y Sungkyu Seo, Op. cit., p. 253.

<sup>31</sup> Kuang-Yow Lian, Sung-Jung Hsiao, y Wen-Tsai Sung, «Intelligent multi-sensor control system based on innovative technology integration via ZigBee and Wi-Fi networks», *Journal of network and computer applications* 36, n.º 2 (2013), p. 70.

<sup>32</sup> Benfano Soewito, Fergyanto E. Gunawan, y Melki Sadekh Mansuan, «WAN Optimization to Speed up Data Transfer», *Procedia computer science* 116 (2017), p. 47.

<sup>33</sup> Shu-na Wang, Ri-qing Lv, Yong Zhao y Jun-kai Qian., «A mach-zehnder interferometer-based high sensitivity temperature sensor for human body monitoring», *Optical Fiber Technology* 45 (2018).

país; por esta razón A. Alva et al. revela un problema común del siglo XXI, el cual es la brecha digital que aún divide el país en dos partes; la rural y la urbana, esta brecha se hace aún más grande conforme aumenta el nivel de tecnología; por esa razón es deber de cada nación disminuir esta brecha de manera que las tecnologías de información y comunicación (TIC 's) puedan unir el país con ayuda de entes reguladores como la CRC (Comisión de Regulación de Comunicaciones); cuando sea posible disminuir en gran parte la brecha digital, los avances tecnológicos en la industria agraria aumentarán el patrimonio del país.<sup>34</sup>

Teniendo en cuenta el problema social; se debe analizar el problema a través de un carácter zootécnico, ya que Plazas, Rosa Angélica Sanmiguel et al. muestran los principales métodos para medir el estrés de animales productores; desde varios puntos de vista como climatológicos, fisiológicos y externos, por tal razón se desea encontrar la mejor manera de obtener estos datos sin afectar el estado físico y mental del animal en estudio, este animal puede ser bovino, porcino o equinos; se determina que la mejor manera de estudiar a los animales productores es por medio de medidas externas no invasivas.<sup>35</sup>

Ahora bien teniendo claro los problemas que acarrea el estudio del proyecto, el enfoque cambia a empresas que han logrado obtener resultados satisfactorios en el sector industrial como Afimilk que muestra uno de sus variados productos orientados a la industrialización del sector agricultor; en este caso el dispositivo llamado "Afi-Act" el cual permite detectar el celo de los bovinos cuando ellos avanzan, se levantan o caminan cierta distancia, el método es bastante práctico aplicado a su método de transmitir los datos de manera inalámbrica a un módulo central; esto les permite captar tan solo una variable la cual es el comportamiento motriz del animal en cuestión, la ventaja principal es su diseño ergonómico y su funcionalidad es bastante eficaz para una función específica; pero no determina el estado de salud de los bovinos y esa es una desventaja frente al proyecto en cuestión.<sup>36</sup>

Otra empresa líder en el sector ganadero de los países bajos es N.E.D.A.P ® (Acronimo - Nederlandsche Apparatenfabriek-) que ha desarrollado y comercializado un dispositivo capaz de sensar las horas que pasa el bovino sentado, recostado o de pie para luego determinar su ciclo estral o si el animal requiere atención médica; es bastante interesante la capacidad de detectar el estado de salud del animal y su ciclo estral con tan solo medir una sola variable, pero hay una falla la cual es la detección de anomalías cardiovasculares o el poder determinar si el bovino se encuentra en estado febril o solo es por el aumento de

---

<sup>34</sup> Alma Rosa Alva de la Selva. Op. cit., p. 265.

<sup>35</sup> Rosa Angélica Sanmiguel Plazas, Fernely Augusto Plazas Hernández, Dunia Yisela Trujillo Piso, María del Rocío Pérez Rubio y Lina María Peñuela Sierra. Op. cit., p 15.

<sup>36</sup> Afimilk, «El collar Silent Herdsman de Afimilk», Afimilk, 7 de febrero de 2016, <https://www.afimilk.com/es/products/cows/sensors/afimilk-silent-herdsman-neck-collar>.

temperatura en el clima; de manera que el dispositivo de NEDAP está diseñado para determinar enfermedades que pueden ser determinadas por medio de la motricidad del animal como las garrapatas o cualquier alergia en la piel la cual se presenta de manera externa en la epidermis del bovino.<sup>37</sup>

Luego de haber finalizado con los ejemplos claros de la viabilidad de proyectos enfocados en el sector ganadero, se puede proseguir a temas relacionados más específicamente con el método para diseñar aplicaciones móviles de manera sencilla; como lo muestran Chadha y Turbak<sup>38</sup> que han desarrollado un lenguaje de programación isomorfo a base de texto, que permite realizar la programación en forma de texto en vez de bloques como lo hace tradicionalmente App Inventor, lo que permite realizar funciones específicas o leer datos de maneras distintas como sensores o pulsos por medio de hardware; de manera que la mezcla de programación por bloques y programación por texto permite que el lenguaje sea más sinérgico con el objetivo que se quiere alcanzar en el proyecto gracias a su facilidad para crear aplicaciones móviles específicamente para el sistema operativo Android.

---

<sup>37</sup> Rey, Emilia Z., «Más que sólo detección de celo.», Más que sólo detector de celo, 15 de julio de 2018, <https://docplayer.es/amp/84291985-Mas-que-solo-deteccion-de-celo.html> »

<sup>38</sup> Karishma Chadha y Franklyn A. Turbak, «Improving App Inventor Usability via Conversion between Blocks and Text.», *J. Vis. Lang. Comput.* 25, n.º 6 (2014), p. 50.

## 6 MARCO TEÓRICO

### 6.1 INTERNET DE LAS COSAS (IoT)

En esta sección se hará una breve revisión de la historia de IoT y cuáles son las características principales a tener en cuenta sobre la misma.

#### 6.1.1 Una revisión histórica sobre IoT.

Gubbi et al.<sup>39</sup> mencionan que el término “**Internet de las Cosas**” fue asociado a Kevin Ashton por primera vez en 1999 en el contexto de la gestión de la cadena de suministro<sup>40</sup>. Sin embargo, en la última década, la definición ha sido más inclusiva, ya que, abarca una amplia gama de aplicaciones como la atención sanitaria, los servicios públicos, el transporte, etc.<sup>41</sup>. Aunque la definición de "cosas" ha estado teniendo pequeñas variaciones a medida que la tecnología evoluciona, el objetivo principal de hacer una información de sentido informático sin la ayuda de la intervención humana sigue siendo el mismo. Una evolución radical de la Internet actual en una red de objetos interconectados que no sólo recoge información del medio ambiente (sensado) e interactúa con el mundo físico (actuación/comando/control), sino que también utiliza las normas de Internet existentes para proporcionar servicios de transferencia de información, análisis, aplicaciones y comunicaciones.

Impulsado por la prevalencia de dispositivos habilitados para tecnología inalámbrica como Bluetooth, identificación por Radiofrecuencia (**RFID**), **Wi-Fi** y servicios de datos por teléfono, así como nodos de sensores y actuadores integrados, IoT (**Internet of Things**) ha salido de su fase experimental y está al borde de transformar la actual Internet estática en un futuro internet totalmente integrado<sup>42</sup>. La revolución de Internet condujo a la interconexión entre personas a una escala y ritmo sin precedentes. La próxima revolución será la interconexión entre objetos para crear un entorno inteligente. Sólo en 2011 el número de dispositivos interconectados en el planeta superó al número de personas. Para el 2013 había 9.000 millones de dispositivos interconectados y se espera que para el 2020 esta cifra alcance los 24 mil millones de dispositivos. Según la GSMA (Global System for Mobile Communications), esto equivale a 1,3 billones de dólares en oportunidades

---

<sup>39</sup>Jayavardhana Gubbi et al., «Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements, and Future Directions», *Future Generation Computer Systems* 29, n.º 7 (septiembre de 2013), p. 90, <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>.

<sup>40</sup> Kevin Ashton, «That ‘internet of things’ thing», *RFID journal* 22, n.º 7 (2009), p. 100.

<sup>41</sup> Harald Sundmaeker, Patrick Guillemin, Peter Friess y Sylvie Woelfflé, *Vision and Challenges for Realising the Internet of Things The meaning of things lies not in the things themselves, but in our attitude towards them*. Antoine de Saint-Exupéry, March, 2010, <https://doi.org/10.2759/26127>.

<sup>42</sup> J Buckley, *The internet of things: from RFID to the next-generation pervasive networked systems* (Auerbach Publications, New York, 2006).

de ingresos para los operadores de redes móviles que solo abarcan segmentos verticales como la salud, la automoción, los servicios públicos y la electrónica de consumo.

IoT (Internet of Things) es un nuevo paradigma que proporciona un conjunto de nuevos servicios para la próxima ola de innovaciones tecnológicas<sup>43</sup>. Las aplicaciones de IoT son casi ilimitadas y permiten una integración perfecta del mundo cibernético con el mundo físico. Sin embargo, a pesar de los enormes esfuerzos de los organismos de normalización, las alianzas, las industrias, los investigadores y otros, todavía hay numerosos problemas con los que lidiar para alcanzar todo el potencial de IoT. Estos temas deben considerarse desde diversos aspectos, como las, las aplicaciones, los modelos de negocios y los impactos sociales y ambientales.

IoT se basa en la integración de diversos procesos, como la identificación, la detección, la creación de redes y la computación. Permite innovaciones tecnológicas a gran escala y servicios de valor agregado que personalizan la interacción de los usuarios con varias "cosas". Existen numerosas aplicaciones de IoT que pueden agruparse en varios dominios como salud, tráfico, logística, comercio minorista, agricultura, ciudades inteligentes, medición inteligente, monitoreo remoto, automatización de procesos, etc. A pesar del enorme progreso en diferentes campos de investigación, incluidas las arquitecturas, la estandarización, las tecnologías emergentes, la seguridad, etc., Čolaković<sup>44</sup> considera que IoT aún se encuentra en la etapa incipiente de su desarrollo.

El esfuerzo de los investigadores por crear una interfaz de persona a persona a través de la tecnología a finales de la década de 1980 dio lugar a la creación de la disciplina informática omnipresente, cuyo objetivo es incorporar la tecnología en el trasfondo de la vida cotidiana. Actualmente, es la era post-PC donde los teléfonos inteligentes y otros dispositivos portátiles están cambiando el entorno haciéndolo más interactivo, así como informativo. Mark Weiser<sup>45</sup>, el antepasado de Ubiquitous Computing (UBICOM), definió un entorno inteligente como "el mundo físico que está rico e invisiblemente entrelazado con sensores, actuadores, pantallas y elementos computacionales, integrado sin problemas en el día a día objetos de nuestras vidas, y conectados a través de una red continua".

La creación de Internet ha marcado un hito principal para lograr la visión de UbiComp, que permite a los dispositivos individuales comunicarse con cualquier otro

---

<sup>43</sup> Alem Čolaković y Mesud Hadžialić, «Internet of Things (IoT): A review of enabling technologies, challenges, and open research issues», *Computer Networks* 144 (2018), p. 20, <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.07.017>.

<sup>44</sup> Ibid., p. 17.

<sup>45</sup> M. Weiser, R Gold, y J.S. Brown, «The origins of ubiquitous computing research at PARC», *IBM systems journal* 38, n.º 4 (2010): 693–696, [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=5387055](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5387055).

dispositivo del mundo. Las interredes revelan el potencial de una cantidad aparentemente infinita de recursos informáticos distribuidos y almacenamiento propiedad de varios propietarios.<sup>46</sup>

Los avances y la convergencia de la tecnología de los Sistemas Micro Electromecánicos (MEMS), las comunicaciones inalámbricas y la electrónica digital han dado como resultado el desarrollo de dispositivos en miniatura que tienen la capacidad de detectar, computar y comunicarse de forma inalámbrica en distancias cortas. Estos dispositivos en miniatura denominados nodos se interconectan para formar Redes de Sensores Inalámbricos (WSN) y encuentran una amplia gama de aplicaciones en monitoreo ambiental, monitoreo de infraestructura, monitoreo de tráfico, venta minorista, etc.<sup>47</sup>. Esto tiene la capacidad de proporcionar un rango de detección ubicua que es fundamental para realizar la visión general de UBICOM como lo describe Weiser<sup>48</sup>.

### 6.1.2 Definición de IoT.

Como se identifica por Atzori et al.<sup>49</sup>, Internet de las Cosas se puede realizar en tres paradigmas: orientado a Internet (Middleware), orientado a las cosas (Sensores) y orientado a la semántica (Conocimiento). Aunque este tipo de delineación es necesaria debido a la naturaleza interdisciplinaria del sujeto, la utilidad de la IoT solo se puede desencadenar en un dominio de aplicación donde se intersecan los tres paradigmas.

En la figura 1 se muestra un esquema de la interconexión de objetos, donde se eligen los dominios de aplicación en función de la escala del impacto de los datos generados. Los usuarios abarcan desde organizaciones de nivel individual a nacional que abordan cuestiones de amplio alcance.

---

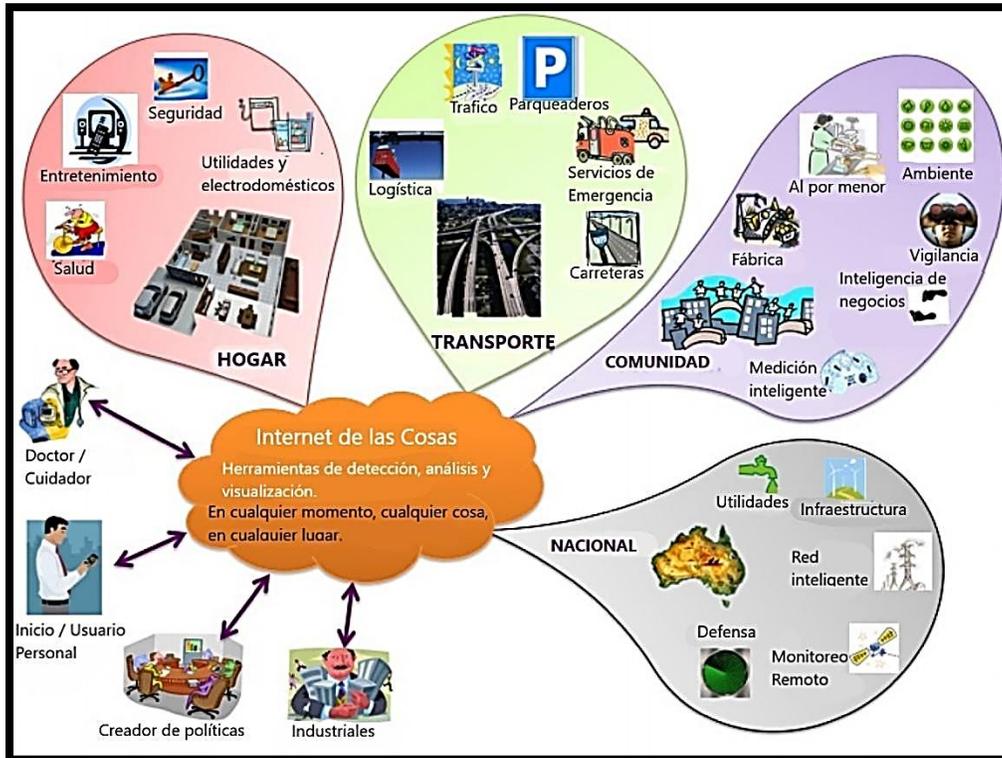
<sup>46</sup> Jayavardhana Gubbi, Rajkumar Buyya, Slaven Marusic y Marimuthu Palaniswami. Op. cit., p. 1645.

<sup>47</sup> I F Akyildiz, T Melodia, y K R Chowdhury, *A survey on wireless multimedia sensor networks* (Computer Networks 51, 2007).

<sup>48</sup> M. Weiser, R Gold, y J.S. Brown. Op. cit., p 693.

<sup>49</sup> Luigi Atzori, Antonio Iera, y Giacomo Morabito, «The Internet of Things: A survey», *Computer Networks* 54, n.º 15 (2010), p. 2790, <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>.

**Figura 1. Esquema de Internet de las Cosas que muestra los usuarios finales y las áreas de aplicación en función de los datos.**



Fuente: Adaptado de: Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions.<sup>50</sup>

El grupo RFID (Radio Frequency Identification), define el Internet de las cosas como la red mundial de objetos interconectados es direccionable de forma única según los protocolos de comunicación estándar.

Según el Clúster de proyectos de investigación europeos sobre el Internet de las cosas:<sup>51</sup> el término "cosas" se refiere a participantes activos empresariales, informativos y sociales los cuales pueden interactuar y comunicarse entre sí e intercambiar datos e información sobre el medio ambiente, al tiempo que reaccionan de forma autónoma a los eventos del mundo real/físico e influyen en él, mediante la ejecución de procesos que desencadenan acciones y crean servicios con o sin intervención humana directa.

<sup>50</sup> Jayavardhana Gubbi, Rajkumar Buyya, Slaven Marusic y Marimuthu Palaniswami. Op. cit., p. 1647.

<sup>51</sup> Harald Sundmaeker, Patrick Guillemin, Peter Friess y Sylvie Woelfflé. Op. cit., p. 23.

Según Forrester<sup>52</sup>, un entorno inteligente utiliza las tecnologías de la información y las comunicaciones para hacer que los componentes y servicios críticos de infraestructura de la administración, la educación, la atención médica, la seguridad pública, los bienes raíces, el transporte y los servicios públicos de una ciudad sean más conscientes, interactivos y eficientes.

Gubbi et al., hacen una definición más centrada en el usuario y no la restringen a ningún protocolo de comunicación estándar<sup>53</sup>. Esto permite que las aplicaciones que tengan una larga duración se desarrollen utilizando los protocolos de última generación disponibles en un momento dado. Por lo tanto, Gubbi et al. definen Internet de las Cosas para entornos inteligentes como la capacidad de compartir información de modo unificado a través de la interconexión de dispositivos de detección y accionamiento, lo cual permite que se desarrollen aplicaciones innovadoras mediante una imagen cooperativa común. Esto se logra mediante la detección ubicua sin fisuras, el análisis de datos y la representación de la información con la computación en la nube como marco unificador.

Por último, Čolaković define que **IoT** se basa en la integración de varios estándares y en la habilitación de tecnologías con diferentes capacidades de sensibilidad, conectividad, almacenamiento, computación y otras<sup>54</sup>. Sin embargo, el desarrollo de estándares y diversidades en las tecnologías desplegadas produce desafíos significativos al proporcionar una conectividad completa de todo<sup>55</sup>. Esto causa desafíos de integración complejos<sup>56</sup> como uno de los principales problemas del desarrollo de IoT. Numerosas organizaciones de normalización, alianzas, académicos e industrias hacen un esfuerzo en la innovación en desarrollos de IoT y la estandarización, pero todavía no hay un marco integral con estándares integrados en el marco de IoT visión <sup>57</sup>.

---

<sup>52</sup> J Bélissent, «Getting clever about smart cities: new opportunities require new business models», *Forrester Research, Inc.*, 2010, p. 33, [http://groups.open.org.nz/groups/ninja-talk/files/f/19710-2010-11-04T092134Z/getting\\_clever\\_about\\_smart\\_cities\\_new\\_opportunities.pdf](http://groups.open.org.nz/groups/ninja-talk/files/f/19710-2010-11-04T092134Z/getting_clever_about_smart_cities_new_opportunities.pdf).

<sup>53</sup> Jayavardhana Gubbi, Rajkumar Buyya, Slaven Marusic y Marimuthu Palaniswami. Op. cit., p. 1658.

<sup>54</sup> Alem Čolaković y Mesud Hadžialić. Op. cit., p. 33.

<sup>55</sup> Massimo Condoluci et al., «Enabling the IoT Machine Age With 5G: Machine-Type Multicast Services for Innovative Real-Time Applications», *IEEE Access* 4, n.º c (2016), p. 5550, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2573678>.

<sup>56</sup> Maria Rita Palattella et al., «Internet of Things in the 5G Era: Enablers, Architecture, and Business Models», *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 34, n.º 3 (2016), p. 515, <https://doi.org/10.1109/JSAC.2016.2525418>.

<sup>57</sup> Chayan Sarkar et al., «DIAT: A scalable distributed architecture for IoT», *IEEE Internet of Things Journal* 2, n.º 3 (2015), p. 234, <https://doi.org/10.1109/JIOT.2014.2387155>.

### 6.1.3 Elementos de IoT.

Comprender los bloques de creación de IoT ayuda a obtener una mejor visión del significado y la funcionalidad reales de la IoT. En las secciones siguientes se analizan seis elementos principales necesarios para ofrecer los servicios de la herramienta IoT como se ilustra en la figura 2. El cuadro 1 muestra las categorías de estos elementos y ejemplos de cada categoría.

**Cuadro 1. Construcción de bloques y tecnologías de IoT.**

Elementos IoT		Ejemplos
Identificación	Nombres	EPC, µCode
	Direcciones	IPv4, IPv6
Sensado		Sensores Inteligentes, Dispositivos de detección portátiles, Sensores Embebidos, Actuadores, Etiquetas RFID
Comunicación		RFID, NFC, UWB, Bluetooth, BL, IEEE 802.15.4, Z-Wave, Wi-Fi, WIFI Direct, LTE-A
Computación	Hardware	Cosas Inteligentes (SmartThings), Arduino, Phidgets, Intel Galileo, Raspberry Pi, Gadgeteer, BeagleBone, Cubieboard, Teléfonos Inteligentes (Smart Phones)
	Software	OS (Contiki, TinyOS, LiteOS, Riot OS, Android) Cloud (Nimbits, Hadoop, etc.)
Servicios		Identificación Relacionada (Envío), Agregación de Información (Red Inteligente), Consiente Colaborativo (Hogar Inteligente), Ubicuo (Ciudad Inteligente)
Semántica		RDF, OWL, EXI

Fuente: Adaptado de: Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications<sup>58</sup>

<sup>58</sup> Ala Al-Fuqaha, Mohsen Guizani, Mehdi Mohammadi, Mohammed Aledhari, y Moussa Ayyash, «Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications», *Abakós* 1, n.º 2 (2015), p. 80, <https://doi.org/10.5752/10.5752/p.2316-9451.2013v1n2p78>.

Figura 2. Los elementos de IoT.



Fuente: Adaptado de: Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications.<sup>59</sup>

### 6.1.3.1 Identificación

La identificación es crucial para que la IoT nombre y haga coincidir los servicios con su demanda. Muchos métodos de identificación están disponibles para la IoT, como los Códigos de Producto Electrónicos (EPC) y los Códigos Ubicuos ( $\mu$ Code)<sup>60</sup>. Además, abordar los objetos de IoT es fundamental para diferenciar entre el identificador de objeto y su dirección. El ID de objeto hace referencia a su nombre, como "T1" para un sensor de temperatura determinado y la dirección del objeto hace referencia a su dirección dentro de una red de comunicaciones. Además, los métodos de direccionamiento de objetos de IoT incluyen IPv6 e IPv4. 6LoWPAN<sup>61</sup> proporciona un mecanismo de compresión a través de encabezados IPv6 que hace que el direccionamiento IPv6 sea adecuado para redes inalámbricas de baja potencia.

Distinguir entre la identificación y la dirección del objeto es imperativo, ya que los métodos de identificación no son únicos a nivel mundial, por lo que el direccionamiento ayuda a identificar objetos de forma única. Además, los objetos dentro de la red pueden utilizar direcciones IP públicas y no privadas. Los métodos de identificación se utilizan para proporcionar una identidad clara para cada objeto dentro de la red.

### 6.1.3.2 Sensado

El sensado en IoT significa recopilar datos de objetos relacionados dentro de la red y enviarlos de vuelta a un almacén de datos, base de datos o nube. Los datos recopilados se analizan para tomar medidas específicas basadas en los servicios

<sup>59</sup> Ibid. p. 2350.

<sup>60</sup> Noboru Koshizuka y Ken Sakamura, «Ubiquitous ID: Standards for ubiquitous computing and the internet of things», *IEEE Pervasive Computing* 9, n.º 4 (2010), p. 99, <https://doi.org/10.1109/MPRV.2010.87>.

<sup>61</sup> C. Schumacher N. Kushalnagar, G. Montenegro, «IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs): Overview, Assumptions, Problem Statement, and Goals», 2007, p. 5.

requeridos. Los sensores IoT pueden ser sensores inteligentes, actuadores o dispositivos de detección portátiles. Por ejemplo, empresas como WEMO, REVOLV y SMARTTHINGS ofrecen centros inteligentes y aplicaciones móviles que permiten a las personas monitorear y controlar miles de dispositivos y dispositivos inteligentes dentro de los edificios usando sus teléfonos inteligentes<sup>62</sup>.

Las Computadoras de Placa Única (SBCs) integradas con sensores y funcionalidades integradas de TCP/IP y seguridad se utilizan normalmente para realizar productos IoT (por ejemplo, Arduino Yun, Raspberry PI, BeagleBone Black, etc.). Estos dispositivos normalmente se conectan a un portal de administración central para proporcionar los datos necesarios por los clientes.

### 6.1.3.3 Comunicación

Las tecnologías de comunicación de IoT conectan objetos heterogéneos para ofrecer servicios inteligentes específicos. Normalmente, los nodos de IoT deben funcionar con poca potencia en presencia de vínculos de comunicación con pérdida y ruidosos. Ejemplos de protocolos de comunicación utilizados para la IoT son **Wi-Fi**, **Bluetooth**, IEEE 802.15.4 (es la base sobre la cual se define **ZigBee**), Z-wave y **LTE-Advanced**.

Algunas tecnologías de comunicación específicas también están en uso como RFID, Comunicación de Campo Cercano (**NFC**) y Banda Ultra Ancha (**UWB**). RFID es la primera tecnología utilizada para realizar el concepto M2M (etiqueta RFID y lector). La etiqueta RFID representa un chip o etiqueta simple adjunta para proporcionar la identidad del objeto. El lector RFID transmite una señal de consulta a la etiqueta y recibe la señal reflejada de la etiqueta, que a su vez se pasa a la base de datos. La base de datos se conecta a un centro de procesamiento para identificar objetos basados en las señales reflejadas dentro de un rango de (10 cm a 200 m)<sup>63</sup>. Las etiquetas RFID pueden ser activas, pasivas o semi-pasivas/activas. Las etiquetas activas son alimentadas por la batería, mientras que las pasivas no necesitan batería. Las etiquetas semi-pasivas/activas utilizan alimentación de placa cuando es necesario.

A continuación, se detallan algunas de las tecnologías de comunicación mencionadas anteriormente:

- **Bluetooth.** El protocolo de comunicación Bluetooth, también conocido como el estándar IEEE 802.15.1 se basa en un sistema de radio inalámbrico diseñado para dispositivos baratos y de corto alcance para reemplazar cables para periféricos de computadora, como ratones, teclados, joysticks e impresoras. Esta gama de aplicaciones se conoce como Red de Área

---

<sup>62</sup> K. Pilkington, «Revolv teams up with Home Depot to keep your house connected», 2014.

<sup>63</sup> Roy Want, «An introduction to RFID technology», *IEEE pervasive computing*, n.º 1 (2006), p. 30.

Personal Inalámbrica (WPAN).<sup>64</sup> Bluetooth intercambia la información o datos entre dispositivos fijos o inalámbricos a través de la banda de frecuencia ISM sin licencia del rango 2.4–2.485 GHz. Bluetooth es administrado principalmente por el SIG.<sup>65</sup>

Bluetooth evolucionó como uno de los estándares de la industria para las redes de área personal inalámbricas de baja velocidad (IEEE 802.15-LR-WPAN) especialmente utilizadas para la comunicación inalámbrica de corto alcance. Se han lanzado muchas versiones como v1.1, v1.2, v2.0, v2.1, v3.0, v4.0 y más recientemente v5.0 con velocidades que van desde 723.1 kbps a 25 Mbps. Bluetooth 5.1 es un estándar reciente que utiliza paquetes LE para la transmisión. Una característica adicional llamada capacidad de búsqueda de dirección muestra la ubicación del dispositivo Bluetooth, que es una nueva característica que se está implementando en el estándar Bluetooth<sup>66</sup>. Por ejemplo, cuando se desea transferir instrucciones o señales de un dispositivo a muchos, la capacidad de búsqueda de dirección será útil, especialmente si hay una gran cantidad de dispositivos y, por lo tanto, es una característica importante que debe introducirse. El Bluetooth SIG ha propuesto dos mecanismos para encontrar la dirección en el estándar Bluetooth 5, uno con AoA (Angle of Arrival o Angulo de Llegada) y otro con AoD (Angle of Departure o Angulo de Salida)<sup>67</sup>.

- **Comunicación de Campo Cercano (NFC).** El protocolo NFC funciona en banda de alta frecuencia a 13,56 MHz y admite una velocidad de datos de hasta 424 kbps. El rango aplicable es de hasta 10 cm donde la comunicación entre lectores activos y etiquetas pasivas o dos lectores activos puede ocurrir<sup>68</sup>. La tecnología de comunicación UWB está diseñada para soportar comunicaciones dentro de un área de cobertura de bajo rango utilizando baja energía y alto ancho de banda cuyas aplicaciones para conectar sensores se han aumentado recientemente<sup>69</sup>.

---

<sup>64</sup> Jin-Shyan Lee, Yu-Wei Su, y Chung-Chou Shen, «A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi», en *IECON 2007 - 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (IECON 2007 - 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Taipei, Taiwan: IEEE, 2007), p. 46, <https://doi.org/10.1109/IECON.2007.4460126>.

<sup>65</sup> Nitesh B. Suryavanshi, K. Viswavardhan Reddy, y Vishnu R. Chandrika, «Direction Finding Capability in Bluetooth 5.1 Standard», en *Ubiquitous Communications and Network Computing*, ed. Navin Kumar y R. Venkatesha Prasad, vol. 276 (Cham: Springer International Publishing, 2019), p. 55, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-20615-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-20615-4_4).

<sup>66</sup> *Ibid.* p. 54.

<sup>67</sup> Erica Gunhardson, «Indoor positioning using angle of departure information», 2015, <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:874882/FULLTEXT01.pdf>.

<sup>68</sup> Roy Want, «Near field communication», *IEEE Pervasive Computing*, n.º 3 (2011), p. 5.

<sup>69</sup> Rakshesh Singh Kshetrimayum, «An introduction to UWB communication systems», *IEEE Potentials* 28, n.º 2 (2009), p. 10, <https://doi.org/10.1109/MPOT.2009.931847>.

- **Fidelidad Inalámbrica (Wi-Fi).** Otra tecnología de comunicación es Wi-Fi que utiliza ondas de radio para intercambiar datos entre las cosas dentro del rango de 100 m<sup>70</sup>. Wi-Fi permite que los dispositivos inteligentes se comuniquen e intercambien información sin utilizar un Router en algunas configuraciones ad hoc. Bluetooth presenta una tecnología de comunicación que se utiliza para intercambiar datos entre dispositivos a corta distancia sin cambios utilizando radio de longitud de onda corta para minimizar el consumo de energía<sup>71</sup>. Para el 2013, el grupo de interés especial Bluetooth (SIG) produjo Bluetooth 4.1 que proporciona Bluetooth de baja energía, así como conectividad DE alta velocidad e IP para admitir IoT<sup>72</sup>. El estándar IEEE 802.15.4 especifica una capa física y un control de acceso medio para redes inalámbricas de baja potencia dirigidas a comunicaciones confiables y escalables<sup>73</sup>.
- **Evolución a largo plazo.** LTE (Long-Term Evolution, por sus siglas en inglés) es originalmente una comunicación inalámbrica estándar para la transferencia de datos de alta velocidad entre teléfonos móviles basados en tecnologías de red GSM/UMTS<sup>74</sup>. Puede cubrir dispositivos de viaje rápido y proporcionar servicios de multidifusión y radiodifusión. LTE-A (LTE Advanced)<sup>75</sup> es una versión mejorada de LTE que incluye extensión de ancho de banda que admite hasta 100 MHz, multiplexación espacial de enlace descendente y de enlace ascendente, cobertura extendida, mayor rendimiento y latencias más bajas.
- **ZigBee.** ZigBee sobre IEEE 802.15.4 define especificaciones para WPAN de baja velocidad (LR-WPAN) para admitir dispositivos simples que consumen energía mínima y típicamente operan en el Espacio Operativo Personal (POS) de 10 m. ZigBee proporciona redes de malla autoorganizadas, de múltiples saltos y confiables con una larga duración de la batería<sup>76</sup>. Dos tipos de dispositivos diferentes pueden participar en una red LR-WPAN (Redes

---

<sup>70</sup> Francesco Potorti Erina Ferro, «Bluetooth and Wi-Fi Wireless Protocols », *Ieee Wireless Communications*, n.º February (2005), p. 5.

<sup>71</sup> McDermott-Wells Patricia, «What is Bluetooth?», *Potentials, IEEE* 23, n.º 5 (2005), p. 40.

<sup>72</sup> Mindy Dolan, «Bluetooth at CES:An IoT for Everyone», Bluetooth Technology Website, 23 de enero de 2017, <https://www.bluetooth.com/blog/bluetooth-at-ces-iot-for-everyone/>.

<sup>73</sup> IEEE Standards Association, «IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 1: MAC sublayer. IEEE Std 802.15. 4e-2012 (Amendment to IEEE Std 802.15. 4-2011)», *IEEE Computer Society: New York, NY, USA*, 2012.

<sup>74</sup> Garth V. Crosby y Vafa, Farzam, «Wireless Sensor Networks and LTE-A Network Convergence», 2013, p. 732.

<sup>75</sup> Thomas Tim Ghost Amitava, Ratasuk Rappapat, Mondal Bishwarup, Mangalvedhe Nitin, «LTE-ADVANCED : NEXT -G ENERATION W IRELESS B ROADBAND T ECHNOLOGY», n.º June (2010), p. 15.

<sup>76</sup> Jin-Shyan Lee, «Performance Evaluation of IEEE 802.15.4 for Low-Rate Wireless Personal Area Networks», *IEEE Transactions on Consumer Electronics* 52, n.º 3 (agosto de 2006), p. 4, <https://doi.org/10.1109/TCE.2006.1706465>.

inalámbricas de área personal de baja tasa): un Dispositivo de Función Completa (FFD) y un Dispositivo de Función Reducida (RFD).

El FFD puede operar en tres modos que funcionan como coordinador de PAN, coordinador o dispositivo. Un FFD puede hablar con RFD u otros FFD, mientras que un RFD puede hablar solo con un FFD. Un RFD está diseñado para aplicaciones que son extremadamente simples, como un interruptor de luz o un sensor infrarrojo pasivo. No tienen la necesidad de enviar grandes cantidades de datos y solo pueden asociarse con un solo FFD a la vez. En consecuencia, la RFD se puede implementar utilizando recursos mínimos y capacidad de memoria.

