

PROYECTO FINAL DE
INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Sistema de Pesaje
Automático para Ganadería

Autores

Ismael, Daniel Alejandro 6.848
Varela, Tomás Ignacio 9.972

Noviembre de 2018



1. Índice

1. Índice	2
2. Resumen	4
3. Introducción	5
3.1. Glosario de términos.....	5
3.2. Historia y antecedentes.....	6
3.3. Justificación del proyecto.....	9
4. Objetivos	10
5. Definición de producto	11
5.1. Especificacion de requerimientos.....	11
5.1.1. Requerimientos funcionales.....	11
5.1.2. Funciones.....	13
5.2. Especificaciones no funcionales y de diseño.....	13
5.2.1. Requerimientos no funcionales.....	13
5.2.2. Requisitos de rendimiento.....	14
5.2.3. Restricciones de diseño.....	14
5.2.4. Atributos del sistema.....	15
6. Análisis de factibilidad	16
6.1. Factibilidad tecnológica.....	16
6.1.1. Análisis de Alternativas de Diseño.....	18
6.1.2. Especificacion funcional.....	19
6.2. Factibilidad de tiempos.....	22
6.2.1. Planificación.....	22
6.2.2. Programación Gantt.....	23
6.3. Factibilidad económica.....	25
6.3.1. Mercado.....	25
6.3.2. Costos.....	26
6.3.3. Ciclo de vida.....	27
6.3.4. Análisis de factibilidad económica.....	27
6.4. Factibilidad legal y Responsabilidad civil.....	28
7. Ingeniería de detalle	30
7.1. Hardware.....	30
7.1.1. Diagrama en bloques.....	30
7.1.2. Descripción detallada de cada bloque.....	30
7.2. Software.....	39

7.2.1.	Adquisición de datos	39
7.2.2.	Almacenamiento	40
7.2.3.	Comunicación inalámbrica	41
7.2.4.	Interfaz de usuario	41
8.	Construcción del prototipo	43
8.1.	Pesaje.....	43
8.2.	Comunicación	47
8.3.	Interfaz de usuario	49
8.4.	Sensores climáticos	52
8.5.	Alimentación eléctrica	55
8.6.	Sistema final.....	58
8.6.1.	Versión 1	58
8.6.2.	Versión 2	59
9.	Validación del Prototipo	60
9.1.	Validación de Hardware	60
9.1.1.	Mediciones y plan de pruebas.....	60
9.1.2.	Evaluación y resultados	76
9.2.	Validación de Software	83
9.2.1.	Validación del microcontrolador.....	83
9.2.2.	Validación de interfaz de usuario	83
10.	Manual de mantenimiento	84
10.1.	Mantenimiento preventivo.....	84
10.2.	Mantenimiento correctivo.....	84
11.	Conclusiones.....	86
11.1.	Excelencias. Objetivos alcanzados	86
11.2.	Fallos. Recomendaciones para futuros diseños	87
12.	Anexos técnicos.....	89
13.	Bibliografía	99

2. Resumen

En nuestro país, los avances tecnológicos de las últimas décadas han influido directamente sobre uno de los sectores económicos más importantes: la agro-ganadería. Esta evolución ha sido sobre todo decisiva en la agricultura, aumentando el rendimiento en la producción y logrando un óptimo aprovechamiento de los recursos disponibles. Sin embargo, la ganadería ha quedado relegada en el uso de tecnologías de última generación. Un ejemplo de esta diferencia se ve evidenciada en los métodos existentes para el control estadístico del engorde animal. Actualmente, esta tarea no se encuentra con ningún nivel de automatización y requiere de una intervención humana constante, reflejándose esto en una baja densidad de datos obtenidos y por lo tanto en un monitoreo ineficiente. Se propone, con el presente trabajo, una solución automatizada que conseguiría tanto reducir los costos de operación como aumentar el rendimiento y los tiempos de engorde.

El proyecto propone un sistema de pesaje automático para la ganadería, basado en un sistema de adquisición de datos emplazado en el campo, y una unidad de almacenamiento y procesamiento de la información ubicada en un puesto de control. En el corral donde se cría a los animales se encuentra una balanza la cual por su ubicación recibe datos diarios del peso de cada bovino, el cual es identificado mediante un chip RFID colocado en su oreja. Dichos datos son almacenados y enviados a la central de monitoreo (ubicada en la vivienda u oficina) para su análisis y posterior entrega de información al usuario. Este proyecto comprende varios campos de la ingeniería electrónica, que incluyen sistemas de sensado, acondicionamiento de las señales, procesamiento, almacenamiento y posterior comunicación y visualización de la información.

3. Introducción

3.1. Glosario de términos

SPA: sistema de pesaje automático.

EEC: establecimientos de engorde a corral.

RFID: Radio Frequency Identification; tecnología utilizada para identificar el ganado, la cual consta de una antena lectora y las etiquetas que se colocan en la oreja del animal.

ADC: Analog-Digital Converter. Dispositivo utilizado para registrar en forma digital información analógica.

Zigbee: tecnología utilizada para lograr comunicaciones inalámbricas, la cual brinda una solución de alto nivel y opera en frecuencias libres (ISM 2,4GHz).

RaspberryPi3 (RPI): placa de desarrollo sobre la cual se montará la central de monitoreo y la interfaz del usuario (similar a una computadora de escritorio).

MicroSD: tarjeta de almacenamiento utilizada para guardar los datos obtenidos por el sistema.

Celda de carga: sensor encargado de obtener el peso que se ejerce sobre la estructura de la balanza.

Microcontrolador (uC): dispositivo encargado de recibir las señales de interés y realizar un primer procesamiento, antes de transmitir la información a la central de monitoreo.

SENASA: Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria.

IPCVA: Instituto de la Promoción de la Carne Vacuna Argentina.

ISM (*Industrial, Scientific and Medical*): banda de frecuencias reservadas para uso no comercial en radiofrecuencia electromagnética en áreas industrial, científicas y médicas.

3.2. Historia y antecedentes

En Argentina, el sector ganadero más importante es el bovino. A su vez, la cría de los mismos se divide mayoritariamente entre dos métodos de engorde: a campo abierto y a corral (*feedlot*). Este trabajo estará centrado en este último método, es decir que se implementará en un establecimiento de engorde a corral (EEC).

La Argentina recién incorporó la práctica del *feedlot* a comienzos de la década del '90. Las razones que motivaron su irrupción fueron económicas. La ganadería perdió terreno frente al avance de la agricultura y sus cultivos de soja, por lo que quedaron menos campos disponibles para el pastoreo. Además, representa una mejora en los tiempos de engorde: para llegar a un animal de 300 kg, por ejemplo, se requieren entre 12 y 18 meses, contra el mínimo de dos años que demora el formato a la vieja usanza.

Actualmente, según datos del Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria (SENASA) y del Instituto de la Promoción de la Carne Vacuna Argentina (IPCVA), la participación de la cría de engorde a corral en la faena nacional representa alrededor de un 37%, valor que se ha mantenido en los últimos años y que está en vistas de crecimiento (figura 1).

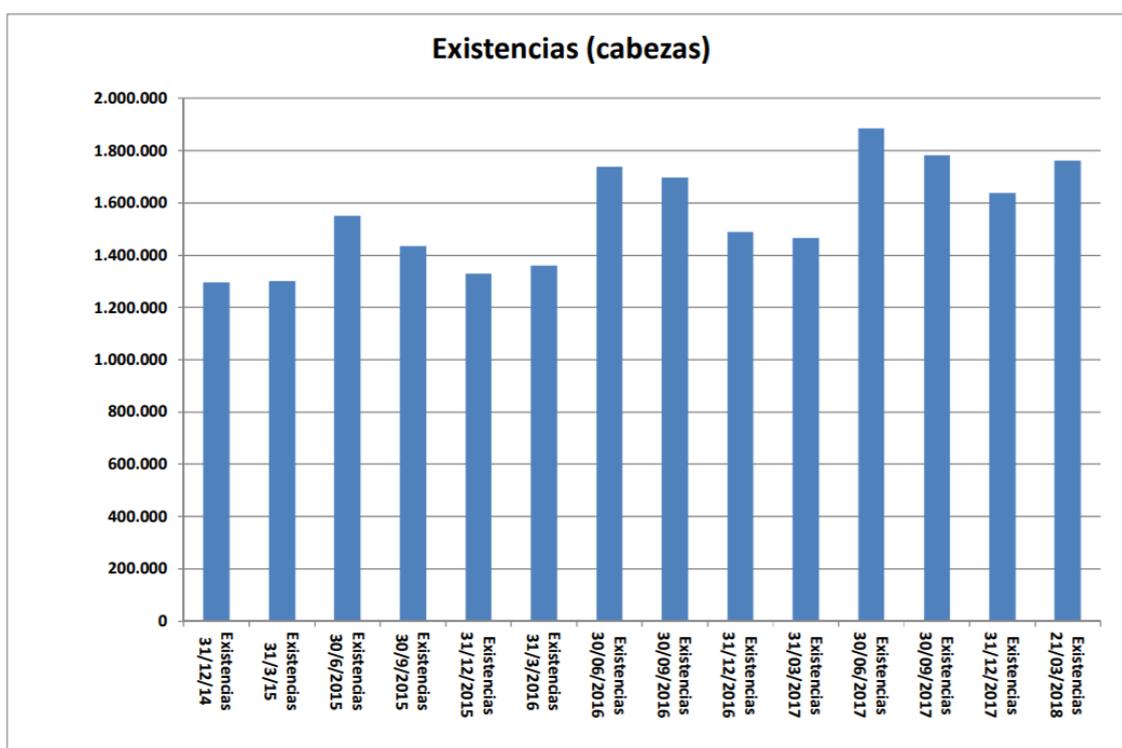


Figura 1: IPCVA. (2018) Existencias en EEC. En Informe elaborado por el Área de Información Económica y Estadística. www.ipcva.com.ar

Hoy en día, uno de los grandes desafíos que tiene el engorde a Corral es la terminación de la hacienda con más cantidad de kilos, ya que se están faenando animales de 300 kg. con una estructura, carcaza y genética para alcanzar 420 kg.; es por eso que hay que empezar a criar de forma eficiente para lograr el objetivo lógico de producción.

El ciclo de engorde del bovino se puede dividir en dos momentos bien diferenciados. En un principio, el animal comienza ganando mayor cantidad de músculos en comparación con la materia grasa, lo cual es deseable. Avanzada la edad y el peso del animal, llega un punto en el cual la ganancia de musculatura se ve reducida (se acerca a su máximo) y por otro lado aumentan con mayor aceleración los tejidos grasos, como se puede apreciar en la figura 2.

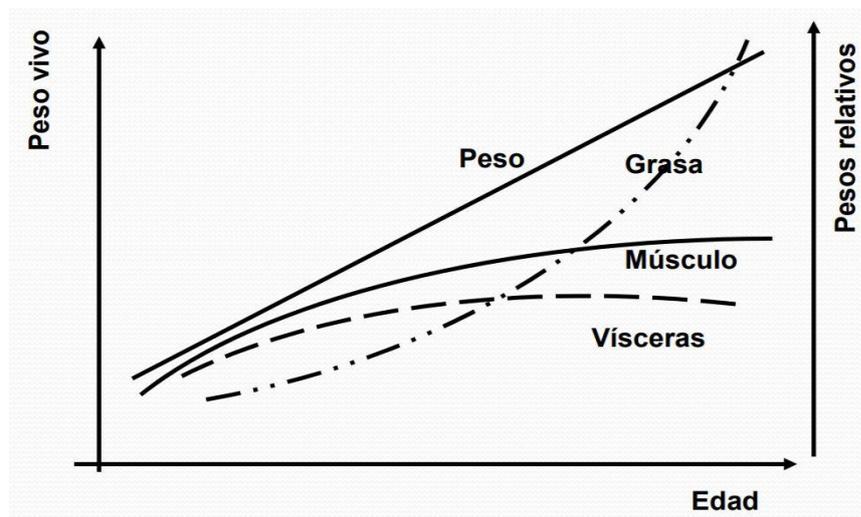


Figura 2: O. N. Di Marco. (2011) Componentes del aumento de peso. En *Tipo de animal y performance en el Feedlot*. www.ganadería.com

Se concluye entonces que otro objetivo de la ganadería es lograr identificar, con mayor precisión, el momento en el cual el animal alcanzó el peso deseado. De esa forma se podría evitar la sobre-alimentación del mismo, reduciendo así costos de materia prima y acelerando los tiempos de engorde.

Para lograr esto, el ganadero debería poder identificar la tasa de engorde de los animales, como se observa en la figura 3. Si pudiera tener acceso a esa información, con una resolución temporal adecuada, podría tomar diferentes decisiones que aumentarían su rentabilidad.

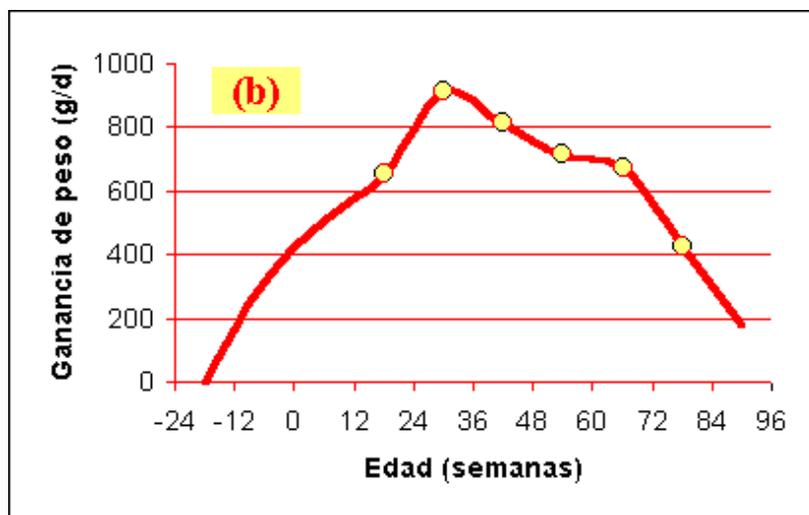


Figura 3: Héctor S. Enrique. (2001) Curvas medias para ganancia diaria de peso. En *Estructura corporal o "Frame"*. www.prodanimal.com.ar

En ese sentido, cierto grado de tecnología está siendo aplicada en la ganadería. Es normal la implementación de sistemas electrónicos para el seguimiento y monitoreo de los animales. Sin embargo, dicho control requiere del movimiento de los animales para su pesaje (ya sea cada 60, 90 o 120 días). Esto no solo es contraproducente por el estrés que genera en el ganado, sino que además hace necesaria la intervención de uno o más operarios que deben arrear al ganado, manipular los lectores de RFID, etc.

Por otro lado, la intervención de la tecnología brindaría la posibilidad de lograr un control del estado sanitario de los animales. Por ejemplo, si se pudiera monitorear el comportamiento de los mismos en cuanto a la frecuencia con la cual se alimentan o hidratan, se podrían identificar rápidamente signos de algunas enfermedades, como es el caso de una de las principales causas, la hipomagnesemia: un desorden metabólico de los bovinos, caracterizado por bajas concentraciones de magnesio (Mg) en sangre. Esta patología se presenta principalmente en países en donde las variaciones climáticas diarias pueden llegar a ser bruscas. Su incidencia es variable de un año a otro, pero es marcadamente mayor en invierno y primavera.

En el sudeste de la provincia de Buenos Aires, la hipomagnesemia constituye el principal problema de mortandad en animales adultos, llegando al 4% en los rodeos afectados. Recientemente se evaluó la incidencia de esta enfermedad durante el periodo 1991 - 2001 en el Servicio de Diagnóstico Veterinario Especializado (SDVE) del INTA EEA Balcarce donde se observó que representa el 52% de las enfermedades metabólicas diagnosticadas en bovinos. Sin embargo, en la mayoría de los casos el animal no muere repentinamente, sino que presenta síntomas de la enfermedad, como por ejemplo estar caído o afectar su hidratación, como se observa en la figura 4. En esos casos, si bien la prevención ha fallado, una rápida identificación del animal afectado (por ejemplo, al notar cambios en el comportamiento del consumo de agua) puede ser la clave para inyectarle un suplemento de magnesio y salvar así al bovino.

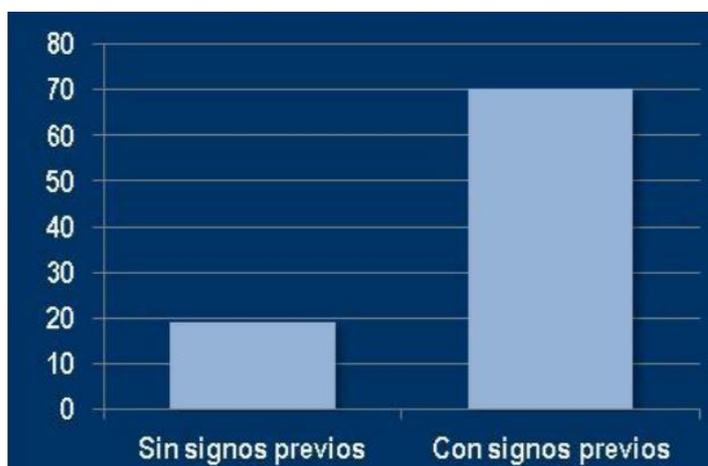


Figura 4: Germán Cantón. (2014) Porcentaje de animales que muestran signos de la patología. En Hipomagnesemia. INTA.

Además, en el mismo estudio desarrollado por el SDVE se observó cómo diferentes situaciones estresantes para el animal pueden ser factores que predisponen a la presentación de la hipomagnesemia, tal como se observa en la figura 5. Esto último está relacionado en gran medida con los movimientos y encierres que deben realizarse tanto como para vacunar al animal como para realizar los pesajes necesarios. Por lo tanto, en caso de poder obtener los pesos de los bovinos de una forma menos estresante, se podrían reducir los factores de estrés que predisponen a la patología.

De forma similar ante otras patologías, cualquier tipo de comportamiento anómalo en cuanto a la frecuencia de hidratación de los animales puede ser utilizado para detectar enfermedades y realizar un control sanitario sobre los mismos.



Figura 5: Germán Cantón. (2014) características de manejo en 27 casos de hipomagnesemia. En *Hipomagnesemia*. INTA.

Se plantea entonces como solución integral un sistema de pesaje automático que brinde esta misma información (y la amplíe) pero sin necesidad de la intervención humana, otorgando como beneficios:

- Mayor frecuencia en el monitoreo de los pesos y tasas de engorde.
- Reducción del estrés en los animales.
- Reducción de costos de materia prima y mano de obra.
- Cierta nivel de monitoreo sanitario de los animales.
- Posibilidad de adaptación a cría de campo abierto.

3.3. Justificación del proyecto

Es importante llevar la cría de ganado en EEC a un nivel de precisión mayor, con el fin de reducir los costos de engorde y aumentar la rentabilidad. Para ello es importante reducir tanto los costos operativos, como aquellos asociados a la sobre-alimentación del animal que tiene lugar tanto por fallar la identificación de los tiempos de engorde como por la falta de datos confiables sobre el peso de la vaca.

Las tecnologías existentes logran cierto nivel de monitoreo, pero sin embargo requieren una intervención humana constante y en consecuencia no logran obtener la calidad ni cantidad de datos que sí lograría un sistema automático.

Es por ello que surge la necesidad de un producto capaz de lograr un valor agregado y que a la vez sea fácil de adaptar a los métodos de cría a corral existentes hoy en día.

4. Objetivos

El sistema propuesto servirá como una herramienta para la toma de decisiones, basándose en la gran cantidad de datos obtenidos gracias al pesaje automático. Algunos de los objetivos planteados son:

- Identificar diferentes velocidades en el engorde, permitiendo vender el ganado en el momento adecuado y reduciendo así la cantidad de alimento malgastado.
- Reducir el estrés en el ganado (en especial el de manejo y transporte), el cual causa reducción en la tasa de engorde, aumenta la vulnerabilidad a enfermedades, y reduce la calidad del producto final. Esto se logra reduciendo los trabajos de rutina que incluyen el arreo, la pasada por corrales y manga para prácticas zootécnicas (por ejemplo, un pesaje no automático) y luego el retorno al corral o en su defecto al pastoreo en el campo (en vacas de cría).
- Elaboración de estrategias eficientes de nutrición basándose en los nuevos datos disponibles.
- Identificar aquellas razas con mejor tasa de engorde.
- Evaluar rendimiento de distintos tipos de alimentos según tasa de engorde.
- Calcular cantidad de agua consumida. A partir de esta información, calcular los requerimientos de agua necesarios, o a la inversa, conociendo la disponibilidad de agua, calcular cuántas cabezas de ganado se puede mantener.
- Alertar sobre posibles enfermedades o problemas sanitarios de los animales, identificando un comportamiento inusual (por ejemplo, pasar dos días seguidos sin tomar agua, o tomando menos de lo normal).

5. Definición de producto

5.1. Especificación de requerimientos

5.1.1. Requerimientos funcionales

La idea de esta solución surgió de las necesidades planteadas por un establecimiento ganadero dedicado al engorde mediante cría a corral (Feedlot). En esta comunicación se destacó la idea de obtener un sistema que pudiera pesar a los animales con mayor frecuencia y sin intervención humana, otorgando así mayor cantidad de datos útiles. Habiéndose planteado la necesidad de proponer una solución automatizada, se concluye que:

- El primer desafío será lograr el correcto pesaje de los animales. Para ello deberán seleccionarse los sensores adecuados y diseñarse una estructura con la resistencia suficiente para resistir los diferentes pesos.
- Siempre debe tenerse en cuenta el perfil de conocimiento tecnológico de los destinatarios del producto. Por tal razón es prioritario mantener una interfaz de usuario sencilla e intuitiva.
- Es probable que el sistema deba ser alimentado mediante energía solar o alguna otra fuente de energía aislada de la red eléctrica, debido al escaso acceso a la misma en la mayoría de los establecimientos. Por esta razón, el diseño de todos los componentes electrónicos deberá priorizar el bajo consumo.
- Si bien el eje principal de este proyecto es el hecho de que el sistema sea automático, no debe dejarse de lado la optimización de los costos asociados. Para lograr un producto rentable y con una rápida amortización, deberán seleccionarse adecuadamente los diferentes componentes y/o materiales a utilizar en la construcción del equipo.
- Se hizo un estudio de los métodos y productos empleados en la actualidad, los cuales en su mayoría son costosos o requieren de mano de obra específica.

Una vez estudiado el mercado, la competencia y las posibles soluciones a diseñar, se optó por realizar un sistema de pesaje que reúne las características de los productos ya existentes, pero en forma unificada y automática. El sistema debería entonces: pesar a los bovinos, identificarlos, almacenar dicha información para su procesamiento, y finalmente otorgar información de interés al usuario.

En ese sentido, en conjunto con el cliente y asesorándolo, se plantearon los siguientes requerimientos funcionales:

Nombre del requerimiento:	RF1: Amplificación de bajo ruido
Características y descripción del requerimiento:	Se amplificará la señal proveniente de la balanza, con el objetivo de poder recuperar la información de interés.
Prioridad del requerimiento:	Alta

Nombre del requerimiento:	RF2: Adquisición de señales
Características y descripción del requerimiento:	Se deberá elegir y configurar correctamente el ADC para digitalizar las diferentes señales de interés con una resolución adecuada.
Prioridad del requerimiento:	Alta

Nombre del requerimiento:	RF3: Procesamiento de datos
Características y descripción del requerimiento:	Se utilizará un microcontrolador adecuado (memoria y velocidad necesaria), para centralizar el control, procesamiento, y almacenamiento de los datos adquiridos.
Prioridad del requerimiento:	Alta

Nombre del requerimiento:	RF4: Identificación del ganado
Características y descripción del requerimiento:	Se utilizará alguna tecnología que permita identificar individualmente cada animal, como puede ser RFID, con un lector con la frecuencia y potencia adecuada para identificar a los animales situados en la balanza.
Prioridad del requerimiento:	Alta

Nombre del requerimiento:	RF5: Almacenamiento de información
Características y descripción del requerimiento:	Se utilizarán tarjetas SD conectadas al microcontrolador, almacenando allí toda la información recopilada por el sistema.
Prioridad del requerimiento:	Alta

Nombre del requerimiento:	RF6: Procesamiento de datos en RaspberryPi3
Características y descripción del requerimiento:	Este software deberá tomar los datos enviados desde la balanza y obtener diferentes conclusiones de utilidad para el usuario: <ul style="list-style-type: none"> • Identificación del peso y tasa de engorde de cada animal. • Elaboración de estrategias de engorde según raza y alimentación. • Evaluar rendimiento de distintos alimentos. • Alertar posibles problemas sanitarios de los animales, identificando un comportamiento inusual (por ejemplo, pasar dos días seguidos sin tomar agua).
Prioridad del requerimiento:	Alta

Nombre del requerimiento:	RF7: Panel solar
Características y descripción del requerimiento:	Colocación de panel solar, regulador y batería para la alimentación eléctrica de todo el sistema.
Prioridad del requerimiento:	Alta

Nombre del requerimiento:	RF8: Tensión de batería
Características y descripción del requerimiento:	Deberá sensarse constantemente la tensión de batería para asegurar el correcto funcionamiento del sistema. En caso contrario activar una alarma.
Prioridad del requerimiento:	Alta

Nombre del requerimiento:	RF9: Sensores adicionales
Características y descripción del requerimiento:	Se colocarán diferentes tipos de sensores (humedad, temperatura, entre otros) a fin de obtener información climática o cualquiera sea con información complementaria. Con un caudalímetro se calculará el agua consumida y en base a esto, se podrán conocer los requerimientos de agua disponible.
Prioridad del requerimiento:	Media

5.1.2. Funciones

El sistema deberá:

- Identificar pesos de los animales y las diferentes velocidades en el engorde, permitiendo observar el momento adecuado para la venta de cada animal.
- Brindar tasas de engorde precisas para determinados lapsos temporales, a fin de permitir al usuario evaluar el rendimiento de distintos tipos de alimentos y elaborar estrategias eficientes de nutrición basándose en los datos disponibles.
- Permitir consultas personalizadas, a fin de identificar las razas con mejor tasa de engorde.
- Calcular cantidad de agua consumida. En base a esto, conocer requerimientos de agua disponible. O a la inversa, sabiendo nuestra disponibilidad de agua, calcular cuántas cabezas de ganado se puede mantener.
- Alertar sobre posibles enfermedades o problemas sanitarios de los animales, identificando un comportamiento inusual (por ejemplo, pasar dos días seguidos sin tomar agua, o tomando menos de lo normal).

5.2. Especificaciones no funcionales y de diseño

5.2.1. Requerimientos no funcionales

Por otro lado, para asegurar un correcto funcionamiento de todo el sistema, deben tenerse en cuenta también los siguientes requerimientos no funcionales:

Nombre del requerimiento:	RNF1: Colocación de la balanza
Características y descripción del requerimiento:	Tanto la balanza como el recinto metálico utilizado para instalar los sensores de peso, deben estar correctamente colocados (es decir, al pie del bebedero) dentro del corral de interés.
Prioridad del requerimiento:	Alta

Nombre del requerimiento:	RNF2: Interfaz de usuario
Características y descripción del requerimiento:	Debe ser sencilla e intuitiva, ya que será el eslabón final del sistema encargado de conectar al usuario con la información de interés.
Hardware necesario:	Se requiere una placa de desarrollo RaspberryPi3 y una pantalla con teclado y mouse opcional (según sea táctil o no) para la entrada y salida de datos.
Prioridad del requerimiento:	Alta

Nombre del requerimiento:	RNF3: Comunicación inalámbrica
Características y descripción del requerimiento:	Toda la información deberá ser enviada a la central de monitoreo ubicada en la vivienda del campo.
Hardware necesario:	Se requieren dos módulos Zigbee para lograr un radioenlace punto a punto entre la balanza y el centro de monitoreo.
Prioridad del requerimiento:	Alta

5.2.2. Requisitos de rendimiento

Capacidad de pesaje: hasta 4 animales en simultáneo (dependiendo el contexto) y en corrales de hasta 200 bovinos.

Autonomía de funcionamiento: como mínimo 2 meses sin mantenimiento, en condiciones normales y con una batería correctamente calculada según el consumo que demanda el sistema.

Frecuencia de consulta: el sistema entregará información diaria, semanal, mensual o a demanda según cada caso.

5.2.3. Restricciones de diseño

- La amplificación de señales debe ser siempre con amplificadores de bajo ruido, para obtener datos correctos.
- En el sistema RFID se deben utilizar frecuencias y potencias que no sean dañinas para el animal.
- El sistema debe ser robusto y resistente a la intemperie.
- La interfaz de usuario debe ser simple.
- Debe existir un backup de la información en caso de no funcionar la comunicación inalámbrica.
- Utilización de paneles solares como alimentación, previendo la falta de acceso a la red eléctrica.
- Se deberán prever protecciones circuitales previendo un mal manejo de parte del operador.

5.2.4. Atributos del sistema

Fiabilidad:

El sistema debe presentar una interfaz de usuario sencilla e intuitiva.

Debe garantizar un correcto funcionamiento ante cualquier tipo de adversidad climática.

Mantenibilidad:

Debe ser lo más robusto posible, asegurando el correcto hermetismo de todas las instalaciones ubicadas en el campo, con el objetivo de resistir ante las diferentes condiciones climáticas adversas que puedan presentarse. Además, se debe intentar llevar al mínimo la cantidad de posibles fallas, ya que al encontrarse en zonas de difícil acceso se reducen las posibilidades de realizar un mantenimiento preventivo adecuado. Desde el punto de vista del hardware se priorizará la utilización de componentes de buena calidad, de proveedores confiables, con bajas tolerancias en sus valores y diseños que intenten maximizar su vida útil. En cuanto al software, se buscará la implementación de un programa robusto y capaz de informar posibles fallas.

Portabilidad:

El sistema debe poder adecuarse en diferentes tipos de corrales y/o bebederos, fácilmente y con mínimas modificaciones necesarias como pueden ser: variación en el tamaño de la balanza, cambios en la potencia del lector de chips RFID, entre otras.

Seguridad:

Se deben proveer los circuitos de protección correspondientes para proteger tanto al operador como a los componentes del equipo: buena aislación eléctrica, bloquear la posibilidad de invertir la polarización de la alimentación al conectar la batería, etc.

Se debe garantizar la seguridad de la información y los datos que maneja el sistema. Físicamente contando con un backup en una tarjeta SD, y de forma lógica al requerir de una contraseña para ingresar a la interfaz de usuario.

Disponibilidad:

Debe trabajar las 24hs del día y asegurar el correcto almacenamiento de toda la información de interés, para que esté disponible en cualquier momento que el usuario lo requiera.

6. Análisis de factibilidad

6.1. Factibilidad tecnológica

Como solución se piensa entonces un sistema automático capaz de pesar los animales, reconocerlos y, previo almacenamiento y transmisión de estos datos, lograr obtener conclusiones de utilidad para el usuario.

El equipo contará con una variedad de sensores, mediante los cuales se podrán obtener: pesos, ID, temperatura, humedad, y otras variables de interés. En todos los casos, deberán implementarse los diferentes circuitos para acondicionar y adquirir dichas señales. Debe tenerse en cuenta que no es el objetivo innovar en un componente electrónico específico, sino que el valor agregado surgirá de la implementación de un sistema integral innovador que funcione de forma robusta, simple y eficiente.

Para ello se plantea un producto cuyo diagrama de funcionamiento es el que se observa en la figura 6. Si bien algunas de las funciones planteadas son opcionales, se observa que el eje principal de funcionamiento comienza con el pesaje de los animales, sigue con su correspondiente procesamiento y finaliza con la visualización de los datos, cumpliendo así con la especificación de requerimientos.

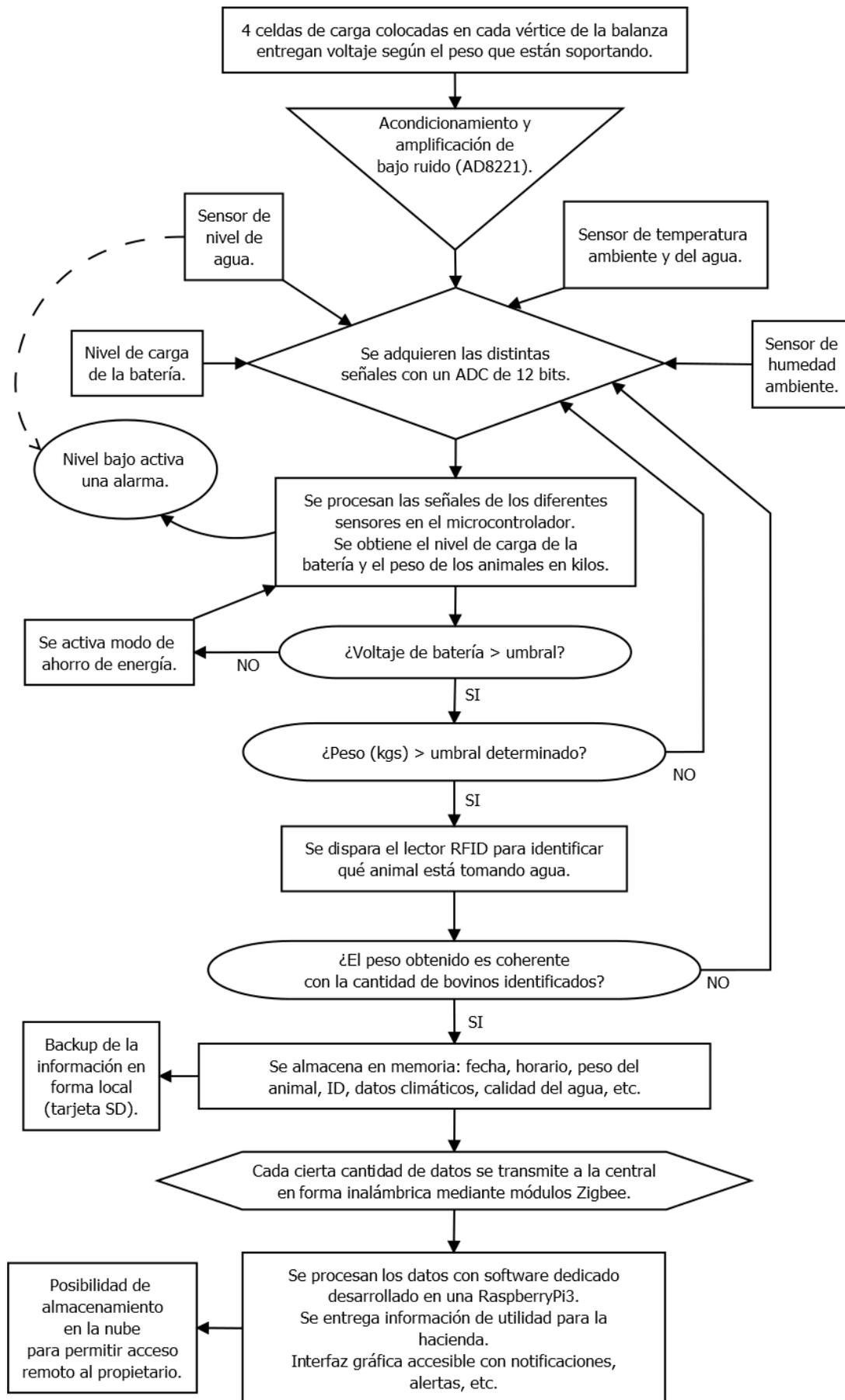


Figura 6: diagrama de funcionamiento.

Para lograr el desarrollo de dicho equipo, será necesario plantear el desarrollo sobre cuatro ejes principales:

- Pesaje.
- Reconocimiento.
- Almacenamiento y comunicación.
- Procesamiento y visualización de datos de interés.

Teniendo en cuenta estas cuatro bases y las especificaciones de requerimientos, se efectúa un análisis sobre el posible diseño del sistema.

6.1.1. Análisis de Alternativas de Diseño

6.1.1.1. *Pesaje*

En un primer paso deben obtenerse los pesos de los animales que estén tomando agua. El bebedero tendrá una dimensión de 2,70 metros de largo y una capacidad de hasta 4 animales en forma simultánea. De allí se desprende que la balanza deberá soportar al menos 2000kg, el cual corresponde al caso de pesarse 4 bovinos en forma conjunta.

Para ello se analizó la posibilidad de la utilización de celdas de carga compuestas por cuatro galgas extensiométricas conectadas como un puente de Wheatstone. Se deberá diseñar e implementar el circuito amplificador adecuado para acondicionar la señal obtenida y poder ser adquirida por un ADC.

Se analizaron diferentes circuitos integrados (CI) de amplificadores. Por un lado, se podría utilizar un amplificador de instrumental específico tal como el AD620 o el AD8221 de la empresa Analog Devices, el cual está integrado en un único CI. Otra opción sería la implementación de un amplificador de instrumental compuesto por tres amplificadores operacionales tradicionales, tal como el LM358. En ambos casos se analizaron distintas variables: consumo eléctrico, niveles de ruido, presentación de los integrados, etc.

6.1.1.2. *RFID*

Una vez obtenido el peso del bovino que está tomando agua, se debe identificar al animal en cuestión. Existen dos tecnologías capaces de identificar un target: el código de barras y la identificación por radiofrecuencia (RFID). En este caso, por la naturaleza del objeto a identificar (un animal) es necesaria una tecnología que pueda individualizar a cada uno de ellos a distancia y estando en movimiento, es decir que es necesario utilizar RFID.

Para ello se utiliza un lector RFID comercial de largo alcance. Se considera costoso, tanto en términos económicos como en cuanto a cantidad de tiempo, el diseño y desarrollo de un lector propio. Deberá determinarse entonces la frecuencia adecuada para dicho lector, como así también el tipo de TAG a utilizar (activo o pasivo). Estos últimos, son etiquetas RFID que contienen un chip de memoria y una antena, permitiéndoles recibir y responder a peticiones por radiofrecuencia desde el emisor-receptor (lector).

6.1.1.3. *Almacenamiento y comunicación*

Una vez determinado el peso e identificado el animal (o animales), se debe almacenar dicha información para su posterior procesamiento. Esto se hace en primer lugar en forma local en el bebedero, lo que podría tener como opción una tarjeta de almacenamiento micro-SD.

Posteriormente esta información se enviará en forma inalámbrica hacia la central de monitoreo ubicada en el campo. Para ello se analizó el uso de diferentes tecnologías, protocolos y frecuencias. En un principio se analizó la utilización de módulos RF sin protocolos de alto nivel.

Si bien esta opción es la más económica, supone un conocimiento profundo sobre la programación del mismo, lo cual puede limitar la posibilidad de escalar y replicar el sistema a futuro.

Se eligió entonces el módulo comercial Xbee3 de la empresa Digi, el cual trabaja sobre el protocolo Zigbee en la banda ISM 2,4GHz, en especial por el bajo consumo, la facilidad de instalación y el amplio soporte técnico existente alrededor del mismo.

6.1.1.4. *Procesamiento*

Los primeros tres ejes estarán acoplados y manejados mediante un microcontrolador. No es así en el caso del procesamiento de los datos y la implementación de la interfaz de usuario. En este último punto, se desarrollará el software sobre una placa de desarrollo RaspberryPi3, lo cual reduce costos y simplifica la operación. Además, al utilizar software de licencia libre, permite la fácil comercialización del producto.

Con los datos recibidos desde el bebedero, se implementará una base de datos. Luego la aplicación se encargará de obtener conclusiones según los requerimientos funcionales del sistema, para luego ofrecerlos en forma gráfica e intuitiva al usuario final.

6.1.2. *Especificación funcional*

Planteadas ya las necesidades de desarrollo del proyecto, se enumeran entonces con un mayor detalle técnico, los requerimientos funcionales:

RF1 - Amplificación de bajo ruido: la señal proveniente de la celda de carga será de muy bajo nivel. Los sensores entregan una tensión de 2mV/V como fondo de escala. Es decir que, en nuestro caso, al ser alimentados con 10V y ser de 1500kg, tendrán un fondo de escala de 20mV. Como es de esperarse, la señal que maneja el sistema será menor a 20mV, ya que se tomaron los 1500kg como margen, pero en realidad cada sensor no debería de tener aplicados más de 500kg en ningún momento de su vida útil.

Dicho esto, queda evidenciado que cada mV entregado por la celda de carga contiene información valiosa. Por ello el sistema de amplificación debe ser de muy bajo ruido, en su configuración adecuada y con los filtros correspondientes.

RF2 - Adquisición de señales: una vez amplificada la tensión entregada por las celdas de carga, la misma llegará a un ADC. Dicho conversor definirá la resolución del sistema, es decir entre qué pesos puede distinguir. En este caso, se desea una sensibilidad de al menos 1kg en cada sensor.

RF3 - Procesamiento de datos: el microcontrolador ubicado en el bebedero deberá ser capaz de proveer los ADC necesarios, así como de recibir todas las señales de interés y procesarlas, para luego ser almacenadas y posteriormente comunicadas a la central de monitoreo. Para ello deberá tener al menos dos (2) ADC con más de cuatro (4) canales cada uno, y al menos diez (10) pines de entrada/salida.

RF4 - Identificación del ganado: se deberá utilizar un lector de RFID en una frecuencia y potencia tal que se logre identificar al animal en un rango de aproximadamente tres (3) metros, siendo este el largo de la balanza. Además, los TAGs a utilizar sobre el animal, deben ser pasivos ya que no se cuenta con la posibilidad de reemplazar la batería ni de afrontar los costos que supondría uno activo.

RF5 - Almacenamiento de información: debe utilizarse una tarjeta SD ya que ésta puede ser alimentada con la tensión que presenta el microcontrolador, es decir 3,3V. Para ello debe instrumentarse el circuito acondicionador con las resistencias de pull-up adecuadas en los pines del microcontrolador necesarios para leer y escribir la tarjeta.

RF6 - Procesamiento de datos en RaspberryPi3: se utilizará esta placa ya que así se podrá implementar una interfaz de usuario sencilla e intuitiva, posiblemente con una pantalla táctil como periférico de entrada/salida para con el usuario. El procesamiento previo de los datos se implementará con un algoritmo hecho, en lo posible, sobre el lenguaje de programación Python. El mismo contará con los pesos del ganado en los diferentes días. Con esta información deberá, además de entregar el peso de cada animal (en caso de ser solicitado por el cliente), identificar las diferentes tasas de engorde de cada bovino. De esta manera podrá advertir al cliente en el momento en que dicha tasa disminuya, significando esto que el animal ha llegado a la finalización de su engorde, y puede dejar de proveérsele alimento suplementado.

Podrá presentar otras utilidades: alertas en caso de que algún animal presente un comportamiento extraño, como puede ser la falta de hidratación en los tiempos usuales; predecir cuanto tiempo falta para que cada uno llegue a su punto máximo de engorde; etc.

RF7 - Panel solar: el sistema debe contar con alimentación independiente de la red eléctrica. Para ello deberá utilizarse tanto un panel solar, regulador y batería capaces de alimentar un sistema de aproximadamente 35 Wh de consumo diario.

RF8 - Tensión de batería: dicha tensión debe ser constantemente monitoreada, a fin de llevar al sistema a un modo de ahorro de energía de ser necesario. Para ello se utilizará un divisor resistivo con los valores correspondientes para no representar un consumo eléctrico significativo, así como un buffer para aislar eléctricamente la batería del resto del sistema.

RF9 - Sensores adicionales: se implementarán sensores climáticos para obtener datos que permitan sacar conclusiones acerca del comportamiento de los animales. Para ello deberá poder medirse la temperatura ambiente, la humedad relativa y la temperatura del agua. Todas estas mediciones deberán tener un error relativo menor al 10%.

En lo posible también deberá medirse la lluvia. En caso de no poder medir la cantidad de agua precipitada, saber al menos si en las últimas horas ha llovido o no (sensor detector de lluvia).

Por otro lado, según los requerimientos no funcionales:

RNF1 - Colocación de la balanza: la estructura debe ser fabricada con madera resistente al peso de al menos 4 animales. Esto se corresponde con un peso aproximado de 2000kg. Debe tener un marco de hierro y un piso de madera con las dimensiones observadas en la figura 7; y cuatro (4) soportes metálicos dentro de los cuales se ubicarán las celdas de carga (sensores de la balanza). Estos materiales deberán tener el tratamiento adecuado para poder ubicarse a la intemperie sin sufrir daños que pudieran afectar el correcto funcionamiento del sistema.

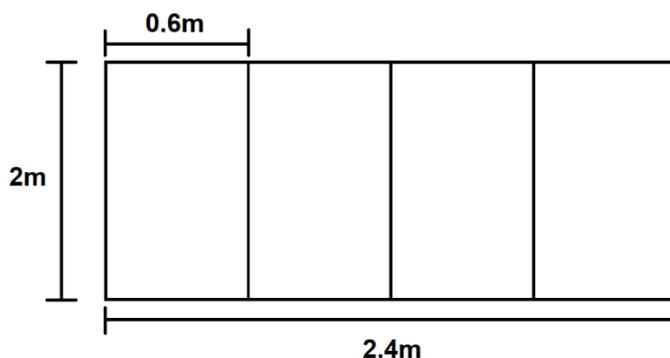


Figura 7: vista superior de la estructura de la balanza.

Debe ubicarse al ras del piso, logrando de esta forma que el animal no tenga que realizar ningún esfuerzo para subirse a la balanza. De hecho el animal no debe notar, al caminar, ninguna diferencia en su andar.

RNF2 – Comunicación inalámbrica: toda la información obtenida en la balanza, debe ser comunicada, como se observa en la figura 8, hacia el centro de monitoreo para su posterior procesamiento y visualización por parte del cliente. Para ello debe asegurarse un rango de comunicación de al menos 300m, distancia típica entre los corrales y la central.

Entre las diferentes opciones tecnológicas disponibles, se opta por módulos que trabajen en la banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) de 2,4GHz, ya que la misma se encuentra liberada para su uso civil (no requiere registrar el dispositivo) y, además, con la configuración y elección de la antena adecuada, pueden lograrse distancias de comunicación de hasta varios kilómetros.

Además, debe tenerse en cuenta que los módulos a utilizar deben ser de bajo consumo. No deberían superar los 100mA de consumo eléctrico durante su fase de transmisión (el resto del tiempo estarán en modo ahorro de energía).

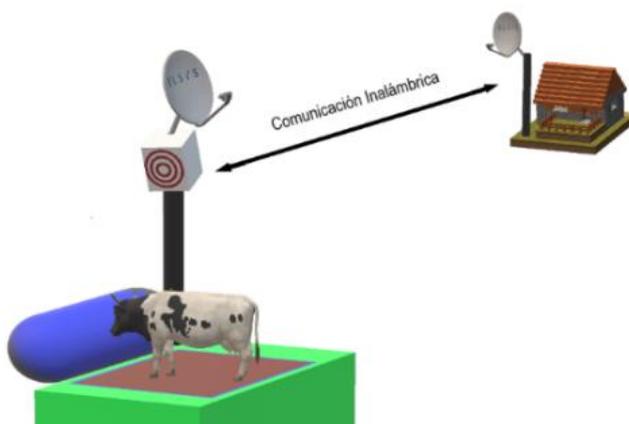


Figura 8: comunicación inalámbrica.

6.2. Factibilidad de tiempos

6.2.1. Planificación

A continuación, se presenta una tabla con las tareas a desarrollar para llevar a cabo el proyecto. En la misma se detallan los tiempos estimados de cada tarea, tanto los optimistas como los pesimistas.

Nro.	Tarea	Antecesora	Duración (optimista) [días]	Duración (pesimista) [días]
1	Definir idea	N/A	25	31
2	Investigar producto existentes	1	10	15
3	Investigar mercado ganadero	1	10	15
4	Definición del producto	2,3	10	15
5	Elección celdas de carga	4	10	15
6	Diseño amplificador	5	10	15
7	Fabricación prototipo de amplificador	6	10	15
8	Testeo y ensayo de celdas	7		15
9	Programación pesaje en microcontrolador	6	45	60
10	Construcción de estructura balanza	7	45	60
11	Prueba de pesaje en campo	10	3	5
12	Diseño de circuito para tarjeta SD	4	3	5
13	Programación de SD en microcontrolador	9,12	45	60
14	Elección de lector y TAGs RFID	4	15	20
15	Diseño circuito RFID	14	10	15
16	Documentación de comandos RFID y programación en microcontrolador	15	30	40
17	Programación de RFID en microcontrolador	14,16	25	35
18	Elección y configuración de módulos Zigbee	4	55	75
19	Programación Zigbee en microcontrolador	18	10	20
20	Diseño de circuitos acondicionadores para sensores adicionales	4	30	40
21	Cálculo de consumo eléctrico	11,15,18	20	30
22	Elección de panel solar, regulador y batería	21	35	45
23	Fabricación de prototipo	11,13,17,19	20	30
24	Testeo de prototipo	23	10	15
25	Diseño y programación de interfaz de usuario	23	20	30
26	Fabricación y testeo PCB	24	15	20
27	Testeo sistema final	26	10	15
28	Documentación en informe de tesis	27	25	30
	Total de días:		471	786

Tabla 1: tareas del proyecto.

Cabe destacar que el total de días informado por la tabla 1 no contempla la ejecución simultánea de tareas, sino que resulta de una sumatoria lineal de las mismas. Es de esperarse entonces, que la duración real del proyecto sea menor a la allí expresada. Se acude entonces al diagrama de Gantt observado en la [sección 6.2.2](#), a fin de reflejar el orden real esperado en la ejecución de las tareas.

6.2.2. Programación Gantt

Las tareas mencionadas anteriormente pueden verse reflejadas en el diagrama de Gantt. En el caso optimista se prevé la finalización del proyecto para el día 19 de agosto de 2018, como se observa a continuación:

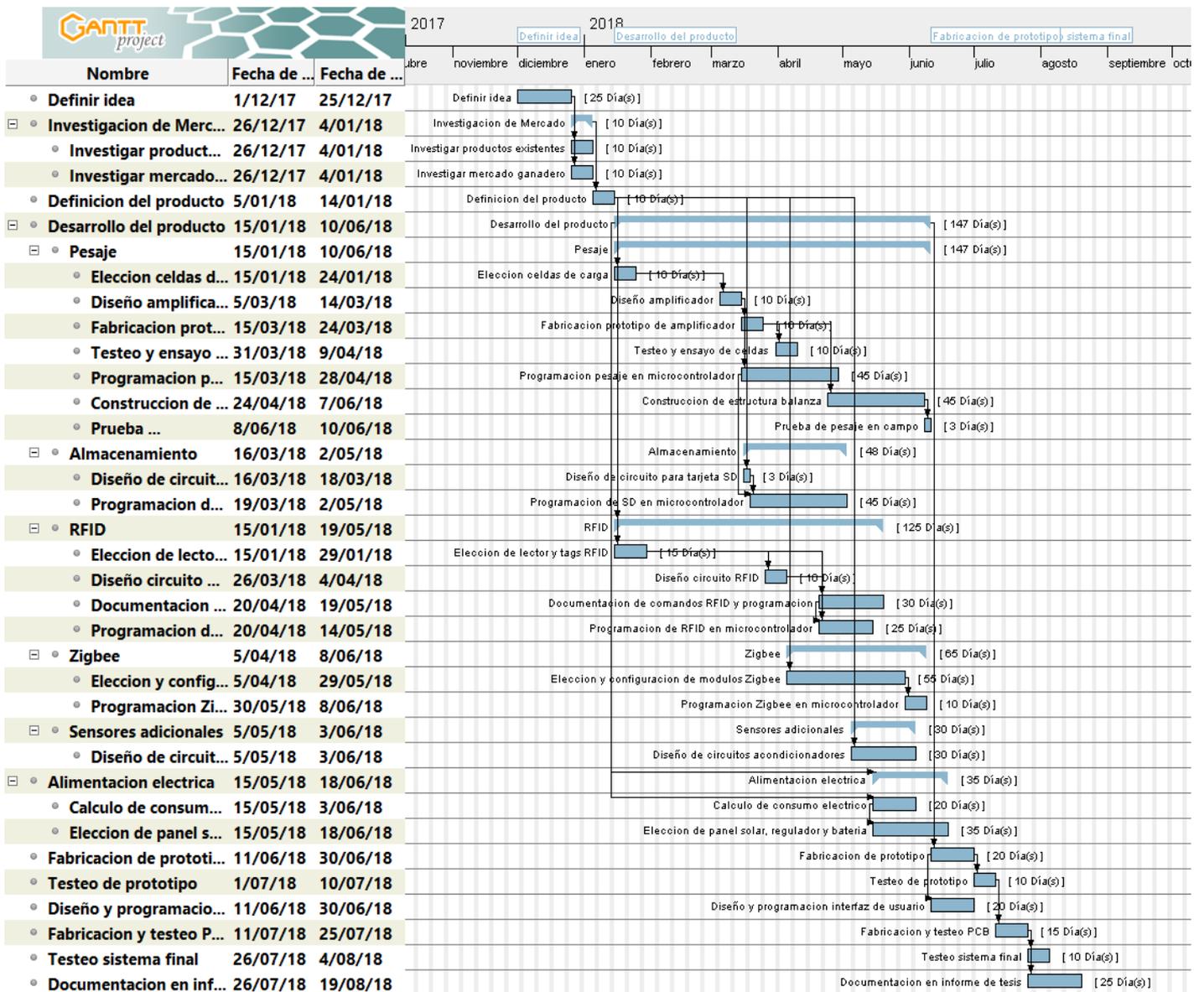


Figura 9: diagrama de Gantt optimista.