Después de activar un FFD por primera vez, puede establecer su propia red y convertirse en el coordinador de PAN. Las redes de estrellas operan independientemente de todas las demás redes de estrella actualmente en operación. Esto se logra al elegir un identificador PAN, que no está siendo usado actualmente por ninguna otra red dentro de la esfera de influencia de la radio. Una vez que se elige el identificador PAN, el coordinador PAN puede permitir que otros dispositivos se unan a su red. Una RFD puede conectarse a una red de árbol de clúster como un nodo de salida al final de una rama, porque solo puede asociarse con un FFD a la vez. Cualquiera de los FFD puede actuar como coordinador y proporcionar servicios de sincronización a otros dispositivos u otros coordinadores. Solo uno de estos coordinadores puede ser el coordinador general de PAN, que puede tener mayores recursos computacionales que cualquier otro dispositivo en el PAN.

- **Banda Ultra Ancha (UWB).** UWB es una comunicación inalámbrica de alta velocidad en interiores de corto alcance<sup>77</sup>. Una de las características más interesantes de UWB es que su ancho de banda es de más de 110 Mbps (hasta 480 Mbps), lo cual puede satisfacer la mayoría de las aplicaciones multimedia, como la entrega de audio y video en redes domésticas, y también puede actuar como un reemplazo de cable inalámbrico de bus serie de alta velocidad como USB 2.0 e IEEE 1394.

Luego de la asignación de frecuencias de UWB en los Estados Unidos y la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) para febrero de 2002, el Comité de Comunicaciones Electrónicas (ECC TG3) estuvo avanzando en la elaboración de un reglamento para la tecnología UWB en Europa. Desde el punto de vista de la implementación, se han desarrollado varias soluciones para utilizar la tecnología UWB en cumplimiento con los requisitos reglamentarios de la FCC. Entre las soluciones PHY existentes, en el Grupo de Tarea 3a IEEE 802.15 (TG3a), multiplexación ortogonal multibanda por división de frecuencia (MB-OFDM), un

---

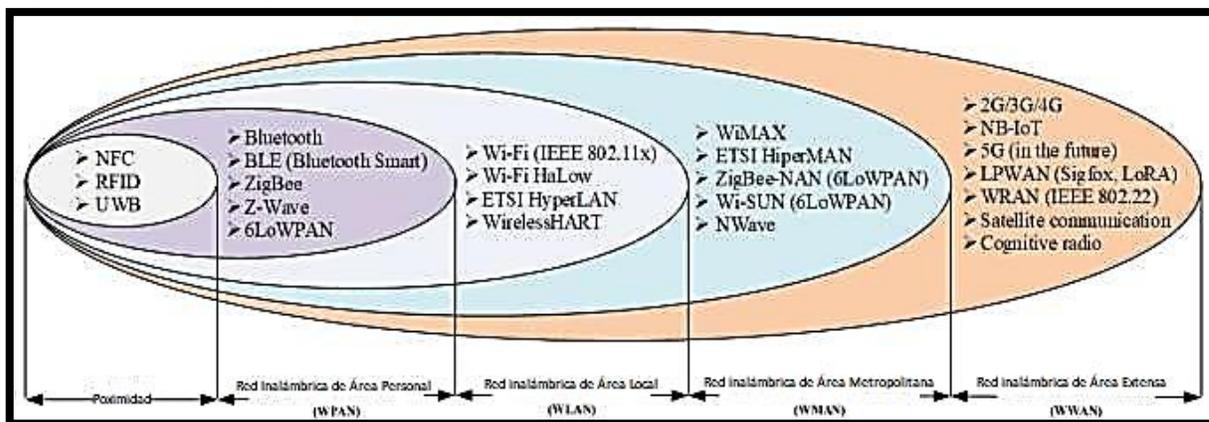
<sup>77</sup> D. Porcino y W. Hirt, «Ultra-Wideband Radio Technology: Potential and Challenges Ahead», *IEEE Communications Magazine* 41, n.º 7 (julio de 2003), p. 68, <https://doi.org/10.1109/MCOM.2003.1215641>.

sistema basado en portadora que divide el ancho de banda UWB en subbandas, y UWB de secuencia directa (DS-UWB), la WiMedia Alliance y el UWB Forum propusieron un sistema basado en impulsos que multiplica un bit de entrada con el código de expansión y transmite los datos mediante la modulación del elemento del símbolo con un pulso corto.

El TG3a se estableció en enero de 2003 para definir una capa PHY alternativa de 802.15.3. Sin embargo, después de tres años de un proceso atascado en IEEE 802.15.3a, los partidarios de ambas propuestas, MB-OFDM y DS-UWB, apoyaron el cierre del grupo de trabajo IEEE 802.15.3a sin conclusión en enero de 2006. Por otro lado, IEEE 802.15.3b, la enmienda a la subcapa 802.15.3 M \ AC se aprobó y lanzó en marzo de 2006<sup>78</sup>.

En la figura 3 se observa el rango de alcance de los diferentes protocolos que se pueden implementar en IoT. Están organizados desde los protocolos que tienen menor alcance hasta los que abarcan distancias de varios kilómetros.

**Figura 3. Tecnologías de comunicación inalámbrica para internet de las cosas.**



Fuente: Adaptado de: Internet of Things (IoT): A Review of Enabling Technologies, Challenges, and Open Research Issues<sup>79</sup>

En el anexo A, se hace una comparación entre los diferentes protocolos de transmisión Bluetooth, UWB, ZigBee y Wi-Fi. Se comparan las velocidades de transmisión, el alcance (en metros), tipo de cifrado que ofrece cada protocolo, etc.

<sup>78</sup> Jin-Shyan Lee, Yu-Wei Su, y Chung-Chou Shen. Op. cit., p. 17.

<sup>79</sup> Alem Čolaković y Mesud Hadžialić. Op. cit., p. 27.

#### 6.1.3.4 Computación

Las unidades de procesamiento (por ejemplo, microcontroladores, microprocesadores, SOC, FPGA) y aplicaciones de software representan el "cerebro" y la capacidad computacional de la IoT. Varias formas de placa de hardware se desarrollaron para ejecutar aplicaciones de IoT como **Arduino**, UDOO, FriendlyARM, Intel Galileo, **Raspberry Pi**, Gadgeteer, BeagleBone, Cubieboard, Z1, WiSense, Mulle y T-Mote Sky.

Además, muchas plataformas de software se utilizan para proporcionar funcionalidades de IoT. Entre estas plataformas, los sistemas operativos son vitales ya que se ejecutan durante todo el tiempo de activación de un dispositivo. Hay varios sistemas operativos en tiempo real (RTOS) que son buenos candidatos para el desarrollo de aplicaciones IoT basadas en RTOS. Por ejemplo, el Contiki RTOS se ha utilizado ampliamente en escenarios de IoT.

Contiki tiene un simulador llamado Cooja que permite a los investigadores y desarrolladores simular y emular aplicaciones de IoT y red de sensores inalámbricos (WSN)<sup>80</sup>, TinyOS<sup>81</sup>, LiteOS<sup>82</sup> y Riot OS<sup>83</sup> también ofrecen un sistema operativo ligero diseñado para entornos IoT. En la industria automotriz también están dando acogida al IoT ya que algunos líderes de la industria automotriz en asociación con Google establecieron Open Auto Alliance (OAA) y están planeando traer nuevas características a la plataforma Android para acelerar la adopción del paradigma de Internet de Vehículos (IoV)<sup>84</sup>. Algunas características de estos sistemas operativos se comparan en el cuadro 2.

---

<sup>80</sup> Adam Dunkels, Bjorn Gronvall, y Thiemo Voigt, «Contiki-a lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors», en *29th annual IEEE international conference on local computer networks* (IEEE, 2004), p. 80.

<sup>81</sup> Philip Levis, Sam Madden, Joseph Polastre, Robert Szewczyk, Kamin Whitehouse, Alec Woo, David Gay, Jason Hill, Matt Welsh y Eric Brewer, «TinyOS: An operating system for sensor networks», en *Ambient intelligence* (Springer, 2005), p. 83.

<sup>82</sup> Qing Cao, Tarek Abdelzaher, y John Stankovic, «The LiteOS Operating System : Towards Unix-like Abstractions for Wireless Sensor Networks», 2008, p. 236, <https://doi.org/10.1109/IPSNS.2008.54>.

<sup>83</sup> Emmanuel Baccelli, Oliver Hahm, Mesut Gunes, Matthias Wahlisch, Thomas C. Schmidt, «RIOT OS: Towards an OS for the Internet of Things», en *2013 IEEE conference on computer communications workshops (INFOCOM WKSHPS)* (IEEE, 2013), p. 75.

<sup>84</sup> Open Automotive Alliance, *Open Automotive Alliance*, 2015, <https://www.openautoalliance.net/#about>.

**Cuadro 2. Sistemas operativos comunes utilizados en entornos IoT.**

Sistema Operativo	Lenguaje Soportado	Memoria Mínima (KB)	Programación basada en eventos	Multihilo	Memoria Dinámica
TinyOS	nesC	1	Si	Parcial	Si
Contiki	C	2	Si	Si	Si
LiteOS	C	4	Si	Si	Si
Riot OS	C/C++	1,5	No	Si	Si
Android	Java	-	Si	Si	Si

Fuente: Adaptado de: Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications.<sup>85</sup>

Las plataformas en la nube forman otra parte computacional importante la IoT. Estas plataformas proporcionan facilidades para que los objetos inteligentes envíen sus datos a la nube, para que los “big data” se procesen en tiempo real y, finalmente, para que los usuarios finales se beneficien del conocimiento extraído del big data recopilado. Hay una gran cantidad de plataformas y marcos de nube gratuitos y comerciales disponibles para hospedar servicios de IoT.

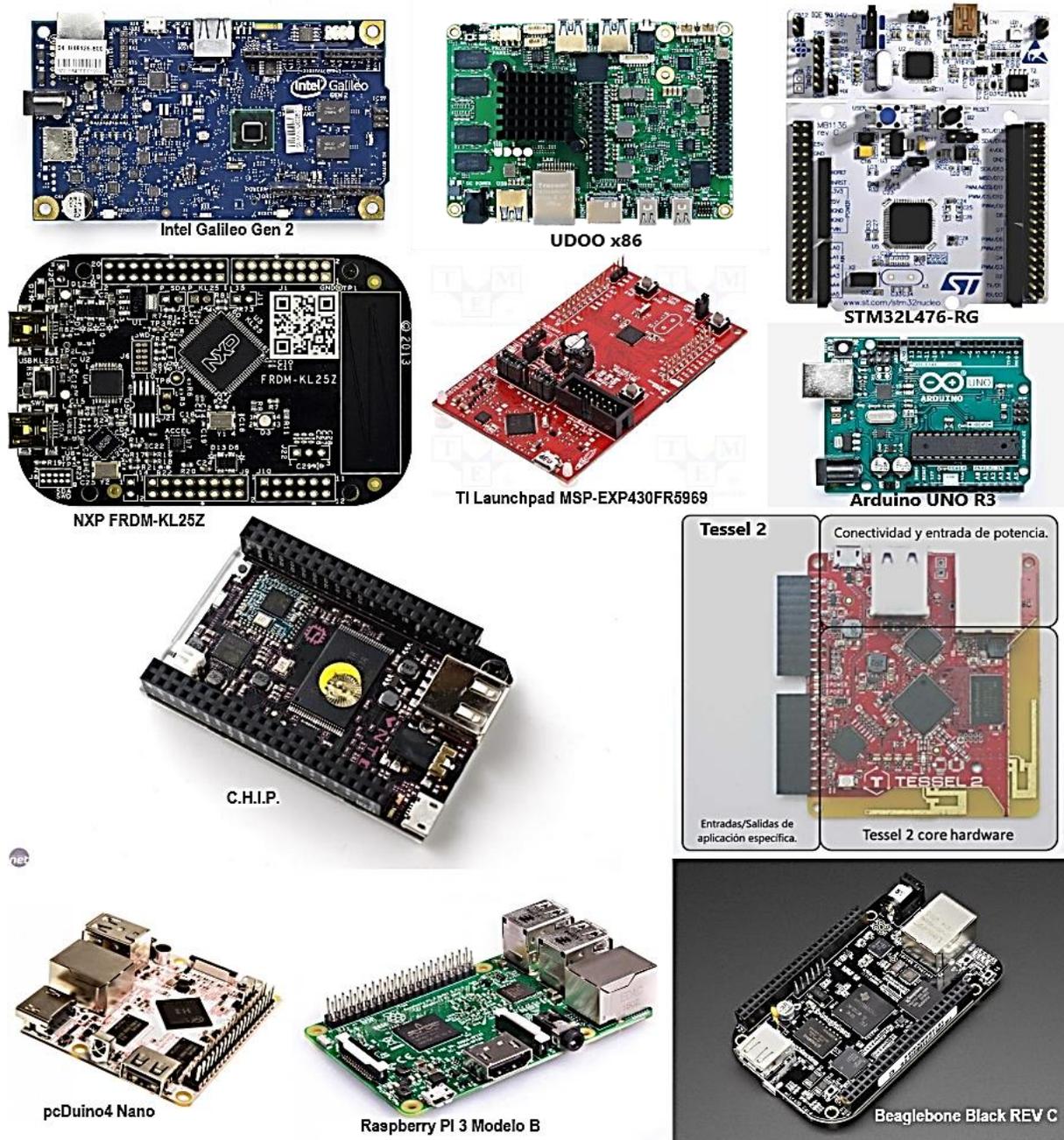
Para aplicaciones en IoT, existen diversas placas de desarrollo de provenientes de diferentes desarrolladores, tales como Intel®, Arduino®, RaspBerry®, BeagleBone®, etc., cada una con diferentes características según el empleo que se les vaya a dar. A continuación, se hará una descripción de dichas placas, detallando cada una de sus características. Pero antes de iniciar con el proceso de descripción, en el anexo B se especifican algunos de los componentes basados en las características de un trabajo.

---

<sup>85</sup> Ala Al-Fuqaha, Mohsen Guizani, Mehdi Mohammadi, Mohammed Aledhari, y Moussa Ayyash. Op. cit., p. 2351.

Prosiguiendo con lo mencionado anteriormente, a continuación, en la figura 4, se observan algunas de las placas de desarrollo que generalmente son usadas para trabajar con IoT. Además, desde el anexo E hasta el anexo J se presentan cuadros de características de las placas y de comparación entre las mismas.

**Figura 4. Recopilación placas de desarrollo usadas en IoT.**



Fuente: Los Autores.

### 6.1.3.5 Servicios

En general, los servicios de IoT se pueden clasificar en cuatro clases<sup>86</sup>. Servicios relacionados con la identidad, Agregación de información Servicios, Servicios de Colaboración-Aware y Servicios Ubicuos. Los servicios relacionados con la identidad son los servicios más básicos e importantes utilizados en otros tipos de servicios. Cada aplicación que necesita traer objetos del mundo real al mundo virtual tiene que identificar esos objetos.

Los servicios de agregación de información recopilan y resumen las mediciones sensoriales sin procesar que deben procesarse e informarse a la aplicación de IoT. Los Servicios de Colaboración consciente actúan además de los Servicios de Agregación de información y utilizan los datos obtenidos para tomar decisiones y reaccionar en consecuencia. Los Servicios Ubiquitos, sin embargo, tienen como objetivo proporcionar Servicios de Reconocimiento Colaborativo en cualquier momento que se necesiten a cualquiera que los necesite en cualquier lugar. Con esta categorización, se revisan algunas aplicaciones de la IoT en los párrafos siguientes.

El objetivo final de todas las aplicaciones de IoT es alcanzar el nivel de servicios ubicuos. Sin embargo, este fin no es fácilmente alcanzable, ya que hay muchas dificultades y desafíos que deben abordarse. La mayoría de las aplicaciones existentes proporcionan servicios relacionados con la identidad, la agregación de información y los servicios de colaboración. La atención sanitaria inteligente y las redes inteligentes entran en la categoría de agregación de información y el hogar inteligente, los edificios inteligentes, los sistemas de transporte inteligente (ITS) y la automatización industrial están más cerca de la categoría de reconocimiento colaborativo.

Los servicios de IoT para el hogar inteligente (Ver figura 5)<sup>87</sup> contribuyen a mejorar el estilo de vida personal al hacer que sea más fácil y conveniente monitorear y operar electrodomésticos y sistemas (por ejemplo, aire acondicionado, sistemas de calefacción, medidores de consumo de energía, etc.) de forma remota. Por ejemplo, una casa inteligente puede cerrar automáticamente las ventanas y bajar las persianas de las ventanas del piso superior según del pronóstico del tiempo. Los hogares inteligentes deben tener una interacción regular con sus entornos internos y externos<sup>88</sup>.

---

<sup>86</sup> L. Mingdong X. Xiaojiang, W. Jianli, «Services and key technologies of the Internet of Things», *ZTE Commun.* 2 (2010), p. 11.

<sup>87</sup> Aaron S. Crandall, Narayanan C. Krishnan, Brian L. Thomas y Diane J. Cook, «Casas: A smart home in a box», *Computer* 46, n.º 7 (2013), p. 65.

<sup>88</sup> N Komninos, E Philippou, y A Pitsillides, «Survey in Smart Grid and Smart Home Security : Issues , Challenges and Countermeasures», n.º c (2014), <https://doi.org/10.1109/COMST.2014.2320093>.

**Figura 5. Hogar Inteligente.**



Fuente: REDEZONE. Imagen ilustrativa de un hogar inteligente [en línea] <<https://bit.ly/2x8YpyX>> [citado en 26 de junio de 2019].

El entorno interno puede incluir todos los electrodomésticos y dispositivos que están conectados a Internet, mientras que el entorno externo consta de entidades que no tienen el control de la casa inteligente, como las entidades de red inteligente.

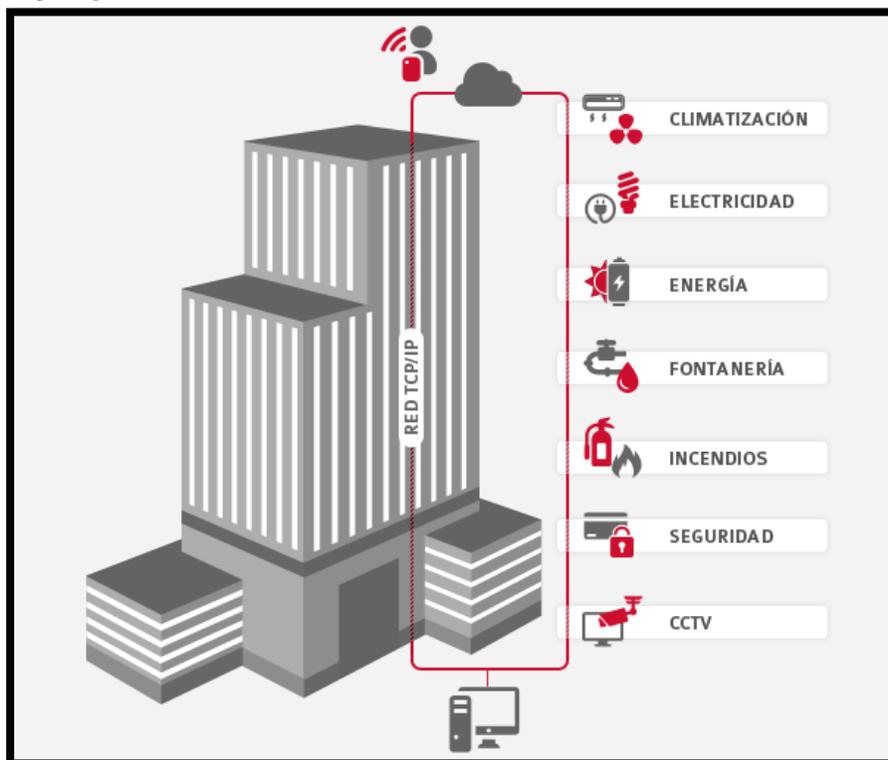
Los edificios inteligentes conectan los sistemas de automatización de edificios (BAS) a Internet<sup>89</sup>. BAS permite controlar y gestionar diferentes dispositivos de construcción utilizando sensores y actuadores como HVAC, iluminación y sombreado, seguridad, seguridad, entretenimiento, etc. Además, el BAS puede ayudar a mejorar el consumo de energía y el mantenimiento de los edificios. Por ejemplo, un lavavajillas parpadeante o un sistema de refrigeración/calefacción pueden proporcionar indicaciones cuando hay un problema que debe comprobarse y resolverse. Por lo tanto, las solicitudes de mantenimiento se pueden enviar a una empresa contratada sin ninguna intervención humana.

En la figura 6 se puede observar un ejemplo de automatización de edificios. Se puede controlar la iluminación, el sistema de ingreso, el sistema de mantenimiento del aire acondicionado, también se puede hacer un control del ambiente dentro del edificio.

---

<sup>89</sup> Edward Finch, «Is IP everywhere the way ahead for building automation ? Because it does not provide continuous» 19, n.º 11 (2001), p. 390.

**Figura 6. Ejemplo de automatización de edificios.**



Fuente: CONTROLMATIC. Imagen ilustrativa de un edificio inteligente [en línea] <<https://bit.ly/2BBWCvr>> [citado en 26 de junio de 2019].

Los sistemas de transporte inteligente (ITS) o los sistemas ciber físicos de transporte (T-CPS) representan la integración entre el cálculo y la comunicación para supervisar y controlar la red de transporte<sup>90</sup>. ITS tiene como objetivo lograr una mejor re- responsabilidad, eficiencia, disponibilidad y seguridad de la infraestructura de transporte. ITS emplea cuatro componentes principales, a saber: subsistema de vehículos (consiste en GPS, lector RFID, OBU y comunicación), subsistema de estación (equipo de carretera), centro de monitoreo ITS y subsistema de seguridad. Además, los vehículos conectados son cada vez más importantes con el objetivo de hacer que la conducción sea más fiable, agradable y eficiente<sup>91</sup>. Por estar en posición, Audi se convirtió en el primer fabricante de automóviles con licencia para conducir por cuenta propia en Nevada<sup>92</sup>. Google es otro pionero en esta área<sup>93</sup>. Además, en diciembre de 2013, Volvo anunció su coche autónomo para conducir

<sup>90</sup> Carolyn Talcott, «Cyber-Physical Systems and Events», 2008, p. 102.

<sup>91</sup> Ying Leng y Lingshu Zhao, «Novel Design of Intelligent Internet-of- ehicles Management System Based on», 2011, p. 3190.

<sup>92</sup> Adario Strange, «Toyota, Audi prepping self-driving cars», 4 de enero de 2013, <https://www.pcmag.com/news/306559/toyota-audi-prepping-self-driving-cars>.

<sup>93</sup> John Markoff, «Google Cars Drive Themselves, in Traffic», The New York Times, 9 de octubre de 2010, [http://www.nytimes.com/%0A2010/10/10/Science/10google.Html?Pagewanted=all&#x0026;\\_r=0%0A](http://www.nytimes.com/%0A2010/10/10/Science/10google.Html?Pagewanted=all&#x0026;_r=0%0A).

unas 30 millas en carreteras concurridas en Gotemburgo, Suecia<sup>94</sup>. A principios de este año (2015), el USDOT anunció que trazaría un camino regulatorio que requeriría que todos los automóviles nuevos estuvieran equipados con sistemas de comunicaciones vehículo a vehículo (V2V) en algún momento en los próximos años.

La automatización industrial<sup>95</sup>, está computando dispositivos robóticos para completar las tareas de fabricación con una mínima participación humana. Permite a un grupo de máquinas producir productos de forma rápida y precisa en base a cuatro elementos: transporte, procesamiento, sensación y comunicación. El uso que se le da al IoT en la automatización industrial es para controlar y monitorear las operaciones, funcionalidades y el índice de productividad de las máquinas de producción a través de Internet. Por ejemplo, si una máquina de producción determinada encuentra un problema repentino, un sistema IoT envía una solicitud de mantenimiento inmediatamente al departamento de mantenimiento para controlar la corrección. Además, la IoT aumenta la productividad mediante el análisis de los datos de producción, el tiempo y las causas de los problemas de producción.

La atención sanitaria inteligente desempeña un papel importante en aplicaciones sanitarias a través de la incorporación de sensores y actuadores en los pacientes y sus medicamentos para fines de seguimiento y seguimiento. La IoT es utilizada por la atención clínica para monitorear los estados fisiológicos de los pacientes a través de sensores mediante la recopilación y el análisis de su información y luego el envío de los datos del paciente analizados de forma remota a los centros de procesamiento para realizar acciones adecuadas. Por ejemplo, Masimo Radical-7 controla el estado del paciente de forma remota e informa a un personal clínico<sup>96</sup>. Recientemente, IBM utilizó la tecnología RFID en uno de los hospitales de Ohio Health para realizar un seguimiento del lavado de manos después de comprobar cada paciente<sup>97</sup>. Esa operación podría utilizarse para evitar infecciones que causan alrededor de 90 000 muertes y la pérdida de alrededor de 30.000 millones de dólares al año.

Las redes inteligentes<sup>98</sup> utilizan la IoT para mejorar y mejorar el consumo de energía de casas y edificios. El uso de la IoT en redes inteligentes ayuda a los proveedores de energía a controlar y administrar los recursos para proporcionar energía proporcionalmente al aumento de la población. Por ejemplo, las redes inteligentes

---

<sup>94</sup> Andrew Del-Colle, «Volvo will test autonomous cars on Sweden's streets», 4 de diciembre de 2013, <https://www.popularmechanics.com/cars/a9834/volvo-announces-autonomous-car-program-16230364/>.

<sup>95</sup> Ioan Ungurean y Nicoleta-cristina Gaitan, «An IoT Architecture for Things from Industrial Environment», n.º May (2016), <https://doi.org/10.1109/ICComm.2014.6866713>.

<sup>96</sup> Masimo Corp., «Radical-7 Breakthrough Measurements. Radical Monitor», 2013, <https://www.masimo.co.uk/products/continuous/root/radical-7/>.

<sup>97</sup> C. Nay, «Sensors remind doctors to wash up», *IBM Res., Armonk, NY, USA*, 2013.

<sup>98</sup> N Komninos, E Philippou y A Pitsillides. Op. cit., p. 1.

utilizan la IoT para conectar millones o miles de millones de medidores de edificios a la red de proveedores de energía.

El uso que se le da a estos medidores es para recopilar, analizar, controlar, monitorear y gestionar el consumo de energía. La IoT permite a los proveedores de energía mejorar sus servicios para satisfacer las necesidades de los consumidores. Además, la utilización de la IoT en la red inteligente reduce los posibles errores, aumenta la eficiencia y mejora la calidad de los servicios. Una ciudad inteligente que podría ser vista como una aplicación de servicios ubicuos, tiene como objetivo mejorar la calidad de vida en la ciudad haciendo que sea más fácil y conveniente para los residentes encontrar información de interés<sup>99</sup>.

En un entorno de ciudad inteligente, varios sistemas basados en tecnologías inteligentes están interconectados para proporcionar los servicios necesarios (salud, servicios públicos, transporte, gobierno, hogares y edificios).

#### **6.1.3.6 Semántica**

La semántica en la IoT se refiere a la capacidad de extraer conocimientos de forma inteligente por diferentes máquinas para proporcionar los servicios necesarios. La extracción de conocimientos incluye el descubrimiento y el uso de recursos y la información de modelado. Además, incluye el reconocimiento y análisis de datos para dar sentido a la decisión correcta de proporcionar el servicio exacto<sup>100</sup>. Por lo tanto, la semántica representa el cerebro de la IoT mediante el envío de demandas al recurso adecuado. Este requisito es compatible con tecnologías Web semánticas como el marco de descripción de recursos (RDF) y el lenguaje de ontología web (OWL). En 2011, el consorcio World Wide Web (W3C) adoptó el formato de Intercambio XML Eficiente (EXI) como recomendación<sup>101</sup>.

En lo referente a EXI, este es importante en el contexto de la IoT porque se requiere para optimizar las aplicaciones XML para entornos con recursos limitados. Además, reduce las necesidades de ancho de banda sin afectar a los recursos relacionados, como la duración de la batería, el tamaño del código, la energía consumida para el procesamiento y el tamaño de la memoria. EXI convierte los mensajes XML a binarios para reducir el ancho de banda necesario y minimizar el tamaño de almacenamiento necesario.

---

<sup>99</sup> Tomas Gea y David Roldán, «Smart cities as an application of Internet of Things : Experiences and lessons learnt in Barcelona», 2013, p. 253, <https://doi.org/10.1109/IMIS.2013.158>.

<sup>100</sup> Wei Wang et al., «Early Progress and Back to the Future Semantics for the Internet of Things »: 8, n.º March (2012): p. 1, <https://doi.org/10.4018/jswis.2012010101>.

<sup>101</sup> John Schneider et al., «Efficient XML interchange (EXI) format 1.0», *W3C Proposed Recommendation 20* (2011): p. 32.

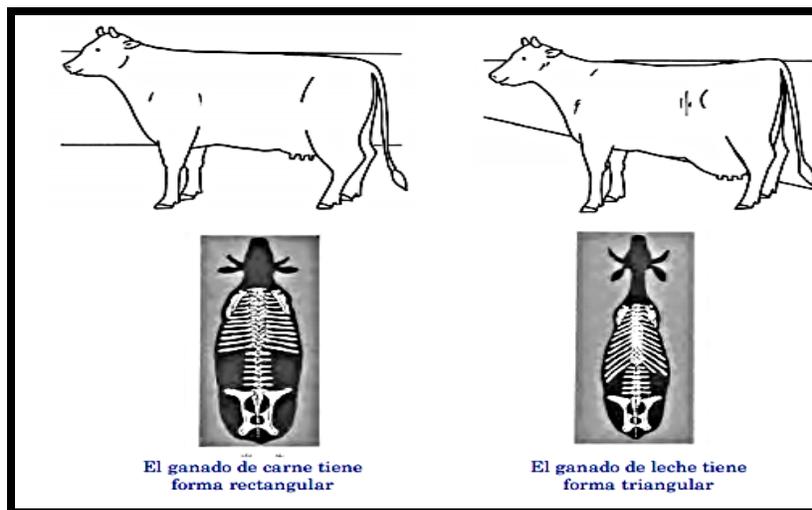
Teniendo en cuenta lo mencionado en la descripción de IoT, Al-Fuqaha et al.<sup>102</sup> identificaron los principales componentes principales de la IoT junto con sus estándares relacionados, tecnologías y realizaciones. La variedad de estándares y tecnologías en estos elementos y la forma en que deben interactuar es un desafío principal que puede impedir el desarrollo de las aplicaciones de IoT. La heterogeneidad de los elementos de IoT necesita una solución completa para hacer realidad los servicios ubicuos de IoT.

## 6.2 BOVINOS Y SU MORFOLOGÍA

### 6.2.1 Ganado bovino

El ganado bovino se puede clasificar en 2 tipos como se observa en la figura 7; el que fue mejorado para producir carne y el que fue mejorado para producir leche; respectivamente la forma del cuerpo del ganado productor de carne es de forma rectangular y posee una mayor complexión por lo que la acumulación de carne es mayor, sin embargo; “el ganado productor de leche tiene una forma triangular, poca musculatura y ubres grandes”.<sup>103</sup>

**Figura 7. Tipos de Ganado.**



Fuente: El ganado de carne tiene forma rectangular. El ganado de leche tiene forma triangular<sup>104</sup>. [citado en 26 de junio de 2019].

<sup>102</sup> Ala Al-Fuqaha, Mohsen Guizani, Mehdi Mohammadi, Mohammed Aledhari, y Moussa Ayyash. Op. cit., p. 2372.

<sup>103</sup> Enrique Ávila, «El ganado de leche tiene forma triangular. El ganado de carne tiene forma rectangular», accedido 26 de junio de 2019, <https://docplayer.es/4183728-El-ganado-de-leche-tiene-forma-triangular-el-ganado-de-carne-tiene-forma-rectangular.html>.

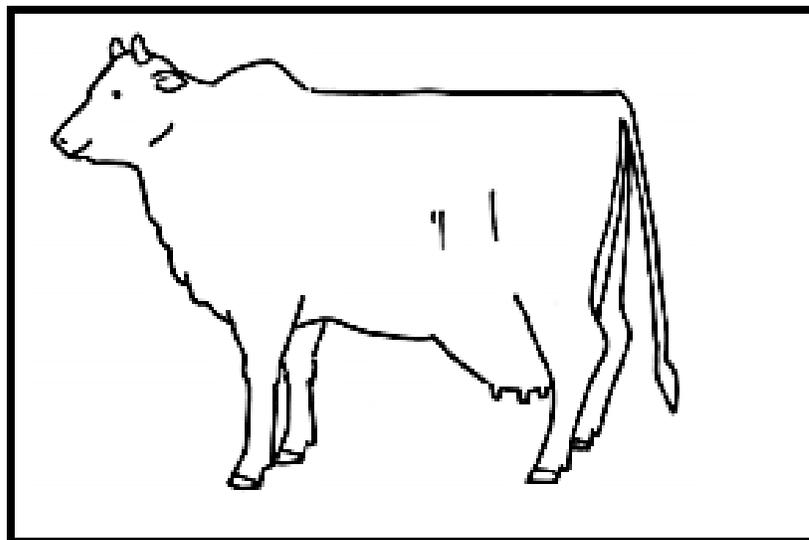
<sup>104</sup> Ibid. p. 5.

La gran diferencia entre estos dos tipos de ganado está en que el ganado lechero utiliza gran parte de sus nutrientes para la producción continua de leche; en cambio, el ganado productor de carne almacena sus nutrientes en forma de grasa o carne; por tal razón sus rasgos físicos son bastante diferentes.

### 6.2.2 Ganado según el clima

El ganado bovino tiende a cambiar su morfología dependiendo del clima al cual se haya adaptado a través de los años; “el ganado en zonas tropicales o cálidas tiende a poseer mayor superficie corporal, pelaje corto y mayor pigmentación en la piel todo esto para disipar el calor de la piel”<sup>105</sup> se observa esto en la figura 8.

**Figura 8. Ganado adaptado al clima cálido.**



Fuente: El ganado de carne tiene forma rectangular. El ganado de leche tiene forma triangular<sup>106</sup>. [citado en 26 de junio de 2019].

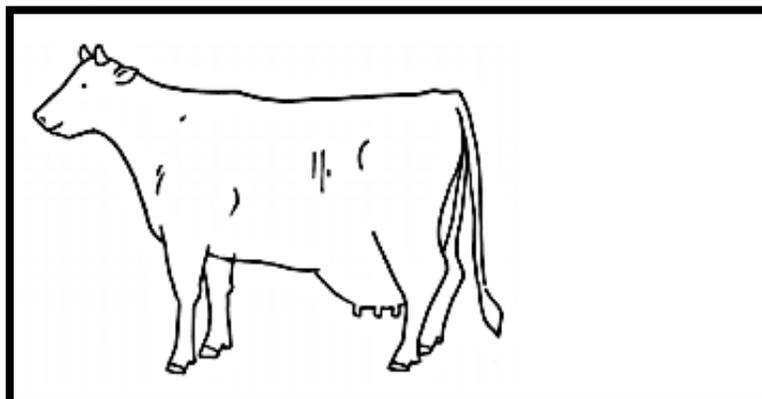
Por el contrario; el bovino adaptado Al clima frío posee menos superficie corporal como se observa en la figura 9, menor pigmentación en su piel y mayor densidad en su pelaje para evitar la disipación de calor.

---

<sup>105</sup> Ibid. p. 6.

<sup>106</sup> Ibid. p. 7.

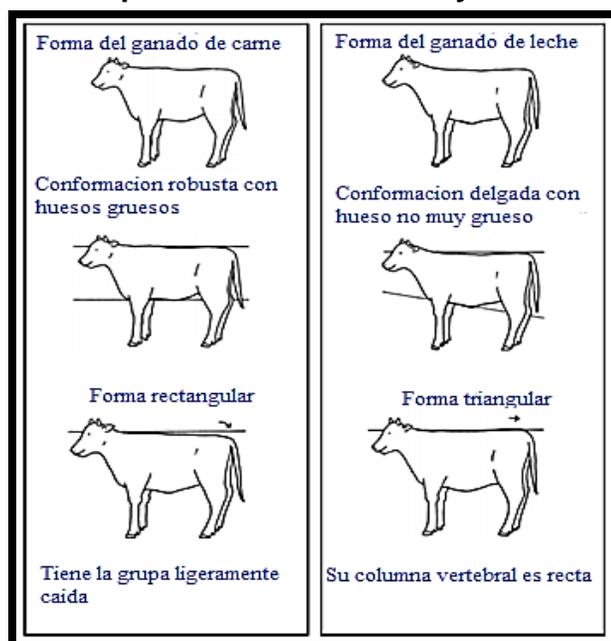
**Figura 9. Ganado adaptado al clima frio.**



Fuente: El ganado de carne tiene forma rectangular. El ganado de leche tiene forma triangular<sup>107</sup>. [citado en 26 de junio de 2019].

En conclusión, la morfología de los productores de carne y leche es importante para determinar su propósito en la producción de mejores productos por eso es importante tener en cuenta la figura 10.

**Figura 10. Morfología de los productores de carne y leche.**



Fuente: El ganado de carne tiene forma rectangular. El ganado de leche tiene forma triangular<sup>108</sup>. [citado en 26 de junio de 2019].

<sup>107</sup> Enrique Ávila. Op. cit., p. 8.

<sup>108</sup> Ibid, p. 9.

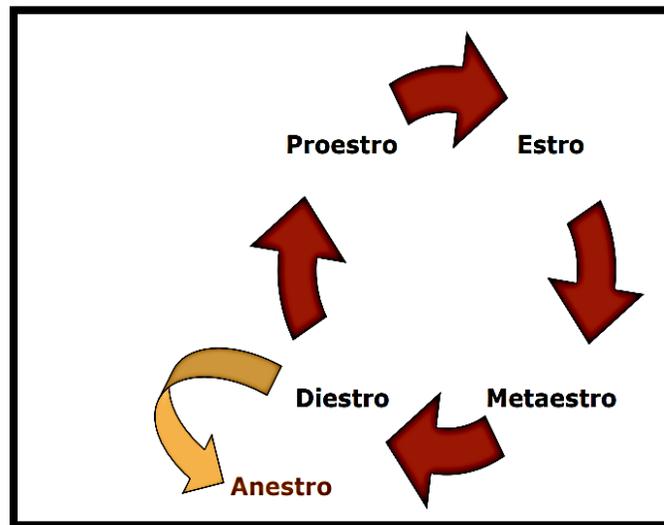
### 6.2.3 Ciclo estral en bovinos

Los bovinos hembra se clasifican en:

- Poliéstricas continuas, las cuales presentan ciclo estral todo el año y solo se ve interrumpido durante el estado de embarazo.
- Con ovulación y cuerpo lúteo; las cuales presentan ciclo estral espontaneo lo que prolonga la fase de anestro, aumentando la inactividad de la hembra.

Entonces se puede resumir el ciclo reproductivo como se muestra en la figura 11, en donde se evidencia de manera concreta el orden de las fases.<sup>109</sup>

**Figura 11. Fases del ciclo Estral.**



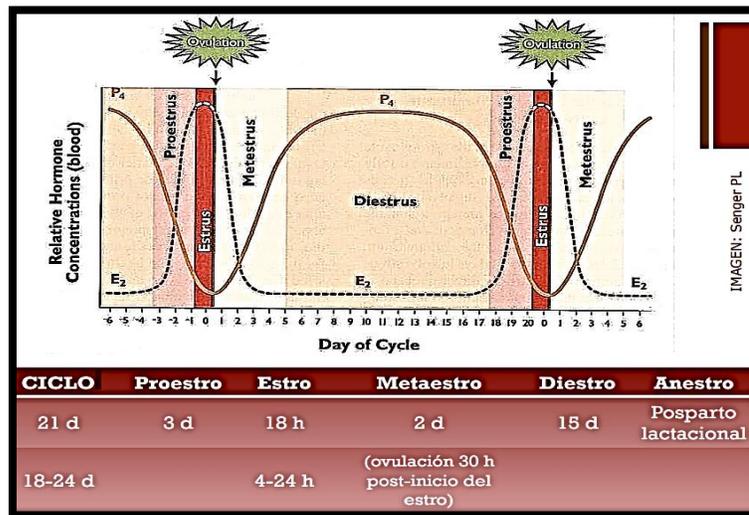
Fuente: Ciclo estral en bovinos<sup>110</sup>. [citado en 26 de junio de 2019].

Cada ciclo comprende sus tiempos (Los cuales se ven en la figura 12) y comportamientos característicos del bovino de manera que algunos son fáciles de reconocer que otros; lo importante es saber reconocer la etapa en la que se encuentra el bovino.

<sup>109</sup> Rangel Lucia, Hernández Medrano, Juan H. «Fisiología reproductiva de los animales domésticos», Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, accedido 26 de junio de 2019, p. 104 [http://www.fmvz.unam.mx/fmvz/publicaciones/archivos/Fisiologia\\_Reproductiva\\_preliminares.pdf](http://www.fmvz.unam.mx/fmvz/publicaciones/archivos/Fisiologia_Reproductiva_preliminares.pdf)

<sup>110</sup> Ibid,p, 109.

Figura 12. Duración de cada fase del ciclo estral.



Fuente: Ciclo estral en Bovinos<sup>111</sup>. [citado en 26 de junio de 2019].

- Pro-estro: Esta etapa presenta ausencia de cuerpo lúteo funcional; se evidencia crecimiento folicular, inicia con la regresión de cuerpo lúteo del ciclo anterior y finaliza con el inicio de la receptividad sexual.
- Estro: Esta etapa es la más fácil de reconocer ya que es bovino presenta deseo sexual desenfrenado y se caracteriza por la aceptación del macho y la maduración folicular; la conducta del bovino cambia radicalmente ya que presenta inquietud, bajo apetito, búsqueda del macho (aumenta la locomoción del animal), topetaos (cornadas sin dirección determinada), montas entre hembras (causada por la hormona sexual) e inmovilidad ante el macho<sup>112</sup>
- Meta-estro: Se caracteriza por la ovulación y formación del cuerpo lúteo; inicia con el fin de la conducta estral y finaliza con la ovulación.
- Di-estro: Se caracteriza por ser la fase más larga de todo el ciclo, además de ser la etapa en la cual el cuerpo lúteo está en toda su operación; pueden ocurrir grandes densidades de folículos.
- Anestro: Se caracteriza por la inactividad de la hembra (estado de reposo) por la inactividad del eje hipotálamo-hipofisiario-gonadal; luego sigue el

<sup>111</sup> Ibid, p. 118.

<sup>112</sup> Ibid, p. 137.

posparto en donde se reinicia la actividad ovárica y se estabiliza la condición corporal.

### **6.3 INDICADORES DE CICLO ESTRAL**

Para el manejo de hatos productores de leche o carne el detectar el evento de estro resulta bastante infructuoso dado que las señales poseen grandes márgenes de error al menos de 1 o 2 días en donde el evento de estro no ocurre u ocurre prematuramente. Para hacer una detección oportuna, es necesario determinar los indicadores de ciclo estral. En la literatura se reportan cambios en los siguientes procesos biológicos.

1. Vocalización
2. Temperatura
3. Locomoción diaria.
4. Fenómeno rítmico.
5. Receptibilidad sexual.
6. Liberación de ovocitos

Pero no todos estos aspectos antes mencionados son cuantificables como la receptibilidad sexual y la liberación de ovocitos. Hay ciertos indicadores presentes en los fenómenos antes mencionados como el aumento de la temperatura, aceleración del ritmo cardíaco y aumento en la movilidad del bovino que sí son cuantificables y que permiten determinar el estado reproductivo del animal. Estos parámetros pueden ser usados de manera independiente para detectar el estro o ser considerados de manera conjunta para obtener una sola señal indicadora.

#### **6.3.1 Vocalización como indicador**

El parámetro de la vocalización del bovino hembra en época de apareamiento se evidencia en un aumento en la frecuencia de los mugidos por lo cual se puede establecer una relación entre frecuencia de los mugidos y los diferentes estados del bovino hembra.<sup>113</sup>

En la figura 13 se observa la frecuencia por intervalos versus la duración total del ciclo estral, el cual como se ve en la figura está comprendido desde el día -9 al día 9, en donde el día 0 es cuando inicia la fase de estro, la cual es crucial para detectar la posible disposición de la hembra para una inseminación exitosa.

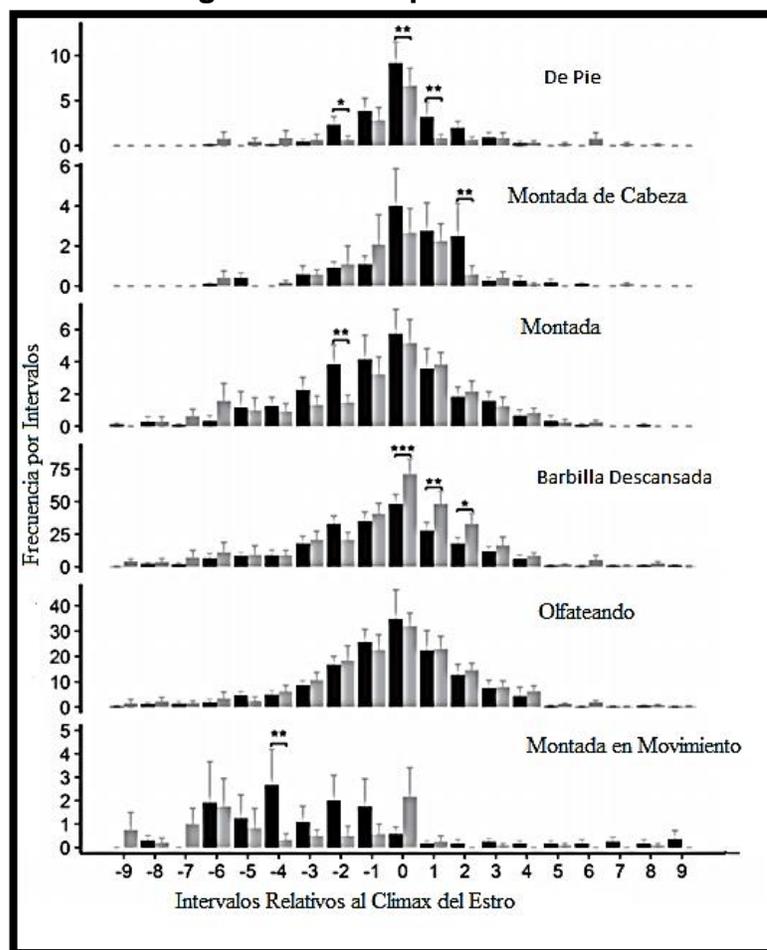
---

<sup>113</sup> Volker Röttgen, Frank Becker, Armin Tuchscherer, Christine Wrenzycki, Sandra Döpjan, Peter C. Schön y Birger Puppe, «Vocalization as an indicator of estrus climax in Holstein heifers during natural estrus and superovulation», *Journal of dairy science* 101, n.º 3 (2018), p. 100.

También se observa los diferentes comportamientos presentes durante el ciclo estral; además de la frecuencia de los mugidos durante cada estado del animal, se puede detallar que existe factor común para todos los comportamientos en el día 0 del ciclo estral que es donde inicia la etapa de estro; tres días después de la etapa llamada pro-estro.

La frecuencia máxima se observa en el día 0 para casi todos los comportamientos, logrando obtener una manera de parametrizar un indicador para el ciclo estral.

**Figura 13. Frecuencia de mugidos Vs Comportamientos.**



Fuente: Wearable Wireless Estrus Detection Sensor for Cows<sup>114</sup>. [citado en 26 de junio de 2019].

<sup>114</sup> L. Mattias Andersson, Hironao Okada, Ryotaro Miura, Yi Zhang, Koji Yoshioka, Hiroshi Aso y Toshihiro Itoh, «Wearable Wireless Estrus Detection Sensor for Cows», *Computers and Electronics in Agriculture* 127 (septiembre de 2016), p. 20, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.06.007>.

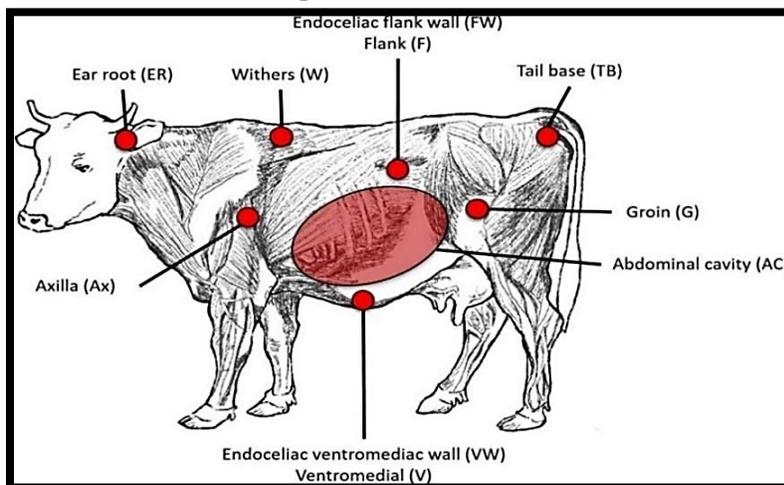
### 6.3.2 Temperatura

Se debe tener en cuenta que, en los bovinos a mayor edad menor temperatura. La temperatura corporal basal es un indicador que bien es parametrizable para detectar el estro además de presentar varios beneficios ya que no depende de variables externas como la posición y velocidad del objeto de estudio; la temperatura se basa más en la etapa di-estro que es aproximadamente un día antes del estro que es la señal máxima. Una de las desventajas radica en que la temperatura basal de los bovinos hembra varía en grandes proporciones a lo largo del día y según la raza del bovino, además de afectar el estado de salud de este y su actividad presente durante el día.

No obstante, la buena actividad estral se ve afectada por el factor ambiental, en particular las altas temperaturas del verano que debilitan la actividad estral normal ya que afecta la función ovárica lo que resulta infructuoso para realizar una buena producción ya sea por inseminación artificial o naturalmente. El monitoreo de la temperatura más efectiva para bovinos es por medio rectal lo que se conoce como RT (temperatura rectal). Este es un método estándar para la detección del estro, pero resulta problemático para los ganaderos tomar las medidas de la RT regularmente para una gran cantidad de ganado.

Existen varios puntos para tomar las medidas de temperatura además de la vía rectal los cuales se observan en la figura 14.

**Figura 14. Puntos térmicos del ganado bovino.**



Fuente: Monitoring of the core body temperature of cows using implantable wireless thermometers<sup>115</sup>. [citado en 26 de junio de 2019].

<sup>115</sup> Wataru Iwasaki, Shuichi Ishida, Daisuke Kondo, Yuichi Ito, Jun Tateno, Michiko Tomioka, «Monitoring of the Core Body Temperature of Cows Using Implantable Wireless Thermometers», *Computers and Electronics in Agriculture* 163 (agosto de 2019), p. 104, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.06.004>.

### 6.3.3 Locomoción Diaria

La locomoción de los bovinos se ve alterada dependiendo de su estado de salud, edad y estado sexual; entonces se puede hacer una estimación del inicio del estro a juzgar por la cantidad de terreno recorrido por el bovino hembra, ya que cuando se acerca el día de estro el bovino aumenta la cantidad de terreno recorrido con una incertidumbre de más o menos un día al inicio del día de estro.<sup>116</sup>

La mayoría de los dispositivos para la detección de estro están conformados por acelerómetros y odómetros para la detección, pero la precisión de dichos dispositivos puede ser afectada por factores ambientales o el tipo de terreno al que se aplican ya que un terreno escarpado tipo rural presenta problemas para el odómetro lo que conlleva a presentar falsos positivos.

### 6.3.4 Desplazamiento

Cuando el bovino hembra inicia su periodo de ovulación (día 0) su temperatura corporal disminuye alrededor de 37.7 °C lo que genera un aumento en su desplazamiento por día para estabilizar su temperatura corporal normal la cual ronda alrededor de 38.5 °C, esto ocurre con bastante frecuencia en zonas de clima templado más que en zonas húmedas con altas temperaturas.

Entonces por medio de los acelerómetros que miden el desplazamiento angular en los tres ejes se puede medir la actividad que realiza el bovino hembra durante el día y la noche de manera que se realiza un control continuo sobre el animal en estudio. Como el sensor es colocado sobre la oreja del animal de manera que no resulta invasiva para este, de esta manera no se interviene en su actividad natural ya que no se produce estrés sobre el mismo; los datos recolectados pueden ser rápidamente condensados por el uso de la estadística para obtener un valor medio que sea el más acercado al indicador del evento de estro.<sup>117</sup>

### 6.3.5 Frecuencia cardíaca

El ritmo o frecuencia cardíacos es un indicador perfectamente parametrizable ya que se notifican los cambios en la actividad física del animal en estudio; cuando el bovino hembra se encuentra en época de estro se produce un aumento en su

---

<sup>116</sup> Ariel Osvaldo Castaldo, *Caracterización de los sistemas de producción bovina (invernada) en el nordeste de la provincia de La Pampa (Argentina): modelos de gestión* (Universidad de Córdoba, Departamento de Producción Animal, 2003).

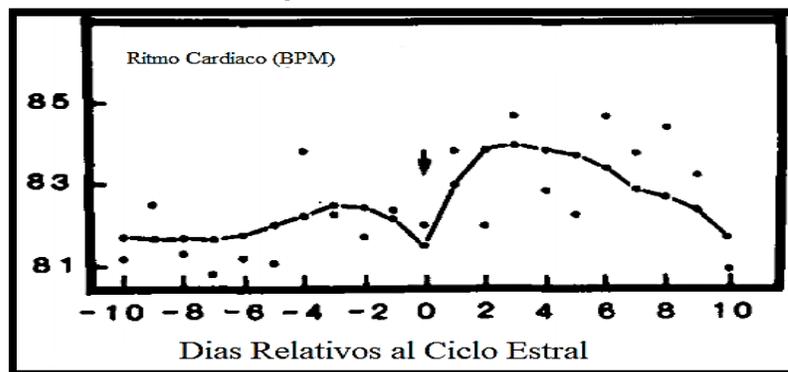
<sup>117</sup> V. Schweinzer, E. Gusterer, P. Kanz, S. Krieger, D. Süß, L. Lidauer, A. Berger, F. Kickingger, M. Öhlschuster y W. Auer ., «Evaluation of an ear-attached accelerometer for detecting estrus events in indoor housed dairy cows», *Theriogenology* 130 (2019), p. 19.

actividad física lo que se traduce en el aumento en la frecuencia cardiaca del animal; de esta manera es posible identificar cambios en sus latidos en cierto periodo de tiempo ya sea en el día o la noche. Un método aconsejable para obtener datos es tomar muestras de los latidos del corazón con un estetoscopio o cualquier otro dispositivo capaz de captar el ritmo cardíaco; entonces se toma muestras durante 15 segundos y se multiplican por 4 para dar latidos por minuto.

Para aumentar la certeza de los datos se puede tomar muestras de sangre inmediatamente después de haber tomado las muestras del ritmo cardíaco, luego, pasar las muestras de sangre a través de un baño de hielo seco o centrifugado de los tubos de ensayo para obtener la proteína denominada "PGFM - (13,14-dihidro-15-keto-PGF(2Alpha)) plasmático" que permite determinar si ocurren variables de manera predecible durante indicadores del ciclo estral.

En la figura 15 se observa los datos obtenidos durante el ciclo estral en un bovino hembra de raza Holstein. Se mide duración de ciclo estral vs latidos por minuto, entonces se puede observar un cambio en el día 0 del ciclo estral que es justo donde se genera la liberación de ovocitos y el bovino hembra está listo para la monta.<sup>118</sup>

**Figura 15. Ciclo estral vs Latidos por minuto.**



Fuente: Changes Throughout Estrous Cycles of Variables That Might Indicate Estrus in Dairy Cows<sup>119</sup>. [citado en 1 de agosto de 2019].

## 6.4 SENSORES

Son unidades que emiten una señal análoga o digital dependiendo de un estímulo externo que genera un cambio en el estado natural de aquellos lugares donde pueda ser detectado cambios físicos por medio de diferentes sensores, los más conocidos pertenecen a la rama que detecta magnitudes físicas evidentes a los cinco sentidos

<sup>118</sup> LEWIS, G. S.; NEWMAN, S. K. Changes throughout estrous cycles of variables that might indicate estrus in dairy cows. *Journal of dairy science*, 1984, vol. 67, no 1, p. 146.

<sup>119</sup> Ibid. p. 149.

del humano como la temperatura, intensidad lumínica, distancia o posición y fuerza aplicada; lo único que hacen los sensores a diferencia de los 5 sentidos es realizar un análisis y mostrar una magnitud matemática perfectamente modelable ya que es un valor numérico.

A continuación, se presenta una recopilación de diferentes sensores para la medición de las variables de interés: temperatura, desplazamiento y ritmo cardíaco.

### 6.4.1 Sensores de temperatura

En este literal, se analizan varios tipos de sensores utilizados para medir temperatura. Se tiene en cuenta el rango de medición, ambientes en los que se usan y si son o no aptos para usos en exteriores.

#### 6.4.1.1 Termopares

Los termopares se basan en dos tiras o filamentos hechos de metales distintos y unidos en un extremo. Los cambios de temperatura en la unión de los metales generan un cambio en la fuerza electromotriz (FEM) entre los extremos. A medida que la temperatura cambia; la fuerza electromotriz disminuye o aumenta según la temperatura, pero lo hace de manera no lineal.

Existen varios tipos de termopares como se puede observar en el cuadro 3, estos tipos son generalmente comerciales.

**Cuadro 3. Tipos de termopares comerciales.**

Tipos	Rango de Temperatura	Incertidumbre
Tipo J	(0 – 750) °C	±2.2°C.
Tipo K	(-200 – 1250) °C	± 2.2°C.
Tipo E	(-200 – 900) °C	± 1.7°C.
Tipo T	(-250 – 350) °C	± 1.0°C.

Fuente: Los Autores.

En la figura 16 se tiene la ficha técnica de las diferentes termocuplas que se pueden encontrar en el mercado.

Figura 16. Ficha técnica termopares.

Tipo de elemento	CAD del cable	Aislante Usado	Tipo J hierro-Constantan	Tipo K CHROMEGA™-ALOMEGA™	Tipo T cobre-Constantan	Tipo E CHROMEGA™-Constantan
Cables pelados (sin aislante)	8 14 20 24	nada	Bare-8-J-12 Bare-14-J-12 Bare-20-J-12 Bare-24-J-12	Bare-8-K-12 Bare-14-K-12 Bare-20-K-12 Bare-24-K-12	Bare-8-T-12 Bare-14-T-12 Bare-20-T-12 Bare-24-T-12	Bare-8-E-12 Bare-14-E-12 Bare-20-E-12 Bare-24-E-12
Con aislantes redondos con un agujero	8 14 20 24	SH-1-8 SH-1-14 SH-1-20 SH-1-24	SH-1-8-J-12 SH-1-14-J-12 SH-1-20-J-12 SH-1-24-J-12	SH-1-8-K-12 SH-1-14-K-12 SH-1-20-K-12 SH-1-24-K-12	SH-1-8-T-12 SH-1-14-T-12 SH-1-20-T-12 SH-1-24-T-12	SH-1-8-E-12 SH-1-14-E-12 SH-1-20-E-12 SH-1-24-E-12
Con aislantes redondos con dos agujeros	8 14 20 24	DH-1-8 DH-1-14 DH-1-20 DH-1-24	DH-1-8-J-12 DH-1-14-J-12 DH-1-20-J-12 DH-1-24-J-12	DH-1-8-K-12 DH-1-14-K-12 DH-1-20-K-12 DH-1-24-K-12	DH-1-8-T-12 DH-1-14-T-12 DH-1-20-T-12 DH-1-24-T-12	DH-1-8-E-12 DH-1-14-E-12 DH-1-20-E-12 DH-1-24-E-12
Con un agujero aislante Fish-Spine	8 14 20	FS-260-8 FS-200-14 FS-110-20	FS-260-8-J-12 FS-200-14-J-12 FS-110-20-J-12	FS-260-8-K-12 FS-200-14-K-12 FS-110-20-K-12	FS-260-8-T-12 FS-200-14-T-12 FS-110-20-T-12	FS-260-8-E-12 FS-200-14-E-12 FS-110-20-E-12
con dos agujeros aislantes ovalados	8 14 20	OV-1-8 OV-1-14 OV-1-20	OV-1-8-J-12 OV-1-14-J-12 OV-1-20-J-12	OV-1-8-K-12 OV-1-14-K-12 OV-1-20-K-12	OV-1-8-T-12 OV-1-14-T-12 OV-1-20-T-12	OV-1-8-E-12 OV-1-14-E-12 OV-1-20-E-12

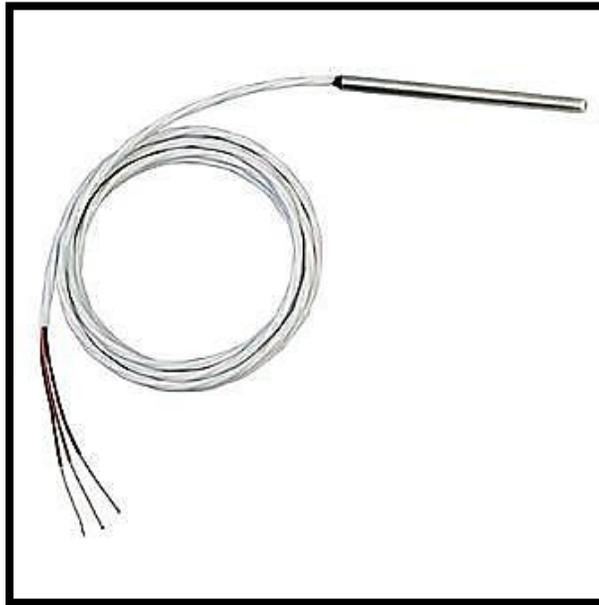
Fuente: OMEGA. Características técnicas de termopares según el tipo de elementos [en línea] <<https://bit.ly/35qlzAV>> [citado en 2 de agosto del 2019].

#### 6.4.1.2 RTD

Son dispositivos termométricos a base de la resistencia térmica de los materiales al aumentar o disminuir la temperatura, existen 2 grandes tipos de sensores a base de la resistencia de los materiales hacia los cambios de temperatura; estos son los RTD (Ver figura 17) y los termistores.

Los RTD se basan en el cambio de resistencia de los metales; donde los cambios se producen de manera semilineal conforme la temperatura varía.

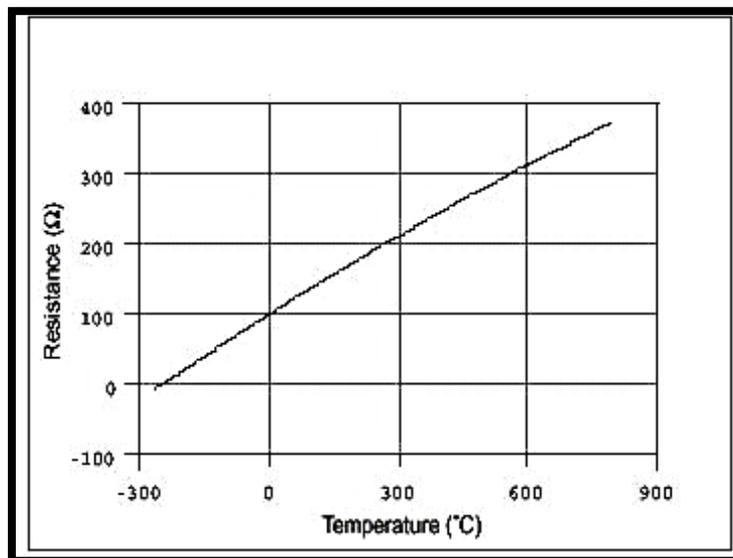
**Figura 17. Sensor RTD.**



Fuente: OMEGA. Sonda RTD corta [en línea] <<https://bit.ly/2MAImCy>> [citado en 4 de agosto de 2019].

Las RTD tienen un rango de medida de aproximadamente (-300 a 800) °C según el material con el cual estén fabricadas. En la figura 18, se tiene un ejemplo de esto.

**Figura 18. Curva de resistencia vs temperatura, RTD de platino.**



Fuente: NI. La curva de resistencia/temperatura para un RTD de platino de PT100 [en línea] <<https://bit.ly/2qaTXj1>> [citado en 5 de agosto del 2019].

### 6.4.1.3 Termistores

Los termistores (Ver figura 19) se basan en el cambio de resistencia en un semiconductor de cerámica y su comportamiento no es lineal con los cambios de la temperatura debido a que el componente cerámico tiene como entradas dos filamentos de distinto material que a veces es deformado al momento de la instalación lo que causa un comportamiento no lineal.

**Figura 19. Tipos de termistores.**



Fuente: RIVERGLENNAPTS. Ejemplos ilustrativos diferentes tipos de termistores existentes [en línea] <<https://bit.ly/2OHMNNj>> [citado en 6 de agosto de 2019].

Los termistores tienen un rango de medición aproximadamente de (-55 a 70) °C con un comportamiento exponencial de temperatura frente a la resistencia del material. Hay algunos termistores con revestimientos de epoxi para uso en temperaturas más bajas de aproximadamente (-50 a 150) °C & para temperaturas más altas se usa un revestimiento de vidrio con un rango aproximado de (50 a 300) °C.

### 6.4.1.4 Bimetálicos

Los dispositivos bimetálicos, como el de la figura 20, se basan en la diferencia en la tasa de dilatación térmica entre distintos metales. Están unidos diferentes fibras o filamentos de dos metales y cuando hay un aumento en la temperatura un lado se dilata más que el otro extremo y la curvatura resultante se traduce en una lectura de temperatura, la única desventaja frente a los RTD o termopares es que su sensibilidad es baja de manera que para aplicaciones médicas o de instrumentación no es ideal, y son utilizados principalmente en el sector industrial.

**Figura 20. Sensor bimetálico.**



Fuente: TERMOMETROS. Termómetros de dial con tira bimetálica y elementos internos en aleación de cobre [en línea] <<https://bit.ly/2oq9QBH>> [citado en 6 de agosto de 2019].

Los termómetros bimetálicos tienen un rango base de (-70 a 600) °C, mientras que las versiones a base de gas tienen un rango de (-200 a 700) °C.

#### **6.4.1.5 Dilatación de fluidos**

Son los dispositivos basados en la reacción de ciertos fluidos frente a la temperatura como el mercurio y el fluido orgánico, debido a que no usan energía eléctrica se usan frecuentemente de manera doméstica y medica debido a su alta sensibilidad; su única desventaja es que no generan datos almacenables ni que pueda ser transmitidos justo después de hacer la medida.

Los termómetros por dilatación de fluidos tienen un rango de base de (28 a 50) ° C, aunque varía según el fabricante y el país en el cual se expende.

#### **6.4.1.6 Cambio de estado**

Los sensores de cambio de estado están basados en etiquetas, gránulos, crayones, lacas o cristales líquidos cuya apariencia cambia cuando se alcanza cierta temperatura. Se usan mayormente en aplicaciones de control o en maquinaria pesada para conocer el estado térmico de motores o bombas de presión.

Algunas tecnologías para la medición de temperatura son las que se observan en el cuadro 4:

**Cuadro 4. Dispositivos de temperatura.**

Tipo	Descripción
KS103J2 (Superficie)	Termistor NTC 10KOHM 3892K, con un rango de (0 a 70) °C
MLX90614ESF (Superficie)	Sensor de temperatura superficial en placa de control. Con un rango de (-12 a 100) °C
DS1922L	Sensor digital de temperatura superficial, impermeable con un rango de (-10 a 65) °C

Fuente: Los Autores

### 6.4.2 Sensores de desplazamiento

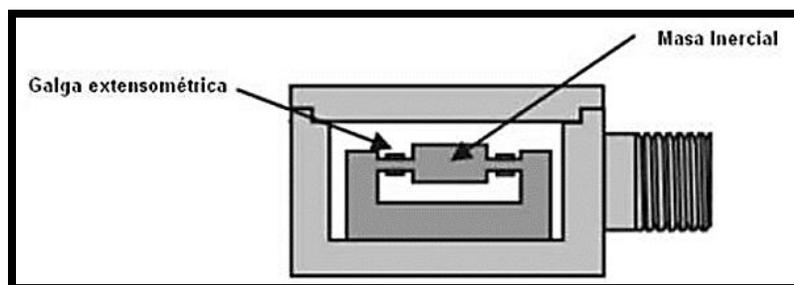
Existe una amplia gama de sensores de desplazamiento como los mecánicos, capacitivos, piezoeléctricos, piezoresistivos y térmicos.

El rango de los acelerómetros está condicionado por su gama (alta, pequeña o mediana), ya que todos tienen el mismo rango y solo varía su sensibilidad. El rango viene dado en unidades de gravedad (g). De este modo el rango base ronda alrededor de (2g a 250g) dependiendo de su aplicación ya que el de 250g se usa para cohetes y balística y el de 2g se usa para aplicaciones de pequeña escala.

#### 6.4.2.1 Acelerómetro mecánico

Usa una masa inerte y resortes elásticos como se observa en la figura 21, en donde los cambios de aceleración se miden con galgas extensiométricas que hacen la función de puente entre la carcasa del instrumento y la masa inercial. La aceleración produce una deformación de la galga que se traduce en un cambio en la corriente detectada por el puente de Wheatstone, en donde la deformación es directamente proporcional a la aceleración aplicada al acelerómetro.

**Figura 21. Acelerómetro mecánico.**

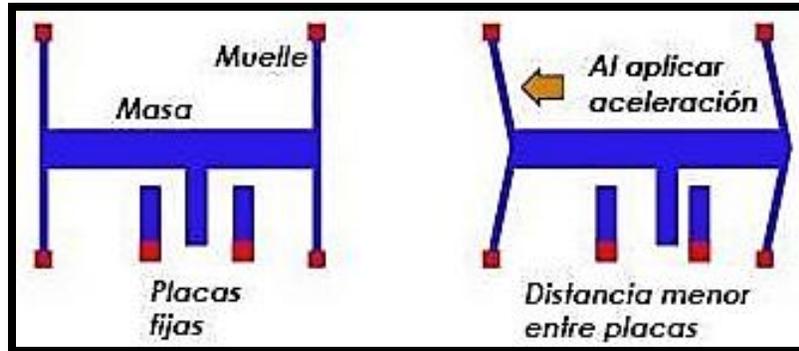


Fuente: INGMECAFENIX. Mecanismo interno acelerómetro mecánico [en línea] <<https://bit.ly/2nFNMCx>> [citado en 6 de agosto de 2019].