Por otro lado, bajo un panorama pesimista respecto a la duración de las tareas, el diagrama de Gantt arroja una fecha de finalización del proyecto estimada para el 31 de octubre de 2018.

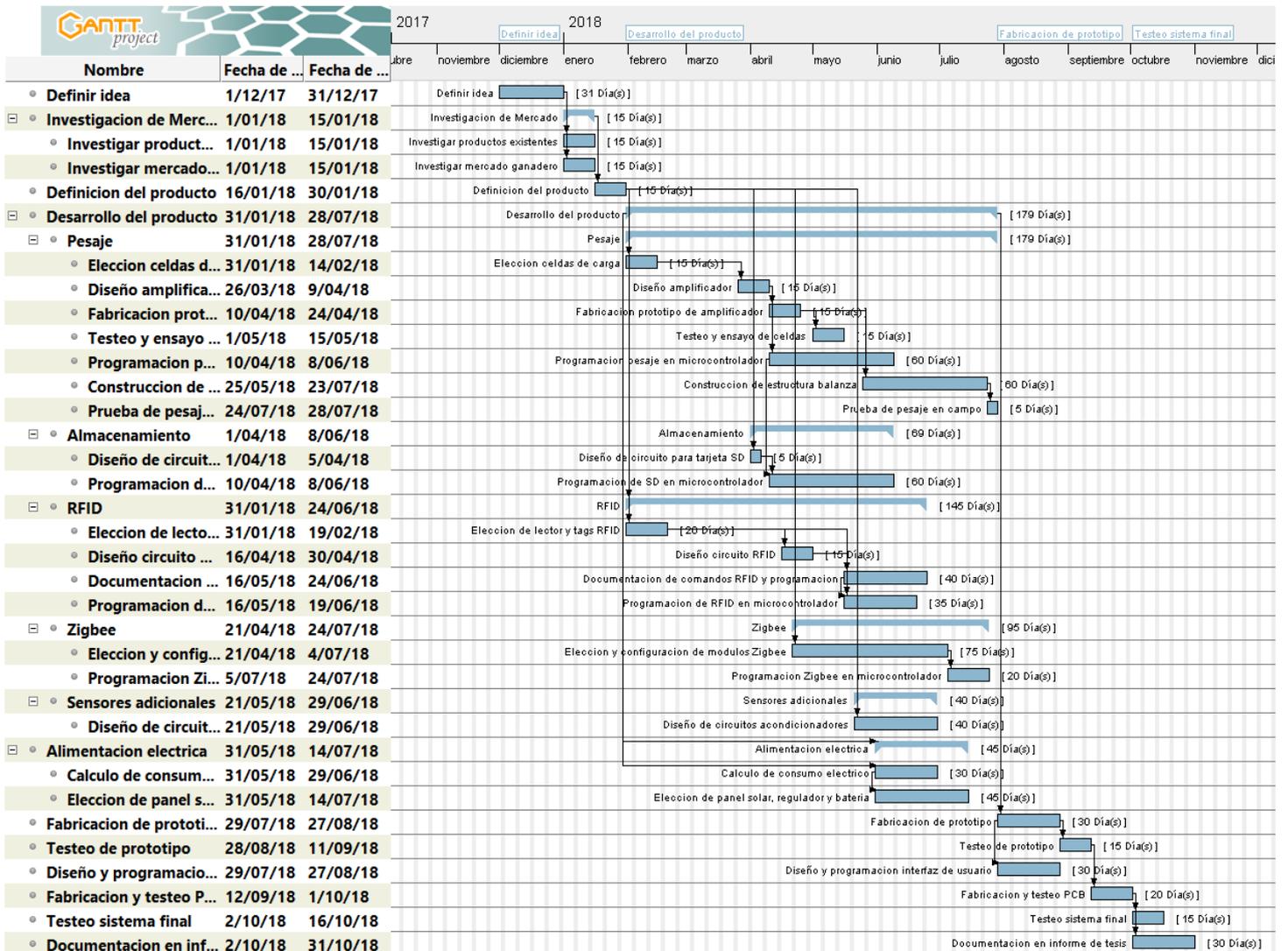


Figura 10: diagrama de Gantt pesimista.

6.3. Factibilidad económica

Al no existir productos similares en el mercado, no se pudo utilizar este criterio para establecer un precio de venta. Sin embargo, se puede hacer una comparativa con productos que cumplen con ciertas funcionalidades (no todas) del Sistema de Pesaje Automático (SPA). En base a esos precios y a los costos de los componentes utilizados se analizó la factibilidad económica del proyecto para que el producto sea competitivo y a la vez presente una cierta rentabilidad esperada.

6.3.1. Mercado

Gracias a información provista por el SENASA y el IPCVA, se logró realizar un estudio sobre la producción de carne vacuna en la Argentina, como así también relevar datos sobre el estado de los establecimientos de Feedlot en el país. Además, se accedió a información por parte de diferentes productores ganaderos. Algunas conclusiones obtenidas fueron:

- El pesaje de los animales debería realizarse con una frecuencia no menor a los 15/30 días, aunque en la realidad estos pesajes se realizan cada 60/90 días. Incluso en muchos establecimientos no se realiza ningún tipo de control hasta no estar ya vendido el ganado.
- En los casos en que se realiza un monitoreo de los pesos de los animales, se debe contar con una balanza in situ. Además, se debe tener en cuenta el tiempo perdido debido al arreo de los animales, ya que deben ser trasladados a la manga correspondiente.
- En algunos establecimientos, se utiliza reconocimiento por RFID para llevar un control informatizado de ciertos datos de los animales.
- Los establecimientos de Feedlot cuentan con alrededor de 1,76 millones de bovinos por trimestre, los cuales alrededor del 35% se encuentran en la provincia de Buenos Aires.

Se observa entonces un mercado estable, de gran tamaño, y con una clara necesidad de implementar algún tipo de solución que permita obtener mayores datos a la hora del monitoreo del engorde de los animales.

Actualmente no existe en el mercado un producto que permita, en forma automática y con la frecuencia deseada, realizar el pesaje de las vacas. Únicamente se encuentran por separado soluciones sobre identificación por RF, y por otro lado balanzas electrónicas (figura 11 y 12).



Figura 11: lector RFID. Fabricante Tru-Test. Web: <http://www.trutest.com.ar/>



Figura 12: balanza electrónica. Fabricante Tru-Test. Web: <http://www.trutest.com.ar/>

Dichos productos no solo presentan un costo elevado (el bastón ronda los USD 1900), sino que siguen aún necesitando de la intervención humana para el traslado de los animales (además del estrés que esto provoca sobre los bovinos).

Se podría decir que el producto propuesto sumaría las funcionalidades de estos dos productos, pero con el valor agregado de la automatización en su funcionamiento.

6.3.2. Costos

Se tomaron en cuenta los costos de desarrollo de la placa principal y los circuitos acondicionadores, así como de los módulos comerciales adquiridos. Los componentes escogidos para el prototipo en esta etapa temprana del proyecto son tentativos y están sujetos a modificación durante el desarrollo del producto. Los costos de todos los componentes requeridos para la instalación del sistema son los observados en la tabla 2.

Componentes	Costo
Lector RFID:	USD 100,00
Celdas de carga (4):	USD 150,00
Estructura de la balanza:	USD 400,00
Componentes amplificador (4):	USD 50,00
Placa amplificador (4):	USD 10,00
Componentes uC (con módulos de comunicación):	USD 145,00
Placa uC:	USD 15,00
Kit panel solar 25W:	USD 300,00
Central de monitoreo:	USD 300,00
Cables/Varios:	USD 50,00
Costo envíos + aduana:	USD 176,00
TOTAL	USD 1.696,00

Tabla 2: costos del sistema.

Por otro lado, hay que tener en cuenta los costos de funcionamiento, los cuales están asociados a la compra de los chips RFID que deben ser colocados en la oreja del animal. Estos chips, denominados TAGs, no son reutilizables ya que posteriormente a su colocación no hay forma de retirarlos íntegramente de la oreja del animal, es decir que su vida útil es lo que dure el engorde (aproximadamente 4 meses) y tienen un costo unitario de aproximadamente USD 1,70. Debe tenerse en cuenta que este es un costo también presente en los productos comerciales descritos anteriormente (figura 11 y 12), ya que están basados en la misma tecnología.

Sin embargo, estos costos están relacionados a la instalación del equipo sobre un solo costado del bebedero. De utilizarse ambos lados se duplicaría la cantidad de animales monitoreados, pero solo aumentarían los costos relacionados con la balanza, ya que la placa principal, los módulos de comunicación, el kit del panel solar y la central de monitoreo se compartirían. Se logra de esta forma, aumentar en un 100% la capacidad del sistema, aumentando tan solo un porcentaje de los costos, como se observa en la tabla 3.

Componentes	Costo
Antena RFID:	USD 100.00
Celdas de carga (4):	USD 300.00
Estructura balanza:	USD 800.00
Componentes ampli (4):	USD 100.00
Placa ampli (4):	USD 20.00
Componentes micro (con 2 Xbee):	USD 145.00
Placa micro y Xbee (2):	USD 15.00
Kit panel solar 25W:	USD 300.00
Central monitoreo:	USD 300.00
Cables:	USD 100.00
Costo envíos + aduana:	USD 239.00
TOTAL =	USD 2,419.00

Tabla 3: costos del sistema utilizando ambos lados del bebedero.

Teniendo en cuenta este último caso, por el sistema pasaran 400 vacas en un cuatrimestre, es decir 1200 vacas anuales. Por lo tanto, el costo de funcionamiento asociado a los TAGs RFID que deben colocarse en cada animal es de aproximadamente USD 2.000,00.

6.3.3. Ciclo de vida

Para analizar el ciclo de vida de este producto es importante remarcar el carácter innovador del mismo, así como el tipo de mercado apuntado. Se trata de un sector estable, e incluso en crecimiento. En el mercado local se prevé un crecimiento importante de la cantidad de establecimientos de engorde a corral en los próximos 10 años, debido al incremento del nivel de exportación como así de las exigencias en la precisión de los tiempos de engorde, lo que incrementaría la demanda de este producto.

6.3.4. Análisis de factibilidad económica

Fijando un precio de venta de USD 5.000,00 en el caso del sistema que realiza el pesaje a ambos lados del bebedero, se procede a analizar cuanto se ahorra el cliente comparando con los métodos convencionales. No se tendrán en cuenta en este caso los costos del bastón RFID ni de la balanza electrónica que el campo debiera contar en el caso del pesaje convencional.

Por un lado, teniendo en cuenta que un pesaje de 200 animales tiene un costo de aproximadamente 9 horas de mano de obra, y que la frecuencia ideal de pesaje es de cada 15 días, esto da que para 1200 bovinos anuales el costo de pesaje sería de aproximadamente USD 2.700 (alrededor de 1300 horas hombre). Además, debe tenerse en cuenta que cada día de pesaje es un día en el cual el animal no puede alimentarse y, por lo tanto, es un día perdido en cuanto al engorde deseado.

Por otro lado, debido a la falta de precisión a la hora de identificar el punto de engorde máximo del animal, se debe considerar la pérdida asociada a la sobre-alimentación del mismo. Este valor será diferente en cada caso ya que depende del nivel de exactitud con el cual se desempeña cada establecimiento, según su experiencia y nivel de pericia en desarrollo ganadero. Sin embargo, puede aproximarse dicha pérdida a valores entre USD 3.000 y USD 6.000.

Se concluye entonces que, en el mejor de los casos, en una cría de 1200 vacas anuales, se tiene una pérdida de al menos de USD 5.700 relacionada con el pesaje y la sobre-alimentación de los bovinos. Si se analiza esto mismo, pero en el plazo de dos años, y además se compara con la instalación del sistema de pesaje automático, se obtienen los valores observados en la tabla 4.

	SPA	Metodo convencional
1er año	USD 5.000 (instalación) + USD 2.000 (funcionamiento)	USD 5.700
2do año	USD 2.000 (funcionamiento)	USD 5.700
TOTAL (en dos años):	USD 9.000	USD 11.400

Tabla 4: costos del SPA vs metodo convencional.

Si bien el costo inicial por la instalación del producto resulta ser un monto alto, gracias al ahorro que permitiría el producto (tanto en alimento como en mano de obra), el producto podrá ser amortizado en alrededor de dos años, o incluso antes. Debe tenerse en cuenta que se trata de un análisis simplificado y no se consideraron por ejemplo los beneficios adicionales (control sanitario, mejora en los tiempos de engorde, etc.).

Es claro que el producto esta apuntado a medianos y grandes productores, debido a la cantidad de animales necesarios para hacer rentable el sistema. Se observa entonces que el plazo de amortización del producto es atractivo para este sector, el cual planifica y toma decisiones a largo plazo, es decir al menos 5 años.

6.4. Factibilidad legal y Responsabilidad civil

Se verificó que el producto no incumpliera con la legislación que rige sobre los establecimientos de engorde a corral, por ejemplo, según la ley 14.867 en la provincia de Buenos Aires. Como valor agregado, incluso llega a intervenir en forma positiva en algunos puntos como por ejemplo los establecidos en el artículo 8 inciso b), el cual trata sobre el acatamiento de las normas de bienestar animal a efectos de evitar, en todo momento, el maltrato, sufrimiento y estrés de los bovinos durante su estadía en el establecimiento.

Frecuencias de señales eléctricas utilizadas

Según el ENACOM (Ente Nacional de Comunicaciones), las bandas de frecuencias no licenciadas se pueden definir como aquellas en las que se permite la operación de dispositivos de radiocomunicaciones sin una planificación centralizada por parte de la Autoridad de Comunicaciones, es decir, sin una autorización individual de cada estación tal que asegure la asignación de una frecuencia o canal para uso exclusivo de la misma. La banda se destina íntegramente a tales dispositivos, sin subdivisión de canales, estableciéndose ciertos requerimientos básicos de convivencia, tales como límites de potencia o de densidad de potencia radiadas, anchura de banda mínima, etc. La coordinación corre por cuenta de los usuarios, pero se apoya principalmente en la inmunidad contra interferencias, propia de la tecnología empleada, y el modo de acceso múltiple a la banda.

En el caso de este trabajo, al tratarse de un contexto aislado (el campo) y prácticamente sin interferencias, no debieron tenerse mayores consideraciones a la hora de la elección de las frecuencias a utilizar, tanto en el caso de la comunicación como en el del RFID. Se eligieron entonces las bandas no licenciadas de 902-928MHz y 2.400-2.500MHz, las cuales tienen prioridad de uso para aplicaciones industriales, científicas y médicas (ISM).

En ambos casos, se tuvo que tener en cuenta que las señales utilizadas no fueran ionizantes, tanto como para los animales como los posibles humanos que pudieran estar expuestos a las mismas.

Resolución 1994/2015

La resolución del ministerio de salud fija la Tasa de Absorción Específica (SAR) media para todo el cuerpo, en el intervalo de frecuencias de 100 kHz a 10 GHz en un máximo de 0,4 W/kg para la exposición ocupacional y 0,08 W/kg para la exposición poblacional. Por otro lado, el valor de SAR localizado en cabeza y tronco, promediado sobre una masa de 1 gramo, no deberá superar un valor máximo de 8 W/kg para exposición ocupacional y 1,6 W/kg para exposición poblacional.

Según estudios que han abordado la medición del SAR sobre tejidos biológicos aún no se cuenta con suficiente información sobre el impacto de estas señales de RF en el largo plazo y ante exposiciones prolongadas, aunque en este caso dada la baja potencia utilizada (30dBm) se cumplen con los valores máximos fijados por el ministerio de salud. Cabe aclarar que dichos valores son similares a los adoptados mundialmente.

Estándares de compatibilidad electromagnética

Además, se buscará mantener los estándares fijados por la FCC (*Federal Communications Commission*), la cual plantea normas de compatibilidad electromagnética para validar productos que puedan llegar a emitir señales, para su venta en los Estados Unidos. Sin embargo, cuenta con un reconocimiento mundial por lo que se utilizaron los valores máximos fijados en la sección 15.247, los cuales hablan de una potencia máxima de emisión, para las bandas utilizadas, de entre 0.125W y 1W como máximo, según el caso. Se verifica entonces, tanto en el caso de los módulos XBee como del lector RFID, que nunca se supera la potencia máxima de 1W.

Para la programación del microcontrolador se utilizó software de licencia libre provisto por el fabricante del mismo, el STM32CubeMX. De mismo modo, para la programación de la Raspberry Pi, se basó el sistema en el sistema operativo gratuito Raspbian. Fue también así para la programación de los módulos de comunicación XBee, para los cuales se utilizó software libre de la empresa Digi. De esta forma, no se requiere ningún tipo de certificación ni licencia específica.

Con respecto a la energía requerida por el sistema, ninguno de sus módulos maneja más de 20V (lo entregado por el panel solar), por lo que no se requieren mayores consideraciones en cuanto al riesgo eléctrico.

7. Ingeniería de detalle

7.1. Hardware

El sistema de pesaje automático cuenta con dos módulos de hardware bien diferenciados, aquel situado en el corral (encargado del pesaje en sí) y por otro lado la central de monitoreo implementada en la oficina o vivienda del establecimiento.

7.1.1. Diagrama en bloques

Se han descrito a lo largo del informe las diferentes partes con las cuales contará el producto. A continuación, se observa el diagrama en bloques simplificado con los componentes necesarios.

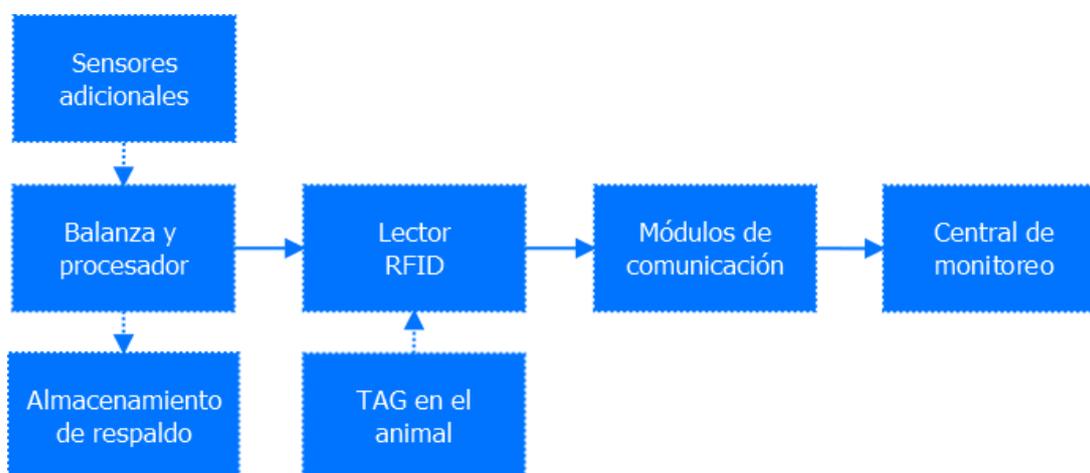


Figura 13: diagrama en bloques de los módulos de Hardware.

7.1.2. Descripción detallada de cada bloque

Balanza

1. Celdas de carga

Suponiendo que se pesarán entre 3 y 4 animales simultáneamente (dependiendo del largo del bebedero), se considerarán los 2000kg como el máximo peso posible en la balanza (sin contar el peso de la estructura). Por lo que considerando un margen de al menos el doble (no mucho más para no perder resolución) y teniendo en cuenta que se utilizarán cuatro celdas de carga (una en cada vértice de la balanza), se deberán seleccionar sensores de aproximadamente entre 1250 y 2000kg.

Para ello, como sensores se utilizarán celdas de carga, las cuales son transductores que entregan una tensión eléctrica proporcional a la fuerza que se les está aplicando. Dicho transductor está compuesto por un arreglo de cuatro galgas extensiométricas, la cual basa su funcionamiento en la deformación elástica (lineal) que sufren los metales y semiconductores cuando son sometidos a un cierto rango de esfuerzo. Dicha deformación es traducida luego, a través del arreglo zigzag que compone la galga, en una variación lineal de resistencia eléctrica. Sin embargo, dicha variación es mínima, y por lo tanto las diferencias en tensión que produce también lo son, por lo que requieren de una posterior amplificación.

La topología utilizada es la del puente de Wheatstone, un arreglo de cuatro resistencias (al ser puente completo) tal como se observa en la figura 14. En dicho circuito, se ingresa con una

tensión de excitación (IN), y se obtiene una tensión de salida (OUT) proporcional a los valores de las resistencias, según la ecuación (1).

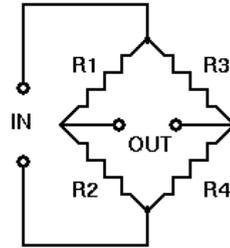


Figura 14: celda de carga en configuración puente completo.

$$V_{OUT} = \left(\frac{R_4}{R_3+R_4} - \frac{R_2}{R_1+R_2} \right) * V_{IN} \quad (1)$$

La celda elegida es de 1500kg y presenta una tensión diferencial de salida de 2mV/V a fondo de escala. De esta información provista por el fabricante se desprende la ecuación (2).

$$V_{OUT} = V_{IN} * 2mV * \frac{Peso[kg]}{1500kg} \quad (2)$$

En nuestro caso, la tensión de excitación para las celdas de carga (Vin) es de 10V, y por lo tanto el voltaje de salida para un determinado peso aplicado se calcula según la ecuación (3).

$$V_{OUT} = 20mV * \frac{Peso[kg]}{1500kg} \quad (3)$$

2. Amplificador de bajo ruido

Considerando la tensión de salida reducida que entregan las celdas de carga, es necesario realizar una amplificación de elevada ganancia, para lo cual se debe utilizar un circuito que priorice mantener el ruido al mínimo, así como un bajo consumo eléctrico. Para ello se tuvieron en cuenta dos opciones. En primer lugar, la utilización de un amplificador de instrumentación integrado, como puede ser el AD620, cuya topología interna es la que se observa en la figura 15 y el cual se presenta en CI de 8 pines, necesitando únicamente como componente externo una resistencia (Rg) para fijar la ganancia del sistema, la cual está definida según la ecuación (4).

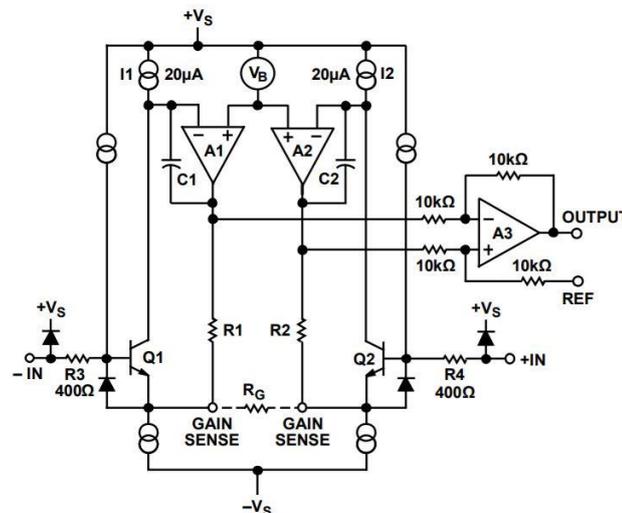


Figura 15: esquema simplificado del AD620.

$$G = \frac{49,4K\Omega}{R_G} + 1 \quad (4)$$

Por otro lado, como alternativa, puede diseñarse un amplificador de instrumental con entrada en alta impedancia y ganancia ajustable utilizando tres amplificadores operacionales convencionales (preferiblemente rail-to-rail) como puede ser el LM358. Se logra entonces obtener un amplificador de instrumental tal como se observa en la figura 16, y cuya ganancia está definida por la ecuación (5).

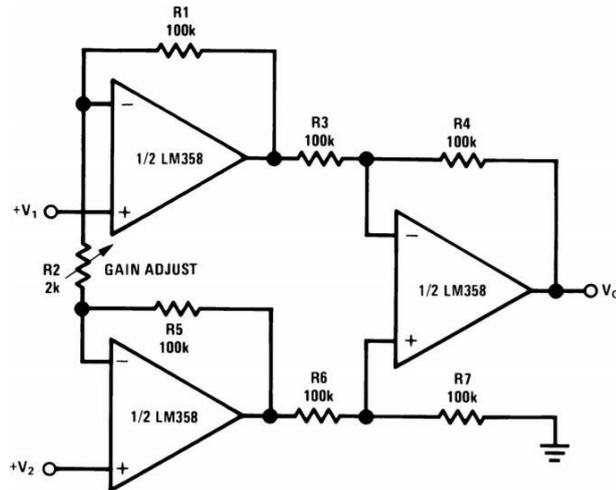


Figura 16: amplificador de instrumental con tres LM358.

$$G = \frac{2R_1}{R_2} + 1 \quad (5)$$

Para el cálculo de la ganancia necesaria se debe realizar un análisis de los pesos máximos que podrá medir el sistema. Si se considera que la balanza tiene capacidad para cuatro animales, en el peor de los casos se estarán pesando cuatro bovinos de 500kg, lo cual totaliza 2000kg. Además, se debe tener en cuenta el peso de la estructura de la balanza, la cual es de aproximadamente 200kg. Dividiendo entre los cuatro sensores, se puede considerar que el peso máximo que recibirá cada celda de carga es de aproximadamente 550kg. Este valor se corresponde con una tensión de salida de 7,15mV. Por lo que, si dicha tensión debe corresponderse con los 3,3V de tensión máxima del ADC, la ganancia deberá ser de aproximadamente 460 veces.

Se realizarán entonces diferentes análisis para decidir la elección de una u otra alternativa.

3. Fuente de tensión negativa

Debido a que las celdas de carga entregan una tensión de salida de entre 0 y 20mV, se debe asegurar que el amplificador responda de manera correcta en todo el rango de tensión de salida, el cual se corresponde con el rango dinámico del ADC (0 a 3,3V). Para ello, la alimentación de dicho circuito deberá ser de fuente doble, es decir que se lo debe alimentar tanto con tensión positiva como negativa.

Para generar la tensión negativa, se pueden utilizar circuitos de capacitores conmutados, los cuales funcionan con fuente simple y entregan como resultado de su operación una tensión negativa. Tal es así el caso del ICL7660, cuyo diagrama de funcionamiento simplificado es el que se observa en la figura 17.

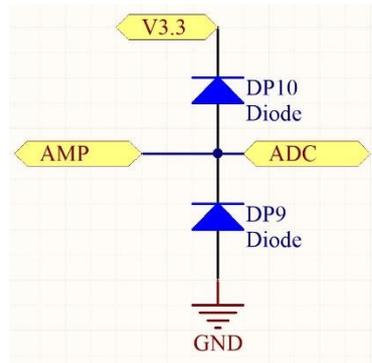


Figura 18: diodos de protección.

5. Sensores climáticos

No solo interesa conocer los pesos de los animales, sino que es conveniente conocer algunos factores del ambiente en el cual se encuentra el mismo. Se sabe que la temperatura y la humedad, entre otras cosas, afectan el comportamiento y engorde del animal.

Es por eso que se seleccionó un medidor de temperatura y humedad ambiente, el HTUF3535 diseñado para bajo consumo y mínima cantidad de componentes externos. Se implementará por software su tabla de lookup correspondiente.

También se medirá la temperatura del agua que se les da a los bovinos, como un factor adicional que afecta su comportamiento. Debido al corto rango de valores a medir (0 a 40 °C) se descarta la utilización de una termocupla, la cual sería necesaria en caso de necesitar medir altas temperaturas. Por otro lado, un termistor requeriría tanto una calibración externa como un circuito acondicionador específico. Es por ello que se utilizará el CI LM35, el cual se colocará en el bebedero dentro de un encapsulado hermético. El acondicionamiento de las señales se hará con el circuito amplificador de la figura 19, diseñado para obtener una lectura de temperatura de rango completo. En ese sentido, se colocan dos diodos sobre el pin de masa a fin de elevar la referencia y permitir la lectura de temperaturas cercanas a 0°C (común en épocas invernales). La salida del LM35 es de 10mV/°C respecto a esta referencia, por lo tanto, se amplifican ambas señales para ser posteriormente adquiridas por el uC y restadas por software.

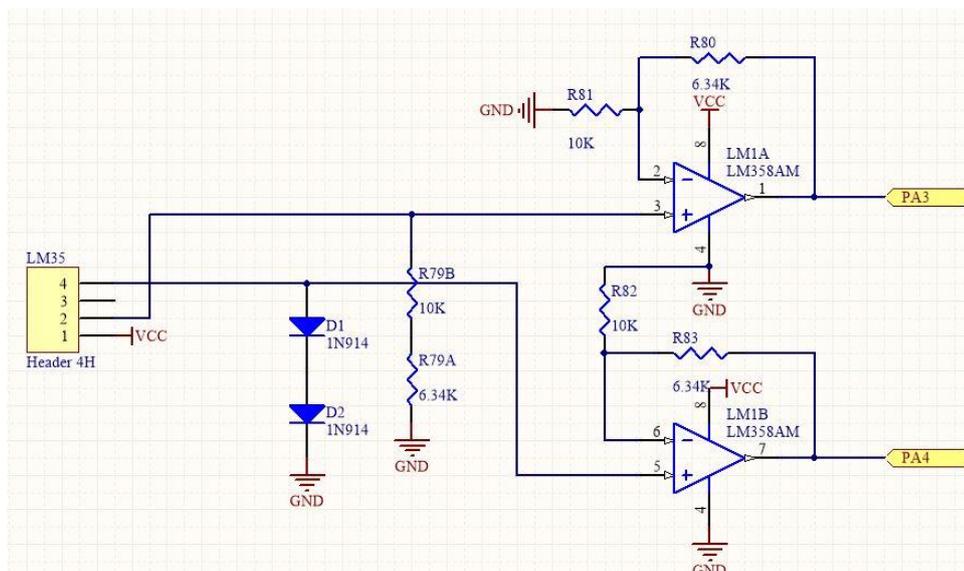


Figura 19: circuito acondicionador del sensor de temperatura de agua.

6. Tarjeta SD

Por último, todos los datos adquiridos por los diferentes sensores deben ser almacenados para su posterior transmisión. Para ello se utiliza una tarjeta micro-SD, la cual permite la recuperación de todos los datos en caso de que en algún momento fallara la comunicación inalámbrica. Es necesario implementar el circuito mostrado en la figura 20 para poder realizar la comunicación por SPI con el microcontrolador.

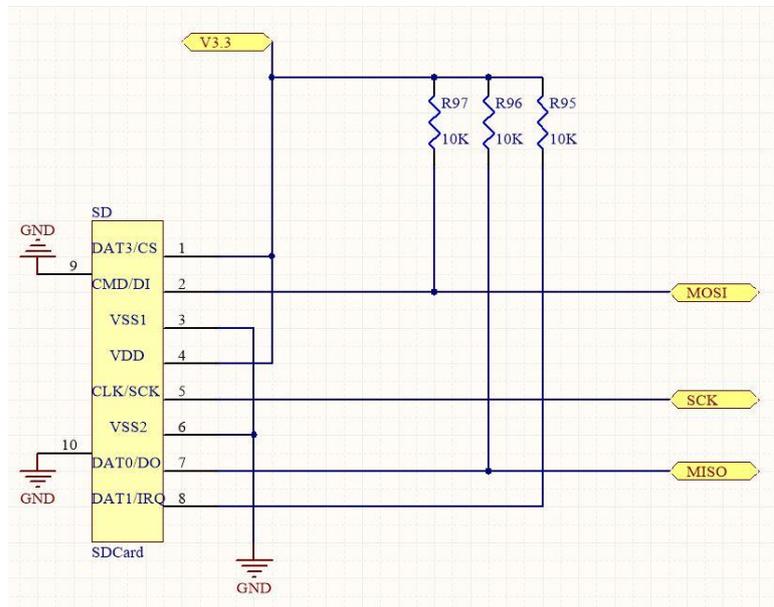


Figura 20: circuito acondicionador tarjeta SD.

RFID

1. Lector

Para la correcta identificación de los animales situados en el bebedero, el rango del lector a utilizar debe ser de al menos 3 metros. La frecuencia que permitiría lograr dicha distancia es la de la banda UHF ubicada entre 860-960 MHz, la cual también presenta una baja interferencia ante obstáculos del tipo orgánico (los mismos animales).

Por el tiempo necesario, costo y complejidad del diseño de un lector (controlador, antena, etc.), se optó por la adquisición de un dispositivo comercial, observado en la figura 21.



Figura 21: lector RFID.

Dicho lector cumple con la norma ISO 18000-6C, lo que permite contar con una interoperabilidad entre distintos fabricantes de TAGs, además de asegurar ciertos estándares de calidad. Presenta una potencia ajustable de entre 0-30dBm, una antena de 8dBi y polarización circular, lo cual brinda según el fabricante hasta 6 metros de rango de lectura. Además, cuenta con un software dedicado el cual permite programar diferentes funciones.

Sin embargo, el equipo demanda un alto consumo eléctrico incluso al no estar disparando. Para solucionar dicho inconveniente, será necesario implementar una llave de encendido comprendida por dos transistores MOSFET como se observa en la figura 22, y controlada por el programa de adquisición mediante una salida digital del microcontrolador.

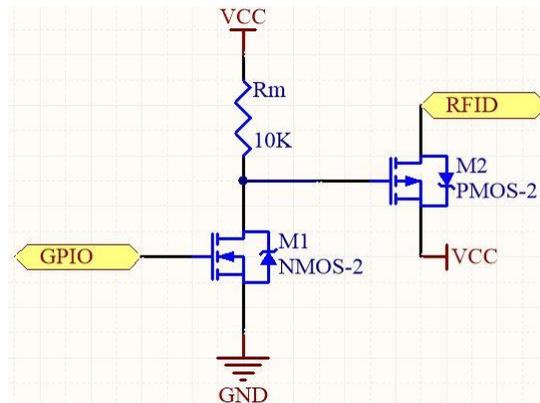


Figura 22: llave de encendido para el lector RFID.

Por último, cabe remarcar que el dispositivo cuenta con la función de escritura, lo que permitirá en caso de ser necesario grabar información dentro de los TAGs que luego se colocarían en cada animal. Esto podría ser útil en futuras funcionalidades que se implementen sobre el sistema, evitando depender (en ciertos casos específicos) de una base de datos y almacenando entonces los mismos sobre el TAG portado por el animal. Puede ser un ejemplo el control de vacunación (se escribe en el TAG al momento de vacunar al animal) o algún otro tipo de almacenamiento de datos relacionados con el animal, los cuales podrían ser consultados de forma inmediata con un lector RFID (sin una central de monitoreo).

2. TAG

Los TAGs generan una señal de radiofrecuencia con los datos de identificación del chip. Esta señal es captada por el lector, que se encarga de leer la información y pasársela, en formato digital, al microcontrolador.

Los TAGs RFID pueden ser activos, semipasivos (o semiactivos) o pasivos. Los activos y semipasivos necesitan alimentación, típicamente una pila pequeña, y generalmente se utilizan para lograr rangos de lectura mayor a los 3 metros. Los TAGs pasivos no requieren ninguna fuente de alimentación interna y sólo se activan cuando un lector se encuentra cerca para suministrarles la energía necesaria. En este caso, se utilizarán este último tipo de TAGs, ya que presentan un menor costo y cumplen con los requisitos del sistema.

Los TAGs a colocar en los bovinos deben ser de la banda UHF 860-960 MHz y presentar un buen rango de lectura. Para ello se tuvieron en cuenta dos chips diferentes: el Alien Higgs 3 y el Monza QT 4, ambos conformes a la especificación EPC Gen 2, la cual define ciertos requerimientos físicos y lógicos, asegurando la compatibilidad de los TAGs con el lector comercial elegido. El primero de los chips presenta una sensibilidad de lectura de -20dBm, mientras que en el Monza es de -19,5dBm.

Ambos identificadores se colocan de igual manera y son como los observados en la figura 23. Además, presentan un costo similar por lo que se deberán realizar diferentes tipos de pruebas para analizar el rango de lectura de ambos chips.



Figura 23: TAGs RFID colocados en el animal.

Módulos de comunicación

En primer lugar, se analizó la utilización del módulo de comunicación *nRF24L01*. Dicho integrado provee un bajo consumo, buen rango de alcance y poca cantidad de componentes externos para su funcionamiento. Sin embargo, al no contar con un protocolo de alto nivel, requiere un esfuerzo de programación adicional tanto para vincular enlaces punto a punto como para establecer redes con varios nodos. En ese sentido, dichos módulos no presentan la posibilidad de escalar el sistema en forma sencilla y confiable, lo cual sería necesario en caso de instalar el equipo en más de un corral. Además, carecen de un soporte técnico adecuado para asegurar el correcto mantenimiento de los mismos.

Se decidió entonces la implementación de módulos XBee3 para la comunicación inalámbrica. Dichos dispositivos cumplen con la especificación *ZigBee*, la cual se basa en un conjunto de protocolos de alto nivel para radiodifusión digital de bajo consumo, basada en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal (*WPAN*). Se destaca entonces por presentar las siguientes mejoras:

- Bajo consumo, con posibilidad de habilitar modo de ahorro de energía (*sleep*) y 130mW de consumo en transmisión.
- Topología de red en malla, la cual permite una fácil escalabilidad de la red inalámbrica.
- Fácil integración, al no requerir prácticamente componentes externos.
- Software dedicado, programación de alto nivel y buen soporte técnico.
- 1000 metros de rango de alcance.

Central de monitoreo

Para la consulta y visualización de los datos es necesario montar una central en la vivienda del establecimiento ganadero. Dicho equipo debe tener conectado un módulo *XBee3* para recibir los datos de los animales adquiridos en el corral.

Si bien en algunas viviendas podría ya encontrarse instalada una computadora, se analizará el caso en el cual no se cuente con dicho dispositivo. Es por ello que se elige desarrollar el programa sobre una placa de desarrollo Raspberry Pi3, la cual permite montarle el sistema operativo Raspbian, basado en Debian (Linux). La RPi3 cuenta con las siguientes especificaciones técnicas:

- Procesador Quad Core 1,2GHz Broadcom BCM2837 64bit.
- 1GB RAM.
- BCM43438 wireless LAN and Bluetooth Low Energy (BLE).
- 100 Base Ethernet.
- 40-pin GPIO.
- 4 USB2.
- HDMI.
- Micro SD.
- Fuente de alimentación con Micro USB (2.5A).

De esta forma, solo es necesario la placa, un monitor, un mouse y un teclado. Con estos pocos componentes de hardware, se cuenta ya con una computadora de fácil utilización para el usuario, sobre la cual se puede desarrollar un software intuitivo y de buen desempeño.

Alimentación eléctrica

Si bien no forma parte estrictamente del sistema de pesaje, se debe tener en cuenta que todo el equipo será alimentado por una batería. La misma será dimensionada según consumos estimados, y recargada mediante un panel solar con su correspondiente regulador.

Además, para el sensado de la tensión de batería se utilizará un divisor resistivo con el fin de disminuir la tensión y acondicionarla para la entrada a un amplificador operacional en configuración seguidor como se observa en la figura 24. De esta forma, se aísla eléctricamente la batería de la entrada del ADC y se logra tener una medición constante de su voltaje.

En caso de identificar un nivel de tensión por debajo de un cierto umbral, el sistema ingresa en un modo de ahorro de energía. Dicho circuito se encuentra alimentado entre 0 y 3,3V, a fin de mantenerse en funcionamiento y detectar cuando la batería se encuentre nuevamente cargada. Como ventaja adicional, al tener una tensión máxima de 3,3V, no es necesaria la colocación de diodos de protección para el ADC ya que, en este caso, de saturarse el amplificador, no se superaría la tensión máxima admitida por el microcontrolador.

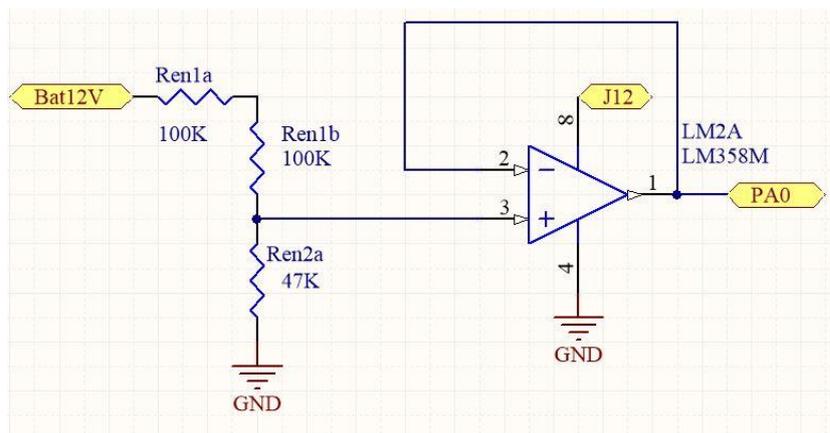


Figura 24: circuito para medición de tensión de batería.

7.2. Software

En el caso de los programas desarrollados, los algoritmos utilizados para la adquisición de datos, almacenamiento y transmisión de los mismos, fueron implementados sobre el microcontrolador en lenguaje C. Por otro lado, para la interfaz de usuario se trabajó en un programa escrito en lenguaje C++ y Python sobre el sistema operativo Raspbian.

7.2.1. Adquisición de datos

En primer lugar, se debe configurar el microcontrolador, inicializando todas sus funciones y cargando el programa encargado del funcionamiento del sistema. Para ello se utilizaron los softwares dedicados: *STM32CubeMX* para su configuración y *System Workbench for STM32* para la programación.

En el caso de la adquisición de datos, se hacen necesarios al menos 10 canales del ADC para los siguientes datos:

- 4 para los sensores de peso.
- 4 para los sensores climáticos: temperatura ambiente, humedad ambiente, y 2 para temperatura del agua (la referencia necesaria para medir temperaturas cercanas a los 0°C y el valor de salida).
- 1 para el sensado de la tensión de batería.
- 1 para la medición de la V_{ref} a fines de mantener precisa la lectura de los demás canales del ADC.

Este último canal se trata de uno interno, el cual se utiliza para medir una tensión específica de 1,2V. Dicho valor, ha sido previamente medido por el fabricante. Según se informa por hoja de datos, en dicho proceso alimentan el microcontrolador con un voltaje estable de 3,3V, leen el canal interno V_{ref} del ADC, y almacenan su valor en el lugar de memoria 0x1FFF7A2A. De esta forma, después de cada medición se halla el valor de la tensión de funcionamiento del ADC mediante un simple cálculo realizado en base a lo sugerido por el fabricante, logrando obtener conversiones precisas.

Obtención del peso e identificación del animal

Para la medición de la balanza, se utiliza el modo DMA (*direct memory access*), el cual trabaja con la memoria de acceso rápido del microcontrolador. Dicho modo de funcionamiento permite lograr una mayor velocidad, al no ingresar los datos a la memoria RAM del sistema. Lo que hace entonces la rutina encargada de la adquisición de los pesos es tomar 1000 muestras por cada sensor a 70kHz, es decir, en forma cuasi-simultánea, con diferencias de tiempo despreciables para la naturaleza de los datos en cuestión.

Posteriormente, la rutina de atención al ADC se encarga de promediar las muestras obtenidas, logrando de esta forma un filtrado por promediación. En el siguiente paso, se evalúa en primer lugar la variación de un determinado conjunto de valores para asegurarse de que el animal este o no completamente sobre la balanza y que no haya sido una perturbación sobre la balanza (se toman 6 mediciones cada medio segundo), y luego también se analiza la variación de dicho peso obtenido respecto al anterior (la tara). Es entonces cuando el sistema decide si debe disparar la identificación por RF, en caso contrario actualiza el valor de tara. Además, el programa analiza y actualiza constantemente el peso individual promedio del corral. De esta forma, al decidir si debe encender el lector RFID, entrega también a la rutina correspondiente la información sobre cuántos animales se encuentran en ese momento sobre la balanza.

Si el lector es disparado, el programa controla que la cantidad de animales identificados sea igual a la cantidad informada por la rutina de adquisición del peso, repitiendo una cierta cantidad de disparos hasta coincidir o agotar un tiempo determinado. En caso de obtener un número de TAGs coherente con la cantidad de animales, procede al almacenamiento. En caso contrario, de leerse TAGs de animales que se encuentran cerca de la balanza, el sistema descarta estos datos ya que es incapaz de identificar a que bovino corresponde el peso medido. Es por ello fundamental la correcta colocación del lector y el establecimiento de zonas de exclusión para evitar lecturas erróneas.

Sensores climáticos

Previo al almacenamiento, se llama a la rutina de lectura de los datos de temperatura y humedad. De esta forma se tienen disponibles los datos climáticos correspondientes al horario en el cual el animal está siendo pesado.

Medición de la tensión de batería

El sensado del voltaje de funcionamiento del sistema se realiza en forma periódica, una vez por minuto. De esta forma se logra monitorear el estado de la batería y, de ser necesario, activar al modo de ahorro de energía y alertar a la central de monitoreo. En dicho modo, se desactivan todos los sensores, manteniendo únicamente el sensado del voltaje de la batería. Luego, cuando se restituye el nivel de tensión, ya sea por una carga externa o por el panel solar, el uC detecta nuevamente el voltaje de trabajo y vuelve a reactivar el sistema.

7.2.2. Almacenamiento

Una vez que se cuenta con el peso de la balanza, los TAGs leídos y los datos climáticos, se procede a almacenar el conjunto de datos en la tarjeta SD dentro de un archivo del tipo .txt con los datos separados por comas (CSV). Previo a la rutina de escritura, es necesario pasar a todas las variables al tipo String. Para ello se utilizarán tanto la función `sprintf` como una función implementada para convertir variables en Hexadecimal mediante desplazamiento de bits y utilización de máscaras.

Luego, se utilizarán diferentes funciones que se encuentran en el módulo de *file systems* FATFS para manejo de tarjetas SD por comunicación SPI. Estas se encargarán de:

- Montar la tarjeta: `f_mount`.
- Abrir el archivo .txt, ya sea en modo escritura (crear o `append`) o lectura: `f_open`.
- Escribir o leer el archivo: `f_puts` / `f_gets`.
- Cerrarlo: `f_close`.

Es importante que la rutina encargada del manejo de la tarjeta SD se implemente con ciclos del tipo *while* y condiciones *if* para brindar mayor robustez, ya que muchas veces se encuentran fallas al llamar a dichas funciones una sola vez.

Cada día, mediante una rutina encargada de leer la hora, el uC determinará el nombre del archivo correspondiente según el día del mes y año. De esta forma, el mismo será del formato 'ddmmyy'. Dentro del mismo se deben anotar los siguientes datos por cada fila:

- TAGs: hasta 4 como máximo. En caso de ser menos, se rellena con ceros. Nunca serán más de 4, ya que la lógica del sistema los habría descartado anteriormente (ver [sección 7.2.1](#)).
- Peso actual de la balanza.
- Peso anterior de la balanza.
- Hora.
- Datos climáticos.

De esta forma, se almacenan todos los datos que posteriormente la central de monitoreo utilizará para hacer los cálculos necesarios acerca de las tasas de engorde de los animales, entre otras cosas.

7.2.3. Comunicación inalámbrica

Como se ha dicho previamente, el programa principal estará constantemente tomando la hora mediante una rutina que atiende al RTC. De esta forma, se busca sincronizar la transmisión de datos a la central de monitoreo una vez por día.

Llegado un horario específico, el cual puede ser alrededor del cambio de día, el sistema entrará a la rutina encargada de la lectura de la tarjeta SD y posterior transmisión por UART mediante el módulo RF XBee3.

Dicho módulo, durante el resto de día, se encontrará en modo de ahorro de energía inducido por el estado alto de una salida de propósito general (GPO) del microcontrolador aplicada sobre un pin específico del Xbee3.

Si bien el módulo provee un protocolo de alto nivel con ACK, repeticiones y otras configuraciones, se tendrá en cuenta un chequeo de la cantidad de líneas transmitidas, a modo de ACK integral del archivo diario a transmitir.

Todo lo que respecta a la configuración específica del módulo, se realiza mediante el software dedicado de la empresa *Digi*, el XCTU.

7.2.4. Interfaz de usuario

Por último, debe implementarse la aplicación encargada de permitir la consulta y visualización de los datos, así como el análisis previo de los mismos. Por ello, debe dividirse en dos módulos: “*back-end*” y “*front-end*”.

Back-end: recepción y análisis de los datos

En primer lugar, se debe asegurar la correcta recepción de los datos y el almacenamiento de los mismos en un archivo CSV. Para ello se desarrolla un script en lenguaje Python, el cual se ejecuta a la hora en la cual el corral está configurado para transmitir los datos del día. Se abre entonces el puerto serie asociado al módulo XBee3 y se guardan los datos en un .txt con el nombre de la fecha en formato ‘*ddmmyy*’.

Luego, se ejecuta una rutina encargada de crear (la primera vez) o escribir una base de datos SQLITE con tres tablas para cada día. La primera estará compuesta por los datos tal cual son recibidos desde el corral. En la segunda se copiarán en primer lugar las filas en las cuales se halla identificado un solo animal, es decir un único TAG. Posteriormente, se procederán a realizar restas con las filas de dos animales (de la primera tabla) en las cuales uno de ellos ya se tenga previamente individualizado, a fin de obtener los pesos faltantes. Con el mismo criterio, se analizarán luego las filas con tres y cuatro animales. De esta forma, la segunda tabla contará con los pesos individualizados de cada animal.

Es importante, para estos cálculos, la utilización de las columnas con el peso actual y el peso anterior (la tara), de forma de filtrar los cambios de pesos producidos por la ingesta de agua por parte del animal que previamente se encontraba en la balanza. También se logra de esta forma cancelar los posibles *offsets* de tensión producidos en los amplificadores de instrumental por cambios de temperatura, así como modificaciones en la tara de la balanza por acumulación de barro u otras sustancias externas que aumentan el peso de la estructura.

Por último, siempre se considerará el peso valido del animal el primero obtenido durante el día, ya que los posteriores (en caso de pesarse más de una vez por día) tendrán sumados los litros de agua bebidos. Dichos datos se copiarán en la tercera tabla de la base de datos, la cual se utilizará para visualización de los datos y consultas por parte del usuario.

Front-end: interfaz gráfica para el usuario

En el caso de la GUI (*graphic user interface*) es necesario mantenerla lo más intuitiva y sencilla posible. Es por ello que se utilizó el software QT, un framework multiplataforma orientado a objetos (lenguaje C++) ampliamente usado para desarrollar programas que utilicen interfaz gráfica de usuario.

Dicha aplicación estará encargada de llevar el control de la hora y de esta forma ir ejecutando en segundo plano los scripts en Python previamente mencionados.

Al mismo tiempo, debe permitir al usuario visualizar y consultar los datos de interés como pueden ser:

- Tasas de engorde y pesos: individuales o por corral.
- Frecuencia de hidratación de los animales (control sanitario).

También, en caso de tener un historial de corrales anteriores del mismo establecimiento, se puede visualizar un pronóstico de engorde para planificar futuras ventas.

Todos estos datos deben estar disponibles para ser descargados en forma de archivo .txt (CSV) o .xsl (para Excel) a un pendrive. De esta forma el usuario puede obtener los datos para su posterior análisis, sin necesidad de tener que visualizarlos únicamente en el establecimiento.

Por último, es importante la implementación de alertas gráficas para casos de urgencia o notificaciones programadas como pueden ser:

- Comportamiento anómalo de un animal (control sanitario).
- Baja tensión de la batería (para una posible carga externa).
- Aviso de animales que ya han alcanzado un peso determinado.

8. Construcción del prototipo

8.1. Pesaje

Celdas de carga

Se adquirieron cuatro celdas de carga como las observadas en la figura 25, las cuales constan cada una de cuatro galgas extensiométricas conectadas como un puente de Wheatstone. Se eligieron celdas que miden hasta 1500kg, ya que como margen de seguridad se tuvo en cuenta el doble del peso máximo que deberían soportar.