### 6.4.2.2 Acelerómetro capacitivo

Está conformado por varias capas capacitivas internas fijas o elásticas entonces al aplicar una fuerza de aceleración sobre el sensor, las capas se mueven una a otra ocasionando que la capacitancia entre ellas varíe, a partir de las variaciones de capacitancia se determina una aceleración. En la figura 22, se observa una representación gráfica de lo antes mencionado.

Figura 22. Estructura interna acelerómetro capacitivo.

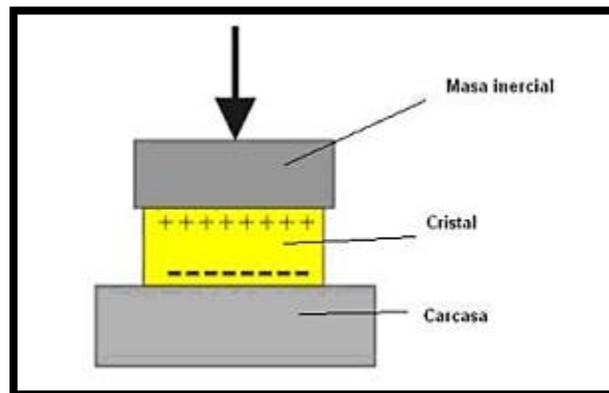


Fuente: INGMECAFENIX. Acelerómetro capacitivo, capas internas [en línea] <<https://bit.ly/32delsn>> [citado en 7 de agosto de 2019].

### 6.4.2.3 Acelerómetro piezoeléctrico

Su funcionamiento se basa en la deformación física del material causando una variación en la estructura cristalina y así cambiando las características eléctricas debido a que el material fue sometido a alguna fuerza externa lo que genera energía eléctrica que se traduce en medidas de aceleración de forma no lineal. En la figura. 23 se observa una representación gráfica de un acelerómetro piezoeléctrico.

Figura 23. Estructura acelerómetro piezoeléctrico.



Fuente: INGMECAFENIX. Componentes de acelerómetro piezoeléctrico [en línea] <<https://bit.ly/2B7kUWV>> [citado en 8 de agosto de 2019].

Algunas tecnologías usadas para la detección del desplazamiento son las que se presentan en el cuadro 5.

**Cuadro 5. Sensores para estimación del desplazamiento.**

Tipo	Descripción
ADXL362	Es un acelerómetro de 3 ejes de potencia y una latencia de salida de 100 Hz. <sup>120</sup>
GY-91 MPU9250	Sensor integrado con acelerómetro y giroscopio para mantener control de movimiento continuo.

Fuente: Los Autores.

### 6.4.3 Sensores de ritmo cardíaco.

Los sensores de pulso cardíaco o ritmo cardíaco son dispositivos que pueden ser utilizados por medio de encoders, entonces se pueden conectar estos sensores de manera exitosa. El sensor funciona por medios ópticos, pero primero posee una etapa de amplificación y un filtro para el ruido, lo cual produce que la señal de salida sea veraz y estable, estos sensores presentan un consumo de corriente bajo; alrededor de los 3 mA con una alimentación de 5V.

Solo existen dos tipos de sensores de ritmo cardíaco uno óptico y el otro por pulsos físicos.

#### 6.4.3.1 Sensor de ritmo cardíaco por oxígeno

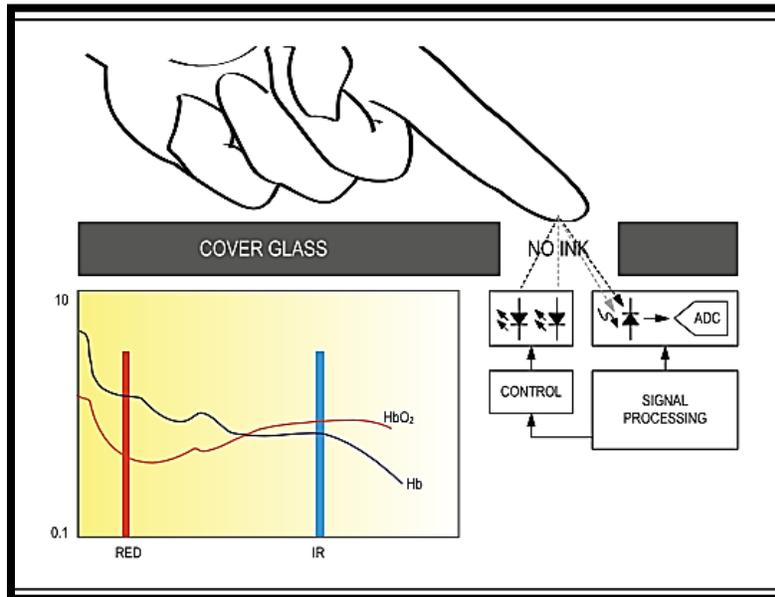
Este sensor se basa en la concentración de oxígeno que hay en determinadas zonas del cuerpo humano o animal como lo son la nuca, brazos, dedos y cuello. Para medir la concentración de oxígeno presente en la sangre, su funcionamiento se basa en la óptica ya que envía una señal con determinada longitud de onda que rebota en los glóbulos rojos si estos poseen exceso de oxígeno de manera que la señal es recibida por el receptor que luego con cierto tratamiento de información los datos son interpretados en pulsos por minuto.

La figura 24 ilustra como es el circuito interno y como funciona generalmente un sensor de ritmo cardíaco por oxígeno.

---

<sup>120</sup> L. Mattias Andersson, Hironao Okada, Ryotaro Miura, Yi Zhang, Koji Yoshioka, Hiroshi Aso y Toshihiro Itoh. Op. cit., p. 103.

**Figura 24. Sensor de ritmo cardíaco por oxígeno.**



Fuente: ELECTRONILB. Funcionamiento sensor ritmo cardíaco por oxígeno [en línea] <<https://bit.ly/32RjOL6>> [citado en 25 de octubre de 2019].

#### 6.4.3.2 Sensor de ritmo cardíaco por pulsos físicos.

Este tipo de sensor basa su lectura en los pulsos que generan las extremidades del cuerpo humano al ser expuestas a presiones externas, como ejemplo son los dispositivos clásicos que usan los médicos generales. Es necesario conocer cuántas pulsaciones por segundo genera el cuerpo humano para sincronizar las pulsaciones generadas por el dispositivo.

El cuadro 6 resume los diferentes métodos e indicadores del ciclo estral descritos previamente y algunos sensores.

**Cuadro 6. Indicadores del ciclo estral.**

Indicador	Descripción	Ejemplos de sensores
Vocalización	Latencia y frecuencia del evento	LM393 KY038
Temperatura	Cambios de temperatura corporal	KS103J2 MLX90614ESF
Movimiento/Desplazamiento	Aumentos o disminuciones del movimiento durante el evento de estro	ADXL362 GY-91 MPU9250
Ritmo Cardíaco	Aumento o disminución del ritmo cardíaco durante inicios del ciclo estral	XD-58C MAX30100

Fuente: Los Autores.

A continuación, en el cuadro 7, se hace clasificación de todos los sensores mencionados, desde los de temperatura hasta los acelerómetros. Estos últimos se utilizan para monitorear el desplazamiento de la vaca.

**Cuadro 7. Características de los diferentes sensores mencionados y sus rasgos de medición.**

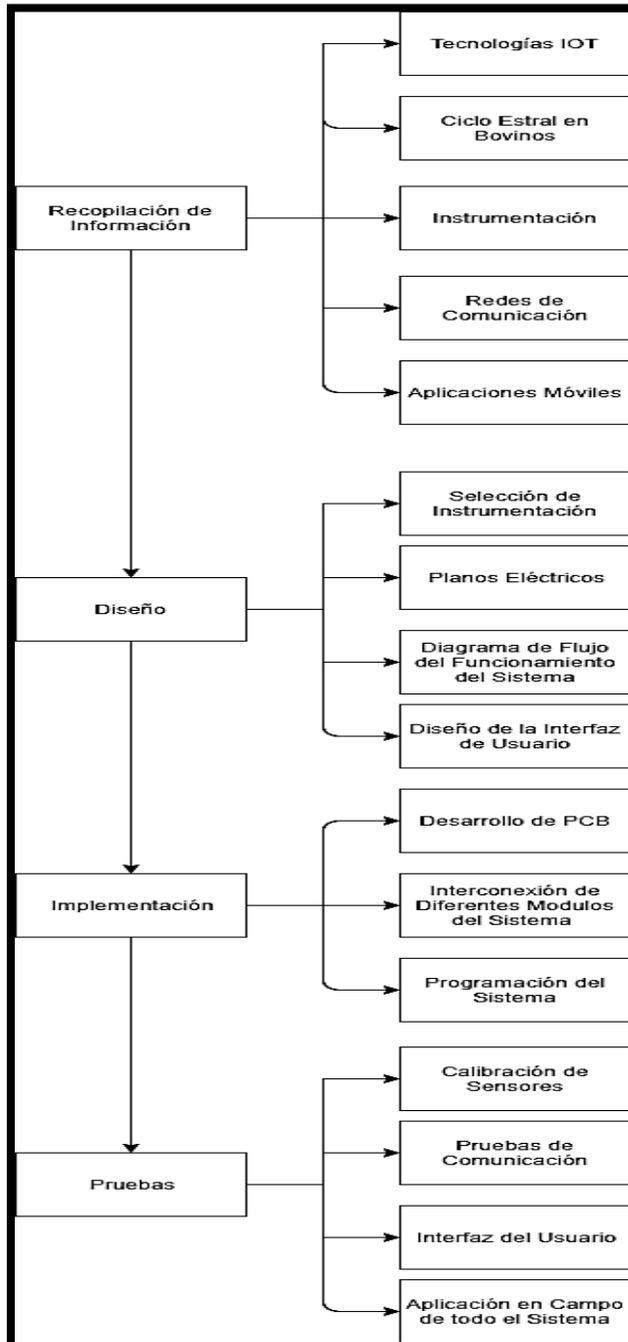
Sensor	Material		Aplicación	Rangos
Temperatura	-		-	-
Termopar	Materiales inoxidables		-	-
	Tipo J	Acero y cobre	Pequeña escala	(0 a 750) °C
	Tipo K	Acero y cobre	Industrial	(-200 a 1250) °C
	Tipo E	Acero y cobre	Industrial	(-200 a 900) °C
	Tipo T	Acero y cobre	Precisión	(-250 a 350) °C
RTD	Aluminio y acero		Industrial y pequeña escala	(-300 a 800) °C
Termistor	Cerámica y epoxi		Pequeña escala	(-55 a 70) °C
Termistor	Cerámica y vidrio		Industrial	(50 a 300) °C
Bimetálico	Aleación de filamentos		Industrial	(-70 a 600) °C
Bimetálico	Gas		Industrial	(-200 a 700) °C
Dilatación	Mercurio		Casero	(28 a 50) °C
Desplazamiento	Piezoeléctrico, mecánico o capacitivo		Pequeña escala o casero	2g
	Mecánico o capacitivo		Industrial	250g
Ritmo Cardíaco	Oximetría		Pequeña y mediana escala	1 BPM
	Presión		General	1 BPM

Fuente: Los Autores.

## 7 METODOLOGÍA

A continuación, en la figura 25, se presenta la metodología utilizada para el desarrollo de este proyecto.

Figura 25. Metodología propuesta.



Fuente: Los Autores.

## **7.1 Recopilación de Información:**

Como primer paso se realizarán consultas en las bases de datos, sitios web y artículos disponibles con el fin de recolectar la mayor cantidad de información posible que sea útil para el proyecto en cuestión.

### **7.1.1 Tecnologías IOT:**

El avance tecnológico está generando una interconexión total de todo aparato electrónico para facilidad y comodidad de las personas; por esta razón es bastante obvio y razonable aplicar el concepto de IOT a este trabajo de grado, precisamente para comodidad del usuario ya que se le presentarán los datos tomados por los sensores por medio de una aplicación móvil.

### **7.1.2 Ciclo Estral en Bovinos:**

Para tener una noción bastante amplia de la problemática se recolecta, separa y selecciona la información concerniente al comportamiento bovino más específico el comportamiento de las hembras; debido a que se desea estudiar su ciclo reproductivo. Para poder sensar las diferentes variables presentes en el ciclo estral se tiene que aplicar un estudio más riguroso para que la diferencia entre el estado natural y la etapa de estro sea apreciable tanto para los sensores como para todo el sistema en cuestión.

### **7.1.3 Instrumentación:**

Luego de haber filtrado toda la información obtenida; el enfoque cambia a los tipos de sensores existentes, específicamente los tipos de sensores que no sean invasivos o externos para evitar invadir el cuerpo del bovino en estudio; de manera que es posible realizar un enfoque en sensores no invasivos y de alta precisión.

### **7.1.4 Redes de Comunicación:**

Las redes son también una base fundamental para el desarrollo del trabajo de grado debido a que es el canal por el cual los datos circularan de manera que se estudia los diferentes tipos de redes existentes y en desarrollo, para que la pérdida de información sea mínima y el gasto en relación sea poco.

### **7.1.5 Aplicaciones Móviles:**

Las aplicaciones móviles resultan bastante útiles para sistemas de control o sensado como es aplicado en el trabajo de grado en cuestión; de manera que presentar los datos finales en una aplicación móvil que el usuario comprenda de manera clara. Resulta interactivo e innovador.

## **7.2 Diseño:**

Teniendo claros los pasos anteriores se procede a diseñar un prototipo que integre lo mejor y más viable de los pasos anteriores como lo son: Tipos de red, tipos de sensores y el comportamiento promedio del animal; para lograr una interpolación de variables como temperatura, distancia recorrida por el animal y el pulso cardíaco perfectamente medibles y expuestas al usuario de manera clara.

### **7.2.1 Selección de Instrumentación:**

Se requiere un dispositivo capaz de lograr la medición de todas las variables antes mencionadas para que el objetivo final que es predecir el ciclo de estro con una precisión bastante alta. Por tal razón la aplicación de varios sensores es necesaria pero que al mismo tiempo sean confiables para que la medida tenga la menor incertidumbre posible.

### **7.2.2 Planos Eléctricos:**

Se desea un esquemático que ocupe la menor área posible, para que el dispositivo de sensado final sea bastante práctico y fácil de usar; por tal razón se planea un esquema embebido, posiblemente a doble cara en el PCB.

### **7.2.3 Diagrama de Flujo del Funcionamiento del Sistema:**

La lógica que será empleada en el dispositivo debe ser bastante completa e integra para que no se presenten errores de estados ni bucles infinitos dentro del mismo de manera que su escritura será fiable; y será actualizada con cada error descubierto.

### **7.2.4 Diseño de la Interfaz de Usuario:**

La interfaz con el usuario debe ser lo más interactiva posible y sobre todo clara; para que cualquier persona sin conocimientos sobre aplicaciones tenga la capacidad de usarla y realizar cambios en el sistema a preferencia como: formato en el que se entregan los datos, tiempo de refresco de los datos, color de la plataforma virtual, el idioma y propiedades avanzadas de administrador.

## **7.3 Implementación:**

Como penúltimo paso se desea una comunicación correcta y completa de todos los sistemas para un correcto funcionamiento y reducir el índice de fallas por parte de los sensores o el sistema de almacenamiento de análisis, por tal razón una calibración final se realizará usando la información recolectada en el primer paso sobre calibración y acople de sistemas sensoricos.

### **7.3.1 Desarrollo de PCB:**

Como se mencionó anteriormente, el PCB (Printed Circuit Board) se busca que sea diseñado a doble cara para aprovechar al máximo la capacidad de

la PCB, claro está que el diseño estará sujeto a cambios según se vayan presentando dificultades de transmisión o comunicación.

### **7.3.2 Interconexión de Diferentes Módulos del Sistema:**

La red debe ser diseñada de tal manera que no llegue a saturarse o pierda información por la distancia del dispositivo sensor; como se pretende usar una red WMN (Wireless Mesh Network) o Red de malla inalámbrica; para centralizar y comandar todos los dispositivos necesarios para el sensado.

### **7.3.3 Programación del Sistema:**

La programación se basa principalmente en el lenguaje de programación C++, con algo de HTML o SQL para el uso de bases de datos y comandos de red para los debidos protocolos de envío de datos.

## **7.4 Pruebas:**

Luego de haber terminado toda la parte de diseño se ejecutan las pruebas del sistema en conjunto para observar su comportamiento en términos de comunicación, acople y sensado; corregir sus fallos será parte primordial de este numeral.

### **7.4.1 Calibración de Sensores:**

Los sensores como parte fundamental del correcto funcionamiento del dispositivo deben estar en óptimas condiciones y con la menor incertidumbre posible para alcanzar una precisión casi exacta.

### **7.4.2 Pruebas de Comunicación:**

La red, se busca, que sea WAN debe ser calibrada con el protocolo necesario para que sea eficiente y no afecte la redundancia.

### **7.4.3 Interfaz del Usuario:**

Interactiva y de fácil comprensión al final de las pruebas, en caso necesario tendrá un manual para el usuario, de manera que será bastante útil.

### **7.4.4 Aplicación en Campo de todo el Sistema:**

Como paso final se procede a realizar una prueba final sobre el correcto funcionamiento de todos los sistemas y que su comunicación sea correcta además de tener en cuenta factores que estarán presentes en las zonas rurales como: humedad, temperatura y atmosfera que puedan generar atenuaciones o perdidas en las comunicaciones que genere fallas en el mismo sistema de sensado; para así garantizar un perfecto funcionamiento.

## 8 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

### 8.1 DESCRIPCIÓN DEL LUGAR DE APLICACIÓN

El sistema de monitoreo está concebido para instalarse en una finca ubicada en el municipio de Cáqueza, Cundinamarca, más exactamente en la vereda Mercadillo Segundo. A continuación, se empezará con la descripción de la finca:

La finca se encuentra ubicada en las coordenadas **4.407793°N 73.991194°W**. En la finca se cuenta con servicio de internet satelital. La modificación que se debe hacer es un cambio de modem/router ya que el que existe no cuenta con unas antenas que brinden la potencia necesaria para lograr un rango de alcance de mínimo 100 m. En la figura 26 se muestran las medidas aproximadas que delimitan la finca.

**Figura 26. Medidas aproximadas de la finca en donde se realizarán las pruebas.**



Fuente: EARTH. Finca en la vereda ubicada en Mercadillo Segundo, Cáqueza-Cundinamarca.

La finca tiene un área aproximada de **10.603,92m<sup>2</sup>** y un perímetro de **402,16m**. Estas medidas también son proporcionadas por la herramienta de medición de Google Earth.

En la figura 27, se observa la casa en la que se encuentra el modem para el acceso a internet. Dicha casa está ubicada justo antes de que empiece el potrero en el cual se encuentran los bovinos hembra.

**Figura 27. Casa con el acceso a internet para subir los datos a la nube.**



Fuente: Los Autores.

El potrero en el cual se encuentran los bovinos hembra, se observa en la figura 28. Como se puede observar, existe un desnivel en el terreno en la parte izquierda, esto hace que no se pueda ver todo el potrero como tal. Este desnivel, también podría provocar una pérdida de la señal entre el transmisor y el receptor de los datos de monitoreo, ya que, sería una obstrucción al paso de la señal.

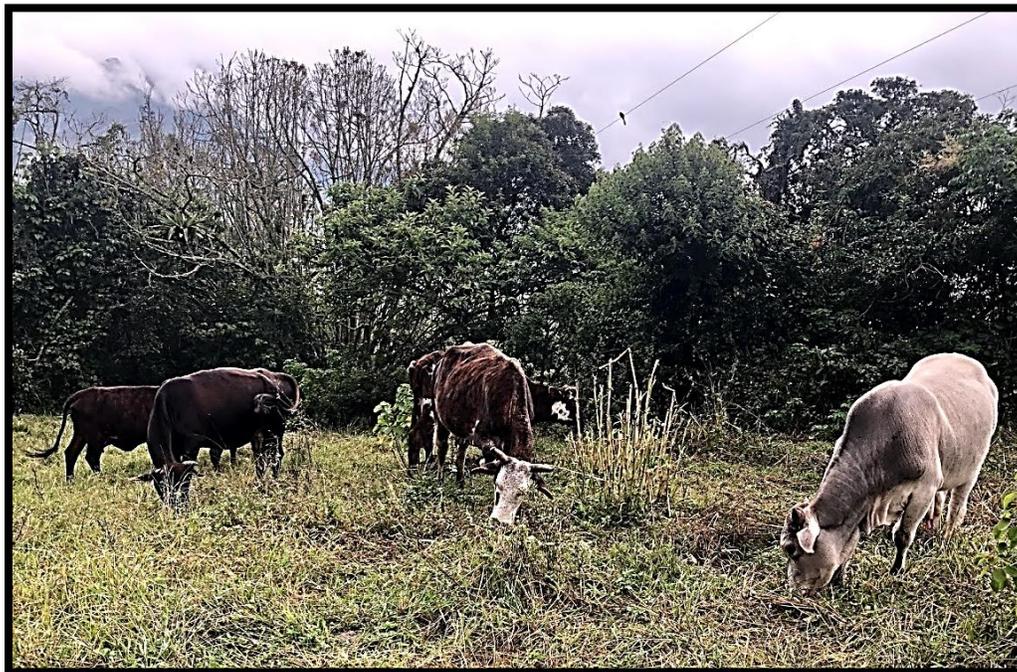
**Figura 28. Finca en la cual se realizarán las pruebas de campo.**



Fuente: Los Autores.

Entrando ya en el punto de interés, en la figura 29, se observan los bovinos hembra a las que se les hará el monitoreo. Como se puede observar, son 4 hembras y un macho (el bovino de cuello gris y de cuerpo blanco), todas ellas ya han tenido terneros, y se espera que pronto, alguna de ellas empiece con su ciclo estral.

**Figura 29. Ganado bovino a cuál se le harán las pruebas de monitoreo estral.**



Fuente: Los Autores.

En cuanto a los becerros que han nacido de los bovinos hembra anteriormente mencionados, en las figuras 30 y 31 se observan los dos más jóvenes y los tres más viejos respectivamente. En cuanto a los dos más jóvenes, estos son los únicos que actualmente continúan alimentándose con leche de sus madres. Los tres más viejos ya se alimentan con pasto, sal y caña que se les da regularmente.

**Figura 30. Los dos terneros más jóvenes actualmente en la finca.**



Fuente: Los Autores.

**Figura 31. Los tres terneros más adultos de la finca.**



Fuente: Los Autores.

## **8.2 SENSORES DISPONIBLES EN EL MERCADO.**

### **8.2.1 Sensores de ritmo cardíaco**

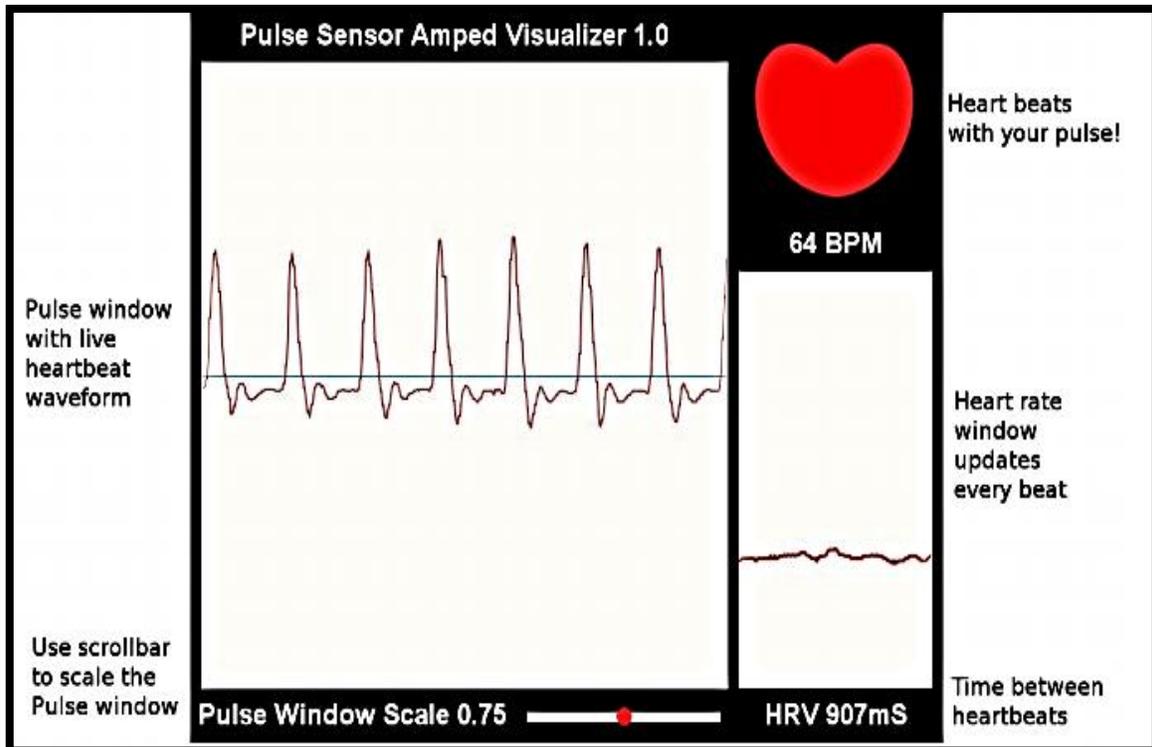
Hay una amplia gama de sensores, pero se proyectaron algunos que entran dentro del rango óptimo para la detección del estro en bovinos hembra. El ritmo cardíaco promedio de los bovinos hembra ronda alrededor de 60 latidos por minuto entonces

se determinó un rango en el cual se contempla tanto el estado del estro como cualquier anomalía que presente el corazón, el rango es (20 a 100) BPM.

### 8.2.1.1 Pulso Cardíaco: SEN-11574

El sensor SEN-11574 es un sensor de frecuencia cardiaca de superficie diseñado para la plataforma de Arduino, de fácil uso y aplicación ya que puede ser usado en las extremidades blandas como orejas, dedos o arterias subcutáneas. Posee un programa en código abierto que permite graficar el pulso en los siguientes rangos como se puede observar en la figura 32.

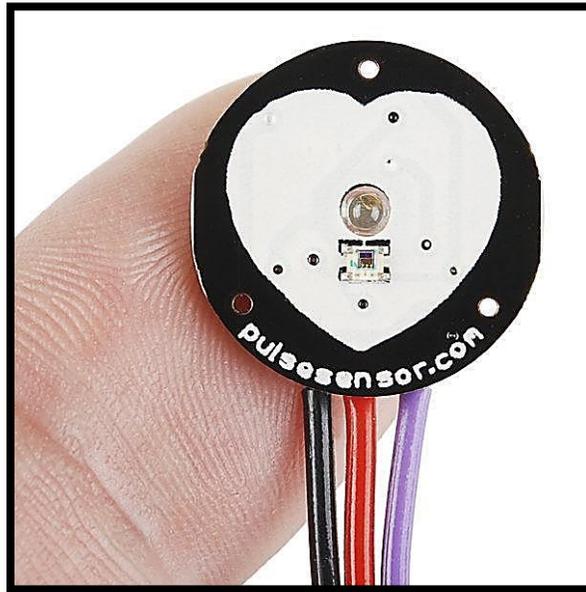
Figura 32. Gráfica de pulso cardíaco.



Fuente: ELECTRONILAB. Imagen gráfica alusiva al pulso cardíaco de una persona [en línea] < <https://bit.ly/2OKgJrZ> > [citado en 9 de agosto de 2019].

El sensor tiene un rango de medida aproximado de (0 – 200) con una incertidumbre de más o menos 1 BPM. En la figura 33 se observa el sensor y su aspecto físico.

**Figura 33. Sensor SEN-11574.**



Fuente: SIGMAELECTRONICA. Sensor de pulso cardíaco [en línea] <<https://bit.ly/315J2nq>> [citado en de agosto del 2019].

El SEN 11574 funciona por medio de luz infrarroja que al ser emitida rebota con los glóbulos rojos que mayor intensidad de oxígeno presenten, la onda que rebota ingresa en un sensor emisor el cual registra la intensidad de oxígeno presente en el sujeto de estudio, luego transforma la intensidad de oxígeno en latidos por minutos ya que existen una relación directa entre intensidad de oxígeno y el ritmo cardíaco.

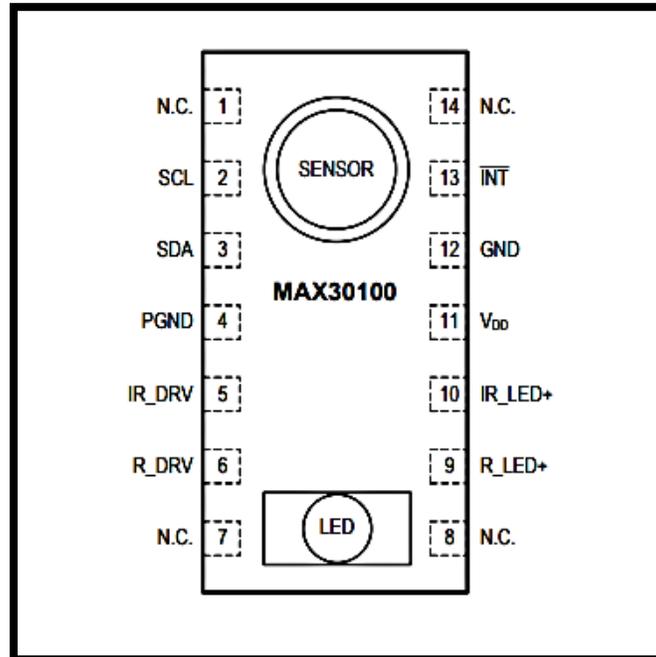
#### **8.2.1.2 MAX30100**

El MAX30100 es un dispositivo que contiene dos leds, uno infrarrojo y el otro emite luz roja; tanto el infrarrojo con la luz roja se usan para medir los niveles de oxígeno en la sangre, entonces cuando el corazón bombea sangre se genera un aumento en la sangre oxigenada como resultado del aumento de la misma y a medida que el corazón se relaja disminuye el nivel de sangre oxigenada al conocer el tiempo entre aumentos y disminuciones de sangre oxigenada, se puede determinar la frecuencia del pulso.

Debido a que la sangre oxigenada absorbe más luz infrarroja, mientras que la sangre desoxigenada absorbe más luz roja y permite el paso a mayor cantidad de luz infrarroja, lo que genera que posea un amplio rango de medida.

En la figura 34 se observa el esquema del sensor MAX30100 detallando la funcionalidad de sus pines.

**Figura 34. Esquema del sensor MAX30100.**



Fuente: Pulse Oximeter and Heart-Rate Sensor IC for Wearable Health<sup>121</sup> [citado en 8 de agosto de 2019].

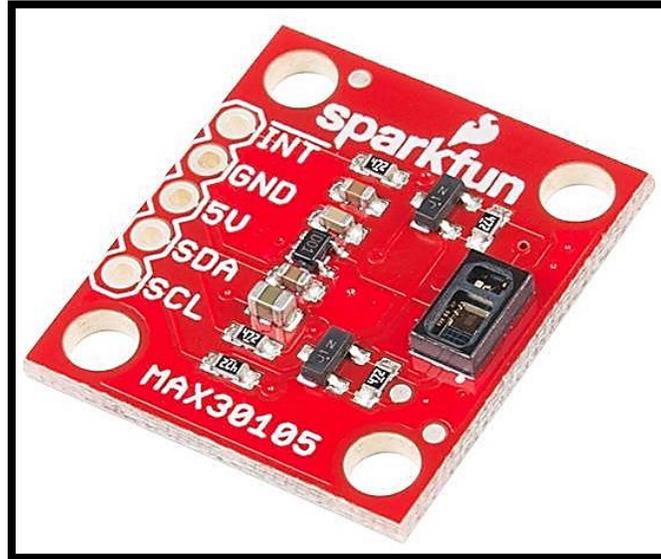
### 8.2.1.3 MAX30105

El integrado MAX30105 (Ver figura 35) es un módulo integrado que detecta partículas por medio de sus 2 LED's internos que realizan un barrido del área a la cual se le quiere practicar el estudio, ya que tiene gran rechazo a la luz ambiental y genera poco ruido es ideal para aplicaciones biomédicas que estén relacionadas con el estudio de oxigenación de la sangre o falta de ciertas proteínas en el cuerpo, además de ser usados como pulsioxímetro debido a que se puede relacionar la falta o el exceso de oxígeno en la sangre con el ritmo cardíaco. El sensor mide longitudes de onda debido a que sus receptores son LED's ópticos.

<sup>121</sup> MAXIM INTEGRATED, «Pulse Oximeter and Heart-Rate Sensor IC for Wearable Health», accedido 8 de agosto de 2019, <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/879178/MAXIM/MAX30100.html>.

Su rango de medida está entre los 490 a los 590 nm con una incertidumbre de 7pa.

**Figura 35. Sensor MAX30105.**



Fuente: SPARKFUN. Particle Sensor Breakout [en línea] <<https://bit.ly/2IMKRPX>> [citado en 11 de agosto de 2019].

En el cuadro 8 se hace la comparación de los sensores de pulso cardíaco anteriormente mencionados.

**Cuadro 8. Sensores de pulso cardíaco.**

Sensor	Costo (COP)	Consumo	Tamaño	Carcasa	Exterior	Exactitud	Rango	Operación
SEN-11574	24.990	3 - 4 mA	15.8 mm	PCB	No	±1 BPM	(0 a 200) BPM	Emisión y recepción de luz
MAX30100	22.000	1.2mA	(14 × 17) mm	PCB	Si	±10nm	(780 a 950) nm	Longitud de Onda
MAX30105	47.000	1.1mA	(20×18.5)m m	PCB	Si	7pA	(490 a 590) nm	Longitud de Onda

Fuente: Los Autores.

En el cuadro anterior se observa de color verde el sensor por el cual se optó, el módulo SEN11574 debido a que es de mayor precisión en cuanto a conversión de datos y posee un tamaño ideal para realizar adaptaciones según convenga, aunque es el de mayor consumo de energía tiene la estructura electrónica más sencilla ya que no requiere adecuaciones de hardware externas ni genera mayor consumo de recursos para la placa Node MCU.

## 8.2.2 Sensores de desplazamiento

Los bovinos hembra poseen la capacidad de correr en promedio alrededor de 40Km/h en su estado natural entonces para hacer una comparación entre la velocidad del bovino en el día estral conforme a su velocidad normal debe tomarse como punto medio 40Km/h.

Los acelerómetros funcionan por medio de varias placas flexibles separadas entre sí por un material dieléctrico para obtener una orientación general de la gravedad cuando sean energizados, la deformación de las placas genera una medida en  $\frac{m}{s^2}$ , según la calibración del dispositivo.

### 8.2.2.1 ADXL321JCP

Es un acelerómetro de baja potencia lo que genera bajo consumo además de ser delgado y capaz de almacenar datos en una memoria, tiene una medida de rango de  $\pm 18$  lo que lo hace bastante viable para medidas de precisión. En la figura 36 se observan las especificaciones técnicas de este sensor y en la figura 37 se observa únicamente lo que es el sensor como tal sin el módulo.

Figura 36. Especificaciones técnicas ADXL321JCP.

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
<b>SENSOR INPUT</b>					
Measurement Range	Each axis		$\pm 18$		g
Nonlinearity	% of full scale		$\pm 0.2$		%
Package Alignment Error			$\pm 1$		Degrees
Alignment Error	X sensor to Y sensor		$\pm 0.1$		Degrees
Cross Axis Sensitivity			$\pm 2$		%
<b>SENSITIVITY (RATIOMETRIC)<sup>2</sup></b>					
Sensitivity at X <sub>out</sub> , Y <sub>out</sub>	Each axis V <sub>s</sub> = 3 V	51	57	63	mV/g
Sensitivity Change due to Temperature <sup>3</sup>	V <sub>s</sub> = 3 V		0.01		%/°C
<b>ZERO g BIAS LEVEL (RATIOMETRIC)</b>					
0 g Voltage at X <sub>out</sub> , Y <sub>out</sub>	Each axis V <sub>s</sub> = 3 V	1.4	1.5	1.6	V
0 g Offset vs. Temperature			$\pm 2$		mg/°C
<b>NOISE PERFORMANCE</b>					
Noise Density	@ 25°C		320		$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ rms
<b>FREQUENCY RESPONSE<sup>4</sup></b>					
C <sub>x</sub> , C <sub>y</sub> Range <sup>5</sup>		0.002		10	$\mu\text{F}$
R <sub>RLT</sub> Tolerance			32 $\pm$ 15%		k $\Omega$
Sensor Resonant Frequency			5.5		kHz
<b>SELF-TEST<sup>6</sup></b>					
Logic Input Low			0.6		V
Logic Input High			2.4		V
ST Input Resistance to Ground			50		k $\Omega$
Output Change at X <sub>out</sub> , Y <sub>out</sub>	Self-test 0 to 1		18		mV
<b>OUTPUT AMPLIFIER</b>					
Output Swing Low	No load		0.3		V
Output Swing High	No load		2.6		V
<b>POWER SUPPLY</b>					
Operating Voltage Range		2.4		6	V
Quiescent Supply Current			0.49		mA
Turn-On Time <sup>7</sup>			20		ms
<b>TEMPERATURE</b>					
Operating Temperature Range		-20		+70	°C

Fuente: Small and Thin  $\pm 18$  g Accelerometer<sup>122</sup> [citado en 15 de agosto de 2019].

<sup>122</sup> ANALOG DEVICES, «Small and Thin  $\pm 18$  g Accelerometer», accedido 18 de agosto de 2019, <https://www.sigmaelectronica.net/manuals/ADXL321JPC.pdf>.

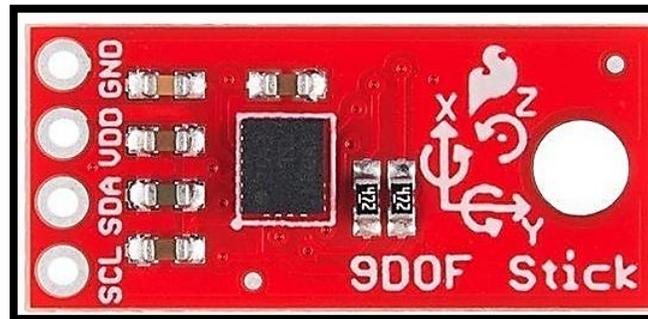


### 8.2.2.3 SEN-13944

El sensor SEN 13944 (Ver figura 39) tiene un sensor de aceleración lineal digital además de un sensor magnético, tiene una escala de rango entre 2g, 4g, 8g y 16g ajustable a petición del usuario.

Posee una interfaz I2C para la recolección de datos cada determinado tiempo además de poder ser configurado por tiempos para su correspondiente apagado o encendido para una gestión inteligente de energía.

Figura 39. Sensor SEN-13944.



Fuente: SPARKFUN. 9DoF Sensor Stick [en línea] <<https://bit.ly/2ILQspu>> [citado en 21 de agosto del 2019].

### 8.2.2.4 MPU6050

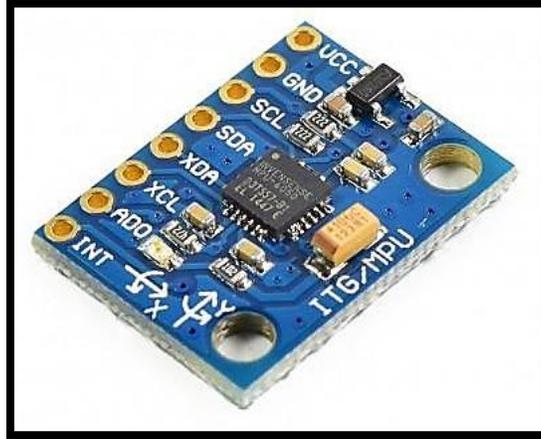
EL MPU6050 (véase figura 40) es una unidad de medición inercial o IMU (Inertial Measurement Units) de 6 grados de libertad (DoF) pues combina un acelerómetro de 3 ejes y un giroscopio de 3 ejes. Este sensor es muy utilizado en navegación, goniometría, estabilización, etc.<sup>123</sup>

Posee una interfaz de I2C mediante la cual envía los datos recolectados tanto en el acelerómetro como en el giroscopio. Este módulo no muestra los datos directamente en unidades de  $\frac{m}{s^2}$  en el acelerómetro, sino que los muestra en unidades de gravedad ( $g$ ) que van desde  $-2g$  hasta  $+2g$ . Lo mismo sucede con el giroscopio muestra un

<sup>123</sup> «Tutorial MPU6050, Acelerómetro y Giroscopio», accedido 26 de agosto de 2019, [https://naylorlampmechatronics.com/blog/45\\_Tutorial-MPU6050-Aceler%C3%B3metro-y-Giroscopio.html](https://naylorlampmechatronics.com/blog/45_Tutorial-MPU6050-Aceler%C3%B3metro-y-Giroscopio.html).

valor entero que va desde  $-32768$  hasta  $+32767$ . Para mostrar los valores en  $\frac{m}{s^2}$  y  $^{\circ}$  se deben escalar los valores antes mencionados.

**Figura 40. Sensor MPU6050.**



Fuente: NAYLAMPMECHATRONICS. Modulo acelerómetro y giroscopio MPU6050 [en línea] <<https://bit.ly/2IK6sjf>> [citado en 26 de agosto de 2019].

En el cuadro 9, se hace la comparación entre los diferentes acelerómetros que podrían ser utilizados para el monitoreo del desplazamiento.

**Cuadro 9. Sensores de desplazamiento.**

Sensor	Costo (COP)	Consumo	Tamaño	Carcasa	Exterior	Exactitud	Rango	Operación
ADXL321JCP	41.350	0.49 mA	4x4 mm	PCB	No	±0.2g	18g	Cambio de placas en 1 eje
LSM303C	65.450	0.180 mA	(2x2) mm	PCB	No	±0.04g	2g, 4g y 8g	Cambio de placas en 3 ejes
SEN13944	52.360	0.6 mA	(3.5x3) mm	PCB	No	±0.09g	2g, 4g, 8g y 16g	Cambio de placas y efecto magnético
MPU6050	10.000	3.6 mA (Giroscopio) 500 µA (Acelerómetro)	(4x4x0.9) mm	PCB	No	±0.02	2g, 4g, 8g y 16g	Cambio de placas.

Fuente: Los Autores.

En el cuadro anterior se observa de color verde el sensor por el cual se optó, el módulo MPU6050, por razones de costo, tamaño y precisión; el tamaño es bastante importante al momento de unificar todos los dispositivos en un solo elemento sensor, además el costo es mucho menor en comparación a los otros módulos, si bien es cierto que posee un consumo de energía mayor al resto se complementa con la precisión que ofrece.

### 8.2.3 SENSORES DE TEMPERATURA

La temperatura es uno de los indicadores de ciclo estral más frecuentes y confiables dentro de los antes mencionados, entonces se debe establecer ciertos sensores que sean capaces de monitorear el rango de temperatura que presentan los bovinos hembra en el inicio de su ciclo estral o cualquier anomalía térmica que sean síntomas de enfermedad, por estas razones se establece un rango de temperatura óptimo para la búsqueda de

sensores que cumplan con el siguiente rango (30 a 50) °C, el rango antes mencionado permite hacer un sondeo bastante amplio del estado del ciclo del bovino hembra o la salud actual del mismo.

#### **8.2.3.1 DS1922L**

El sensor DS1922L (Ver figura 41) es un sistema robusto que mide temperaturas y registra su resultado en una memoria cifrada, la recolección de datos en la memoria se define por el usuario para un total de 8192 lecturas de 8 bits, se puede programar para tener un inicio inmediato o después de cierto retraso definido por el usuario además de proteger sus datos por medio de una contraseña.

Se construyó de manera duradera ya que su encapsulado es de acero inoxidable ideal para trabajos a la intemperie.

**Figura 41. Sensor DS1922L.**



Fuente: ZA.RS-ONLINE. Temperature Sensor -40 → +85 °C ±0.5°C 1-Wire, 2-Pin F5 MicroCan [en línea] <<https://bit.ly/2VBeQQ1>> [citado en 26 de agosto de 2019]

#### **8.2.3.2 KS103J2**

El KS103J2 (Ver figura 42) es un sensor de alto costo, pero con una alta precisión y una estabilidad en su comportamiento, para la detección de temperatura son particularmente adecuados debido a la composición de su sistema cerámico y vidrio lo que permite una absorción de calor a través de su superficie, es ideal para aplicaciones a pequeña escala para interiores.

**Figura 42. Sensor KS103J2.**

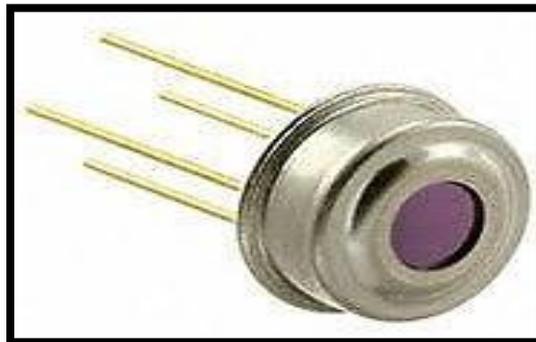


Fuente: LITTLELFUSE. KS103J2 - KS Series [en línea] <<https://bit.ly/2q4hd1W>> [citado en 26 de agosto del 2019].

### **8.2.3.3 MLX90614**

Este sensor permite una lectura de temperatura de alta precisión sin contacto con el objeto de estudio lo que lo hace ideal para lecturas en zonas residenciales y en ambientes estáticos en donde el objeto de estudio es un ente inamovible. Este sensor se puede observar en la figura 43.

**Figura 43. Sensor MLX90614.**



Fuente: DIGIKEY. MLX90614ESF-BAA-000-TU [en línea] <<https://bit.ly/2q1wFvI>> [citado en 26 de agosto de 2019].

En el cuadro 10, se tiene la comparación de los sensores de temperatura que se mencionaron anteriormente.

**Cuadro 10. Sensores de temperatura.**

Sensor	Costo (COP)	Consumo	Tamaño	Carcasa	Exterior	Exactitud	Rango	Operación
DS1922L	256.646	20mA	17.35 mm	Pastilla	Si	±0.5°C	(-40 a 85) °C	Contacto
KS103J2	15.000	10mA	38.1mm	Cerámica	No	±0.1°C	(-80 a 135) °C	Diferencia de filamento
MLX90614	33.696	25mA	17.20mm	Aluminio	Si	±0.5°C	(-70 a 125) °C	Longitud de Onda
DS18B20	20.000	(0.1 – 2)mA	(10 a 50)mm	Aluminio	Si	±0.5°C	-200 a 350	Contacto Superficial

Fuente: Los Autores.

En el cuadro anterior se observa de color verde el sensor por el cual se opta, la termocupla DS18B20 debido a costos, resistencia a exteriores y consumo frente a otros sensores es el que menos consume energía y la energía es un factor importante ya que todo el sistema será alimentado por una batería.

## 8.2.4 UNIDAD DE CONTROL Y UNIDAD DE COMUNICACIÓN

En esta sección se hace la comparación de dos unidades de control y cuatro unidades de comunicación. Esta comparación se hace lo más detallada posible en cuanto a características como cantidad de pines GPIO, procesador, pero, lo primordial es evaluar el consumo de cada uno de estos componentes. Para elegir la unidad de control, se hace una comparativa en el cuadro 11. La característica principal que se busca es que sea de bajo consumo energético.

**Cuadro 11. Comparación placas de desarrollo Arduino UNO R3 y RaspBerry PI 3 Model B.**

Características	Arduino UNO R3	Raspberry PI Model B
Voltaje de salida	3.3 - 5 V	3.3 V
Voltaje de Alimentación	5 – 12 V	5 V
Consumo de energía	23 $\mu$ A - 45 mA	300 mA - 1.34 A
Pines GPIO	22	17
Entrada Analógica	Sí	No
Salida de Video	No	HDMI
DSL	No	Sí
CSL	No	Sí
Salida de Audio	No	Conector HDMI/audio
Ethernet	No	Sí
Wi-Fi	No <sup>(3)</sup>	Sí
Bluetooth	No <sup>(3)</sup>	Sí
Almacenamiento Externo	No	microSD
Almacenamiento Interno	32 KB	No
CPU	Atmel AT-mega328P (16 MHz, un núcleo)	ARM Cortex-A53 (1,2 GHz, cuatro núcleos)
GPU	No	Broadcom VideoCore IV
RAM	2 KB	1 GB
Sistema Operativo	No	Linux, Windows 10
Código Abierto	Sí	Parcialmente
Costo [COP] <sup>(2)</sup>	85.900	120.400

<sup>(1)</sup> El consumo de energía varía ampliamente dependiendo del modo de operación y la demanda de carga.  
<sup>(2)</sup> Precios listados más bajos, excluyendo impuestos.  
<sup>(3)</sup> La placa es capaz de usar la tecnología con la ayuda de periféricos.

Fuente: Los Autores.

Se elige el Arduino UNO, ya que este es el que presenta un consumo mucho más bajo en comparación con la Rasperry PI Model B, que para funcionar al tope de su capacidad necesita de hasta 1.34 A y también porque al comparar los precios (colores verde y rojo) de estas dos placas, resulta que la Rasperry PI es aproximadamente un 40% más cara que la tarjeta de Arduino. Pero por algunas razones que se mencionan más adelante, la opción de usar una placa de Arduino **UNO R3** se descarta.

En el cuadro 14, se tiene la comparación entre los diferentes módulos de comunicación cotejados para la transmisión de datos a la aplicación. Al igual que con la unidad de control, la característica principal a tener en cuenta es el consumo energético, inmediatamente después de este, se tiene en cuenta el alcance y precio.

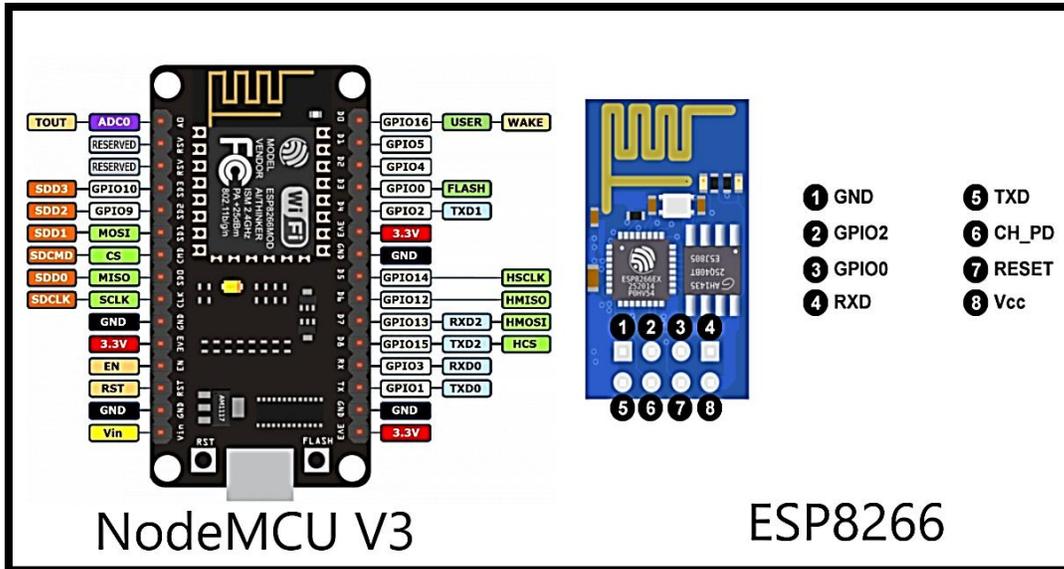
**Cuadro 12. Comparación módulos de comunicación.**

Características		NodeMCU V3	ESP8266	ESP32	XBee SX 868
Procesador		Tensilica L106 32-bit (80 - 160MHz)	Tensilica L106 32-bit (80 - 160MHz)	Xtensa® LX6 32-bit (160 - 240 MHz)	Transceptor ADF7023, Cortex™ -M3 EFM32LG230F256 @ 48 MHz
Potencia	Voltaje de Alimentación	3.3 V	3 - 3.6 V	2.3 - 3.6 V	2.4 - 3.6 V
	Corriente de Transmisión	215 mA	215 mA	240 mA	55 mA
	Corriente de Recepción	62 mA	62 mA	100 mA	40 mA
	Corriente en modo hibernación	10 µA	10 µA	5 µA	1.8 µA
	Voltaje de Salida	3.3 V	3.3 V	3.3 V	3.3 V
Pines GPIO		17	8	36	13
RAM		32KB + 96KB	64 KB + 96 KB	520 KB	-
Memoria Flash		512KB - 16MB	512KB - 16MB	11 MB	-
Topología de Red		Wi-Fi Direct (P2P), soft-AP.	Wi-Fi Direct (P2P), soft-AP.	Wi-Fi Acces point & Station	DigiMesh®, repetidor, punto a punto, punto a multipunto, punto a punto
Banda de Frecuencia		2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz	863 MHz - 870 MHz
Alcance		~100 m	~100 m	~100 m	Hasta 14,5 km con antena de 2,1 dBi
Costo (COP)		26.200	17.000	50.000	76.300

Fuente: Los Autores.

Aunque el módulo NodeMCU tiene características similares al módulo ESP8266, no son el mismo módulo. El NodeMCU es un módulo que se puede programar directamente desde la IDE de Arduino, es decir, no se precisa tener un Arduino para poder trabajar con las funcionalidades de comunicación Wi-Fi. Por otro lado, este módulo también tiene más pines GPIO, los cuales se pueden utilizar para propósitos generales como conversión ADC. A continuación, en la figura 44, se puede apreciar la diferencia entre estos dos módulos.

Figura 44. Comparación NodeMCU y ESP8266.



Fuente: Los Autores.

En un principio el módulo de comunicación elegido es el ESP8266 ya que en relación consumo-precio, pero por problemas técnicos como la relación de tiempo entre envío de datos y configuración del módulo por medio de comandos Hayes, causaba pérdida de datos y reconfiguraciones en el modo de operación del módulo ESP8266 además de presentar problemas de comunicación entre el Arduino Nano y el módulo por cuestiones de reinicio, la salida transmisora como receptora del módulo entraba en conflicto, lo que causaba pérdida de datos, por esas razones se decide optar por el módulo **NodeMCU V3** al hacer esto también se elimina la necesidad de usar una placa de Arduino UNO R3 ya que cuenta con características similares. Se puede programar IDE (Integrated Development Environment) de Arduino y usar los pines GPIO, esto gracias a que el sistema no requiere usar una excesiva cantidad de pines de entrada o de salida.

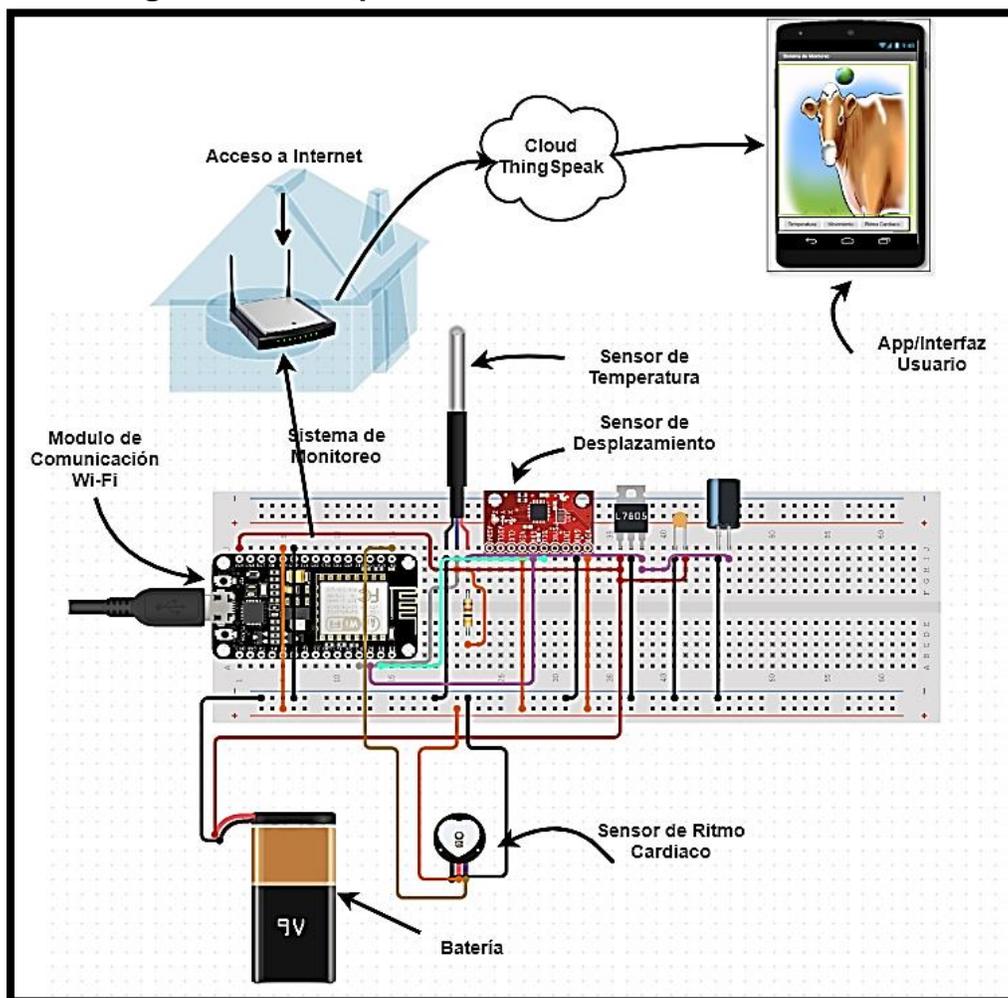
## 9 DISEÑO

Teniendo en cuenta las características de la finca, se requiere un alcance de mínimo 100 metros para el dispositivo de comunicación. El sistema de monitoreo dispondrá de los siguientes elementos. En la sección anterior se describió los componentes específicos a utilizar:

- Una unidad de control y comunicación.
- Sensor de temperatura.
- Sensor de desplazamiento.
- Sensor de ritmo cardíaco.
- Interfaz de usuario.

En la figura 45 se presenta un diagrama general del sistema.

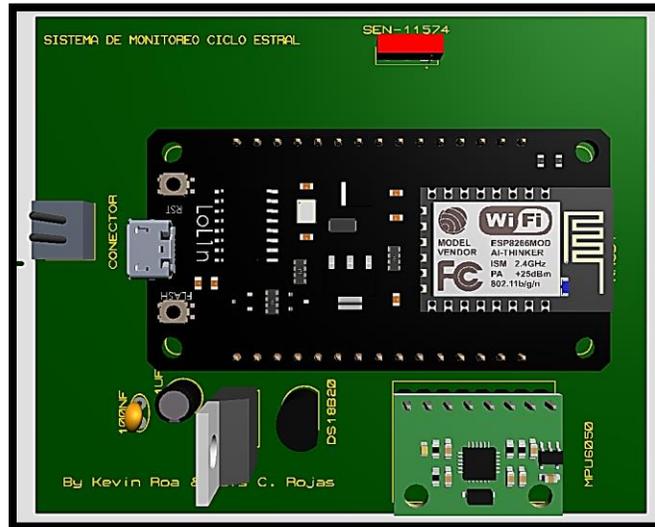
**Figura 45. Diagrama de componentes del sistema de monitoreo.**



Fuente: Los Autores.

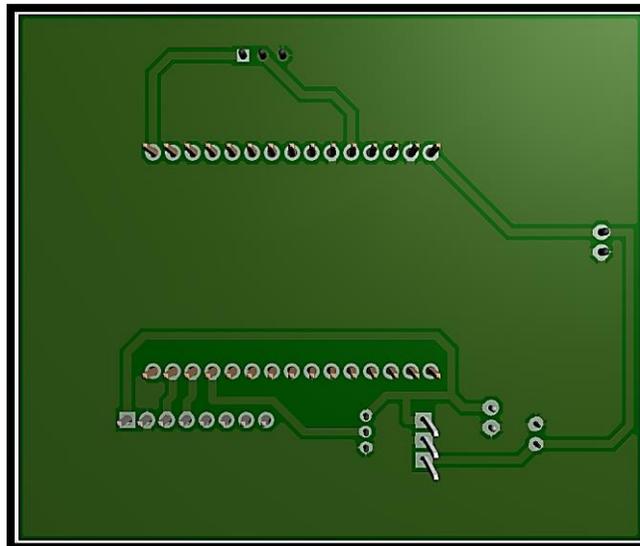
En la figura 46, se observa el diseño en PCB del sistema de monitoreo. Este diseño se realizó en el software Proteus. Además de los sensores y el módulo NodeMCU, cuenta con un circuito regulador de voltaje, el cual permite que se alimente tanto el módulo como los sensores, haciendo que la placa no se dañe en caso de que un sensor fallara consumiendo demasiada corriente. Cabe anotar que tanto el sensor de temperatura como el de pulso (color rojo) no coinciden con los sensores reales, esto se debe a que en Proteus no se tiene el esquema en 3D para dichos sensores. En la figura 47 se observa la vista inferior de la PCB.

**Figura 46. Diseño PCB sistema de monitoreo (Vista superior).**



Fuente: Los Autores.

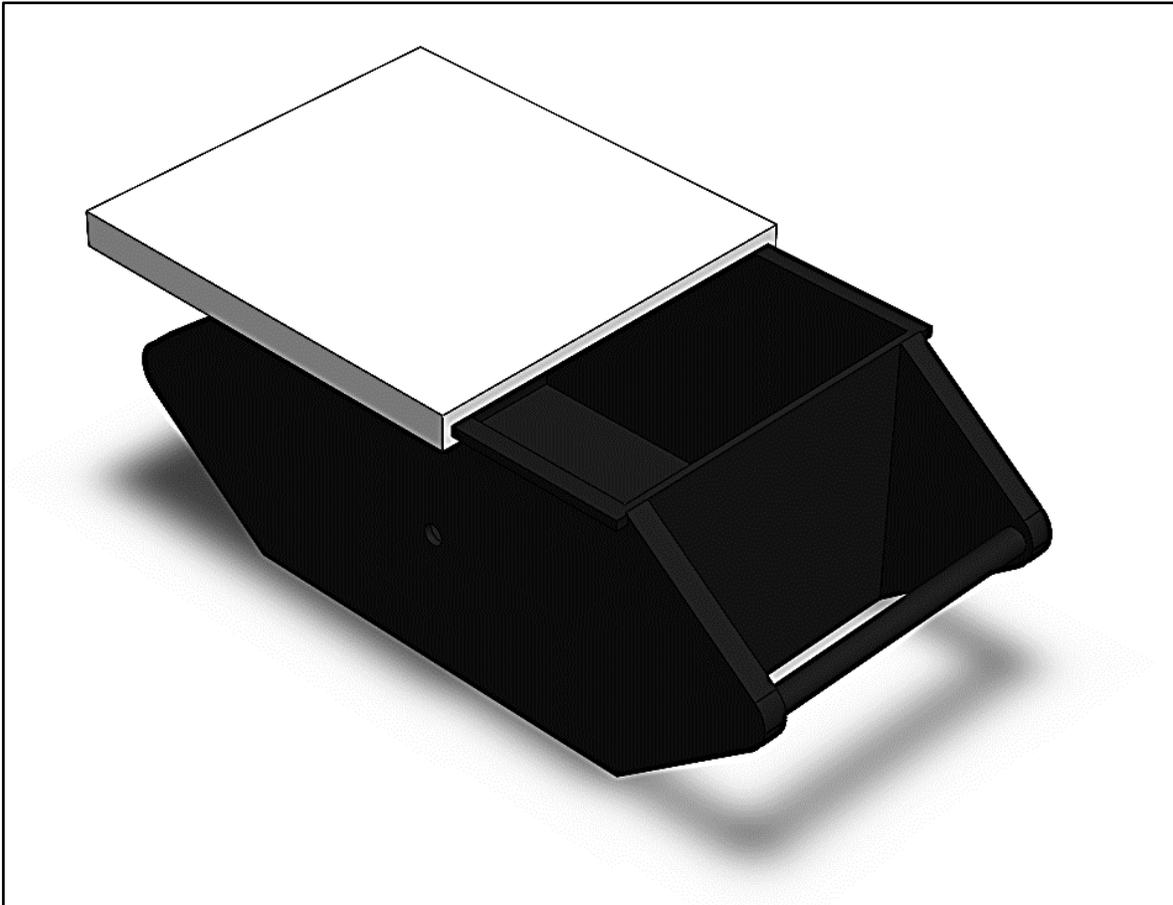
**Figura 47. Diseño PCB sistema de monitoreo (Vista inferior).**



Fuente: Los Autores.

Para el diseño 3D de la caja contenedora del sistema, se utilizó la herramienta SolidWork. La caja se hizo en dos partes. La primera que se diseñó fue la caja como tal, considerando las medidas de la PCB y cómo iría sujeta al animal. Para esto cuenta con dos asas o aberturas estilo polea, que permiten colocar una correa. Lo segundo fue la tapa para poder sellar todo el contenido de la caja. En la figura 48 se observa el ensamble de las dos piezas.

**Figura 48. Diseño de caja contenedora del sistema de monitoreo.**



Fuente: Los Autores.

## 10 IMPLEMENTACIÓN

### 10.1 CAPTURA DE VARIABLES

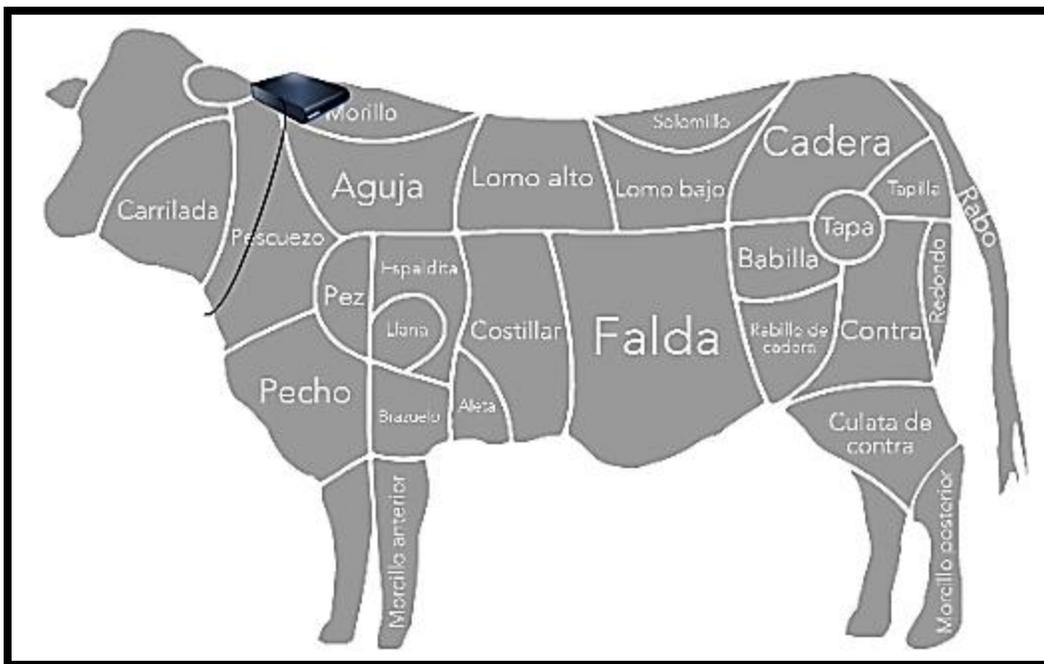
Previamente se identificaron algunas variables indicadoras del ciclo estral, las cuales son temperatura, ritmo cardíaco y desplazamiento. Luego, en el capítulo anterior, se identificaron los sensores capaces de capturar los datos para cada variable en específico, estos sensores son los siguientes:

1. Para ritmo cardíaco: SEN-11574.
2. Para temperatura: SEN DS18B20.
3. Para desplazamiento: MPU-6050.

Ahora bien, se procede a describir el método de acondicionamiento a nivel de hardware para cada sensor, para lo cual se mostrará la forma correcta de conexión para la placa Node MCU y así lograr una captura de datos exitosa.

Para mantener a todos los sensores fijos y en contacto con el bovino hembra se hace uso de una cubierta o armadura externa que contiene tanto a la placa, batería y sensores a modo de collar. Este dispositivo está asegurado alrededor del cuello del bovino hembra y se ubica en la parte superior del murillo o nuca del animal. En la figura 49 se observa la forma en la cual el dispositivo final se ubica para la captura de datos.

**Figura 49. Ubicación del sistema de monitoreo en el bovino hembra.**



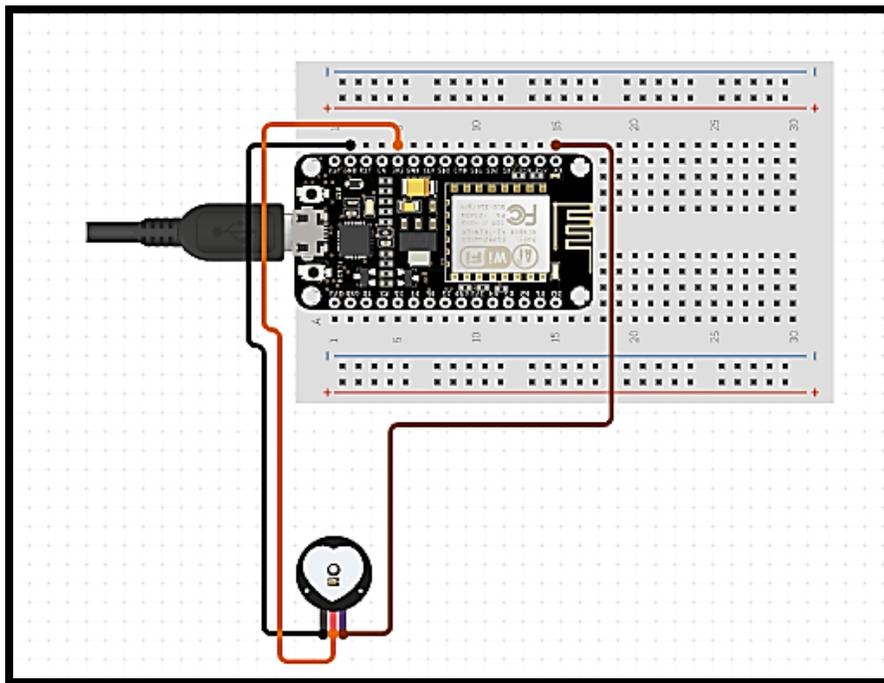
Fuente: Los autores

Luego de establecer la ubicación del dispositivo se continúa con el acondicionamiento de los sensores.