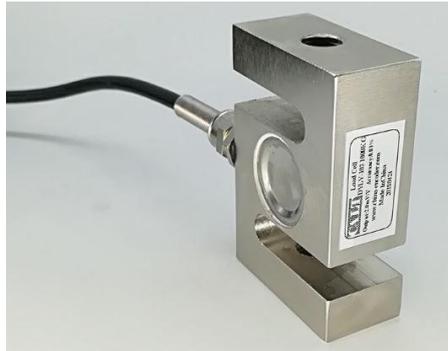


Figura 25: celda de carga.

Dichos dispositivos presentan un fondo de escala, para los 1500kg, proporcional a la tensión con la cual son alimentados, a razón de 2mV/V. Se utilizó entonces una alimentación de 10V, coincidiendo así con la tensión requerida por otros componentes del sistema, y fácilmente obtenible con una batería de 12V.

Amplificador

Como se dijo anteriormente, en primer lugar, se barajaron dos opciones: utilización del CI AD620 o la implementación de un amplificador de instrumental con 3 amplificadores operacionales LM358. Por ello, para comparar el funcionamiento de ambos circuitos, se realizó la placa que se observa en la figura 26 en base a las topologías nombradas anteriormente, a fines de analizar el comportamiento de ambos. Se tuvo en cuenta también el análisis de los circuitos con y sin filtros de entrada y salida. Los resultados serán analizados en la próxima sección.



Figura 26: prototipo para análisis de AD620 vs LM358.

Dicha placa también se utilizó para realizar mediciones sobre el ICL7660, a fines de constatar su correcto funcionamiento como fuente de tensión negativa. Para todas estas mediciones se colocaron diferentes jumpers permitiendo evaluar cada módulo tanto por separado como en forma conjunta.

Dado que a la par de la balanza se encuentra el lector RFID, se implementó el filtro de entrada para RF propuesto por la hoja de datos con los pares R1-C1 y R2-C2 para el rechazo de modo común y el capacitor C3 para las señales diferenciales, obteniéndose las frecuencias de corte 48Hz y 2,27Hz respectivamente, según las ecuaciones (6) y (7). Se eligieron frecuencias de corte bajas para aumentar el filtrado, ya que la correspondiente pérdida de ancho de banda del sistema no afecta el funcionamiento del mismo, debido a la naturaleza misma de las señales (movimientos lentos de animales).

$$F_{corte} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \quad (6)$$

$$F_{corte(diff)} = \frac{1}{2\pi R_1 (C_1 + 2C_3)} \quad (7)$$

Se implementó también el filtro pasa bajos de salida, logrando una frecuencia de corte de 1,6Hz, según la ecuación (8). Esta frecuencia de corte está pensada para filtrar ruido de línea pensando en otras implementaciones en las cuales estuviera presente la red eléctrica. Además, para la definición de la ganancia según la ecuación (9), se coloca la resistencia variable (a fin de poder realizar diferentes pruebas) R_G de $1k\Omega$

$$F_{corte} = \frac{1}{2\pi R_8 C_8} \quad (8)$$

$$R_G = \frac{49,4k\Omega}{G-1} \quad (9)$$

Posteriormente, se diseñó la placa definitiva del circuito amplificador según el esquemático observado en la figura 27. Se reemplazó el CI AD620 por el AD8221, ya que se trata de una versión más moderna y con mejores prestaciones (menor consumo, menor nivel de ruido, menor costo). Los demás componentes a utilizar, los cuales se listan en la tabla 5, fueron también de tecnología de montaje superficial como se puede observar en la figura 28. A lo calculado anteriormente se agregaron, por recomendación de la hoja de datos, los capacitores de desacople C4/C6 y C5/C7.

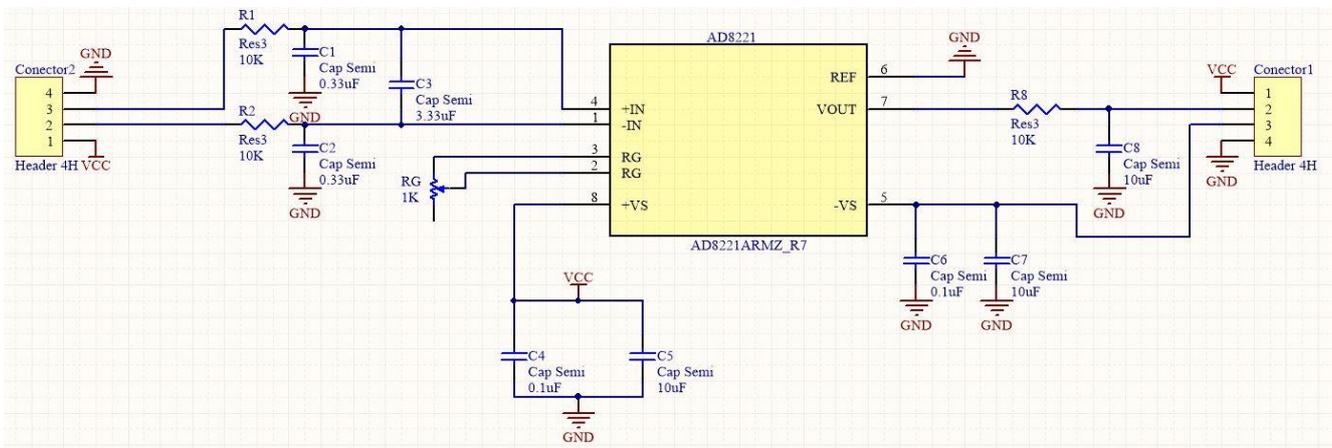


Figura 27: esquemático del circuito amplificador.

Nombre del componente	Componente
R1/R2/R8	Resistencia 10kΩ 1% 2W
RG	Trimmer Multivuelta 1kΩ 10%
C1/C2	Capacitor cerámico 0,33uF 5% 25V
C3	Capacitor cerámico 3,3uF 5% 25V
C4/C6	Capacitor cerámico 0,1uF 10% 25V
C5/C7	Capacitor tantalio 10uF 10% 20V
C8	Capacitor cerámico 10uF 20% 16V
Conectores	Conectores serie MATE-N-LOK

Tabla 5: lista de componentes del amplificador.

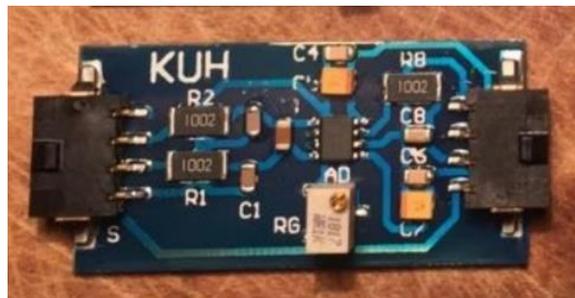


Figura 28: placa del amplificador.

Placa del microcontrolador

En primer lugar, para realizar todas las pruebas de funcionamiento se utilizó el kit de desarrollo STM32F4 Discovery de la empresa ST observado en la figura 29. Dicha placa ya cuenta con diferentes periféricos y pines preparados para diferentes tipos de funcionalidades, así como un debugueador integrado. Esto permitió realizar una gran variedad de evaluaciones de manera sencilla y rápida.



Figura 29: placa de evaluación STM32F4 Discovery.

Algunas de las características principales con las que cuenta el kit de desarrollo son:

- Microcontrolador de 32-bit ARM®Cortex®-M4 con FPU core, 1-Mbyte de memoria Flash, 192-Kbyte de RAM.
- 3 ADC con hasta 15 canales cada uno.
- On-board ST-LINK/V2-A (debugger).
- USB ST-LINK con tres interfaces diferentes:
 - Debug port.
 - Virtual Com port.
 - Mass storage.
- Alimentación a través del bus USB o en forma externa con 5 V.
- Fuente de alimentación: 3 V y 5 V
- Ocho LEDs:
 - LD1 (rojo/verde) para comunicación USB.
 - LD2 (red) para encendido de 3.3 V.
 - Cuatro LEDs para usuario, LD3 (naranja), LD4 (verde), LD5 (rojo) y LD6 (azul).
 - 2 USB OTG LEDs LD7 (verde) VBUS y LD8 (rojo) sobre-corriente.
- Dos botones switch (uno de usuario y uno de reset).

Se diseñó también un adaptador de LQFP100 a pines through hole de 0.9mm de diámetro a fines de probar la utilización del chip STM32F407 de manera individual y comprobar las diferentes configuraciones.

En el caso de los ADC, la tensión de entrada máxima es de 3,3V. En ese sentido y como protección, se adicionaron dos diodos Schottky RB161MM-20 para el caso en el cual la entrada se encuentre fuera del rango de 0-3,3V, los cuales presentan una alta velocidad de conmutación.

En cuanto a la comunicación UART con el lector RFID, debe tenerse en cuenta que dicho componente entrega una salida RS232 mientras que el microcontrolador maneja niveles TTL 0-3,3V. Para dicho acondicionamiento de la señal se utilizó el CI MAX3232 con la topología observada en la figura 30, el cual permite la comunicación entre ambas interfaces.

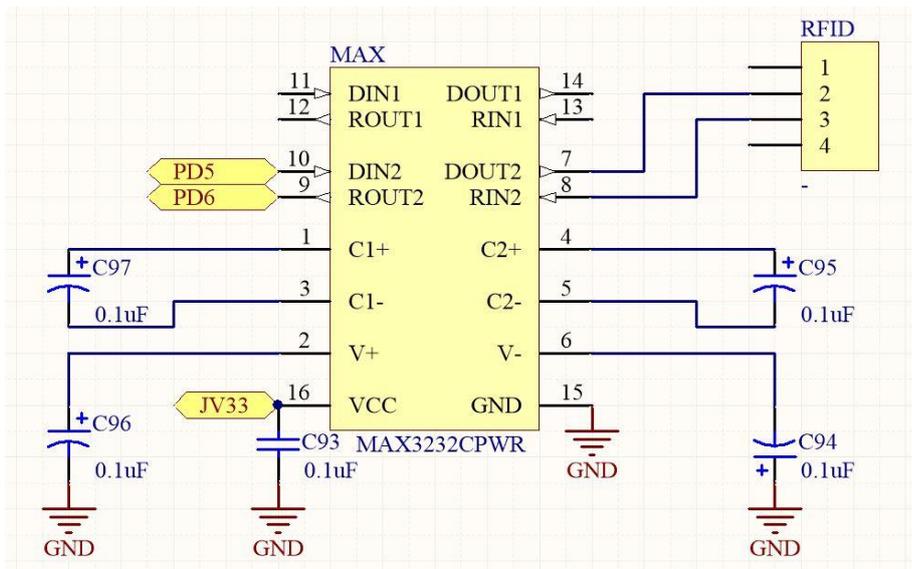


Figura 30: MAX3232 para conversión de niveles RS232 a TTL(3.3V).

Para el almacenamiento en la tarjeta micro-SD, se implementó el circuito de resistencias de pull-up necesario sobre una placa pre-perforada en conjunto con un adaptador como el observado en la figura 31, a fin de realizar las pruebas necesarias.



Figura 31: adaptador para tarjeta micro-SD.

Se utilizó también un display LCD 7 segmentos de 16x2 como el de la figura 32, a fin de poder monitorear ciertas variables al alimentar el sistema de forma externa y no desde una computadora.

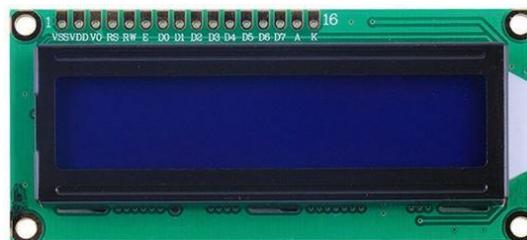


Figura 32: display LCD 16x2.

8.2. Comunicación

Placa del Xbee

Para la utilización de los módulos de comunicación XBee, se diseñó e implementó la placa observada en la figura 33 con los correspondientes capacitores de desacople recomendados por hoja de datos y con un LED de encendido, a fin de poder configurar y probar a los mismos utilizando una computadora. Por ello, se utilizó el adaptador TTL-USB del fabricante Seed, el cual se muestra en la figura 34.



Figura 33: placa del módulo de comunicación XBee.



Figura 34: adaptador USB-TTL.

Finalmente, para la configuración de los módulos se utilizó el software dedicado de la empresa Digi, llamado XCTU (figura 35). Dentro del mismo se eligió el protocolo ZigBee ya que el mismo resuelve la *paquetización* de las tramas a enviar, permitiendo manejar directamente línea por línea del archivo CSV (.txt) en donde se almacenan las lecturas realizadas en el corral.

Además, en dicho software se simulan diferentes tipos de trama, lo cual permite evaluar una variedad de situaciones y poder así programar desde el microcontrolador el posterior manejo de los módulos.

Se tuvo en cuenta en el diseño de la placa el acceso al pin necesario para el manejo del modo *sleep* del dispositivo, el cual permite disminuir drásticamente el consumo del módulo.

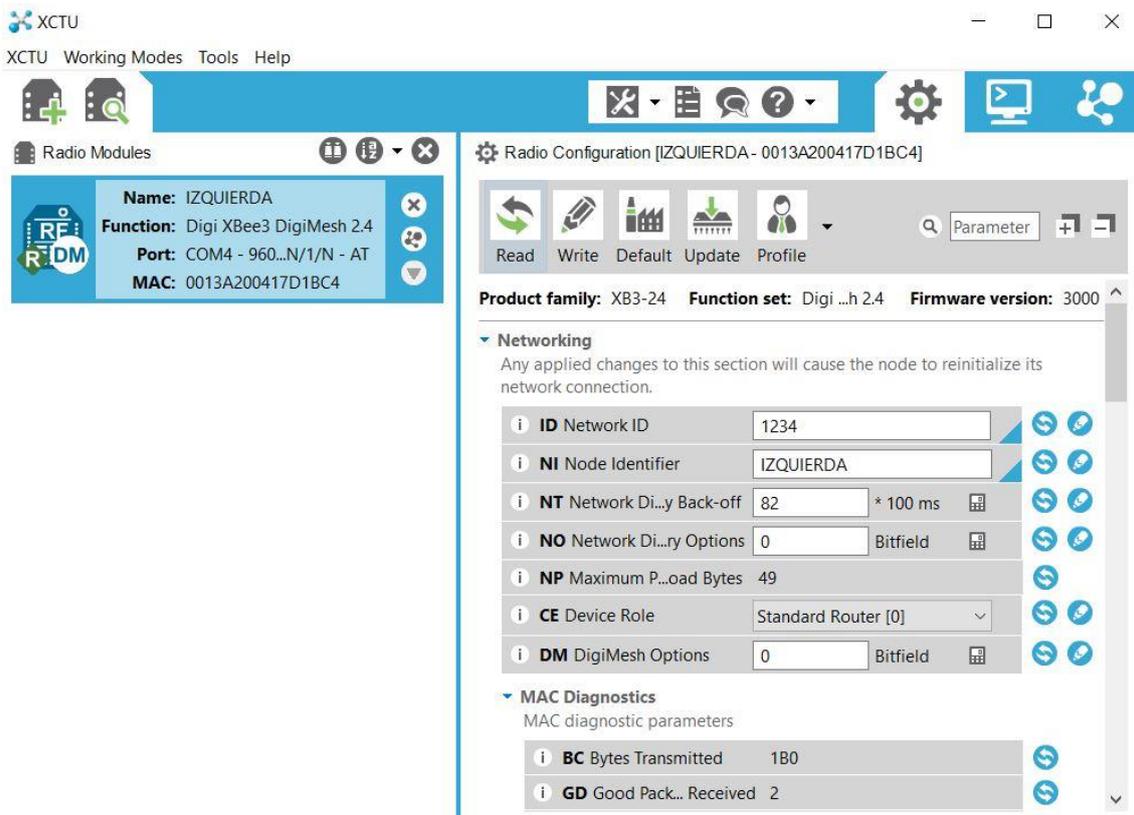


Figura 35: software XCTU para configuración de los módulos XBee.

8.3. Interfaz de usuario

Como se explicó anteriormente, el software en la central de monitoreo tendrá una parte de procesamiento back-end y otra de interfaz de usuario.

En el primer caso, se programaron dos scripts en lenguaje Python. Uno de ellos para la recepción de datos desde el corral a través del módulo XBee, el cual se activa sincrónicamente una vez por día en el horario adecuado. A su vez, algunos minutos después de finalizar dicha comunicación, se activa el segundo script, el cual se encarga de interpretar los datos recibidos y volcar en una base de datos los pesos de cada animal.

Todo este control se realiza dentro de la aplicación principal, la cual lee periódicamente el día y la hora, ejecutando en los momentos necesarios a cada script. De esta forma, cada tabla creada diariamente se le da el nombre correspondiente al día, en el formato *ddmmyy*. Además, cada TAG estará asociado a un ID de animal, el cual se cargará inicialmente al ingresarlo al corral.

Como resultado, se obtiene diariamente una tabla nueva dentro de la base de datos, la cual se conforma por los pesos de cada animal, similar a la observada en la figura 36. Para ello, el algoritmo realiza diferentes análisis con los datos recibidos, ejecutando restas y comparaciones en los TAGs y pesos recibidos. En caso de existir más de un peso de cada bovino por haberse pesado en dos momentos del día diferentes, el programa se encarga de seleccionar el mínimo de aquellos, evitando de esta forma mediciones erróneas por incluir agua ingerida o alguna otra variación no atribuible directamente al engorde.

ID	TAGS	PESO
Filter	Filter	Filter
1	E2000299999999999999999901	279.1
2	E2000299999999999999999902	314.1
3	E2000299999999999999999903	262.4
4	E2000299999999999999999904	334.5
5	E2000299999999999999999905	291.5
6	E2000299999999999999999906	319.0
7	E2000299999999999999999907	291.9
8	E2000299999999999999999908	307.9
9	E2000299999999999999999909	317.5
10	E2000299999999999999999910	285.5
11	E2000299999999999999999911	317.6
12	E2000299999999999999999912	297.1
13	E2000299999999999999999913	300.8
14	E2000299999999999999999914	270.6
15	E2000299999999999999999915	291.5

Figura 36: tabla con pesos diarios de los animales.

Por otro lado, para la consulta de datos y visualización por parte del usuario, se realiza una aplicación en C++ con el software QT, el cual permite implementar interfaces gráficas de manera sencilla e intuitiva. En primer lugar, se presenta una página de autenticación, como se observa en la figura 37.



Figura 37: pantalla de autenticación.

Una vez ingresado al sistema, se encuentra la pantalla principal tal como se observa en la figura 38. Aquí hay tres utilidades principales:

- Alerta sanitaria: en caso de existir algún comportamiento anómalo de algún bovino, la aplicación activa dicha alarma. En caso de hacer click sobre la misma, lleva a una nueva página donde se encontrarán los detalles de la notificación (número de corral, ID del animal, descripción de la alarma, etc.).
- Descarga a USB: haciendo click en dicho botón, permite descargar toda la base de datos del sistema a un pendrive. Útil en caso de que no se disponga de tiempo para analizar los datos en la vivienda, se contará con los mismos para un posterior análisis.
- Consulta de datos: permite seleccionar de qué corral se quiere obtener información.



Figura 38: pantalla principal.

En caso de iniciar la consulta de uno de los corrales, se ingresará a la pantalla observada en la figura 39. En forma automática se visualizarán los pesos individuales de cada animal en una tabla. Se podrán buscar qué bovinos se encuentran en cierto rango de pesos, y en este caso se actualizará la tabla con los animales correspondientes. Se informará también el promedio del peso de todo el corral. Por otro lado, para la consulta de tasas de engorde, se procederá a seleccionar un rango de fechas sobre la cual se desea filtrar. Esto sirve, por ejemplo, para consultar tasas en diferentes periodos y poder así evaluar rendimientos de distintos animales. Si se desea seleccionar también el animal o grupo de aquellos sobre los cuales se desea consultar la tasa, y posteriormente al hacer click en el botón de consulta se pasará a la siguiente página, como se observa en la figura 40.

Buscar pesos entre

Min. kg

Max. kg

Promedio del corral:

nan kg

Tasa de engorde de animales seleccionados en tabla

← octubre 2018 →

	dom.	lun.	mar.	mié.	jue.	vie.	sáb.
40	30	1	2	3	4	5	6
41	7	8	9	10	11	12	13
42	14	15	16	17	18	19	20
43	21	22	23	24	25	26	27
44	28	29	30	31	1	2	3

Desde hasta

	ID	TAG	PESO
1	<input type="checkbox"/>	1	E200029999999999999... 279.0999
2	<input type="checkbox"/>	2	E200029999999999999... 314.1
3	<input type="checkbox"/>	3	E200029999999999999... 262.4000
4	<input type="checkbox"/>	4	E200029999999999999... 334.5
5	<input type="checkbox"/>	5	E200029999999999999... 291.5
6	<input type="checkbox"/>	6	E200029999999999999... 319
7	<input type="checkbox"/>	7	E200029999999999999... 291.9
8	<input type="checkbox"/>	8	E200029999999999999... 307.9
9	<input type="checkbox"/>	9	E200029999999999999... 317.5
10	<input type="checkbox"/>	10	E200029999999999999... 285.5

Figura 39: página de informacion del corral.



Figura 42: tubo hermético para colocar en el agua.

Por otro lado, para la medición tanto de la temperatura como de la humedad ambiente, se utiliza el CI HTUF3535. Dicho integrado presenta un módulo de medición tanto de temperatura como humedad. Al tratarse de un sensor alineal, se implementó en software las ecuaciones y tablas de *look-up* informadas por hoja de datos a fin de obtener los valores correctos de ambas magnitudes.

En el caso de la temperatura se utilizó la tabla de lookup 6 en conjunto con las ecuaciones (10-11) y se colocó una R_{batch} de $20k\Omega$ tal como se observa en la figura 43. Se obtiene entonces el valor de la resistencia NTC (*Negative Temperature Coefficient*) mediante la ecuación y posteriormente la temperatura correspondiente según la tabla.

Temperature (°C)	Resistance (Ω)
-40	195652
-30	113347
-20	68237
-10	42506
0	27219
10	17926
20	12081
25	10000
30	8315
40	5834
50	4161
60	3014
70	2228
80	1669
85	1452

Tabla 6: tabla de lookup para la medición de temperatura.

$$V_{out} (mV) = \frac{V_{cc}(mV) * Resistance}{R_{batch}(\Omega) + Resistance} \quad (10)$$

$$Resistance (\Omega) = \frac{-V_{out}(mV) * R_{batch}(\Omega)}{(V_{out} - V_{cc})} \quad (11)$$

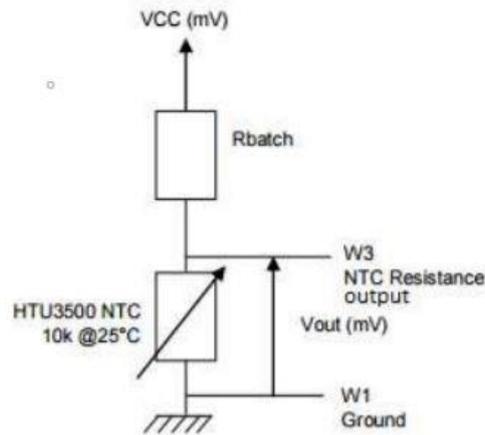


Figura 43: conexión de Rbatch para la medición de temperatura.

En caso de necesitar cambiar la implementación en el microcontrolador, se informa también por hoja de datos la resistencia en función de la temperatura según la ecuación (12), así como los datos característicos del NTC observados en la tabla 7.

$$R_T = R_N * e^{\beta(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_N})} \quad (12)$$

RN: Resistencia nominal a temperatura TN (25 °C)	10kΩ
TN: temperatura nominal	298 K (25 °C)
β: constante específica del material	3380
Rango de medición de temperatura	-40°C a 110°C
Constante de tiempo	10 s
Tolerancia de la Resistencia a temperatura nominal	1%

Tabla 7: características del NTC.

Para el caso de la humedad relativa (expresada en porcentaje), no se requiere de ningún componente externo, y el valor puede obtenerse con el uso de la tabla de lookup 8 a través de la ecuación (13), colocando Vout en mV.

0	Vout (mV)	RH (%)	Vout (mV)
10	1235	55	2480
15	1390	60	2605
20	1540	65	2730
25	1685	70	2860
30	1825	75	2990
35	1960	80	3125
40	2090	85	3260
45	2220	90	3400
50	2350	95	3530

Tabla 8: tabla de lookup para la medición de humedad.

$$RH = -1,564 \times 10^{-9} * V_{out}^3 + 1,205 \times 10^{-5} * V_{out}^2 + 8,22 \times 10^{-3} * V_{out} - 15,6 \quad (13)$$

El fabricante provee también la ecuación lineal (14). Sin embargo, estas ecuaciones están contempladas para una medición de humedad realizada con una temperatura ambiente de 25 grados centígrados. Se implementa entonces, según hoja de datos, la ecuación (15) la cual contempla un factor de corrección basado en la medición de temperatura.

$$RH(a\ 25^{\circ}\text{C}) = 0,03812 * V_{out} - 39,36 \quad (14)$$

$$RH(\text{real}) = RH(a\ 25^{\circ}\text{C}) - 0,15 * (25 - T) \quad (15)$$

En cuanto a la alimentación eléctrica del integrado, debido a que tiene una tensión de funcionamiento de 5V (diferente a las dos disponibles: 3,3V y 10V) y a que no representa un consumo elevado (1,2mA), no se necesitó de una alta eficiencia por lo que se implementó un regulador lineal LDO (*Low-dropout regulator*) de bajo consumo con voltaje de salida fijo de 5V. Sin embargo, para mantener al mínimo el tiempo de funcionamiento, se implementó una llave con MOSFET controlada desde el microcontrolador. Desde la salida de este circuito se ingresa luego a dos ADC del microcontrolador.

8.5. Alimentación eléctrica

Para el cálculo del consumo eléctrico del sistema se realizó un análisis de los diferentes módulos que lo componen. En primer lugar, se realizaron mediciones de los diferentes componentes funcionando individualmente y luego se realizó una estimación de tiempos de encendido, obteniendo así un consumo/hora estimado tal como se observa en la tabla 9.

Módulo	Tensión de funcionamiento [V]	Consumo de corriente [A]	Potencia [W] (según tiempo encendido)
Microcontrolador	3,3V	0,04A	0,132W
XBee3	3,3V	~0A	~0W
Max3232 + Tarjeta SD	3,3V	0,006A	0,0198W
Lector RFID	10V	0,35A	0,583W
Celdas de carga	10V	0,02A	0,2W
Amplificador de instrumentación e ICL7660.	10V	0,01A	0,36W
Total			1,29W

Tabla 9: consumos estimados.