El primer sensor, el SEN-11574, que es el encargado de medir el ritmo cardíaco; para lograr una captura de datos óptima se debe garantizar buen contacto con la piel del bovino durante la toma de datos, ya que, si sufre una desconexión física momentánea, la continuidad de los datos se pierde causando errores en la captura de los mismos. De manera que este sensor debe estar fuertemente asegurado para no perder datos ni introducir errores en las medidas. Para obtener una captura de datos exitosa, este sensor debe estar ubicado justo debajo de la cubierta y aislado del resto del sistema, logrando así un contacto fijo sobre el murillo del animal donde se encuentra un punto de medida del ritmo cardíaco bovino.

En la figura 50 se observa el esquema básico para lograr capturar datos por medio del sensor SEN-11574. Dicho esquema se realizó en la plataforma circuito.io.

**Figura 50. Esquema básico de conexión del sensor SEN-11574.**

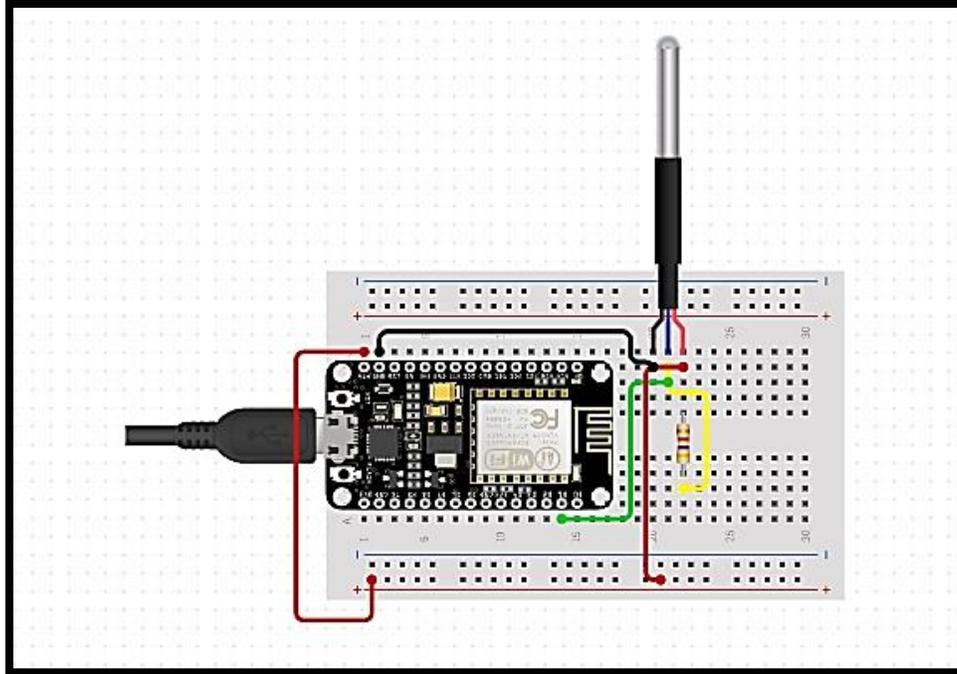


Fuente: Los Autores.

El segundo sensor, el SEN DS18B20, mide la temperatura corporal de cualquier ser vivo con una precisión de  $\pm 0.5$  °C. Para lograr esto solo se debe conectar el sensor a un módulo que permite la interpretación entre el sensor y la tarjeta NodeMCU V3. A fin de mantener una toma de datos continua con el sensor de temperatura, se debe alejar levemente de la cubierta el filamento metálico que toma los datos de temperatura y se adhiere con un parche dérmico al costado izquierdo o derecho del

animal. En la figura 51 se observa el esquema básico de conexión para operar de manera exitosa el sensor de temperatura.

**Figura 51. Esquema básico de conexión para el sensor DS18B20.**



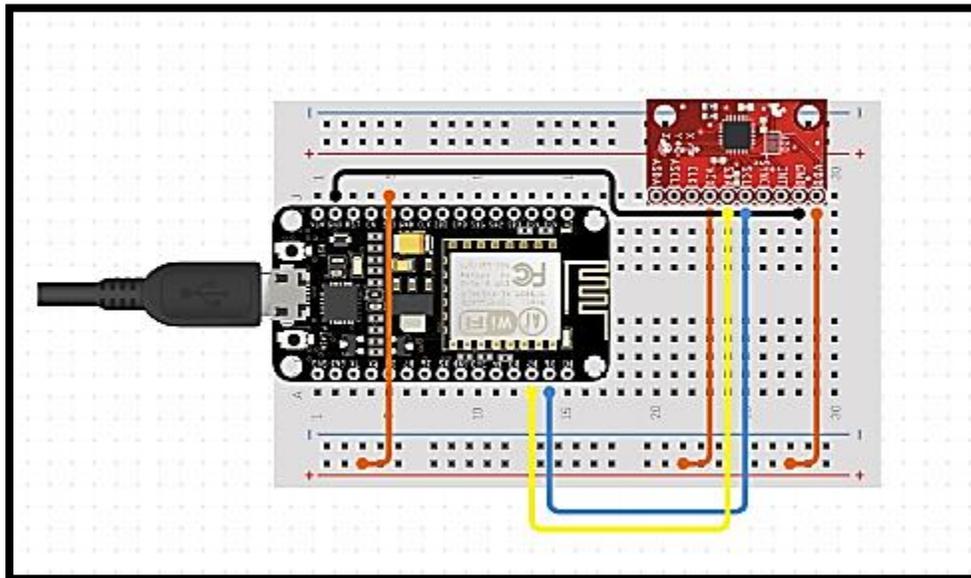
Fuente: Los Autores.

El ultimo sensor es el MPU-6050, el cual es capaz de medir velocidad angular en los tres ejes básicos de posición, lo que permite por medio de programación obtener desplazamiento a través de rangos mínimos y máximos presentes en los cambios de la aceleración angular del dispositivo. Este sensor puede ser el que más error presenta en cuanto a velocidad lineal se refiere, pero como lo que en realidad se quiere obtener es una medida de desplazamiento durante el día por medio de un promedio, entonces en realidad no es relevante la precisión de la velocidad obtenida si no el cambio que se presenta de la misma.

Este dispositivo se ubica en el interior de la cubierta de forma perpendicular al suelo y sobre el morillo o nuca del bovino hembra, ya que el sensor fue calibrado para cambiar el ángulo al presentarse una deformación en la locomoción del bovino hembra. Esto se explica de forma clara en la sección siguiente llamada caracterización de sensores.

En la figura 52 se observa el esquema básico de conexión para el sensor SEN-MPU6050.

**Figura 52. Esquema básico de conexión del sensor SEN-MPU6050.**



Fuente: Los Autores.

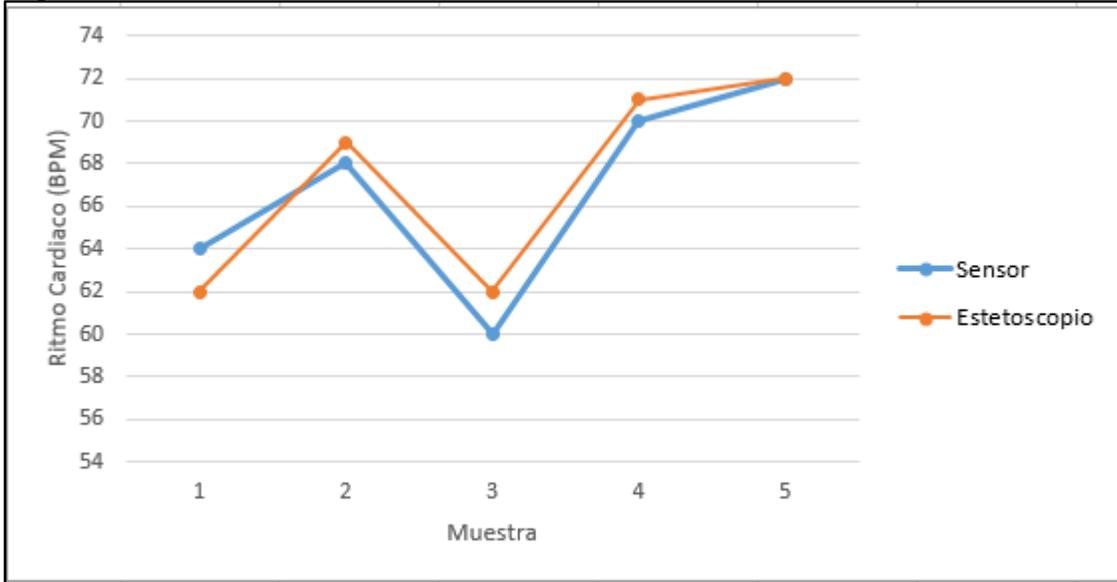
## 10.2 CARACTERIZACIÓN DE SENSORES

Antes de obtener medidas de cualquier sensor, se debe realizar la caracterización de cada uno para conocer el comportamiento e incertidumbre de los mismos. Para lograr obtener una calibración dentro de las incertidumbres teóricas de cada sensor, se utiliza un instrumento de referencia o instrumento patrón de medición confiable. Dichos dispositivos de referencia son:

- Ritmo cardíaco – estetoscopio.
- Temperatura – termómetro digital.
- Desplazamiento – podómetro

Para el sensor de ritmo cardíaco se usa un estetoscopio general para comparar los latidos generados en un minuto por el sensor y los latidos generados por el estetoscopio en un minuto. De esta manera se obtienen las curvas de la figura 53. En esta figura se puede observar la caracterización del sensor de ritmo cardíaco SEN11574, tomando como referencia un estetoscopio común. De esta prueba se concluye que el sensor que se utiliza para la toma de datos no tiene una incertidumbre mayor a 1 BPM con respecto al estetoscopio, por lo cual se puede conferir credibilidad a los datos tomados por esta clase de sensor.

**Figura 53. Gráfica de caracterización del sensor de ritmo cardíaco.**



Fuente: Los Autores.

Para el sensor de temperatura se usa como referencia un termómetro digital con un rango de medida de (32 – 42) °C y una incertidumbre de  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ . El rango de operación del termómetro digital está dentro de la temperatura normal de un bovino hembra (38.5 °C) y en el momento en el que ocurre el evento de estro (37.7 °C). Para hallar el error porcentual ( $E_p$ ) del sensor de ritmo cardíaco se hace uso de la siguiente ecuación 1:

$$E_p = \frac{|Valor\ experimental - Valor\ verdadero|}{Valor\ verdadero} * 100 \quad (\text{ec } 1).$$

Donde,

- Valor experimental será el valor expresado por el sensor SEN1574.
- Valor verdadero será el suministrado por el estetoscopio Littmann Classic II. De este modo, el valor experimental total después de haber realizado un promedio o regresión lineal es de:

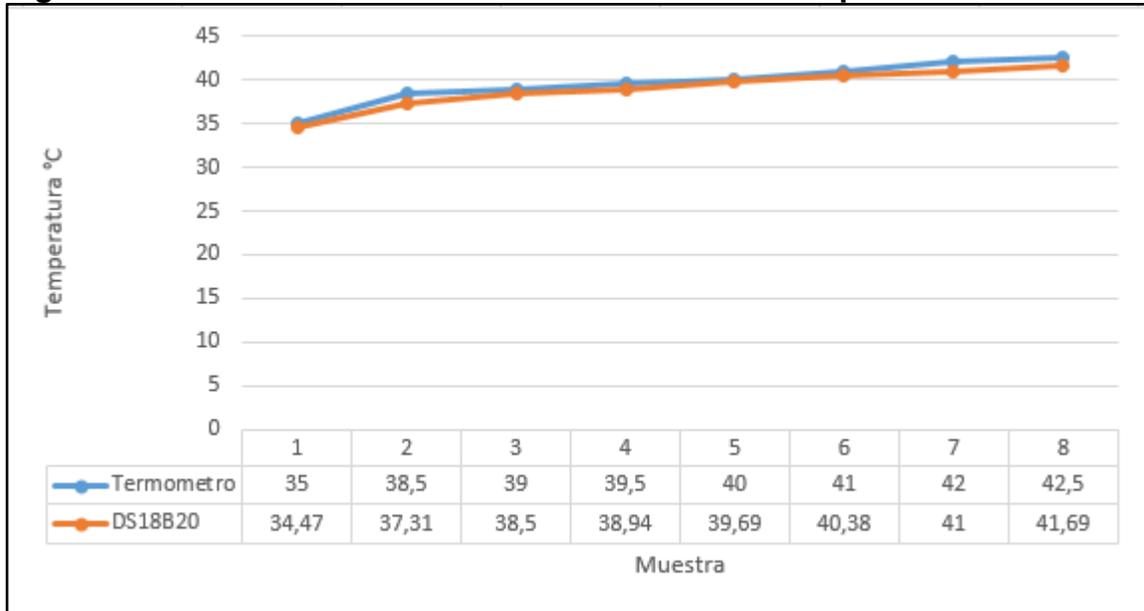
$$E_p = 1.84\%$$

La diferencia entre ambos dispositivos es mínima por lo que el sensor es confiable.

Los datos que se observan en la figura 54 evidencian la exactitud del sensor de temperatura que es usado para el dispositivo y cabe mencionar que la diferencia con el termómetro digital no es superior a  $\pm 0.19^\circ\text{C}$ . De esto se puede concluir que

los datos adquiridos por el sensor de temperatura tienen poca incertidumbre y se otorga credibilidad a los datos obtenidos.

**Figura 54. Curvas de caracterización del sensor de temperatura.**

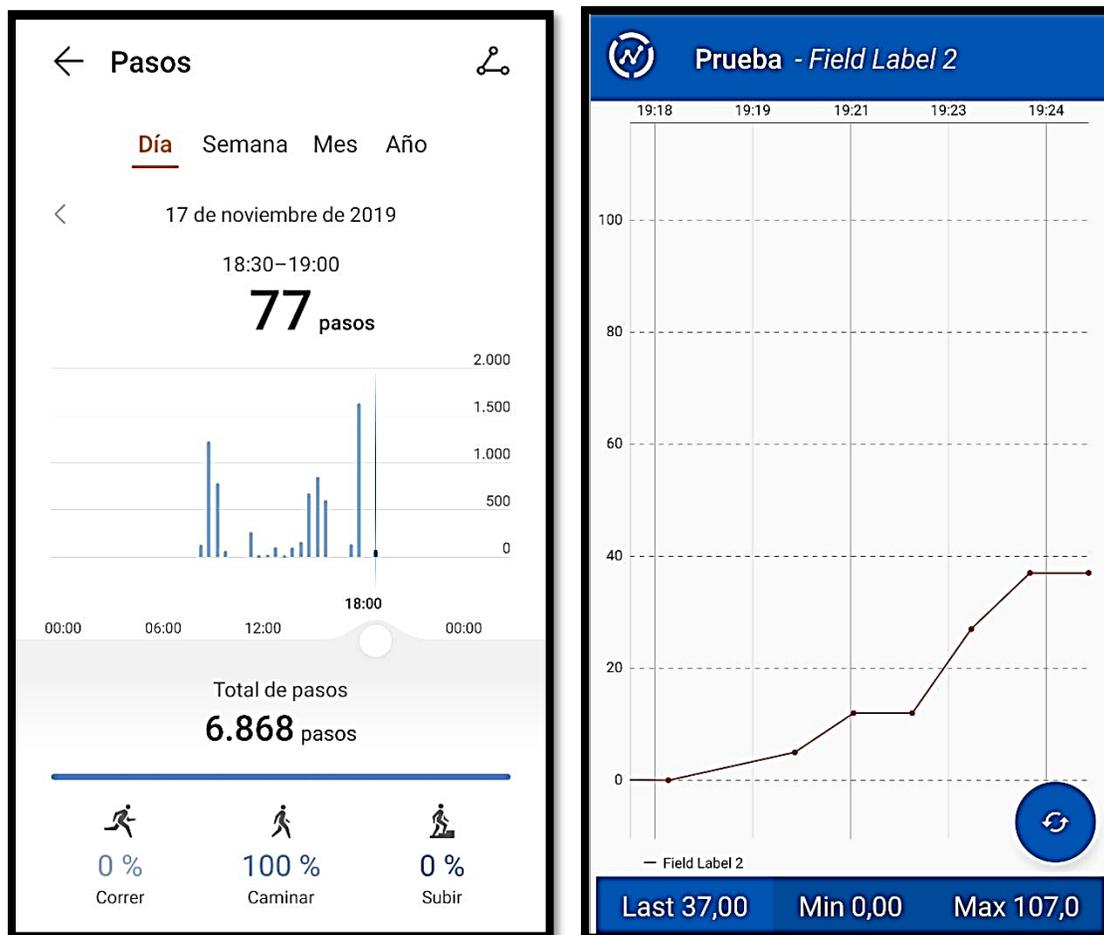


Fuente: Los Autores.

Finalmente, el sensor de desplazamiento MPU-6050, tiene que ser caracterizado a través del podómetro integrado en cualquier celular de gama media o alta. En este caso en particular se usa el podómetro integrado por la empresa Huawei en el celular Honor 8x. Este podómetro no es perfecto, pero sirve para identificar la precisión del sensor MPU-6050. Para la caracterización se contaron 50 pasos de aproximadamente 60 cm como referencia y los resultados se pueden observar en la figura 55.

En la figura 55 se observa la diferencia de medida entre el podómetro de Huawei y el sensor MPU-6050 respectivamente. Teniendo en cuenta que la referencia es 50 solo falta hallar la diferencia entre 77 pasos del podómetro de Huawei y los 37 pasos del sensor MPU-6050, entonces el error del podómetro de Huawei es de 27 pasos y el error del sensor MPU-6050 es de 13 pasos.

**Figura 55. Mediciones del Podómetro Huawei versus MPU-6050.**



Fuente: Los Autores.

Esto sugiere que el sensor MPU-6050 posee una incertidumbre menor que el podómetro de Huawei, pero en realidad si se aumenta el número de pasos la incertidumbre del podómetro se ajusta y el del sensor MPU-6050 se desequilibra, pero como se medirán valores de desplazamiento bajos y se ponderan en un mes no afecta en gran medida al dispositivo. En términos de porcentaje de error (según la ecuación 1), los resultados son expresados de la siguiente forma:

$$Ep_{MPU6050} = \frac{|37 - 50|}{50} * 100 = 26\%$$

$$Ep_{Podometro} = \frac{|77 - 50|}{50} * 100 = 54\%$$

Se puede observar que el error porcentual mayor pertenece al podómetro de Huawei. Estas cifras denotan que el sensor MPU6050 posee una menor incertidumbre que el podómetro de Huawei, por lo tanto, se puede confiar de los datos suministrados por el sensor MPU6050.

### 10.3 TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Después de obtener de manera exitosa las medidas de cada sensor se debe realizar un tratamiento de la información para que resulte de forma comprensible tanto al sistema como a las personas que la lean o visualicen.

Todos los tratamientos de información se realizan de manera virtual (IDE Arduino) con ayuda de módulos de interpretación como es el caso del sensor de temperatura. Cada sensor hace uso de un código distinto para lograr una interpretación exitosa; pero al final todos los códigos convergen en uno solo que es ingresado a la tarjeta NodeMCU V3 por medio del IDE (Integrated Development Environment) de Arduino.

El tratamiento de información para el sensor SEN-11574 resulta ser el más corto, ya que su funcionamiento se basa en longitudes de onda de manera que ya está diseñado para capturar y enviar datos sin interrupciones desde que el sensor se encuentre energizado. En el anexo C se evidencia la manera correcta de capturar los datos del sensor de ritmo cardíaco SEN-11574.

El tratamiento de información para el sensor de temperatura SEN DS18B20 se hace por una entrada digital del NodeMCU V3 de manera que toma muestras cada determinado tiempo establecido por el usuario para luego interpretar los datos y hallar la temperatura por medio de la fórmula descrita en el código. En el anexo D se presenta el código necesario para que la temperatura se mida de manera óptima por el sensor.

El último tratamiento de información es el más largo y robusto en términos de manejo de datos debido a que el código para la captura de datos es extenso y requiere de la mayoría de los recursos de memoria del dispositivo NodeMCU V3. Dentro del código se realiza una conversión de datos ya que inicialmente se captura velocidad angular en los tres ejes y luego esa velocidad angular se convierte en desplazamiento lineal en un solo eje.

## **10.4 SISTEMA DE TRANSMISIÓN**

Para el sistema de transmisión se seleccionó la tecnología WIFI ya que cubre la extensión geográfica total del estudio además de que el área de estudio cuenta con señal para realizar cuantas transmisiones sean necesarias. En el caso de que la extensión geográfica sea mayor se recomienda diseñar una red en malla de varios puntos de acceso que se prevé cubrirán toda el área deseada.

El NodeMCU v3 está configurado para acceder automáticamente a la red establecida previamente por codificación de manera que solo se necesita conocer el nombre del punto de acceso y la contraseña. Cabe mencionar que cada envío de datos le cuesta al dispositivo un gran gasto de energía, de manera que los datos solo son enviados cada hora para un total de 730 envíos al mes.

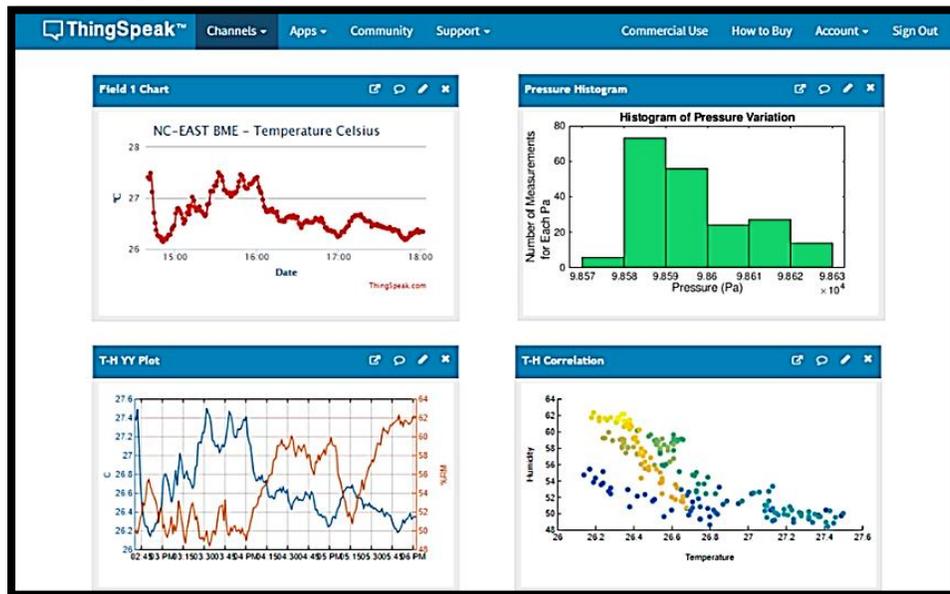
## **10.5 RECEPCIÓN Y VISUALIZACIÓN DE DATOS**

Existen diversos métodos para recibir datos, como páginas web, aplicaciones de escritorio desarrolladas en Java o AppInventor, bases de datos o aplicaciones en línea, no obstante, por cuestiones de tiempo se decide utilizar la aplicación en línea ThingSpeak.com.

Finalmente, la recepción de datos se hace a través de la plataforma en línea ThingSpeak (ver figura 56) que permite recibir datos desde cualquier parte del mundo siempre y cuando se cuente con conexión a internet, de manera que la recepción final se hace y visualiza por medio de ThingSpeak que también está disponible para Smartphones de manera que el usuario final puede consultar las medidas de los sensores en cualquier lugar y a cualquier hora del día.

En la figura 56 se observa un simple ejemplo de cómo es la interfaz de ThingSpeak para pc, las gráficas que permite obtener y su composición visual, después, en la siguiente unidad se representan los datos obtenidos por medio de la aplicación.

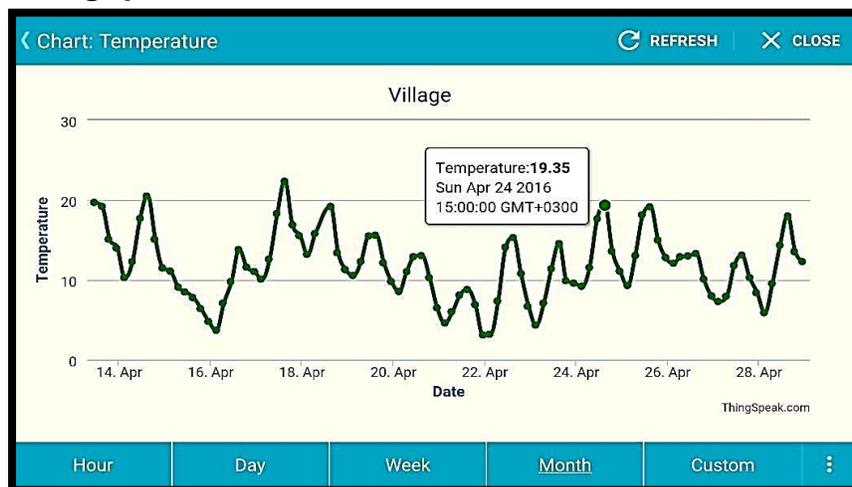
Figura 56. ThingSpeak formato PC.



Fuente: THINGSPEAK. Channels <<https://thingspeak.com/channels/252385>> [citado en 16 de octubre de 2019].

La figura 57 muestra la interfaz de ThingSpeak en formato móvil. Como se observa, la interfaz no es muy distinta a la que se tiene en pc.

Figura 57. ThingSpeak formato móvil.



Fuente: ThingView Free, Channels <<https://images.app.goo.gl/jCWe6CaEM74NttVZ7>> [citado en 16 de octubre de 2019].

## **11 PRUEBAS DEL PROTOTIPO**

### **11.1 PRUEBAS DEL SISTEMA DE MONITOREO EN EL CAMPO**

En esta etapa, se realizaron tres pruebas. Cada una de las pruebas fue mejorando con el tiempo, los datos obtenidos y a su vez calibrando los sensores para obtener una mejor medición de las variables. Es importante mencionar que los dos animales de prueba no se encontraban en estro, por tanto, solo se obtienen datos de indicadores normales presentes en cualquier bovino hembra saludable.

El primer animal, el cual está presente en las pruebas iniciales y la tercera prueba, es una hembra de aproximadamente 5 años de edad, además de estar en estado de embarazo lo que ubica a este bovino en la etapa de anestro. Hasta que no dé a luz y pasen aproximadamente 2 meses, no podrá ingresar de nuevo a la etapa de pro-estro.

El segundo animal de prueba, el cual está presente en la segunda prueba, es una hembra de aproximadamente 2 años de edad con ningún parto registrado hasta la fecha de manera que tampoco presenta indicios de ciclo estral, solo se puede mencionar que está en excelente estado de salud y posiblemente en 6 meses más estará lista para entrar en el ciclo completo iniciando desde pro-estro hasta llegar a anestro.

#### **11.1.1 Pruebas iniciales del sistema de monitoreo en el campo**

En un principio se tomaron medidas del costado lateral de la vaca, más específicamente a la altura de la axila, tal como se observa en la figura 56. Estas medidas no fueron del todo exitosas, ya que la abundancia de pelaje en esa zona no permitió que el sensor de ritmo cardíaco tomara medidas correctas. Para el caso de la temperatura, se obtuvo un valor constante de 35.375 °C, pero este valor no corresponde con el típico en una vaca (37.7 °C) por tal razón se debía mejorar la forma de colocar el dispositivo sobre el animal en cuestión. Los resultados de estas medidas se observan en las figuras 58 y 59.

**Figura 58. Toma de medidas de temperatura y ritmo cardíaco a la altura de la axila.**

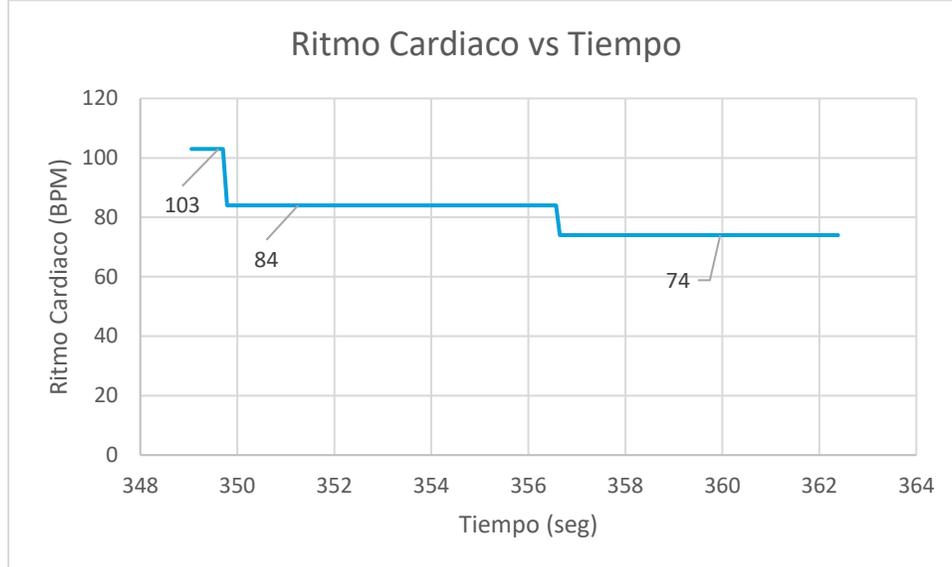


Fuente: Los Autores.

Como se mencionó, el sensor de ritmo cardíaco tomaba medidas incorrectas; esto se observa en la figura 59. Inicialmente se tiene un ritmo cardíaco de 103 pulsaciones por minuto, posteriormente baja a 84 pulsaciones por minuto, el cual es un valor relativamente normal en una vaca adulta (40-80 BPM). Finalmente, bajó a 74 pulsaciones por minuto. Estos resultados se encuentran dentro del rango esperado de medición.

Es importante mencionar que los resultados obtenidos se grafican de forma lineal, tomando solo los valores del ritmo como números enteros, de manera que la gráfica termina siendo una recta debido al modo en que se envían los datos de forma digital y no análogos. Es posible obtener una gráfica de los pulsos cardíacos en formato análogo, pero es más pedagógico para el usuario final presentar los datos de forma digital en formato de número entero que varía con el tiempo que una gráfica ECG.

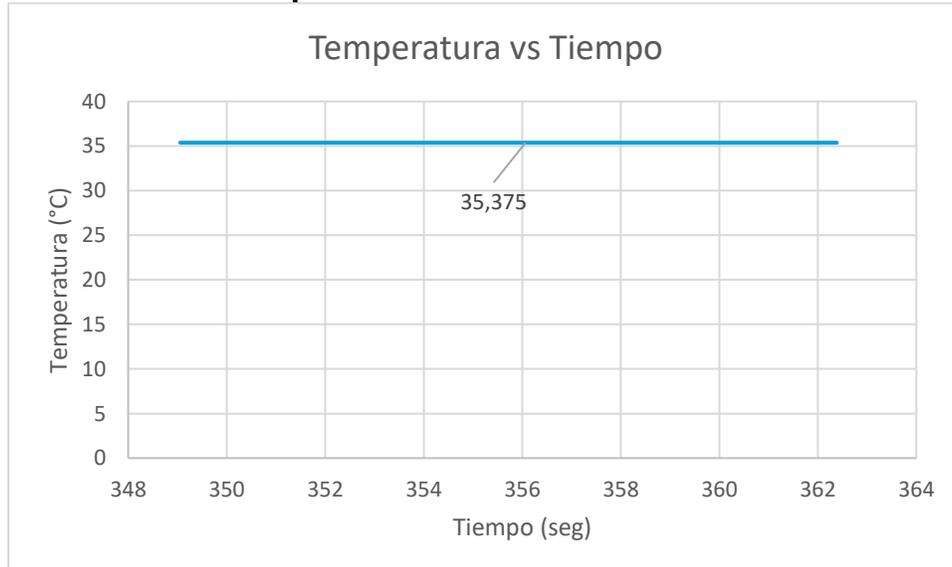
**Figura 59. Gráfica ritmo cardíaco con medición hecha a la altura de la axila.**



Fuente: Los Autores.

En la figura 60, se evidencia lo dicho anteriormente. La temperatura se mantiene constante a lo largo del tiempo. Aunque debido a que el sensor estaba captando tanto la temperatura del ambiente como la de la vaca, no se obtuvo una medida realmente aproximada a los 37.7 °C que es el valor típico de cuando esta está en su ciclo estral.

**Figura 60. Grafica de temperatura con medición hecha a la altura de la axila.**



Fuente: Los Autores.

Posteriormente, como se observa en la figura 61, se pasó a tomar medidas en el cuello de la vaca. En este punto se obtuvieron mejores resultados con el sensor de ritmo cardíaco y con el sensor de temperatura. Esta vez se alcanzó un valor de temperatura más alto (35.875 °C). Estas mediciones se observan en las figuras 62 y 63.

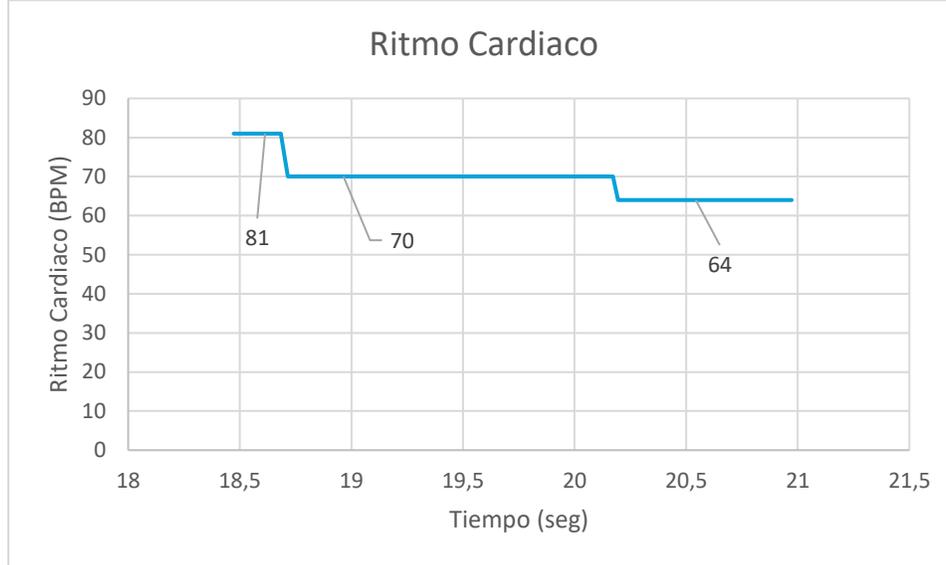
**Figura 61. Toma de medidas de temperatura y ritmo cardíaco en el cuello.**



Fuente: Los Autores.

Como se observa en la figura 62, las medidas obtenidas por el sensor de ritmo cardíaco, fueron más cercanas a las reales. Esto fue porque una parte del cuello de la vaca estaba casi en su totalidad sin pelaje, lo que hacía que el sensor tocara directamente la piel. Pero en ocasiones la vaca giraba la cabeza ocasionando que el sensor dejara de tener contacto directo y se alteraran un poco las mediciones; pese a esto, se obtuvieron mediciones más acertadas. Estas mediciones se encuentran dentro de los rangos de medición esperados.

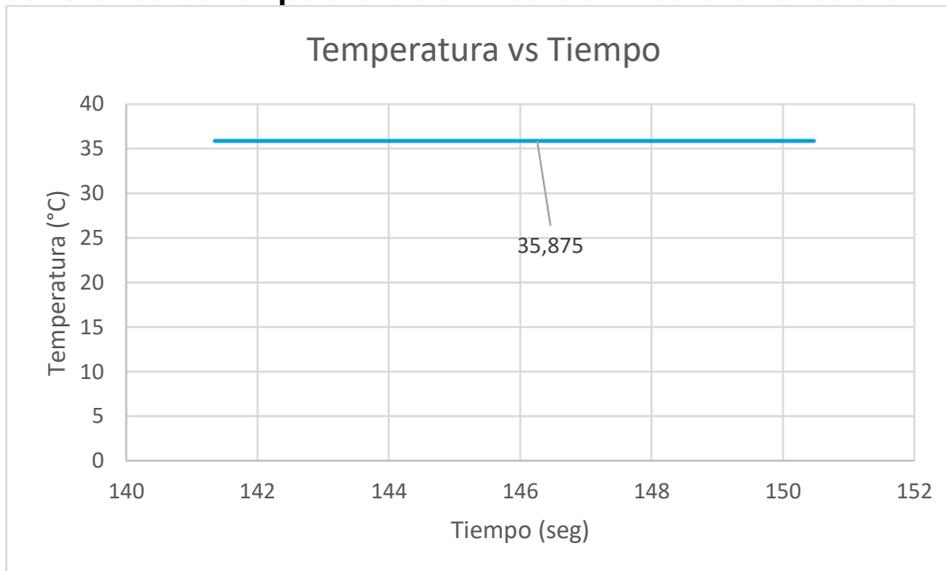
**Figura 62. Grafica de ritmo cardíaco con medición hecha en el cuello.**



Fuente: Los Autores.

Con respecto a la medición de temperatura en la figura 63, se observa que esta fue considerablemente más alta con respecto a la anterior medición, sin embargo, tampoco se alcanzó la medición de temperatura que se quería. Esto fue porque al momento de tomar las medidas, no se tenía un ambiente propicio para aislar la temperatura ambiente de la de la vaca, sin embargo, estos valores están dentro del rango de medición esperado.

**Figura 63. Grafica de temperatura con medición hecha en el cuello.**



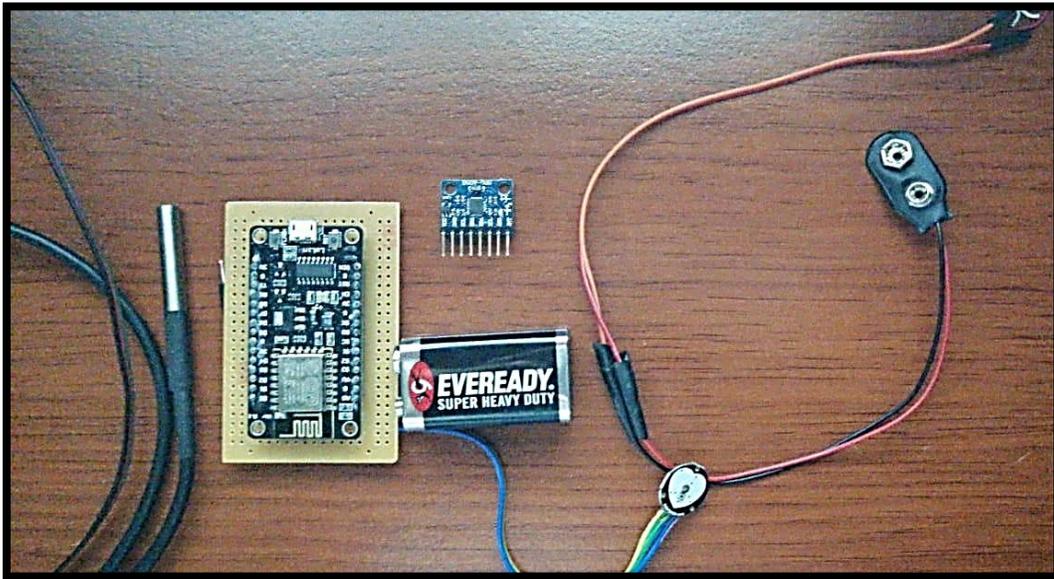
Fuente: Los Autores.

### 11.1.2 Segunda prueba del sistema de monitoreo en el campo

Luego de haber caracterizado los sensores y conocer el comportamiento de cada uno, se realiza una segunda toma de datos, pero esta vez con los ajustes necesarios para obtener datos más fieles a la referencia.

En la figura 64 se observan los elementos necesarios para realizar la prueba. El dispositivo consta de la placa NodeMCU v3, el sensor de temperatura DS18B20, el sensor de ritmo SEN11574, el sensor de desplazamiento MPU6050 y una pila de 9 voltios

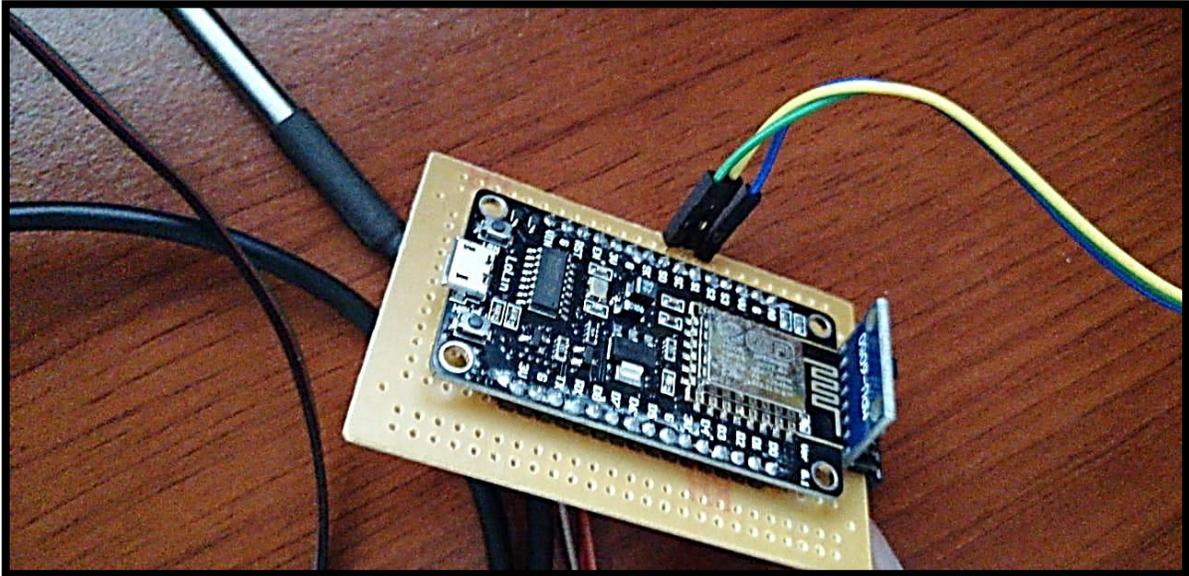
**Figura 64. Elementos usados para realizar la prueba.**



Fuente: Los Autores.

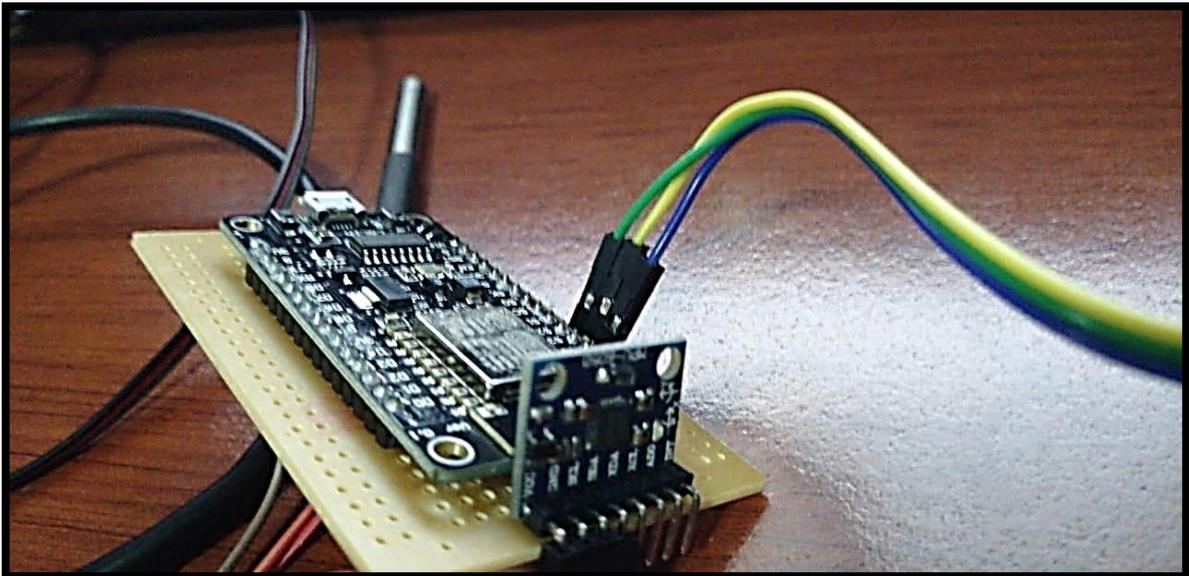
En las figuras 65 y 66 se observa la forma en la cual el dispositivo fue puesto a prueba en campo real y a continuación se presentan las figuras relacionadas con su aplicación en el campo.

**Figura 65. Dispositivo ensamblado vista superior.**



Fuente: Los Autores.

**Figura 66. Dispositivo ensamblado vista frontal.**



Fuente: Los Autores.

Ahora bien, cabe aclarar que a falta de tiempo la cubierta exterior y las correas para sostener el dispositivo no estaban disponibles en el momento de la prueba, por tal razón se adaptó el dispositivo para ser colocado justo en el lomo del bovino hembra, ya que también es un punto para obtener datos de temperatura exitosos debido a que esta justo encima de la espina dorsal, la cual generaba cambios más notables

al momento de desplazarse, lo que facilitó las medidas de desplazamiento y temperatura.

Hubo un grave revés al momento de colocar el dispositivo sobre el animal ya que al momento de adaptar una soga para mantener el dispositivo sobre el animal, en el primer intento el dispositivo cayó al suelo lo que generó que el sensor de ritmo cardíaco SEN11574 sufriera daños irreparables, por la imposibilidad de obtener un nuevo sensor en el área que se realizó la prueba, se decidió continuar la prueba sin obtener datos de ritmo cardíaco, pero los datos de ritmo cardíaco que se obtuvieron en las pruebas iniciales dan crédito a la funcionalidad del sensor en un ambiente no controlado.

Como se observa en la figura 67 la adaptación realizada es bastante empírica pero sustentable ya que el animal soportó el dispositivo sin ningún problema durante 3 horas seguidas hasta que la batería fue agotada del todo, pero los datos fueron almacenados en la plataforma de ThingSpeak de manera que el trabajo no fue en vano.

**Figura 67. Adaptación del dispositivo.**



Fuente: Los Autores.

En la figura 68 se observa al bovino hembra con el dispositivo transmitiendo de forma exitosa durante alrededor de 2 horas en los cuales la información era almacenada de forma continua en la aplicación ThingSpeak. En el capítulo 11.2 se sustentarán los resultados obtenidos en esta prueba.

**Figura 68. Bovino hembra con el dispositivo después de 2 horas.**



Fuente: Los Autores.

### **11.1.3 Tercera prueba del sistema de monitoreo en el campo recepción y visualización de la información**

Para la tercera prueba ya se contaba con la PCB, pero, seguía faltando la cubierta exterior. Durante el desarrollo de la prueba hubo fallas con la batería ya que el conector que se utilizó para esta, no tenía un buen acople, por esta razón, por momentos se desconectaba y esto hacía que el valor de la variable del desplazamiento se reiniciara.

En la figura 69 se observa la acomodación del dispositivo al lomo de la vaca, los sensores de ritmo y de desplazamiento van directamente sobre este. El sensor de temperatura se coloca en un costado mediante un parche dérmico.

**Figura 69. Ajuste de dispositivo sobre el lomo de la vaca.**



Fuente: Los Autores.

En la figura 70 se observa a la vaca ya con el dispositivo ajustado en su sitio. Posteriormente a esto, por medio de un lazo se procedió a hacer andar la vaca por aproximadamente media hora.

**Figura 70. Prueba con dispositivo en PCB.**



Fuente: Los Autores.

## **11.2 RECEPCIÓN Y VISUALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN.**

La última fase es la de recepción y visualización en donde el usuario final puede observar en cualquier momento la información recolectada por el dispositivo. La aplicación ThingSpeak permite observar la información desde un pc o un dispositivo móvil que cuente con acceso a internet.

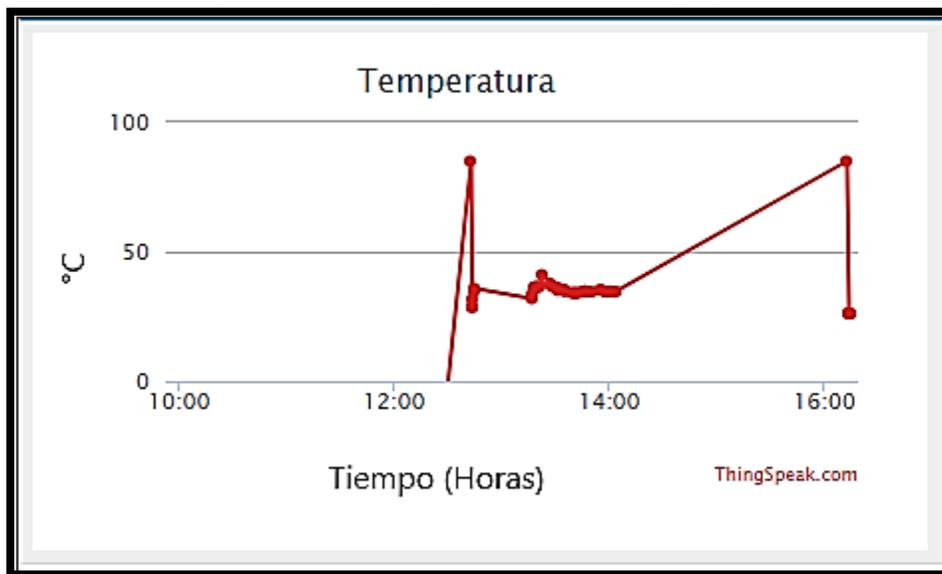
Los resultados obtenidos en la segunda prueba fueron satisfactorios omitiendo el hecho del daño que sufrió el sensor de ritmo cardíaco. Las pruebas iniciaron el día 10 de noviembre del 2019 a las 12:30 pm, tiempo en el cual el dispositivo fue adaptado y colocado sobre el lomo del bovino hembra. El envío de datos se programó para que se hiciera cada 10 segundos.

Finalmente, la transmisión de datos inició a las 12:45 pm y finalizó a las 4:10 pm del mismo día. Cabe mencionar que el bovino hembra en estudio se encuentra en embarazo lo que elimina la presencia del evento de estro, pero esto no es problema ya que el objetivo primordial es evidenciar los cambios generados durante un lapso de tiempo largo y la efectividad de los sensores trabajando en conjunto. Es

importante decir que encontrar un bovino hembra que este justo en el ciclo estral es bastante complicado debido a que habría que hacer pruebas al menos durante 2 meses para sustentar la diferencia entre ciclo normal o anestro y ciclo estral. Entonces se concluye que estas pruebas solo son para probar la efectividad del método para monitorear el estado de los bovinos.

En la figura 71 se observa el inicio y fin de la transmisión y la continuidad de temperatura entre las 13:00 y las 14:00, en donde la temperatura se mantiene entre 31.4 °C y 36.9 °C, estos valores son los esperados teniendo en cuenta que el animal en estudio se encuentra en estado de embarazo. En donde se observa los picos de subida de hasta 85° C, significan el momento en el cual el dispositivo estaba en proceso de ser colocado o retirado. Cabe aclarar que la recta que aumenta de manera proporcional es debido al aumento de la actividad del bovino hembra y es el intervalo de tiempo en donde la gráfica de desplazamiento aumenta de forma exponencial quiere decir esto que su comportamiento fue bastante errático durante cierta hora del día.

**Figura 71. Datos temperatura de la plataforma ThingSpeak.**

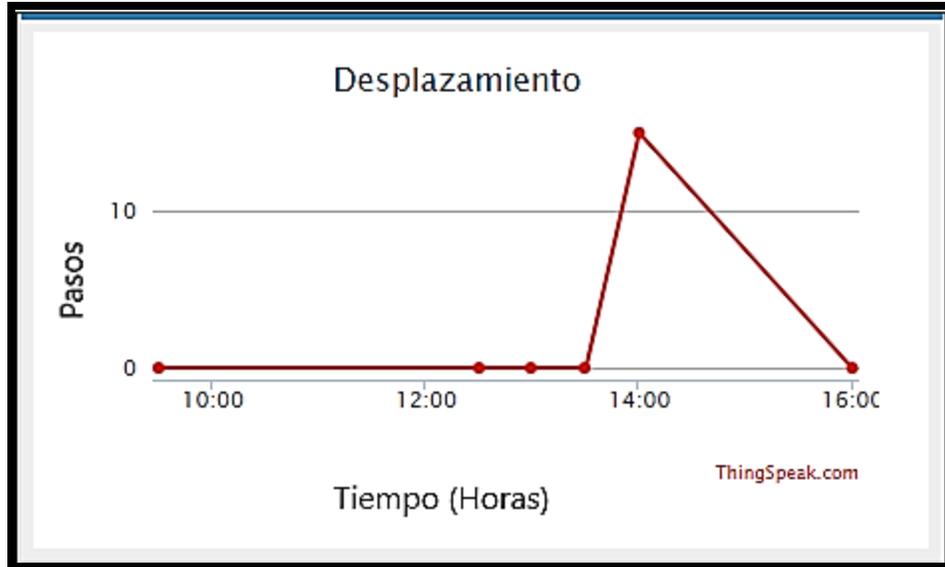


Fuente: Los Autores.

En la figura 72 se observa el desplazamiento medido en pasos realizados por el animal durante la prueba, es importante mencionar que el aumento de desplazamiento del animal es acorde al aumento de temperatura en esa hora del día lo que significa que, al aumentar su desplazamiento, aumento su temperatura lo cual es razonable. Se puede concluir que el bovino hembra aumentó su

desplazamiento para equilibrar la temperatura ambiente con su temperatura interna y no sufrir descompensaciones en la noche.

**Figura 72. Datos desplazamiento de la plataforma ThingSpeak.**

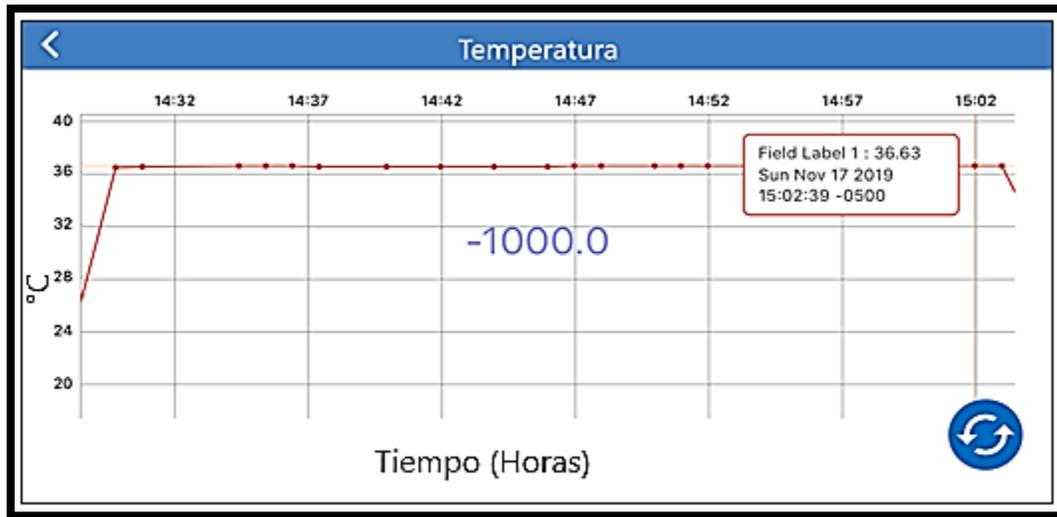


Fuente: Los Autores.

La tercera prueba inicio a las 14:28 y finalizaron a las 15:03, pero, en este intervalo de tiempo solo se tienen los datos de temperatura y desplazamiento, esto debido al error del sensor de ritmo cardíaco que se mencionó anteriormente.

En la figura 73 se observa que desde que inició la prueba y hasta que finalizó, el valor de la temperatura se mantuvo constante con un valor de 36.63°C el cual es el valor que se esperaba para esta variable. El valor de -1000 (en color azul) se debe a que en ese momento se desconectó la batería.

**Figura 73. Datos de temperatura visualizados en la ampliación móvil de ThingSpeak.**



Fuente: Los Autores.

En la figura 74 se observa que la cantidad máxima de pasos acumulados por la vaca en el transcurso de 10 minutos fue de 102. Este valor tan alto se debe a que, como se mencionó anteriormente, la vaca se hizo caminar al amarrarle un laso.

Mientras se realizaba la prueba, se desconectó la batería, es por esto que antes de finalizar la prueba, el último valor registrado fue de 11 (en color azul) pasos.

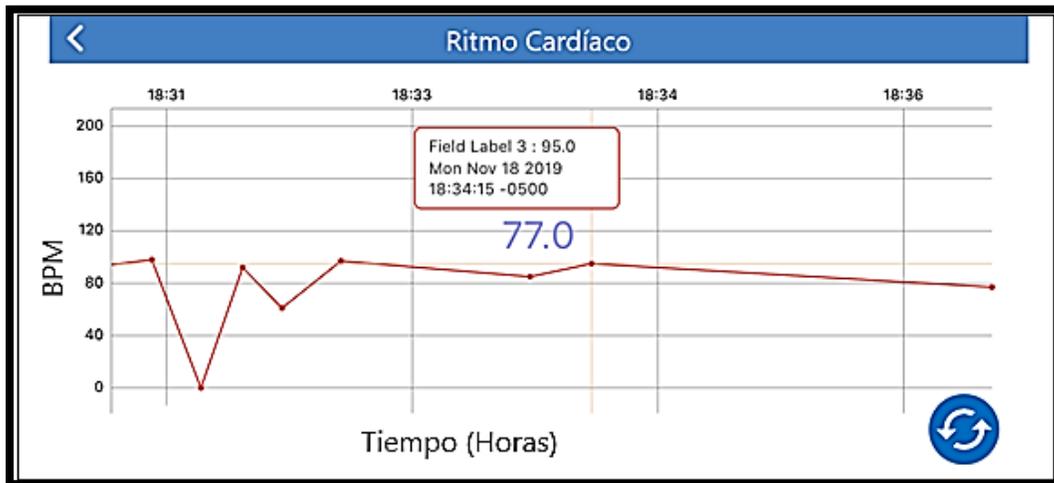
**Figura 74. Datos de desplazamiento visualizados mediante la aplicación móvil de ThingSpeak.**



Fuente: Los Autores.

En la figura 75 se observa el ritmo cardíaco. Se obtuvieron muestras durante aproximadamente 5 minutos, dentro de los cuales hubo un fallo con la batería por el cual existe un periodo de tiempo en el que el valor del ritmo cardíaco marco 0, sin embargo, en el tiempo restante se obtuvo un valor máximo de 95 un valor mínimo de 77 (en color azul). Estos resultados se encuentran dentro de los valores de ritmo cardíaco esperados.

**Figura 75. Datos de ritmo cardíaco visualizados en la aplicación de ThingSpeak.**



Fuente: Los Autores.

Dentro del marco del proyecto se obtiene el prototipo final, en la figura 76 se observa el dispositivo en su estado inicial de calibración.

**Figura 76. Dispositivo en etapa final.**



Fuente: Los Autores

Ahora bien, se presenta a continuación en la figura 77, el dispositivo final.

**Figura 77. Prototipo final funcional.**



Fuente: Los Autores.

## 12 CONCLUSIONES

Después de recopilar la información suficiente sobre el ciclo estral, tecnologías IoT y aplicaciones móviles se determinó cuál es el método que mejor se adapta a las metas propuestas para después identificar la instrumentación requerida para la captura de las diferentes variables como temperatura, ritmo cardíaco y posición, ha de haber una selección exhaustiva para cumplir de manera óptima con las expectativas propuestas.

A pesar de que durante la etapa de diseño ocurrieron algunos percances con algunos sensores, el diseño del sistema de monitoreo se cumplió a cabalidad, logrando que este sea capaz de enviar los datos obtenidos de las mediciones efectuadas por los diferentes sensores a la plataforma ThingSpeak en donde son representados gráficamente, dando a conocer una forma de transmitir información de forma inalámbrica entrando en el campo de IoT, lo que sugiere la amplia gama de soluciones que puede prestar la automatización, control y comunicación por medio de dispositivos sensores aplicados a procesos, ya sean a pequeña escala o a gran escala, demostrando que hay pocas barreras limitantes aplicadas a la ingeniería y las comunicaciones ya sea alámbricas o inalámbricas.

Pese a que, cuando se implementó por primera vez el prototipo del sistema en el campo, la conexión que se tenía de los componentes hacía que la medición fuera un poco tediosa ya que, cuando la vaca se movía ocasionaba que estos se desconectaran haciendo que en los datos que se obtenían aparecieran errores. Para la segunda prueba se mejoró este sistema, con esta mejora fue más fácil hacer las mediciones ya que, las conexiones estaban mejor hechas y permitían una mayor libertad de movimiento de la vaca antes de que fuera posible que se desconectaran (dicha desconexión no ocurrió en ningún momento).

ThingSpeak presenta ciertas limitaciones como la capacidad de almacenamiento que no supera los 6 meses ya que después de ese tiempo los datos son reiniciados, por tal razón se recomienda para trabajos futuros el almacenar datos en memorias estáticas extraíbles. Otra limitación de ThingSpeak es el tiempo de espera para subir y almacenar datos que son enviados desde el dispositivo, lo que sugiere que para aplicaciones de alta velocidad de transmisión o procesos que dependan de datos como dispositivos de tratamiento de información o minería de datos, no se recomienda usar ThingSpeak para dichos casos.

La manera más eficaz para diseñar un sistema electrónico para la monitorización de variables indicatoras del ciclo estral, se logra siguiendo una serie de pasos; primero se debe identificar las variables que presentan cambios durante el ciclo estral y si es posible su medida a través de sensores, después se debe realizar el debido tratamiento de información para obtener valores lógicos y reales conforme a los cambios físicos que presenten las variables indicadores, para el último paso se debe realizar la debida transmisión de datos a diferentes aplicaciones de visualización para lograr la validación correspondiente según los cambios físicos.

### 13 RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Para futuros trabajos a partir de esta investigación se recomienda hacer unos cambios respecto al acelerómetro, el cual es el dispositivo que mide el desplazamiento de la vaca, ya que, este no es capaz de calcularla con precisión. Empezando porque cuando se calcula la velocidad se produce un error bastante considerable, este error se transfiere al cálculo del desplazamiento, es por eso que el dispositivo aconsejado para la sustitución del acelerómetro es un GPS. Con este se puede tener control total de la posición de la vaca, además es más fácil determinar cuánto desplazamiento ha hecho el animal en cierto lapso de tiempo. Sin embargo, el GPS tiene una desventaja, y es que necesita estar constantemente enviando datos, lo que hace que el consumo de energía sea elevado y la vida de la batería se acorte drásticamente.

Por otro lado, respecto al sistema de alimentación, este se puede modificar y adaptar paneles solares. Al hacer este cambio, se garantiza que el sistema este activo la mayor cantidad de tiempo posible antes de que haya que hacer un cambio de batería. Así mismo, se garantiza que no se creen problemas de energía en dado caso de que se use el GPS.

También, hay que tener en cuenta que el sistema de monitoreo se pensó para un lugar pequeño, en donde el animal no va a estar a una distancia mayor a 100 metros del lugar de origen de la señal Wi-Fi. Es por eso que, si se desea ampliar el rango de operación del sistema, se debe optar por otras tecnologías de comunicación, como por ejemplo señales microondas, usar un módulo XBee ya que este tiene un alcance superior a 1 km o en dado caso de que solo se quiera mejorar el rango de alcance de la señal Wi-Fi, se puede optar por diseñar una red tipo malla.

La aplicación de ThingSpeak es perfecta para mostrar y visualizar datos, pero no se recomienda el uso de la misma para recolección rápida de datos ya que toma aproximadamente de 15 a 20 segundos, de manera que si se desea realizar tratamientos de datos o envíos a velocidades mayores no se recomienda usar ThingSpeak para la tarea o proceso en sí.

Teniendo en cuenta lo anterior, este sistema puede pasar de ser un sistema de monitoreo a un sistema de detección del ciclo estral. Este nuevo sistema puede ser patentado ya que, hasta la fecha, en el mercado no se encuentran dispositivos que detecten el ciclo estral de la manera en que se planteó en este documento.

## 14 BIBLIOGRAFÍA

Afimilk. «El collar Silent Herdsman de Afimilk». Afimilk, 7 de febrero de 2016. <https://www.afimilk.com/es/products/cows/sensors/afimilk-silent-herdsman-neck-collar>.

Akyildiz, I F, T Melodia, y K R Chowdhury. *A survey on wireless multimedia sensor networks*. Computer Networks 51, 2007.

Al-Fuqaha, Ala, Guizani, Mohsen, Mohammadi, Mehdi, Aledhari, Mohammed, y Ayyash, Moussa. «Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications». *Abakós* 1, n.º 2 (2015): 78–95. <https://doi.org/10.5752/10.5752/p.2316-9451.2013v1n2p78>.

ANALOG DEVICES. «Small and Thin  $\pm 18$  g Accelerometer». Accedido 18 de agosto de 2019. <https://www.sigmaelectronica.net/manuals/ADXL321JPC.pdf>.

Andersson, L. Mattias, Hironao Okada, Ryotaro Miura, Yi Zhang, Koji Yoshioka, Hiroshi Aso, y Toshihiro Itoh. «Wearable Wireless Estrus Detection Sensor for Cows». *Computers and Electronics in Agriculture* 127 (septiembre de 2016): 101-8. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.06.007>.

Arduino.cl - Plataforma Open Source para el desarrollo de prototipos electrónicos. «Arduino UNO». Accedido 31 de marzo de 2019. <http://arduino.cl/arduino-uno/>.  
Areed, Marwa F. «A keyless Entry System based on Arduino board with Wi-Fi technology». *Measurement* 139 (2019): 34-39.

Arias, R A, T L Mader, y P C Escobar. «Factores climáticos que afectan el desempeño productivo del ganado bovino de carne y leche Climatic factors affecting cattle performance in dairy and beef farms». *Arch Med Vet* 40, n.º 1 (2008): 7–22. <https://doi.org/10.4067/S0301-732X2008000100002>.

ASALE, RAE-. «“Diccionario de la lengua española” - Edición del Tricentenario». «Diccionario de la lengua española» - Edición del Tricentenario. Accedido 10 de septiembre de 2019. <https://dle.rae.es/?id=H05vNCx>.

Ashton, Kevin. «That ‘internet of things’ thing». *RFID journal* 22, n.º 7 (2009): 97-114.

Association, IEEE Standards. «IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 1: MAC sublayer. IEEE Std 802.15. 4e-2012 (Amendment to IEEE Std 802.15. 4-2011)». *IEEE Computer Society: New York, NY, USA, 2012*.

Atzori, Luigi, Antonio Iera, y Giacomo Morabito. «The Internet of Things: A survey». *Computer Networks* 54, n.º 15 (2010): 2787–2805. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>.

Ávila, Enrique. «El ganado de leche tiene forma triangular. El ganado de carne tiene forma rectangular». Accedido 26 de junio de 2019. <https://docplayer.es/4183728-El-ganado-de-leche-tiene-forma-triangular-el-ganado-de-carne-tiene-forma-rectangular.html>.

Baccelli, Emmanuel, Oliver Hahm, Mesut Gunes, Matthias Wahlisch, y Thomas C. Schmidt. «RIOT OS: Towards an OS for the Internet of Things». En *2013 IEEE conference on computer communications workshops (INFOCOM WKSHPs)*, 79-80. IEEE, 2013.

Bélissent, J. «Getting clever about smart cities: new opportunities require new business models». *Forrester Research, Inc.*, 2010, 33. [http://groups.open.org.nz/groups/ninja-talk/files/f/19710-2010-11-04T092134Z/getting\\_clever\\_about\\_smart\\_cities\\_new\\_opportunities.pdf](http://groups.open.org.nz/groups/ninja-talk/files/f/19710-2010-11-04T092134Z/getting_clever_about_smart_cities_new_opportunities.pdf).

Bishop, Toni A, y Ramesh K Karne. «A Survey of Middleware.», 254-58, 2003.  
Boushaba, Mustapha, Abdelhakim Hafid, y Michel Gendreau. «Node stability-based routing in wireless mesh networks». *Journal of Network and Computer Applications* 93 (2017): 1-12.

Buckley, J. *The internet of things: from RFID to the next-generation pervasive networked systems*. Auerbach Publications, New York, 2006.  
Cao, Qing, Tarek Abdelzaher, y John Stankovic. «The LiteOS Operating System: Towards Unix-like Abstractions for Wireless Sensor Networks», 2008, 233–244. <https://doi.org/10.1109/IPSN.2008.54>.

Castaldo, Ariel Osvaldo. *Caracterización de los sistemas de producción bovina (invernada) en el nordeste de la provincia de La Pampa (Argentina): modelos de gestión*. Universidad de Córdoba, Departamento de Producción Animal, 2003.

Catalano, Rodolfo, y Santiago Callejas. «DETECCION DE CELOS EN BOVINOS. FACTORES QUE LA AFECTAN Y METODOS DE AYUDA». *Medicina Veterinaria* 82 (2001): 17–22.