Para el análisis se consideró despreciable el consumo por el módulo XBee, ya que el mismo solo estará en funcionamiento algunos minutos diarios, consumiendo en esos instantes alrededor de 0,06W. El resto del tiempo se encontrará en modo de ahorro de energía, con un consumo prácticamente nulo.

Por otro lado, para la estimación de consumo del lector RFID, se consideró que el mismo dispararía una vez por minuto. Dada la naturaleza en la velocidad del comportamiento de los animales, dicha frecuencia es más que suficiente para detectar cambios de bovinos sobre la balanza.

Según las estimaciones, el sistema consumirá alrededor de 31Wh diarios. Por lo tanto, si se considera el peor caso como aquel en el cual existiesen tres días seguidos nublados, con carga nula por parte del panel solar, se debería contar con una batería que pudiese brindar alrededor de 93Wh. Eligiendo una tensión de 12V, el amperaje necesario es de alrededor de 7Ah. Se elige entonces el valor comercial 12V 7Ah.

Se debe, además, elegir un regulador de tensión que maneje la potencia entregada por el panel solar, el cual es de aproximadamente 20W. Para ello se puede optar entre dos tecnologías: PWM (modulación por ancho de pulsos) o MPPT (*Maximum Power Point Tracker*). Este último es el más eficiente y costoso, pero dada la dimensión del panel con el que se cuenta, al no necesitar una alta eficiencia de conversión se eligió un regulador PWM de 10A como el que se observa en la figura 44, reduciendo así los costos.



Figura 44: regulador PWM de 10A.

Las tensiones de funcionamiento de todos los componentes del sistema son 10V y 3,3V. Al ser la eficiencia en el consumo eléctrico un punto fundamental del proyecto, se implementaron dos fuentes buck para proveer dichas tensiones. Para ello se utilizaron los CI TPS565201 (3,3V) y el TPS54202 (10V) con las topologías observadas en la figura 45 y 46 respectivamente. En ambos casos se logran eficiencias de alrededor del 90% según hoja de datos.

En ambos casos se colocaron las resistencias R_{fbt} y R_{fbb} para obtener los valores de tensión de salida deseados (3,3V y 10V) según la ecuación (16).

$$V_{out} = 0,76 * \left(1 + \frac{R_{fbt}}{R_{fbb}}\right) \quad (16)$$

Se colocan también capacitores de desacople y de filtrado de alta frecuencia a la entrada de los CI. Finalmente, los valores tanto de los componentes del filtro de polo doble (L_1 y C_{out}) como del capacitor de *bootstrap* fueron seleccionados según hoja de datos para cada caso.

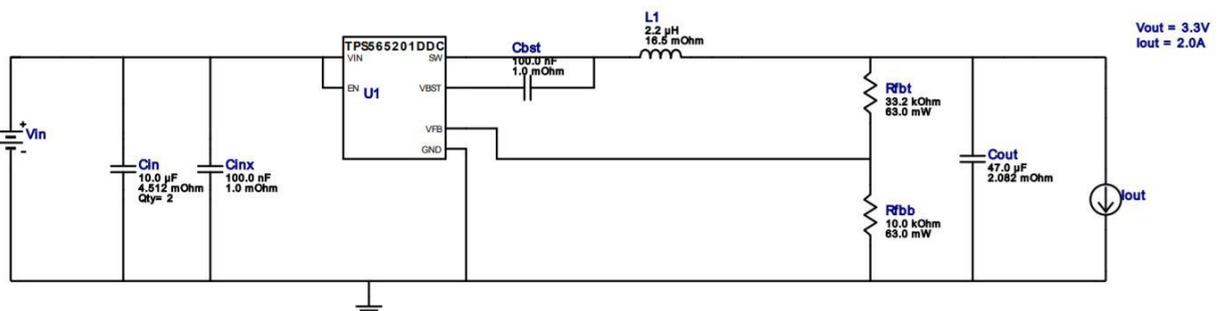


Figura 45: fuente buck para 3,3V.

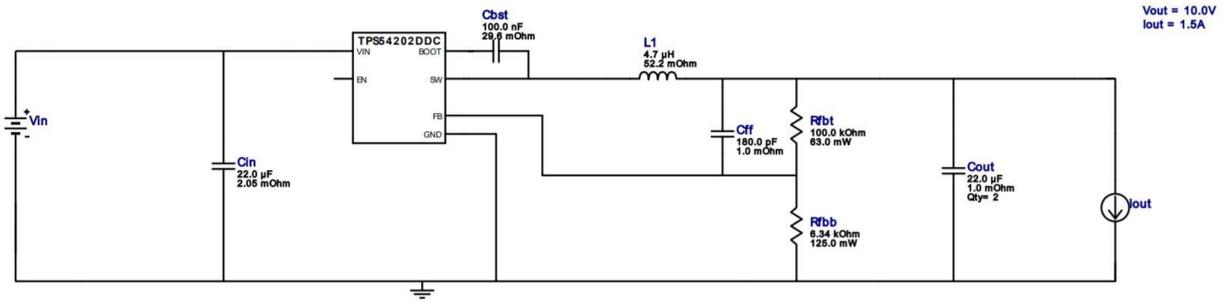


Figura 46: fuente buck para 10V.

Por otro lado, se colocó una batería de 3,3V sobre el pin VBat del microcontrolador, a fin de mantener alimentado constantemente el reloj RTC (*Real Time Clock*) del mismo. Dicho componente es fundamental para mantener el sincronismo entre el corral y la central de monitoreo, necesaria para la comunicación de los módulos XBee.

Finalmente, se implementó un atenuador de tensión con un amplificador operacional, con el objetivo de sensar dicho valor en el microcontrolador e identificar momentos de baja carga de batería, activando entonces el modo de ahorro de energía del sistema.

8.6. Sistema final

8.6.1. Versión 1

Teniendo en cuenta todas estas consideraciones, los diferentes sensores que deben medirse en los ADC, las fuentes buck para obtener las tensiones de funcionamiento (10V y 3,3V) y sumando además el circuito para el módulo de comunicación XBee y para el almacenamiento en la tarjeta micro-SD, se diseñó la placa final observada en la figura 47.

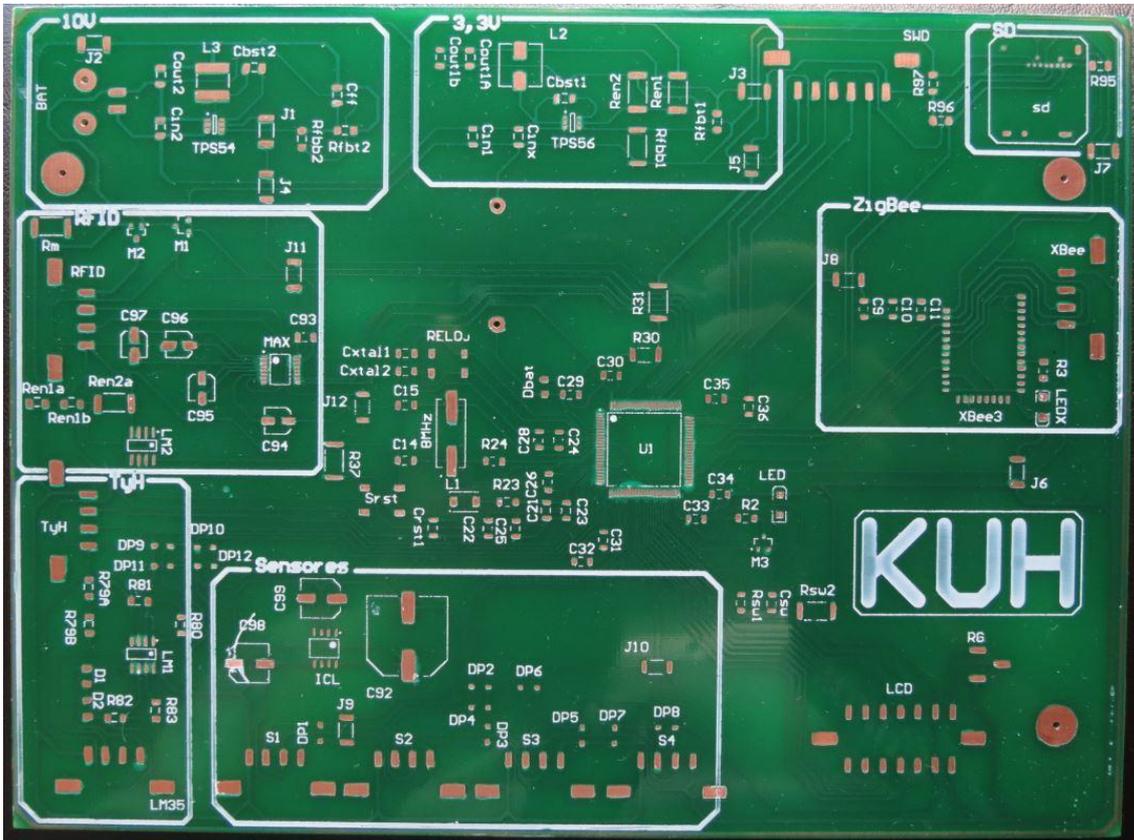


Figura 47: primera versión de la placa final con el sistema completo.

Sin embargo, dicha placa presenta algunas fallas de diseño o aspectos a mejorar:

- Errores en el pinout de la tarjeta micro-SD.
- Ausencia de resistencias pull-down en pin *enable* de la fuente de 10V y en las llaves MOSFET.
- Alto nivel de consumo por utilizar amplificadores operacionales LM358 de forma continua.
- Ausencia de plano de masa.
- Errores en la ubicación de conectores en relación a la carcasa en la cual se ubicará la placa.

8.6.2. Versión 2

Se realizó entonces un segundo prototipo observado en la figura 48, el cual presenta las siguientes mejoras:

- Pinout de tarjeta SD correcto.
- Resistencias de pull-down en todos los pines de *enable*.
- Se adicionan llaves de alimentación con MOSFET para los circuitos de sensores climáticos y sensado de batería (LM358).
- Se agrega plano de masa

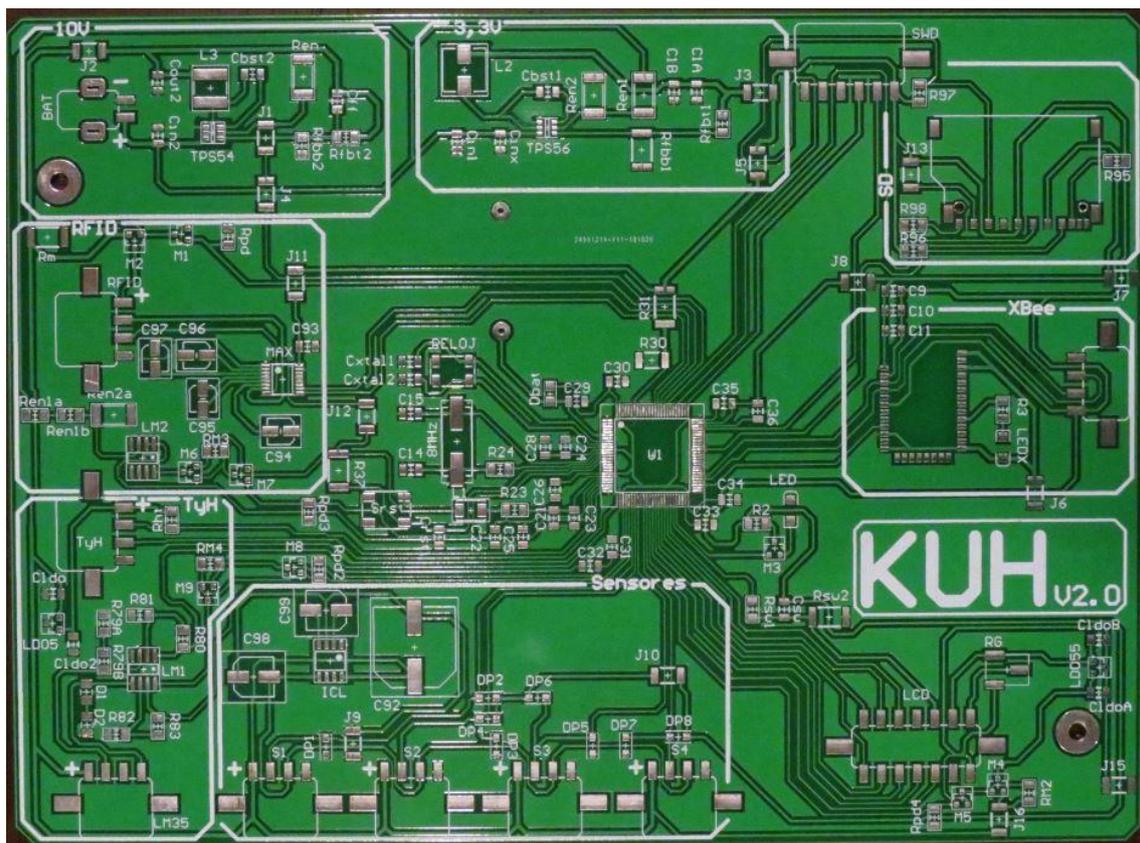


Figura 48: segunda versión de la placa final con el sistema completo.

9. Validación del Prototipo

9.1. Validación de Hardware

9.1.1. Mediciones y plan de pruebas

AD620 vs LM358

En primer lugar, se concluyó que la utilización del AD620 disminuye notablemente la cantidad de componentes lo cual simplifica la implementación física del circuito. Sin embargo, se analizaron los comportamientos de ambos circuitos propuestos, teniendo en cuenta los niveles de ruido y precisión en las mediciones.

Para comenzar las pruebas, se colocó la ganancia de ambos amplificadores en 300 veces. Dicho valor es similar al que se utilizará posteriormente en el pesaje de los animales. En la primera medición se desconectaron tantos los filtros de salida como los de entrada. En dicha evaluación no se notó una diferencia importante entre el AD620 y los LM358. Se procedió entonces a conectar los filtros de entrada y mantener desconectados los de salida, obteniendo las salidas observadas en la figura 49.

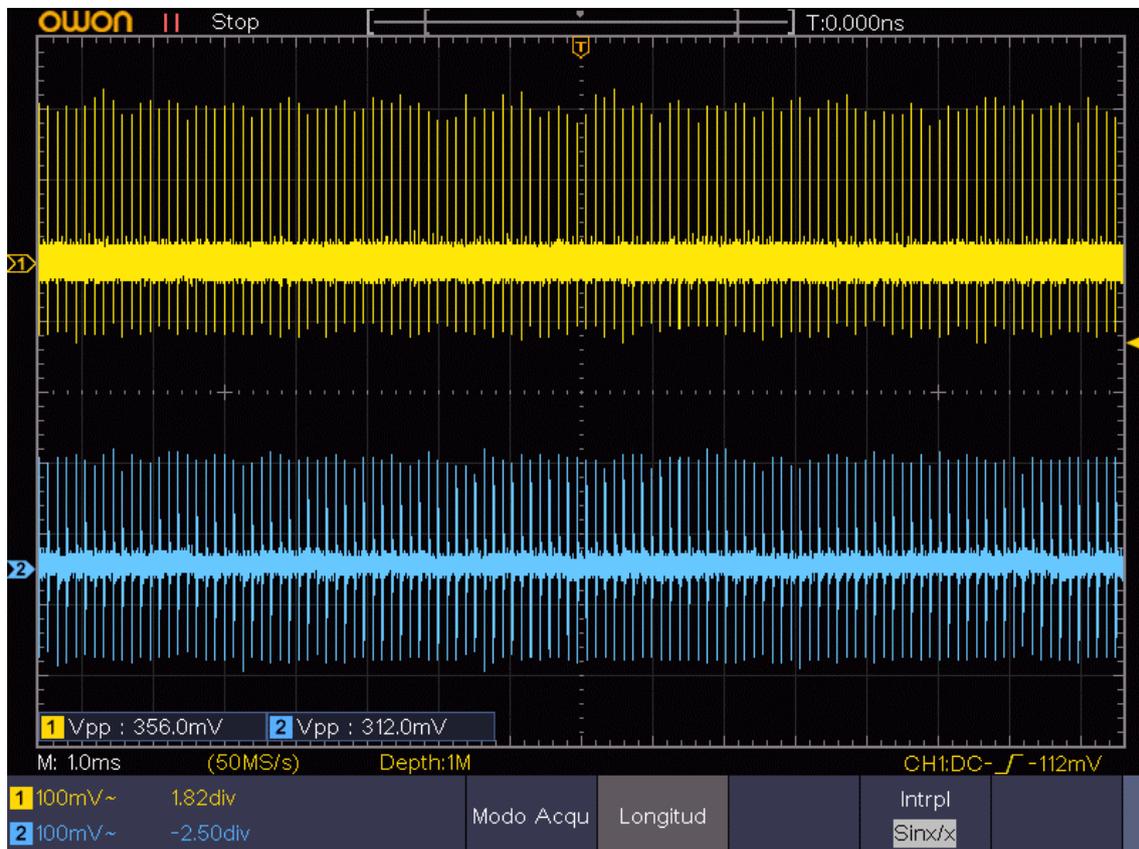


Figura 49: niveles de ruido de los amplificadores sin filtros de salida.
Amarillo: AD620. Azul: LM358.

En este caso, si bien el LM358 presenta niveles menores de ruido, estos siguen siendo elevados. Se conectaron entonces los filtros de salida, obteniendo los resultados mostrados en la figura 50.

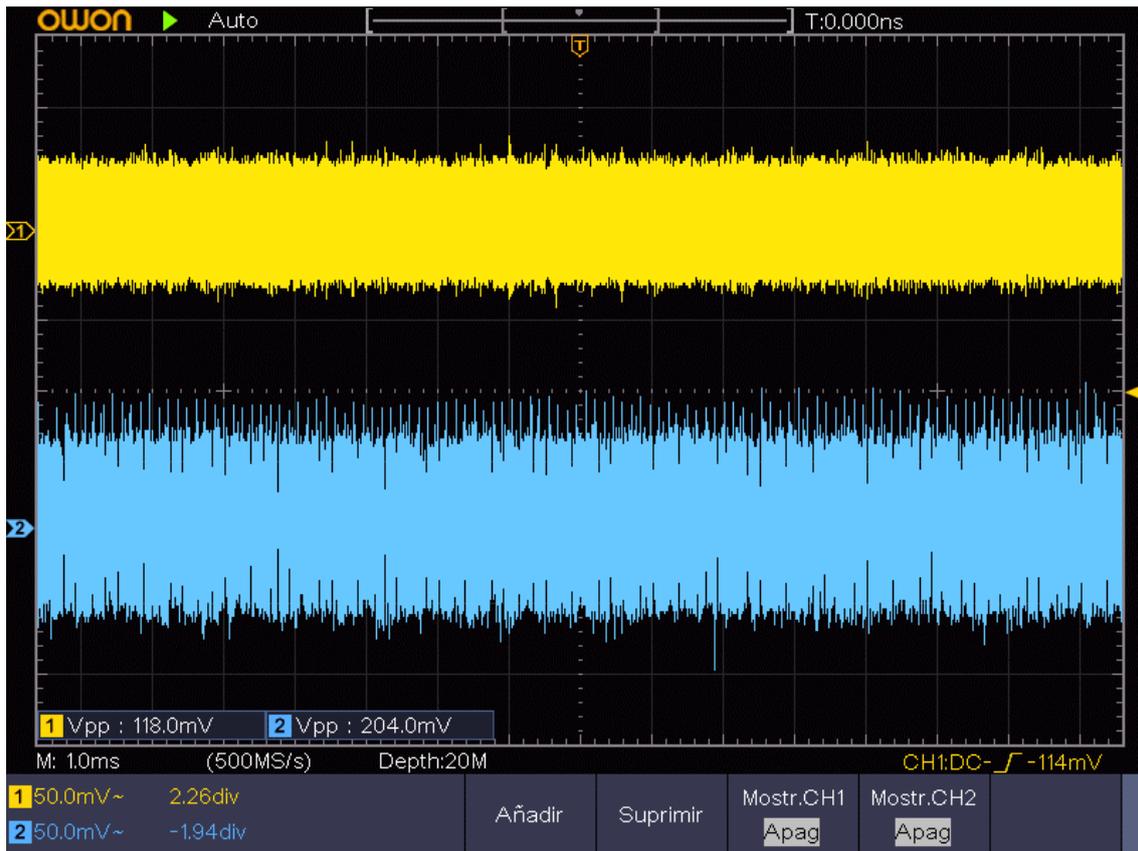


Figura 50: niveles de ruidos de los amplificadores con filtros de salida.
Amarillo: AD620. Azul: LM358.

Se observa entonces que el CI que menor ruido presenta es el AD620, por lo tanto una vez elegido dicho integrado, se procedió a realizar un plan de pruebas para corroborar el correcto funcionamiento del módulo de amplificación.

Cabe aclarar que en este caso la resistencia de ganancia esta implementada con un potenciómetro, a fin de poder realizar diferentes mediciones. Sin embargo, en una versión definitiva del amplificador dicha resistencia debería ser reemplazada por una de valor fijo y tolerancia al 1%, para reducir variaciones indeseadas en la ganancia.

Por otro lado, el offset en tensión que podría aparecer por cambios en la temperatura, si bien no es despreciable, no afecta al funcionamiento del sistema. Esto es porque se realiza una tara constante del sistema por software, filtrando así este y otros tipos de variaciones.

Plan de pruebas. Módulo: amplificación.

Tipo de prueba	Nombre	Numero de prueba	Datos de prueba	Instrumental necesario	Paso a paso	Responsable	Resultado esperado	Resultado obtenido	Fecha de ejecución	Comentario
Unitaria	Amplificación de bajo ruido	1	Alimentación: 10V. Tensión entregada por las celdas: 10mV/V. Ganancia del circuito amplificador: 100 veces.	- Circuito amplificador - Estructura para apoyar sobre las celdas de carga	1- Encender el circuito amplificador. 2- Conectarle las celdas de carga. 3- Subir una persona de X kg a la balanza. 4- Registrar la tensión.	Desarrollador electrónica	Obtener tensión amplificada según los datos de prueba.	Con 90kg, se obtuvo una tensión de 117mV.	16/5/2018	
Unitaria	Amplificación de bajo ruido	2	Alimentación: 10V. Tensión entregada por las celdas: 10mV/V. Ganancia del circuito amplificador: 1000 veces.	- Circuito amplificador - Estructura para apoyar sobre las celdas de carga	1- Encender el circuito amplificador. 2- Conectarle las celdas de carga. 3- Subir una persona de X kg a la balanza. 4- Registrar la tensión.	Desarrollador electrónica	Obtener tensión amplificada según los datos de prueba.	Con 90kg, se obtuvo una tensión de 1,17V.	16/5/2018	

Calibración celdas de carga

En primer lugar, para la calibración de las celdas de carga se procedió a realizar un ensayo de compresión. Se utilizó para ello una máquina específica de la marca Instron, como la que se observa en la figura 51.



Figura 51: máquina de compresión.

Dicho instrumental permitió aplicar sobre las celdas de carga valores de fuerzas conocidas, manteniéndolas constantes y variándolas dentro del rango de interés. Al mismo tiempo, cada sensor se encontraba conectado al circuito amplificador para poder adquirir los datos y almacenarlos en el microcontrolador. El error con el cual se manejó la máquina de compresión en esta medición fue de aproximadamente $\pm 0.001\text{kN}$ (alrededor de 100 gramos), lo cual se considera satisfactorio ya que se ubica por debajo de la resolución del sistema, la cual varía entre 120 y 170 gramos según el fondo de escala utilizado.

Se obtuvieron entonces 4 conjuntos de datos, uno para cada sensor, conformados por los valores de fuerzas aplicadas y los informados por las celdas de carga. De esta forma, mediante la resta de estos 2 conjuntos de datos, se logró obtener las curvas de error como se observa en la figura 52. Para ello se utilizó un polinomio de ajuste de grado 4, el cual, para cualquier valor medido por la celda de carga, obtiene el error estimado que se está cometiendo.

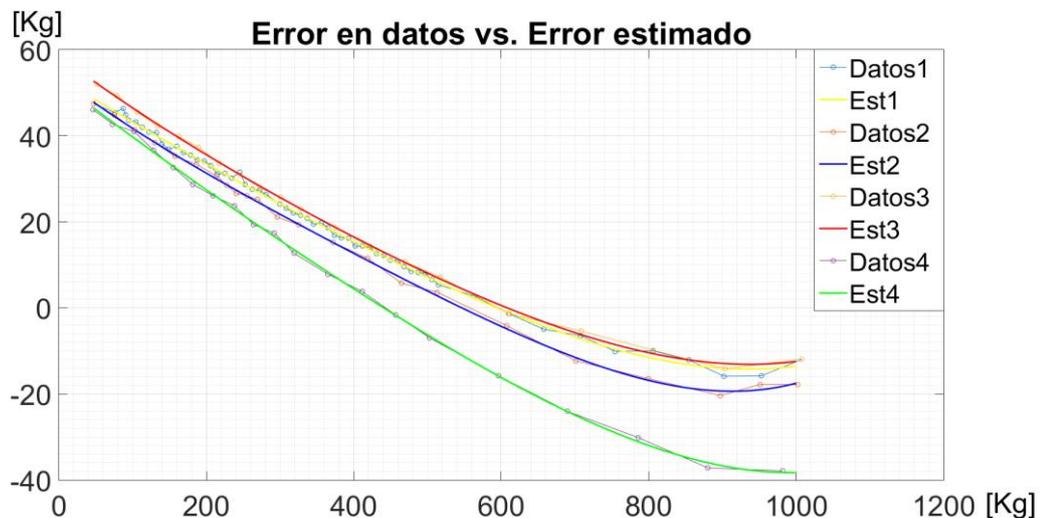


Figura 52: curvas de error de las celdas de carga.

Sin embargo, se notó que los errores obtenidos eran mucho más grandes que los informados por el fabricante de las celdas de carga. Además, se observó que el error tendía a ser mínimo únicamente cuando la tensión de salida estaba en alrededor de 1,2V, similar a la tensión de referencia medida en el microcontrolador para calibrar el ADC.

Se concluyó entonces que existía un error en la configuración del tiempo de apertura de la ventana de adquisición durante el muestreo de la señal. Al ser por un corto tiempo, sucedía que el capacitor del *sample & hold* del conversor no lograba cargarse ni descargarse por completo al valor que debía. Se incrementó entonces el tiempo de dicha ventana, configurándola al máximo, pasando de 3 a 480 ciclos de reloj. Se logró de esta forma mejorar la precisión del ADC. Esto fue verificado realizando pesajes de objetos y/o personas de peso conocido. Con una ventana de apertura corta presentaban porcentajes de error mayores al 20%. Por otro lado, al aumentar el tiempo de adquisición se logró disminuir notablemente dicho porcentaje (errores del 2-3% respecto a balanzas comerciales de uso doméstico).

Verificación del ADC

Si bien los datos obtenidos con el ensayo de compresión no se utilizaron para la calibración de las celdas de carga, permitieron verificar el correcto funcionamiento de la placa de amplificación y del ADC, ya que se contaba con una señal prácticamente continua. Se realizaron entonces promediaciones de a 100 y de a 1000 valores. En ambos casos la dispersión de los datos fue de unos 20 valores, de los 4096 provistos por el ADC de 12 bits. No se observaron mayores diferencias entre los promedios obtenidos con mayor o menor cantidad de valores (tomando como mínimo 100 datos).

Plan de pruebas. Módulo: adquisición de señales.

Tipo de prueba	Nombre	Numero de prueba	Datos de prueba	Instrumental necesario	Paso a paso	Responsable	Resultado esperado	Resultado obtenido	Fecha de ejecución	Comentario
Unitaria	Calibración de ADC	1	Algoritmo necesario para leer los canales del ADC en el uC.	- uC	1- Encender el uC. 2- Ingresar al ADC con Vref (3V). 3- Ingresar al ADC con 0V.	Desarrollador electrónica	Obtener 4096 en el caso de los 3V, alrededor de 2000 para 1,5V y 0 en el caso de los 0V.	Se obtuvo 4096 y 0 como se esperaba, pero hubo errores en la medición de los 1,5V.	24/5/2018	A medida que se acercaba a 1,5V y luego a 3V, se observaba una caída en Vref.
Unitaria	Calibración de ADC	2	Algoritmo necesario para leer los canales del ADC en el uC.	- uC	1- Encender el uC. 2- Ingresar al ADC con Vref (3V). 3- Ingresar al ADC con 0V.	Desarrollador electrónica	Obtener 4096 en el caso de los 3V, alrededor de 2000 para 1,5V y 0 en el caso de los 0V.	Se obtuvieron los resultados esperados.	25/5/2018	Se aumentó el periodo de muestreo para lograr los resultados esperados.

Verificación del microcontrolador

Para probar el microcontrolador fuera de la placa de desarrollo Discovery, se diseñó un adaptador para el paquete LQFP100. De esta forma se logró agregar los componentes externos (tecnología *through hole*) para inicializar y probar el dispositivo, como se observa en la figura 53.

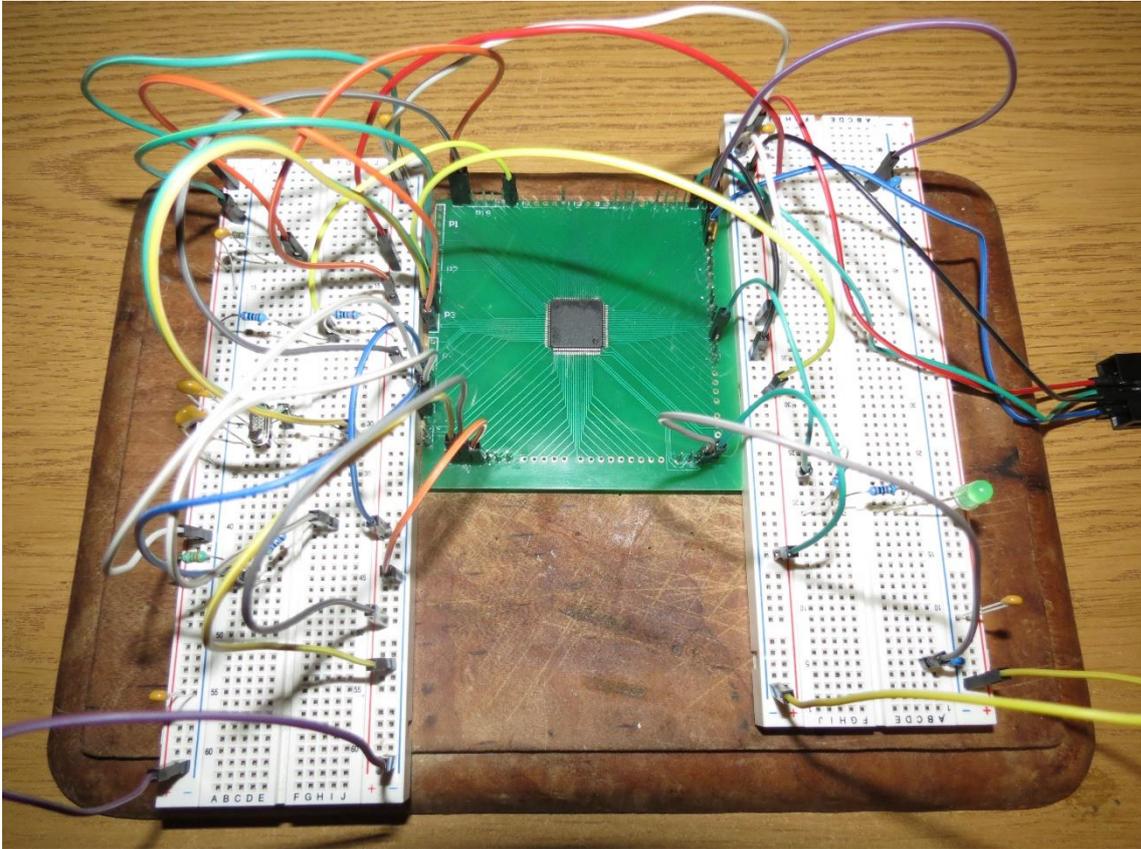


Figura 53: STM32F4 con sus componentes externos.

Para poder programar y observar el funcionamiento del microcontrolador, se utilizó un depurador USB portátil ST-LINK V2, como el observado en la figura 54.



Figura 54: programador/depurador ST-LINK V2.

Luego se hicieron pruebas con y sin oscilador externo, y se midieron señales periódicas para analizar su estabilidad en frecuencia. Se observaron ciertas variaciones al no utilizar un oscilador externo, por lo que se decidió finalmente su utilización.

Se verificó el pinout provisto por el software STM32CubeMX, tal como se observa en la figura 55. De esta forma se probaron individualmente algunas de las funcionalidades que luego se utilizarán en el diseño final.

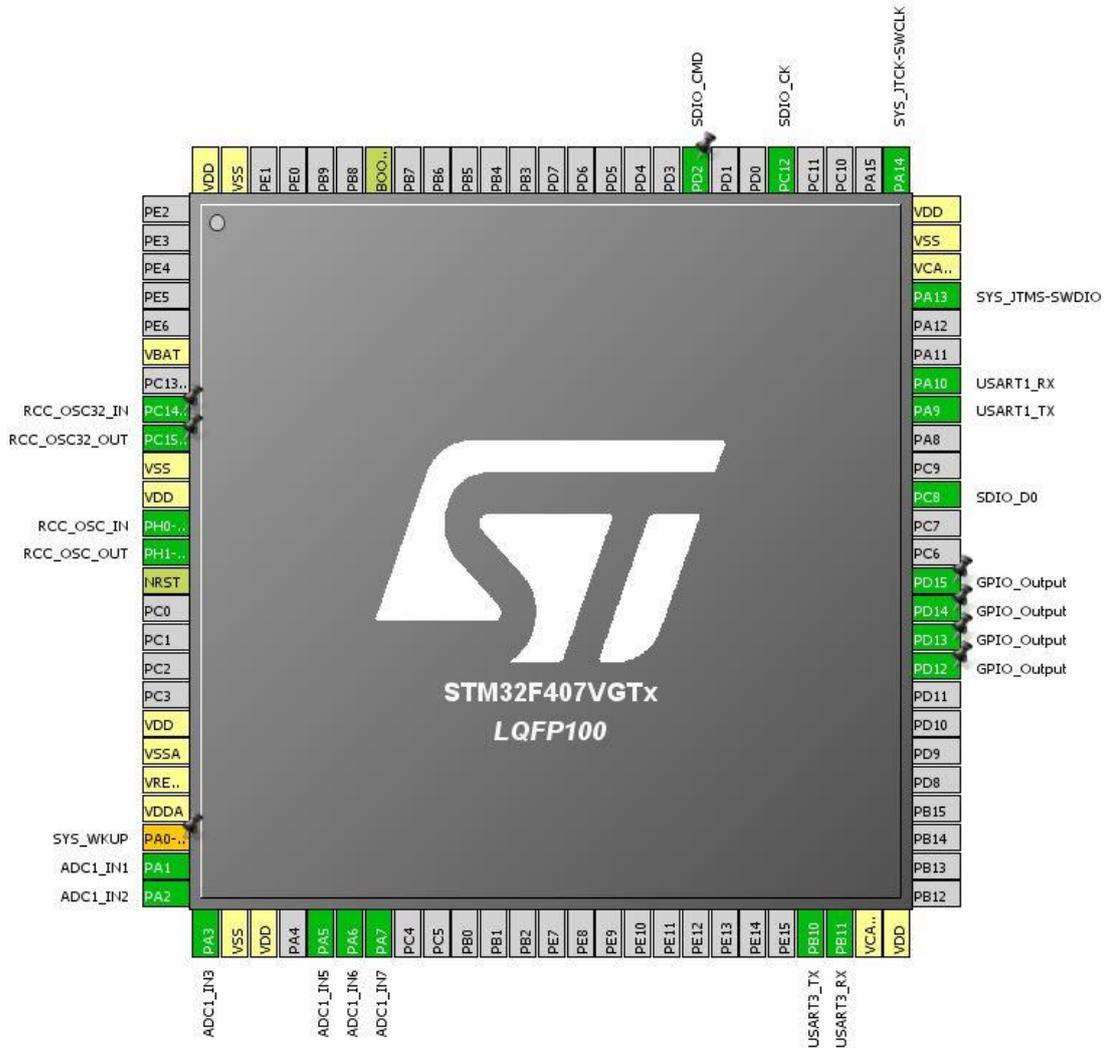


Figura 55: pinout del microcontrolador STM32F4.

Verificación de los módulos de comunicación

Una vez implementada la placa de prueba para los módulos XBee, se procedió a realizar una medición de rango. Para ello se utilizaron dos antenas de polarización vertical, una de 6dBi y otra de 5dBi, similares a la que se observa en la figura 56; dos XBee3 y dos computadoras portátiles. Además, el software dedicado del dispositivo (XCTU) presenta la funcionalidad “Range test”, el cual permite realizar la prueba deseada en forma sencilla y visualizando ciertas variables de interés.



Figura 56: antena de 2,4GHz y conector u.FL.

En el caso 1, se colocó uno de los módulos dentro de la vivienda del campo, y se comenzó a incrementar la distancia. Cuando la separación fue de alrededor de 100 metros, la potencia recibida comenzó a caer rápidamente (línea continua verde), perdiendo así una gran cantidad de paquetes (línea punteada azul) como se observa en la figura 57. El comportamiento fue similar con ambas antenas.

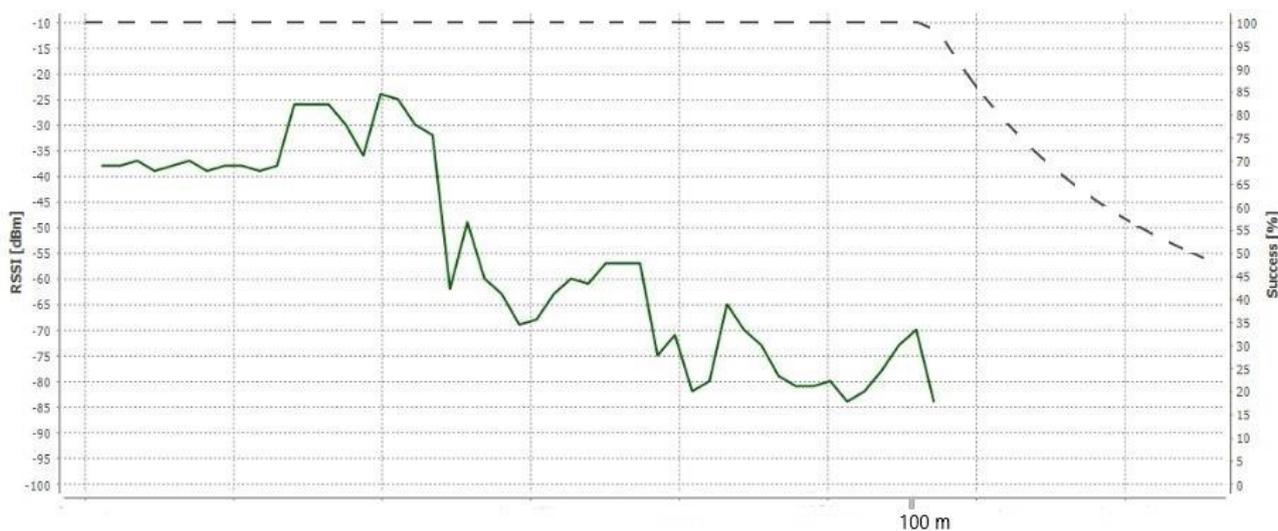


Figura 57: potencia (línea continua verde) y paquetes recibidos con éxito (línea punteada azul), en el caso 1.

Se procedió entonces a colocar la antena del primer módulo fuera de la vivienda. Luego se midió con las dos antenas en línea recta y sin obstáculos, es decir, a campo abierto. En este caso (2), se lograron alcanzar aproximadamente los 1000 metros de distancia, como se observa en la figura 58.

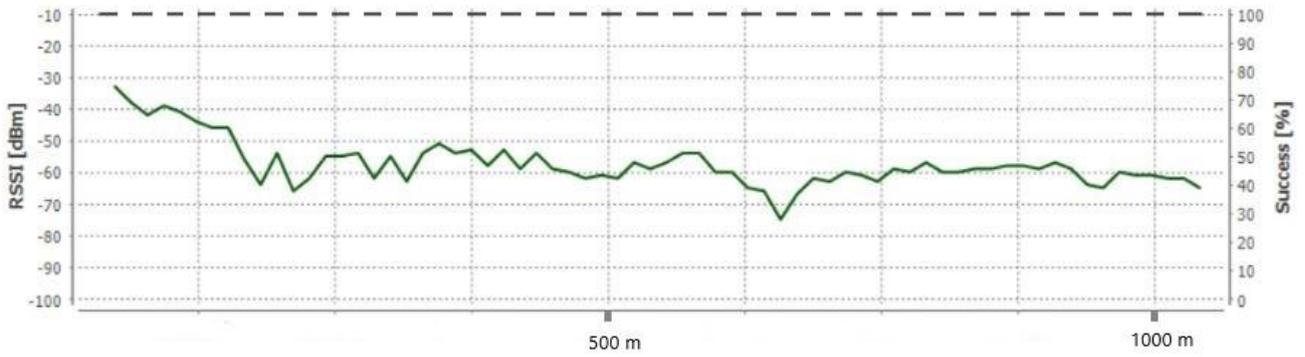


Figura 58: potencia (línea continua verde) y paquetes recibidos con éxito (línea punteada azul), en el caso 2.

Para el tercer caso, se mantuvo la antena del primer módulo fuera de la vivienda y se llevó el módulo portátil hasta el bebedero en el cual se va a instalar el prototipo del sistema. Dicho corral se encuentra a aproximadamente 300 metros de la vivienda, y con algunas estructuras de por medio actuando como obstáculos. Primero se utilizó la antena con menor ganancia (5dBi), con los resultados que se observan en la figura 59.

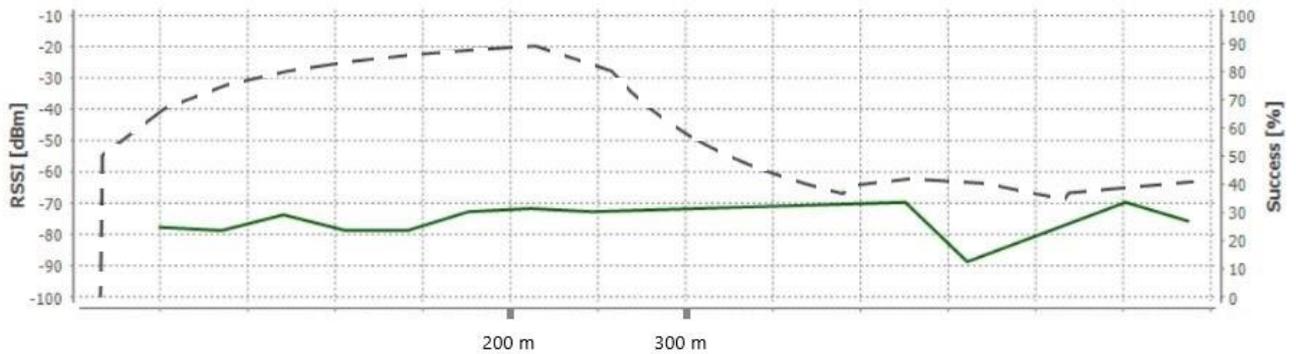


Figura 59: potencia (línea continua verde) y paquetes recibidos con éxito (línea punteada azul), en el caso 3.

Por último, situado en el mismo punto, pero utilizando la antena de mayor ganancia (6dBi), se logró mejorar notablemente la comunicación, como se observa en la figura 60. Si bien la potencia de recepción no pareciera cambiar demasiado entre el caso 3 y 4, se comprueba empíricamente un mayor éxito en la recepción de paquetes con la antena de mayor ganancia.

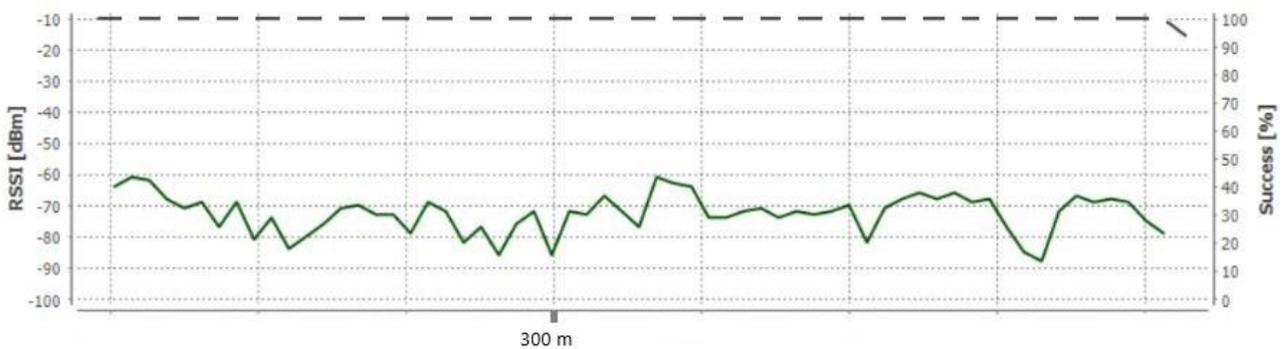


Figura 60: potencia (línea continua verde) y paquetes recibidos con éxito (línea punteada azul), en el caso 4.

Plan de pruebas. Módulo: comunicación inalámbrica.

Tipo de prueba	Nombre	Numero de prueba	Datos de prueba	Instrumental necesario	Paso a paso	Responsable	Resultado esperado	Resultado obtenido	Fecha de ejecución	Comentario
Unitaria	Rango de comunicación inalámbrica 100m	1		- Modulo adaptador TTL/USB - Dos (2) computadoras	1- Conectar el par de módulos inalámbricos, cada uno a una computadora diferente. 2- Incrementar la distancia entre ambos módulos hasta alcanzar 100 metros de separación. 3- Conectar los módulos inalámbricamente.	Desarrollador electrónica	Comunicación exitosa	Comunicación exitosa	30/08/18	
Unitaria	Rango de comunicación inalámbrica 300m	1		- Modulo adaptador TTL/USB - Dos (2) computadoras	1- Conectar el par de módulos inalámbricos, cada uno a una computadora diferente. 2- Incrementar la distancia entre ambos módulos hasta alcanzar 300 metros de separación. 3- Conectar los módulos inalámbricamente.	Desarrollador electrónica	Comunicación exitosa	Comunicación exitosa	30/08/18	Se logró incluso una comunicación exitosa a 1000 metros de distancia.

Verificación del lector RFID

El largo del bebedero donde se identificarán los animales es de aproximadamente 2,4 metros. Es por ello que se diseñó un plan de pruebas para la verificación del rango de lectura de RFID.

En ese sentido, se compararon también los rangos de lectura con dos chips distintos para la elección del TAG, los cuales son el Alien Higgs 3 y el Monza QT 4.

Plan de pruebas. Módulo: RFID.

Tipo de prueba	Nombre	Numero de prueba	Datos de prueba	Instrumental necesario	Paso a paso	Responsable	Resultado esperado	Resultado obtenido	Fecha de ejecución	Comentario
Unitaria	Rango del TAG	1		- Fuente de alimentación - Cable adaptador RS232/USB	1- Conectar el lector RFID con su fuente de alimentación. 2- Conectar a computadora y acceder al software. 3- Configurar potencia máxima. 4- Incrementar distancia entre el TAG y el lector hasta 3 metros. 5- Verificar correcta identificación del TAG.	Desarrollador electrónica	Identificación exitosa	Identificación exitosa	26/3/2018	

Verificación de la alimentación

Basándose en los cálculos de consumo realizados, se conectó a la batería de 12V 7Ah una carga con consumo de 0,75W, que, si bien es un 40% menor al esperado por el sistema, permite realizar ciertas estimaciones sobre el comportamiento de la batería. Se obtuvo entonces la curva de descarga observada en la figura 61.

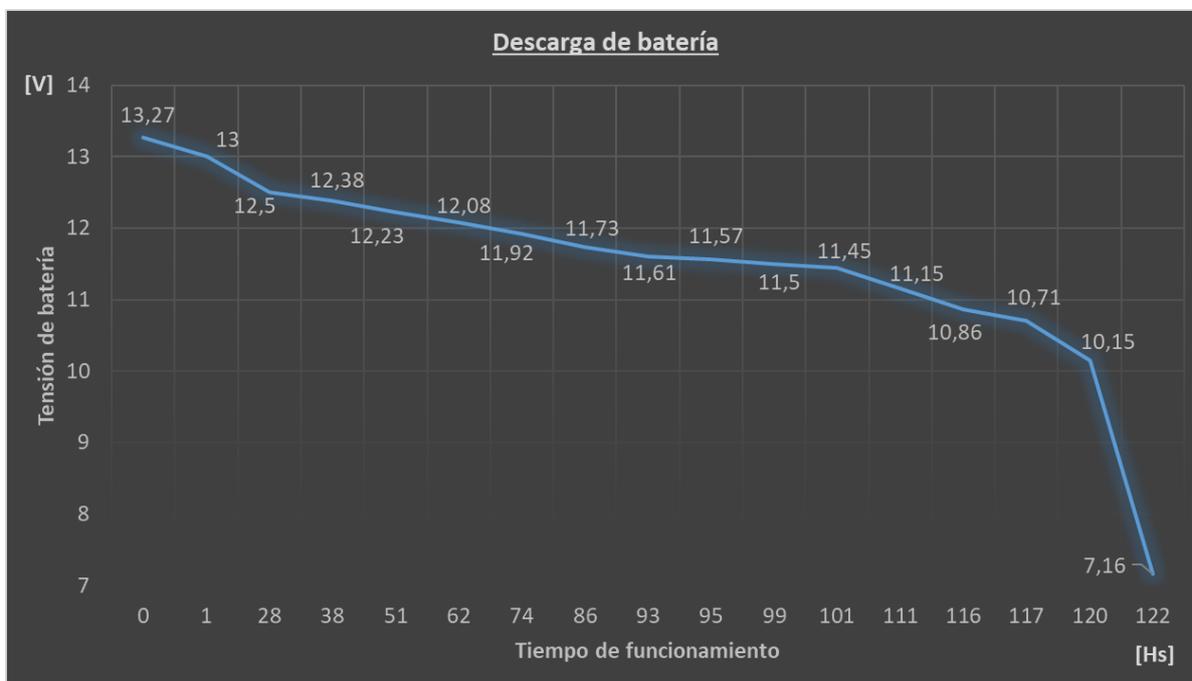


Figura 61: ciclo de descarga de batería.

Posteriormente se conectó la batería al panel solar con el respectivo regulador PWM. Se realizaron mediciones de corriente de carga en diferentes momentos de la misma, obteniéndose valores en el rango de 0,5 y 1,3A. Durante la carga, la tensión del panel solar disminuyó de los 19V a circuito abierto a un rango de entre 13,5 y 15,5V. Se logró de esta forma una carga completa, con buen estado climático, en menos de 7 horas.

Se midió luego la tensión de batería con el circuito acondicionador, desde el ADC del microcontrolador, obteniéndose los valores correctos tanto al estar cargada (alrededor de los 13V) como descargada (menor a 11V).

Plan de pruebas. Módulo: alimentación.

Tipo de prueba	Nombre	Numero de prueba	Datos de prueba	Instrumental necesario	Paso a paso	Responsable	Resultado esperado	Resultado obtenido	Fecha de ejecución	Comentario
Unitaria	Medición de tensión de batería			- Batería de 12V -Circuito acondicionador -uC	1- Conectar la batería al circuito acondicionador, y su salida al ADC del uC. 2- Registrar el valor obtenido.	Desarrollador electrónica	Obtener un valor de alrededor de 2482 (+- 10%)			
Integral	Medición de consumo		- Consumo teórico del sistema (Watts).	- Batería o fuente de alimentación - Voltímetro - Amperímetro - Sistema completo (amplificador, RFID, etc.)	1- Conectar todos los componentes y poner en funcionamiento el sistema. 2- Medir el voltaje de alimentación. 3- Medir la corriente eléctrica promedio en una hora. 4- Calcular el consumo en Wh.	Desarrollador electrónica	Medir consumo calculado teóricamente para del circuito.			