Chadha, Karishma, y Franklyn A. Turbak. «Improving App Inventor Usability via Conversion between Blocks and Text.» *J. Vis. Lang. Comput.* 25, n.º 6 (2014): 1042-43.

Chai, Yuan, y Xiao-Jun Zeng. «Regional condition-aware hybrid routing protocol for hybrid wireless mesh network». *Computer Networks* 148 (2019): 120-28.

Čolaković, Alem, y Mesud Hadžialić. «Internet of Things (IoT): A review of enabling technologies, challenges, and open research issues». *Computer Networks* 144 (2018): 17–39. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.07.017>.

Colazo, M.G., y R.J. Mapletof. «Fisiología del Ciclo Estral Bovino». *Revista Ciencias Veterinarias* 16 (2014): 31–46. <http://dx.doi.org/10.19137/cienvet2014-1623>.

Condoluci, Massimo, Giuseppe Araniti, Toktam Mahmoodi, y Mischa Dohler. «Enabling the IoT Machine Age With 5G: Machine-Type Multicast Services for Innovative Real-Time Applications». *IEEE Access* 4, n.º c (2016): 5555–5569. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2573678>.

Conesa, Juan A. «Mecanismos de transmisión de calor (conducción, convección, radiación)». *Experimentación en Ingeniería Química I*, 2013.

Crandall, Aaron S., Narayanan C. Krishnan, Brian L. Thomas, y Diane J. Cook. «Casas: A smart home in a box». *Computer* 46, n.º 7 (2013): 62-69.

Del-Colle, Andrew. «Volvo will test autonomous cars on Sweden's streets», 4 de diciembre de 2013. <https://www.popularmechanics.com/cars/a9834/volvo-announces-autonomous-car-program-16230364/>.

Dolan, Mindy. «Bluetooth at CES: An IoT for Everyone». Bluetooth Technology Website, 23 de enero de 2017. <https://www.bluetooth.com/blog/bluetooth-at-ces-iot-for-everyone/>.

Dunkels, Adam, Bjorn Gronvall, y Thiemo Voigt. «Contiki-a lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors». En *29th annual IEEE international conference on local computer networks*, 455-62. IEEE, 2004.

Erina Ferro, Francesco Potorti. «Bluetooth and Wi-Fi Wireless Protocols»: *Ieee Wireless Communications*, n.º February (2005): 1–24.

Finch, Edward. «Is IP everywhere the way ahead for building automation ? Because it does not provide continuous» 19, n.º 11 (2001): 396–403.

Garth V. Crosby, y Vafa, Farzam. «Wireless Sensor Networks and LTE-A Network Convergence», 2013, 731–734.

Gascón, David. «Redes de Sensores Inalámbricos, la tecnología invisible». *Tecnología y Sociedad*, 2010, 54. <http://www.libelium.com/libelium-downloads/libelium-bit-coit.pdf>.

Gea, Tomas, y David Roldán. «Smart cities as an application of Internet of Things : Experiences and lessons learnt in Barcelona», 2013, 552–557. <https://doi.org/10.1109/IMIS.2013.158>.

Ghost Amitava, Ratasuk Rappapat, Mondal Bishwarup, Mangalvedhe Nitin, Thomas Tim. «LTE-ADVANCED : NEXT -G ENERATION W IRELESS B ROADBAND T ECHNOLOGY», n.º June (2010): 10–22.

Gubbi, Jayavardhana, Rajkumar Buyya, Slaven Marusic, y Marimuthu Palaniswami. «Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements, and Future Directions». *Future Generation Computer Systems* 29, n.º 7 (septiembre de 2013): 1645-60. <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>.

Gunhardson, Erica. «Indoor positioning using angle of departure information», 2015. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:874882/FULLTEXT01.pdf>.

Hahn, G.L., Terry Mader, y R.A. Eigenberg. *Perspective on development of thermal indices for animal studies and management*. Vol. 7, 2003.

Hansmann, Uwe, Lothar Merk, Martin S Nicklous, y Thomas Stober. *Pervasive computing: The mobile world*. Springer Science & Business Media, 2003.

Iwasaki, Wataru, Shuichi Ishida, Daisuke Kondo, Yuichi Ito, Jun Tateno, y Michiko Tomioka. «Monitoring of the Core Body Temperature of Cows Using Implantable Wireless Thermometers». *Computers and Electronics in Agriculture* 163 (agosto de 2019): 104849. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.06.004>.

James Graves, Debra Jones, Benjamin D. Kern, Boon Meksavan, y Joe Shidle. WIRELESS NETWORK DETECTOR. US 20050176420A1. MCDERMOTT, WILL & EMERY LLP 227 WEST MONROE STREET CHICAGO, IL 60606-5096 (US), issued 11 de agosto de 2005. <http://www.freepatentsonline.com/20050176420.pdf>.

Jiménez-pérez, Florencio A, María Urdaneta, Rumualdo González, y Jorge Sandoval. «DEL CELO EN NOVILLAS DE DOBLE PROPÓSITO Evaluation of Four Methods for Heat Detection in Dual Purpose Heifers» XIX (2009): 366–370.

Jin-Shyan Lee. «Performance Evaluation of IEEE 802.15.4 for Low-Rate Wireless Personal Area Networks». *IEEE Transactions on Consumer Electronics* 52, n.º 3 (agosto de 2006): 742-49. <https://doi.org/10.1109/TCE.2006.1706465>.

Katherine, Lisi, Carpio Santos, Ing Miguel Ángel, y Zúñiga Sánchez. «Sistema móvil para controlar la posición en tiempo real del ganado de la Finca Sartenejal del Cantón Baba.», 2018.

Komninou, N, E Philippou, y A Pitsillides. «Survey in Smart Grid and Smart Home Security: Issues, Challenges and Countermeasures», n.º c (2014). <https://doi.org/10.1109/COMST.2014.2320093>.

Koshizuka, Noboru, y Ken Sakamura. «Ubiquitous ID: Standards for ubiquitous computing and the internet of things». *IEEE Pervasive Computing* 9, n.º 4 (2010): 98–101. <https://doi.org/10.1109/MPRV.2010.87>.

Kshetrimayum, Rakesh Singh. «An introduction to UWB communication systems». *IEEE Potentials* 28, n.º 2 (2009): 9–13. <https://doi.org/10.1109/MPOT.2009.931847>. Kwak, Yeon Hwa, Wonhyo Kim, Kwang Bum Park, Kunyun Kim, y Sungkyu Seo. «Flexible Heartbeat Sensor for Wearable Device». *Biosensors and Bioelectronics* 94 (agosto de 2017): 250-55. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2017.03.016>.

Lang, Rudy, Michael Lescisin, y Qusay H. Mahmoud. «Selecting a Development Board for Your Capstone or Course Project». *IEEE Potentials* 37, n.º 3 (mayo de 2018): 6-14. <https://doi.org/10.1109/MPOT.2017.2716778>.

Larson, L.L., y P.J.H. Ball. *Regulation of estrous cycles in dairy cattle: A review*. Vol. 38, 1992. [https://doi.org/10.1016/0093-691X\(92\)90234-I](https://doi.org/10.1016/0093-691X(92)90234-I).

Lee, Jin-Shyan, Yu-Wei Su, y Chung-Chou Shen. «A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi». En *IECON 2007 - 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 46-51. Taipei, Taiwan: IEEE, 2007. <https://doi.org/10.1109/IECON.2007.4460126>.

Leng, Ying, y Lingshu Zhao. «Novel Design of Intelligent Internet-of-ehicles Management System Based on», 2011, 3190–3193.

Levis, Philip, Sam Madden, Joseph Polastre, Robert Szewczyk, Kamin Whitehouse, Alec Woo, David Gay, Jason Hill, Matt Welsh, y Eric Brewer. «TinyOS: An operating system for sensor networks». En *Ambient intelligence*, 115-48. Springer, 2005.

Lewis, G.S., y S.K. Newman. «Changes Throughout Estrous Cycles of Variables That Might Indicate Estrus in Dairy Cows». *Journal of Dairy Science* 67, n.º 1 (enero de 1984): 146-52. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(84\)81278-3](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(84)81278-3).

Lian, Kuang-Yow, Sung-Jung Hsiao, y Wen-Tsai Sung. «Intelligent multi-sensor control system based on innovative technology integration via ZigBee and Wi-Fi networks». *Journal of network and computer applications* 36, n.º 2 (2013): 756-67.

Luis Alberto Espejo Ponce, Yareny Rivera García, José Miguel Méndez Alonso, Abelino Lobato González, y Hugo Alberto Flores Vargas. «DISPOSITIVO DE RASTREO GPS PARA GANADO BOVINO», 2017.

Macmillan, Keith, Basiamisi Segwagwe, y C.S. Pino. *Association between the manipulation of patterns of follicular development and fertility*. Vol. 78, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0378-4320\(03\)00098-8](https://doi.org/10.1016/S0378-4320(03)00098-8).

Markoff, John. «Google Cars Drive Themselves, in Traffic». *The New York Times*, 9 de octubre de 2010. [http://www.nytimes.com/%0A2010/10/10/Science/10google.Html?Pagewanted=all&#x0026;\\_r=0%0A](http://www.nytimes.com/%0A2010/10/10/Science/10google.Html?Pagewanted=all&#x0026;_r=0%0A).

Masimo Corp. «Radical-7 Breakthrough Measurements. Radical Monitor», 2013. <https://www.masimo.co.uk/products/continuous/root/radical-7/>.

MAXIM INTEGRATED. «Pulse Oximeter and Heart-Rate Sensor IC for Wearable Health». Accedido 8 de agosto de 2019. <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/879178/MAXIM/MAX30100.html>.

N. Kushalnagar, G. Montenegro, C. Schumacher. «IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs): Overview, Assumptions, Problem Statement, and Goals», 2007, 1–12.

Nay, C. «Sensors remind doctors to wash up». *IBM Res., Armonk, NY, USA*, 2013.  
Nelson, Lílido, Viera Rosales, Freddy Boxell, Martínez Jesús Alexander, y Díaz de Ramírez. «CONDUCTA SEXUAL Y SIGNOS DEL CELO EN GANADO MESTIZO DE DOBLE PROPÓSITO (Sexual behaviour and estrus signs in crossbred dual purpose cattle)», 2002.

Odde, Ken. *A review of synchronization of estrus in postpartum cattle*. Vol. 68, 1990. <https://doi.org/10.2527/1990.683817x>.

Open Automotive Alliance. *Open Automotive Alliance*, 2015. <https://www.openautoalliance.net/#about>.

Palattella, Maria Rita, Mischa Dohler, Alfredo Grieco, Gianluca Rizzo, Johan Torsner, Thomas Engel, y Latif Ladid. «Internet of Things in the 5G Era: Enablers, Architecture, and Business Models». *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 34, n.º 3 (2016): 510–527. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2016.2525418>.

Patricia, McDermott-Wells. «What is Bluetooth?» *Potentials, IEEE* 23, n.º 5 (2005): 33-35.

Pilkington, K. «Revolv teams up with Home Depot to keep your house connected», 2014.

Porcino, D., y W. Hirt. «Ultra-Wideband Radio Technology: Potential and Challenges Ahead». *IEEE Communications Magazine* 41, n.º 7 (julio de 2003): 66-74. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2003.1215641>.

Rangel Lucía, Hernández Medrano, Juan H.. «Fisiología reproductiva de los animales domésticos». Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Accedido 26 de junio de 2019, 10-540 [http://www.fmvz.unam.mx/fmvz/publicaciones/archivos/Fisiologia\\_Reproductiva\\_pr\\_eliminares.pdf](http://www.fmvz.unam.mx/fmvz/publicaciones/archivos/Fisiologia_Reproductiva_pr_eliminares.pdf).

Raza, Ali, Ataul Aziz Ikram, Asfand Amin, y Ahmad Jamal Ikram. «A Review of Low Cost and Power Efficient Development Boards for IoT Applications». En *2016 Future Technologies Conference (FTC)*, 786-90. San Francisco, CA, USA: IEEE, 2016. <https://doi.org/10.1109/FTC.2016.7821693>.

Rey, Emilia Z. «Más que sólo detección de celo.» Más que sólo detector de celo, 15 de julio de 2018. <https://docplayer.es/amp/84291985-Mas-que-solo-deteccion-de-celo.html>.

Rippe, A Christian. «EL CICLO ESTRAL». *Dairy Cattle Reproduction Conference*, 2009, 112. [https://www.researchgate.net/profile/Christian\\_Rippe2/publication/265116863\\_EL\\_CICLO ESTRAL/links/55143dd70cf2eda0df308475/EL-CICLO-ESTRAL.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Christian_Rippe2/publication/265116863_EL_CICLO ESTRAL/links/55143dd70cf2eda0df308475/EL-CICLO-ESTRAL.pdf).

Röttgen, Volker, Frank Becker, Armin Tuchscherer, Christine Wrenzycki, Sandra Döpjan, Peter C. Schön, y Birger Puppe. «Vocalization as an indicator of estrus climax in Holstein heifers during natural estrus and superovulation». *Journal of dairy science* 101, n.º 3 (2018): 2383-94.

Ruiz Somoyar, Javier Andres. «Monitoreo en la ganadería bovina a través de redes gsm/gprs». *Mmum*, 2016, 108.

Sanmiguel Plazas, Rosa Angélica, Fernely Augusto Plazas Hernández, Dunia Yisela Trujillo Piso, María del Rocío Pérez Rubio, Lina María Peñuela Sierra, y Alice DiGiacinto. «Requerimientos para la medición de indicadores de estrés invasivos y no invasivos en producción animal». *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú* 29, n.º 1 (2018): 15-30.

Sarkar, Chayan, Akshay Uttama Akshay, R. Venkatesha Prasad, Abdur Rahim, Ricardo Neisse, y Gianmarco Baldini. «DIAT: A scalable distributed architecture for IoT». *IEEE Internet of Things Journal* 2, n.º 3 (2015): 230–239. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2014.2387155>.

Schneider, John, Takuki Kamiya, Daniel Peintner, y Rumen Kyusakov. «Efficient XML interchange (EXI) format 1.0». *W3C Proposed Recommendation* 20 (2011): 32.

Schweinzer, V., E. Gusterer, P. Kanz, S. Krieger, D. Süß, L. Lidauer, A. Berger, F. Kicking, M. Öhlschuster, y W. Auer. «Evaluation of an ear-attached accelerometer for detecting estrus events in indoor housed dairy cows». *Theriogenology* 130 (2019): 19-25.

Selva, Alma Rosa Alva de la. «Los nuevos rostros de la desigualdad en el siglo XXI: la brecha digital». *Revista mexicana de ciencias políticas y sociales* 60, n.º 223 (2015): 265-85.

Soewito, Benfano, Fergyanto E. Gunawan, y Melki Sadekh Mansuan. «WAN Optimization to Speed up Data Transfer». *Procedia computer science* 116 (2017): 45-53.

Strange, Adario. «Toyota, Audi prepping self-driving cars», 4 de enero de 2013. <https://www.pcmag.com/news/306559/toyota-audi-prepping-self-driving-cars>.

Sundmaeker, Harald, Patrick Guillemin, Peter Friess, y Sylvie Woelfflé. *Vision and Challenges for Realising the Internet of Things The meaning of things lies not in the things themselves, but in our attitude towards them. Antoine de Saint-Exupéry*. March, 2010. <https://doi.org/10.2759/26127>.

Suryavanshi, Nitesh B., K. Viswavardhan Reddy, y Vishnu R. Chandrika. «Direction Finding Capability in Bluetooth 5.1 Standard». En *Ubiquitous Communications and Network Computing*, editado por Navin Kumar y R. Venkatesha Prasad, 276:53-65. Cham: Springer International Publishing, 2019. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-20615-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-20615-4_4).

Talcott, Carolyn. «Cyber-Physical Systems and Events», 2008, 101–115. «Tutorial MPU6050, Acelerómetro y Giroscopio». Accedido 26 de agosto de 2019. [https://naylorlampmechatronics.com/blog/45\\_Tutorial-MPU6050-Aceler%C3%B3metro-y-Giroscopio.html](https://naylorlampmechatronics.com/blog/45_Tutorial-MPU6050-Aceler%C3%B3metro-y-Giroscopio.html).

Ungurean, Ioan, y Nicoleta-cristina Gaitan. «An IoT Architecture for Things from Industrial Environment», n.º May (2016). <https://doi.org/10.1109/ICComm.2014.6866713>.

Wang, Shu-na, Ri-qing Lv, Yong Zhao, y Jun-kai Qian. «A mach-zehnder interferometer-based high sensitivity temperature sensor for human body monitoring». *Optical Fiber Technology* 45 (2018): 93-97.

Wang, Wei, Cory Henson, Kerry Taylor, Commonwealth Scientific, y I C T Centre. «Early Progress and Back to the Future Semantics for the Internet of Things»: 8, n.º March (2012): 1–21. <https://doi.org/10.4018/jswis.2012010101>.

Want, Roy. «An introduction to RFID technology». *IEEE pervasive computing*, n.º 1 (2006): 25-33.

———. «Near field communication». *IEEE Pervasive Computing*, n.º 3 (2011): 4-7.

Weiser, M., R Gold, y J.S. Brown. «The origins of ubiquitous computing research at PARC». *IBM systems journal* 38, n.º 4 (2010): 693–696.  
[http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=5387055](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5387055).

X. Xiaojiang, W. Jianli, L. Mingdong. «Services and key technologies of the Internet of Things». *ZTE Commun.* 2 (2010): 11.

## 15 ANEXOS

### Anexo A. Comparación de los protocolos de Bluetooth, UWB, ZigBee y Wi-Fi.

Estándar	Bluetooth	UWB	ZigBee	Wi-Fi
Especificación IEEE	802.15.1	802.15.3a *	802.15.4	802.11 a/b/g
Banda de Frecuencia	2.4 GHz	3.1-10.6 GHz	868/915 MHz; 2.4 GHz	2.4 GHz; 5 GHz
Velocidad máxima de la señal	1 MB/s	110 MB/s	250 KB/s	54 Mb/s; 860 MB/s
Rango Nominal	10m	10m	10 - 100 m	100 m
Rango en exteriores (Línea de vista)	10 – 100 m <sup>(1)</sup>	-	1600 m	304.8 m <sup>124</sup>
Potencia de Tx nominal	0 – 10 dBm	-41.3 dBm/MHz	(-25) – 0 dBm	15 – 20 dBm
Número de canales RF	79	(1-15)	1/10; 16	14 (2.4 GHz)
Canal de Banda Ancha	1 MHz	500 MHz – 7.5 GHz	0.3/0.6 MHz; 2 MHz	22 MHz
Tipo de Modulación	GFSK	BPSK, QPSK	BPSK (+ ASK), O-QPSK	BPSK, QPSK COFDM, CCK, M-QAM
Extensión	FHSS	DS-UWB, MB-OFDM	DSSS	DSSS, CCK, OFDM
Mecanismo de convivencia	Frecuencia adaptativa por salto	Frecuencia adaptativa por salto	Selección de frecuencia dinámica	Selección de frecuencia, control de transmisión de potencia (802.11h)
Celda básica	Piconet	Piconet	Estrella	BSS
Extensión de la célula básica.	Scatternet	De igual a igual	Jerarquía de árbol, malla	ESS
Número máximo de nodos celulares	8	8	> 65000	2007
Cifrado	Cifrado de flujo EQ	Cifrado de bloques AES, (CTR, modo contador)	Cifrado de bloques AES, (CTR, modo contador)	Cifrado de flujo RC4 (WEP), Cifrado de bloque AES
Autenticación	Secreto compartido	CBC-MAC (CCM)	CBC-MAC (ext. De CCM)	WPA2 (802.11i)
Protección de Datos	16-bit CRC	32-bit CRC	16-bit CRC	32-bit CRC

<sup>(1)</sup> El rango de alcance depende de la clase del dispositivo Bluetooth, si es de Clase 1 su alcance es de 100 m y si es de Clase 2 o 3, su alcance es de 10 m.

\*Proyecto no aprobado.

Acrónimos: ASK (Amplificación por cambio de amplitud), GFSK (Frecuencia de Gaussian SK), BPSK / QPSK (SK de fase binario / cuadratura), O-QPSK (offset-PSK), OFDM (multiplexación por división de frecuencia ortogonal), COFDM (codificado OFDM) , MB-OFDM (OFDM multibanda), M-QAM (modulación de amplitud en cuadratura M-aria), CCK (codificación de código complementaria), FHSS / DSS (salto de frecuencia / espectro de propagación de secuencia directa), BSS / ESS (conjunto de servicio básico / extendido), AES (estándar de encriptación avanzada), WEP (privacidad equivalente por cable), WPA (acceso protegido a Wi-Fi), CBC-MAC (código de autenticación de mensaje de encadenamiento de bloques de cifrado), CCM (CTR con CBC-MAC), CRC (redundancia cíclica comprobar).

Fuente: Adaptado de: A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi.<sup>125</sup>

<sup>124</sup> James Graves, Debra Jones, Benjamin D. Kern, Boon Meksavan y Joe Shidle, WIRELESS NETWORK DETECTOR, US 20050176420A1 (MCDERMOTT, WILL & EMERY LLP 227 WEST MONROE STREET CHICAGO, IL 60606-5096 (US), issued 11 de agosto de 2005), <http://www.freepatentsonline.com/20050176420.pdf>.

<sup>125</sup> Lee, Su, y Shen, «A Comparative Study of Wireless Protocols».

## Anexo B. Componentes asociados basados en características del trabajo que se vaya a realizar.

Característica	Componente asociado
<b>Control</b>	
Motor	I/o digital, modulación de ancho de pulso (PWM), entrada analógica, batería
Actuador	Entrada/Salida digital, PWM, batería
Bomba	Entrada/Salida digital, PWM, batería
Solenoide	Entrada/Salida digital, PWM, batería
<b>Sensado</b>	
Fotorresistor	Entrada/Salida digital, entrada analógica
Toque capacitivo	Entrada/Salida digital
Giroscopio	Bus de circuito analógico e interintegrado (I2C), bus de interfaz periférica serie (SPI)
Acelerómetro	Entrada analógica, I2C, SPI
Efecto Hall	Entrada/Salida digital
Potenciómetro	Entrada analógica
Pulsador	Entrada/Salida digital
Termopar	Entrada/Salida digital
Inclinación	Entrada/Salida digital
Infrarrojo	Entrada/Salida digital
<b>Visual</b>	
LED	Digital i/o
LCD	I/O digital, interfaz serial de pantalla (DSI)/interfaz de alta definición (HDMI), SPI
Visualización de segmentos	Entrada/Salida digital
Proyector	HDMI, fuente de alimentación externa
Láser	Entrada/Salida digital, batería
<b>Audio</b>	
Zumbador	Entrada/Salida digital
Altavoz	Entrada/Salida digital, Conector de salida de audio
Auriculares	Conector de salida de audio
Amplificador	Digital i/o, analog-in, battery
Mic	Entrada analógica
<b>Red</b>	
Servidor	Ethernet, Almacenamiento/SD
Multimedia	Ethernet/Wi-Fi, Almacenamiento/SD, USB
Radio	Ethernet/Wi-Fi, Entrada/Salida digital
Bluetooth	Entrada/Salida digital, transmisor serial, receptor serial, USB
Wi-Fi	Entrada/Salida digital, transmisor serial, receptor serial, USB
Red de malla	Ethernet/Wi-Fi
Nube	Ethernet/Wi-Fi
GPS	Ethernet/Wi-Fi, transmisor serie, receptor serial
<b>Software</b>	
Juegos	Sistema operativo
Aplicaciones	Sistema operativo
GUIs	Sistema operativo
<b>Hardware</b>	
GPU	Sistema en un chip
RAM	SRAM, DRAM
Almacenamiento	EEPROM, FRAM, tarjetas SD, USB

Fuente: Adaptado de: Selecting a development board for your capstone or course project<sup>126</sup>.

<sup>126</sup> Rudy Lang, Michael Lescisin, y Qusay H. Mahmoud, «Selecting a Development Board for Your Capstone or Course Project», *IEEE Potentials* 37, n.º 3 (mayo de 2018), p. 7, <https://doi.org/10.1109/MPOT.2017.2716778>.

## Anexo C. Tratamiento de datos sensor ritmo cardíaco (SEN-11574).

```
#define USE_ARDUINO_INTERRUPTS true //Lee interrupciones externas del dispositivo
#include <PulseSensorPlayground.h> // Incluye la libreria del sensor
// Variables
const int PulseWire = 0; // Configuracion para leer el sensor en la entrada analogica 0
int Threshold = 550; // Determina que un pulso mayor a 550 es un error y reinicia medida
PulseSensorPlayground pulseSensor; // Crea un objeto con el metodo para leer el sensor
void setup() {
    Serial.begin(115200); // Velocidad de transmision en baudios
    pulseSensor.analogInput(PulseWire);
    pulseSensor.setThreshold(Threshold);
}
//Bucle infinito del programa
void loop() {
    // Llama a la funcion de capturar el ritmo de forma infinita
    int myBPM = pulseSensor.getBeatsPerMinute();
    if (pulseSensor.sawStartOfBeat()) { // Observa la salida del sensor y sus cambios
        Serial.println(myBPM);
    }
    delay(20); // Tiempo de refresco minimo
}
```

Fuente: Autores.

## Anexo D. Tratamiento de datos sensor de temperatura (SEN DS18B20).

```
#include <OneWire.h> // Librería del sensor
int DS18S20_Pin = 2; // Establece como entrada al pin digital 2
OneWire ds(DS18S20_Pin);
void setup() {
    Serial.begin(115200); // Velocidad del dispositivo en baudios
}
void loop() {
    float temp=getTemp(); // Variable que llama a la función getTemp()
    Serial.println(temp); // Impresión de la variable por puerto serial
    delay(5000); // Tiempo de espera para la siguiente muestra
}
float getTemp() { // Función contenedora de la lectura del sensor
    byte data[12]; // Arreglos de 12 y 8 posiciones
    byte addr[8];
    if (!ds.search(addr)) { // Busca la dirección correcta
        ds.reset_search();
        return -1000;
    }
    if(OneWire::crc8(addr, 7) != addr[7]) { // Identifica que el sensor este conectado de forma correcta
        Serial.println("CRC no valido");
        return -1000;
    }
    if(addr[0]!=0x10&&addr[0]!=0x28) { // Reconoce el sensor
        Serial.print("Dispositivo no es reconocido");
        return -1000;
    }
    ds.reset();
    ds.select(addr);
    ds.write(0x44,1);
    byte present = ds.reset();
    ds.select(addr);
    ds.write(0xBE);
    for(int i=0;i<9;i++) { // Lee el sensor y guarda los datos en un arreglo
        data[i]=ds.read();
    }
    ds.reset_search();
    byte MSB = data[1];
    byte LSB = data[0];
    float tempRead = ((MSB<<8)|LSB);
    float TemperatureSum=tempRead/16; // Fórmula para hallar la temperatura
    return TemperatureSum; // Retorna el valor al void loop
}
}
```

Fuente: Autores.

## Anexo E. Cuadro de especificaciones UDOO x86.

Características	UDOO x86
Procesador	2.22 GHz Intel Atom (Básico)
	2.24 GHz Intel Celeron (Avanzado)
	Pentium Intel de 2,56 GHz (Ultra)
Núcleos	4
Almacenamiento	8 GB eMMC, M.2 Ranura Sata, Micro
	Ranura para tarjeta SD
Memoria	2 GB (Básico)
	4 GB (Avanzado)
	8 GB (Ultra)
Conectividad	Conector Gigabit Ethernet
	Módulos inalámbricos M.2
	BLE 4.0
USB	3x USB 3.0
Otras Interfaces	Hasta 20 GPIOs
	2 x I2C - Pantalla táctil
	Interfaz RC5 IR
	14 pines de salida Arduino (4 PWM)
	6 (10 bits si hay resolución)
	SPI Flash, conector JTAG
Sensores	Acelerómetro y giroscopio de 6 ejes
OS	Windows 7,8,8.1,10 32 y 64 bits, Variantes de Linux

Fuente: Adaptado de: A Review of Low Cost and Power Efficient Development Boards for IoT Applications<sup>127</sup>.

<sup>127</sup> Ali Raza, Ataul Aziz Ikram, Asfand Amin y Ahmad Jamal Ikram, «A Review of Low Cost and Power Efficient Development Boards for IoT Applications», en *2016 Future Technologies Conference (FTC)* (2016 Future Technologies Conference (FTC), San Francisco, CA, USA: IEEE, 2016), p. 90, <https://doi.org/10.1109/FTC.2016.7821693>.

## Anexo F. Cuadro de especificaciones Tessel 2.

Características	Tessel 2
Procesador	ARM Cortex M0 de 48 MHz (Atmel SAM D21, un núcleo).
Almacenamiento	32 MB de almacenamiento flash
Memoria	64 MB de RAM DDR2
Conectividad	Enrutador WiFi de 580 MHz
	Un puerto Ethernet 10/100 (conector RJ-45)
USB	2x USB 2.0
	1x Micro USB
Otras Interfaces	Botón Pulsador
	LEDs
	16 pines GPIO
	I2C
	SPI
Lenguaje	JavaScript y Rust
Voltaje de Salida	3.3 V

Fuente: Los Autores.

## Anexo G. Cuadro de potencia, E / S y costo de las placas desde Arduino UNO Rev 3 hasta STM32L476-RG.

Placa	Voltaje de Salida	Consumo de Energía <sup>(1)</sup>	Pines GPIO	Entrada Analógica	Costo [COP] <sup>(2)</sup>
Raspberry Pi 3 Model B	3.3 V	300 mA - 1.34 A	17	No	120.400
BeagleBone Black Rev c	3.3 - 5 V	210 mA - 460 mA	66	Sí	189.200
Arduino Uno Rev 3	3.3 - 5 V	23 $\mu$ A - 45 mA	22	Sí	85.900
Intel Galileo Gen 2	3.3 - 5 V	379 mA–430 mA	20	Sí	154.800
Launchpad MSP-EXP430FR5969	5 V	0.02 $\mu$ A–100 $\mu$ A	20	Sí	55.000
NXP FRDM KL25Z	3.3 V	2 $\mu$ A–20 mA	64	Sí	51.600
pcDuino4 Nano	5 V	Desconocido	18	Sí	86.000
ST NUCLEO-L476RG	3.3 - 5 V	300 mA	64	Sí	47.200
C.H.I.P.	3.3 V	80 mA–500 mA	80	Sí	31.000

(1) El consumo de energía varía ampliamente dependiendo del modo de operación y la demanda de carga.  
(2) Precios listados más bajos, excluyendo impuestos.

Fuente: Adaptado de: Selecting a development board for your capstone or course project<sup>128</sup>.

<sup>128</sup> Rudy Lang, Michael Lescisin, y Qusay H. Mahmoud. Op. cit., p 10.

**Anexo H. Cuadro de detalles audiovisuales de las placas desde Arduino UNO Rev 3 hasta STM32L476-RG.**

Placa	Salida de Video	DSL	CSL	Salida de Audio
Raspberry Pi 3 Model B	HDMI	Sí	Sí	Conector HDMI/audio
Beagle Bone Black Rev C	MicroHDMI	No	No	MicroHDMI
Arduino Uno Rev 3	No	No	No	No
Intel Galileo Gen 2	No	No	No	No
Launchpad MSP-EXP430FR5969	No	No	No	No
NXP FRDM KL25Z	No	No	No	No
pcDuino4 Nano	HDMI, CVBS	No	Sí	Conector de audio de 3,55 mm
ST NUCLEO-L476RG	Controlador LCD	No	No	No
C.H.I.P.	Sí, TRRS	No	Sí	Sí, TRRS

Fuente: Adaptado de: Selecting a development board for your capstone or course project<sup>128</sup>.

**Anexo I. Cuadro de redes / almacenamiento de las placas desde Arduino UNO Rev 3 hasta STM32L476-RG.**

Placa	Ethernet	Wi-Fi	Bluetooth	Almacenamiento Externo	Almacenamiento Interno
Raspberry Pi 3 Model B	Sí	Sí	Sí	microSD	No
Beagle Bone Black Rev C	Sí	No <sup>(1)</sup>	No <sup>(1)</sup>	microSD	4 GB
Arduino Uno Rev 3	No	No <sup>(1)</sup>	No <sup>(1)</sup>	No	32 KB
Intel Galileo Gen 2	Sí	No <sup>(1)</sup>	No <sup>(1)</sup>	SD	8 MB
Launchpad MSPEXP430FR5969	No	No <sup>(1)</sup>	No <sup>(1)</sup>	No	64 KB
NXP FRDM KL25Z	No	No <sup>(1)</sup>	No <sup>(1)</sup>	No	28 KB
pcDuino4 Nano	Sí	No <sup>(1)</sup>	No <sup>(1)</sup>	microSD	No
ST NUCLEOL476RG	No	No <sup>(1)</sup>	No <sup>(1)</sup>	No <sup>(1)</sup>	1 MB
C.H.I.P.	No	Sí	Sí	No <sup>(1)</sup>	4 GB

<sup>(1)</sup> La placa es capaz de usar la tecnología con la ayuda de periféricos.

Fuente: Adaptado de: Selecting a development board for your capstone or course project<sup>129</sup>.

<sup>129</sup> Rudy Lang, Michael Lescisin, y Qusay H. Mahmoud. Ibid., p 11.

**Anexo J. Cuadro de conjunto de chips / software de las placas desde Arduino UNO Rev 3 hasta STM32L476-RG.**

Placa	CPU	GPU	RAM	Sistema Operativo	Código Abierto
Raspberry Pi 3 Model B	ARM Cortex-A53 (1,2 GHz, cuatro núcleos)	Broadcom VideoCore IV	1 GB	Linux, Windows 10	Parcialmente
BeagleBone Black Rev c	ARM Cortex-A8 (1 GHz, un núcleo)	PowerVR SGX530	512 MB	Linux, Android	Parcialmente
Arduino Uno Rev 3	Atmel ATmega328P (16 MHz, un núcleo)	No	2 KB	No	Sí
Intel Galileo Gen 2	Intel Quark X1000 (400 MHz, un núcleo)	No	256 MB	Linux	Parcialmente
LaunchPad MSP-EXP430FR5969	MSP-430FR5969 de 16 bits (16 MHz, un núcleo)	No	2 KB	No	Sí
NXP FRDM KL25Z	MKL25Z128V-LK4 (48 MHz, un núcleo)	No	16 KB	MBED	Sí
pcDuino4 Nano	ARM Cortex-A7 (1,2 GHz, cuatro núcleos)	Mali-400MP2	1 GB	Linux, Android	Sí
ST NUCLEOL476RG	STM32 (80 MHz, un núcleo)	No	128 KB	MBED	Sí
C.H.I.P.	ARM Cortex-A8 (1 GHz, un núcleo)	Mali 400	512 MB	CHIP OS (Linux)	Sí

Fuente: Adaptado de: Selecting a development board for your capstone or course project<sup>129</sup>.

**Anexo K. Manual de Usuario (ver archivo).**

<sup>129</sup> Rudy Lang, Michael Lescisin, y Qusay H. Mahmoud. Ibid., p 11.