Verificación del sistema completo

Para la prueba del prototipo final, el cual consta de una placa integradora de todos los módulos anteriormente detallados, se plantearon las siguientes mediciones a realizar:

- Medir voltajes de funcionamiento de ambas fuentes buck (3,3V y 10V), así como evaluar sus entradas de habilitación.
- Medir voltaje negativo del ICL7660 (-10V).
- Comprobar el correcto funcionamiento de las llaves implementadas con MOSFET.
- Comprobar la correcta adquisición de datos provenientes de la balanza, a través del ADC.
- Transmitir y recibir datos desde y hacia el módulo de comunicaciones XBee.
- Comprobar correcto funcionamiento del lector RFID y su comunicación UART con el microcontrolador.
- Sensar humedad y temperatura desde los sensores climáticos implementados.
- Almacenar y leer información desde la tarjeta SD.
- Evaluar consumo eléctrico del sistema en su conjunto.

Todas estas pruebas se realizaron tanto en la primera versión del prototipo como en la segunda.

9.1.2. Evaluación y resultados

En primer lugar, se realizaron mediciones sobre los convertidores buck encargados de proveer las tensiones de funcionamiento para todo el sistema. En el caso de la primera versión del prototipo (KUH V1), se observaron los voltajes mostrados en la figura 62 y 63.

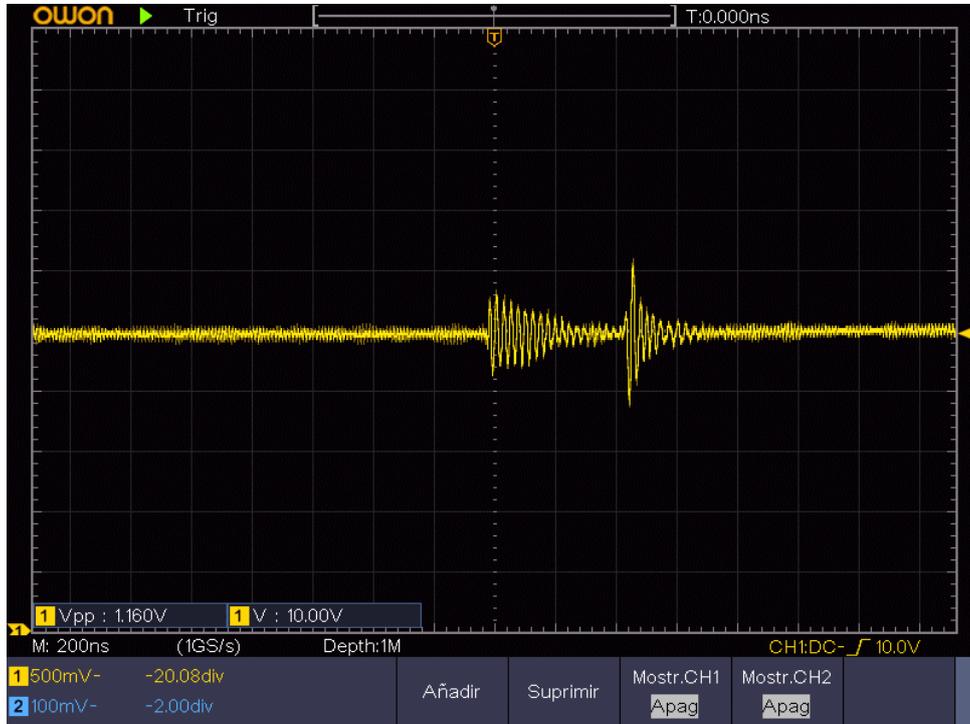


Figura 62: salida de la fuente de 10V en KUH V1.

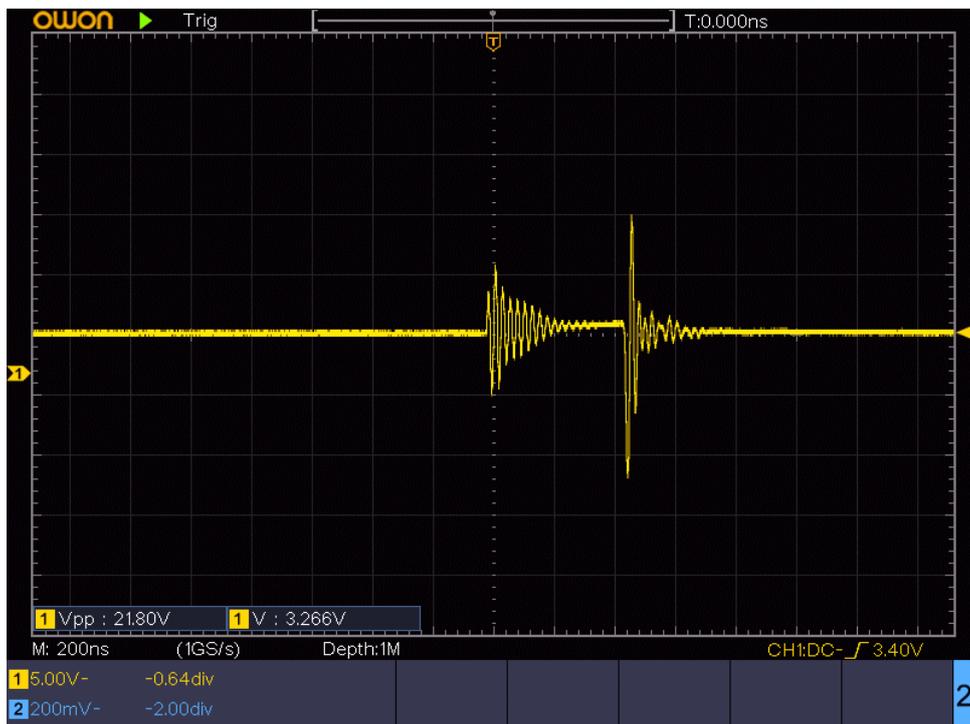


Figura 63: salida de la fuente de 3,3V en KUH V1.

En ambas fuentes se observan sobre-picos de tensión, de aproximadamente $1V_{pp}$ en el caso de la fuente de $10V$, y de $20V_{pp}$ en el caso de la fuente de $3,3V$. Sin embargo, en este último caso dicho ruido es irradiado, ya que se comprobó mediante mediciones que no está presente realmente en el circuito.

Dichos comportamientos no deseados pueden deberse a diversos factores como puede ser el layout del PCB, el ruteo, la ausencia de plano de masa, etc. Consecuentemente, en la segunda versión del prototipo (KUH V2), en la cual se realizaron correcciones sobre los factores nombrados, se observaron mejoras como se muestra en la figura 64 y 65.

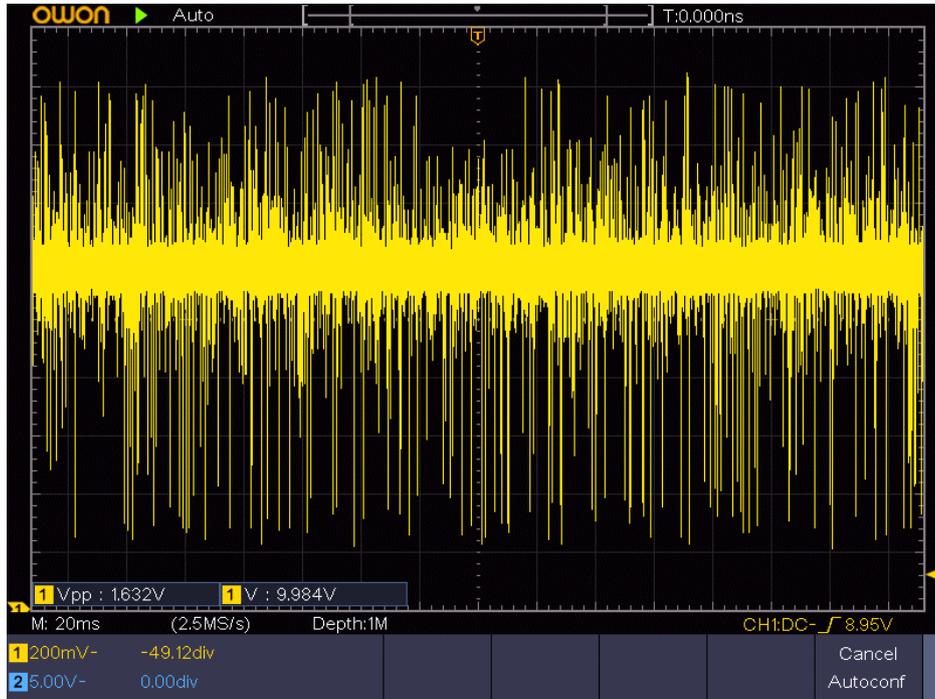


Figura 64: salida de la fuente de $10V$ en KUH V2.

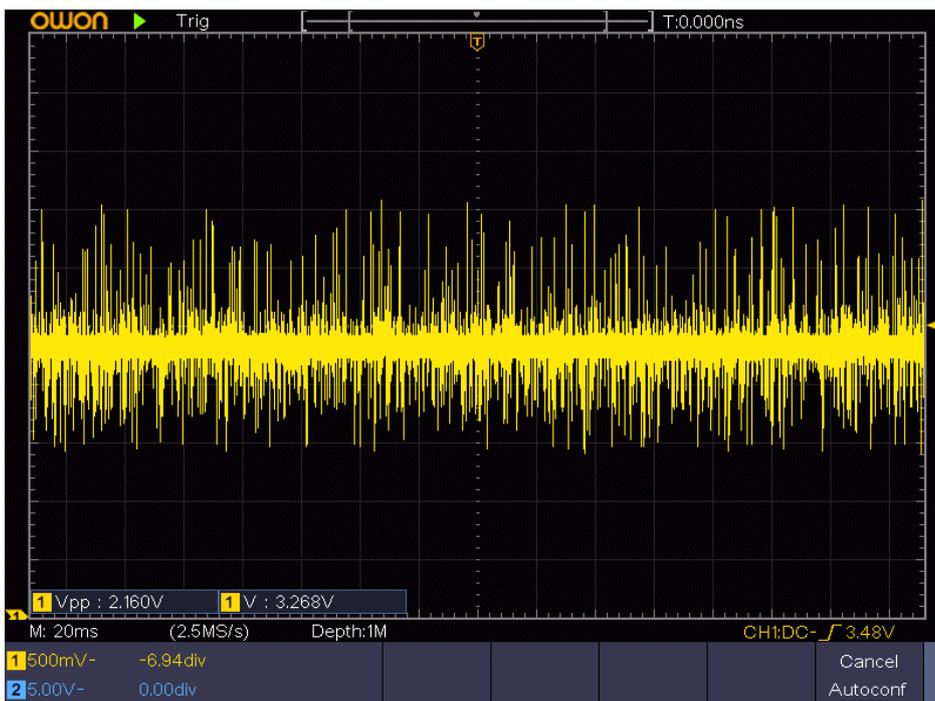


Figura 65: salida de la fuente de $3,3V$ en KUH V2.

En este último caso se midió el ruido irradiado en la cercanía del convertidor obteniendo lo mostrado en la figura 66 y comprobando así que los picos observados no están realmente presentes en el circuito.

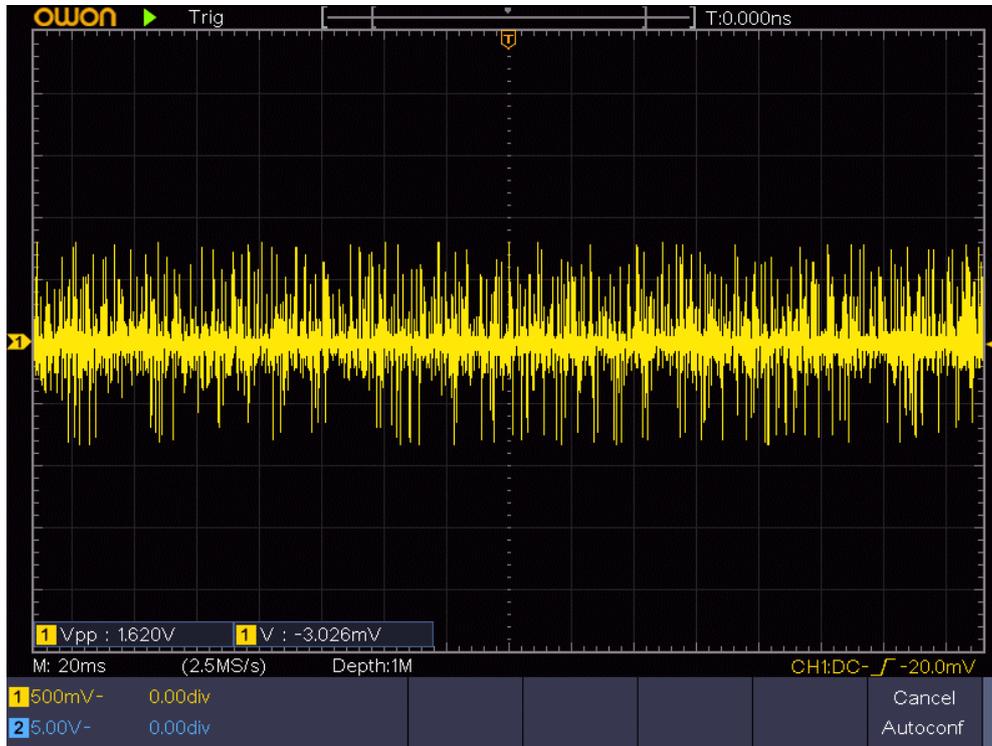


Figura 66: ruido irradiado de la fuente de 3,3V en KUH V2.

En ambas fuentes se comprobaron también el correcto funcionamiento de sus entradas de habilitación. En el caso de la fuente de 3,3V dicha entrada se encuentra constantemente conectada a la entrada de la batería a través de un divisor resistivo de voltaje. En el caso de la fuente de 10V, la entrada de habilitación se maneja mediante un pin de propósito general del microcontrolador.

Para completar las evaluaciones de los voltajes de funcionamiento, se corroboró el correcto funcionamiento del ICL7660 midiendo los -10V destinados a los amplificadores de instrumentación. También se comprobó la habilitación de diferentes circuitos implementada mediante llaves con MOSFET, así como los 5V a la salida de los LDO en KUH V2.

Luego se realizaron mediciones de los 4 ADC dedicados a la lectura de los sensores de la balanza, obteniendo los datos esperados. También se realizaron lecturas de los canales dedicados a los sensores climatológicos, con resultados exitosos.

Se configuró e instaló el módulo de comunicaciones inalámbrico XBee, y se comprobó su correcto funcionamiento transmitiendo datos a la central de monitoreo. Se realizó también un almacenamiento de datos y posterior lectura de los mismos sobre la tarjeta micro-SD.

Luego, se corroboró el funcionamiento de la UART encargada de comunicarse con el lector RFID, tal como se observa en la figura 67. Una vez comprobado, se procedió a conectar el lector y verificar de ese modo tanto la comunicación serie como la alimentación eléctrica hacia el mismo.

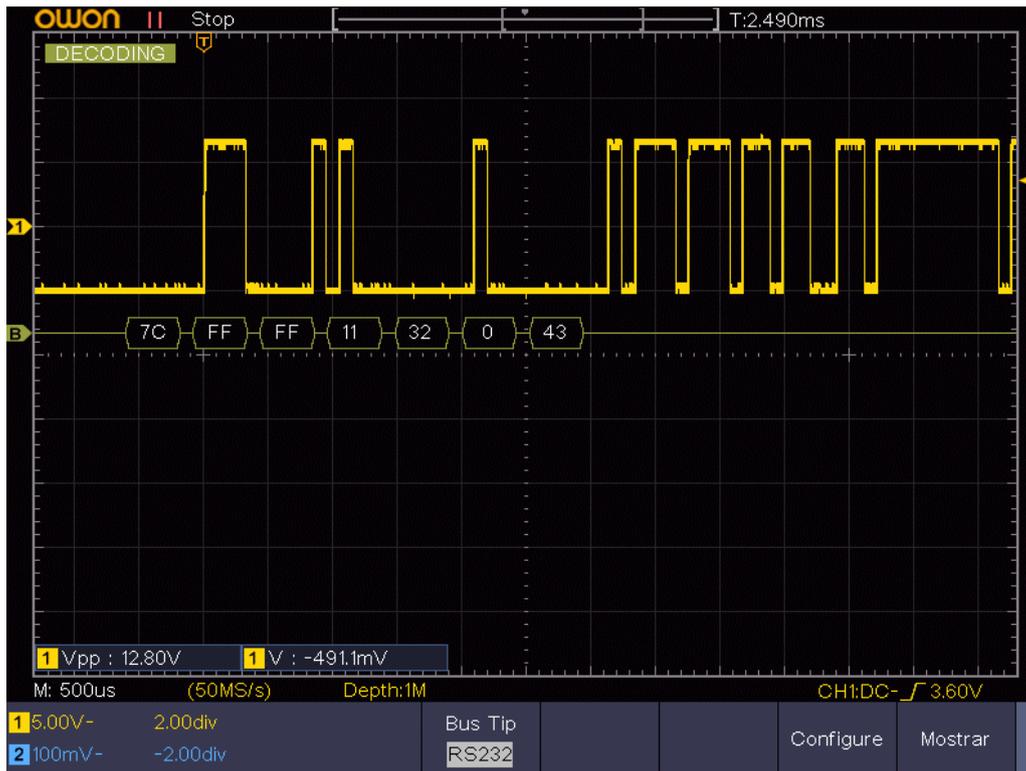


Figura 67: comando de lectura RFID enviado desde la UART del uC.

Finalmente, se realizaron mediciones de consumo eléctrico para todo el sistema. En el régimen estable, es decir con el lector RFID, módulo XBee y los sensores climáticos apagados, se obtuvieron 90mA de consumo a 12,8V de la batería. Esto implica un consumo permanente (durante el pesaje) de aproximadamente 1,15W. Es decir 27,6Wh por día. Para el lector RFID se midieron 350mA a 10V, y se estima un disparo de 10 segundos de duración, una vez por minuto, es decir aproximadamente 583mWh.

Si se suman entonces los 14Wh diarios estimados para el lector RFID, se obtienen alrededor de 41,6Wh de consumo diario. Dicho consumo es un 30% mayor al estimado, lo cual plantea tres posibilidades:

- Aumentar el tamaño de la batería.
- Reducir el tiempo de autonomía del sistema (en días nublados).
- Modificar la frecuencia de disparo del lector RFID, reduciendo así el consumo asociado al mismo y manteniendo la duración de la batería elegida previamente durante el tiempo esperado.

En el primer caso, supondría un mayor costo y tamaño de la misma, por lo que se descarta dicha opción (la caja contenedora a utilizar ya presenta una dimensión determinada). Por lo tanto, se implementó una combinación de las últimas dos, informando un menor tiempo de autonomía y a la vez limitando la cantidad de disparos por minuto posibles del lector RFID.

En cuanto al TAG a utilizar, se realizaron pruebas con el Monza QT 4 y el Alien Higgs 3. Si bien ambos presentaron un comportamiento similar en cuanto al rango, el Higgs3 es el que aparentemente presenta mayor rango y facilidad de lectura.

En último lugar, ya evaluados todos los módulos del sistema y verificadas las principales funcionalidades planteadas para el equipo, se procedió a la instalación del mismo en el campo. Se realizó en primer lugar el armado de la caja contenedora del sistema, tal como se observa en la figura 68.

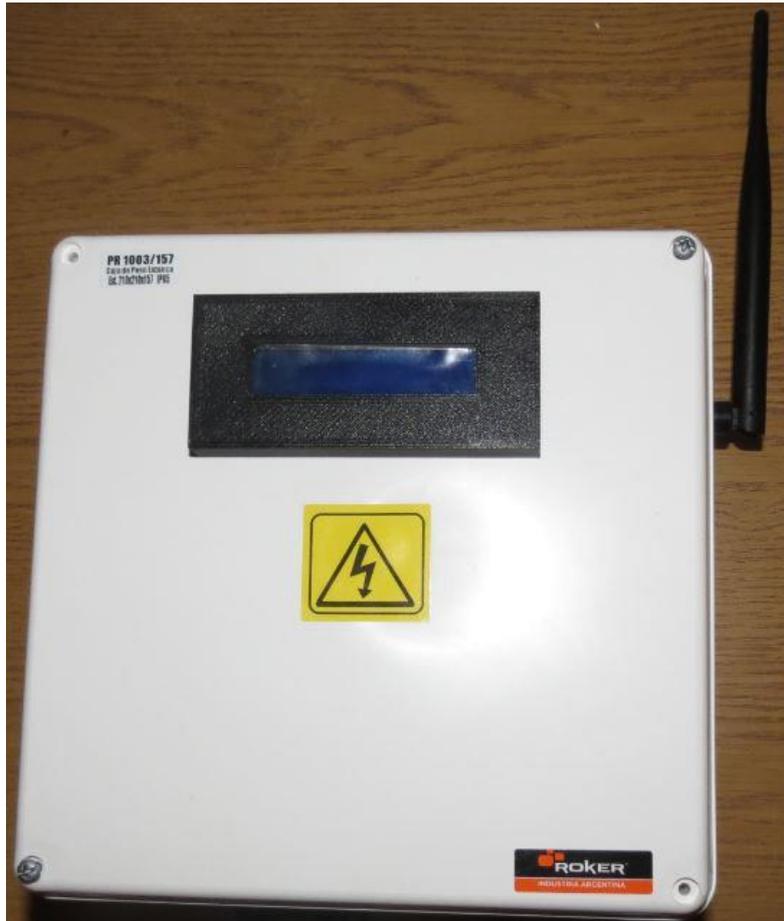


Figura 68: caja contenedora del sistema.

Luego se realizó un soporte de cemento para los cuatro vértices de la balanza (figura 70 y 71), donde se colocarán las estructuras contenedoras de las celdas de carga (figura 69).



Figura 69: recinto contenedor de la celda de carga.



Figura 70: excavación para los soportes de la balanza.



Figura 71: armado de los soportes de la balanza.

Luego se colocó la estructura de la balanza sobre los 4 soportes, dentro de los cuales se ubican las celdas de carga, tal como se observa en la figura 72.



Figura 72: colocación de la balanza.

Finalmente, se conectó y encendió el equipo, recibiendo los datos en la central de monitoreo y corroborando el correcto pesaje e identificación de los animales, así como la obtención de los diferentes datos climatológicos.

9.2. Validación de Software

9.2.1. Validación del microcontrolador

En este paso se verificó, en primer lugar, la robustez del firmware del dispositivo. Para ello se realizaron diferentes pruebas sobre la adquisición de datos, reemplazando los animales por personas para tener mayor facilidad. Se simularon diferentes variaciones de pesos y posibles situaciones, como, por ejemplo:

- Se sube una persona a la balanza con un TAG RFID. El sistema debe almacenar su peso y ID.
- Se sube una persona a la balanza sin TAG. El sistema debe ignorar esta medición.
- Se suben dos personas a la balanza con dos TAGs. El sistema debe almacenar el peso y conjunto de IDs.
- Se suben dos personas a la balanza sin TAG o con uno solo. El sistema debe ignorar esta medición.
- Estando una persona en la balanza, se sube otra, ambas con TAG. El sistema debe almacenar los datos.
- Estando una persona en la balanza, se sube otra, una de las dos sin TAG. El sistema debe ignorar esta medición.
- Estando dos personas en la balanza, se baja una, la que queda con TAG. El sistema debe almacenar los datos.
- Estando una sola persona con TAG en la balanza, se colocan otros TAGs en el rango de lectura RFID. El sistema debe ignorar esta medición ya que es incapaz de discernir a quien pertenece el peso medido.
- Etc.

En los casos en los cuales la balanza detectaba cambios de peso, habilitaba al lector RFID pero este al disparar no encontraba TAGs, se verificó el correcto funcionamiento del sistema al evitar ciclos infinitos, ya que luego de un cumplirse un cierto tiempo de *timeout* se desiste de disparar al lector.

Además, se verificó el correcto funcionamiento de las banderas implementadas en código a fin de realizar la lógica del sistema a modo de máquina de estados (pesaje -> disparo RFID -> almacenamiento -> comunicación inalámbrica; etc.).

Por otro lado, se dejó en funcionamiento el sistema durante 3 días seguidos. De esta forma, se corroboró el correcto funcionamiento del mismo en forma continua, así como la continuidad en la fecha y hora del sistema, fundamental para la sincronización del mismo con la central de monitoreo.

9.2.2. Validación de interfaz de usuario

En el caso del software de consulta de datos, es esencial verificar su robustez y simpleza. Para ello, se le entregó una copia de la aplicación al usuario final, con una base de datos artificial, un pendrive USB y algunas pocas instrucciones de uso. De esta forma, se comprobó la sencillez y lo intuitivo de la aplicación, ya que se realizaron consultas y extracciones de datos de manera exitosa.

Se simuló también cortes de luz en medio de una consulta, para verificar el posterior booteo del sistema y corroborar que no haya posibles pérdidas de datos.

10. Manual de mantenimiento

El mantenimiento del sistema se abordará desde dos perspectivas, a saber:

10.1. Mantenimiento preventivo

Estará asociado a tareas que puede realizar el usuario, en el campo y sin soporte técnico. Fundamentalmente se recomendará realizar una limpieza de la balanza con periodicidad de al menos cada 15 días. Si bien el equipo realiza una tara constante al pesar, tener demasiadas sustancias no deseadas sobre la balanza puede deteriorar el estado de la misma a mediano y largo plazo, y afectar el comportamiento de los bovinos incomodándolos, en el corto plazo.

Debido a la arquitectura del sistema propuesto, se dificulta proveer mayores instrucciones de mantenimiento para el usuario. Por lo que el sistema utilizará la alarma de la central de monitoreo para dar aviso de algún comportamiento erróneo en el mismo. De esta forma, el usuario puede contactarse con el soporte técnico para recibir una visita de mantenimiento correctivo.

10.2. Mantenimiento correctivo

En caso de realizar una visita de soporte técnico, ante un eventual fallo, es esencial identificar el componente dañado o la falla para poder solucionarla. Para ello, se ha colocado un pulsador y una pantalla LCD en la caja del equipo (en el corral). Se implementó entonces una lógica dentro del firmware específicamente para un modo especial, dedicado a la identificación de fallas. De esta forma, una vez identificado el problema, puede reemplazarse el módulo necesario para volver operativo al sistema.

Se accede entonces al modo de mantenimiento pulsando el pulsador. Cuando el microcontrolador detecta la interrupción, la cual debe ser un flanco de subida y uno de bajada (*Rising/Falling edge trigger detection*), entra en dicho modo. Para ello, levanta una bandera la cual dentro de la máquina de estados no permite acceder a ningún otro tipo de funcionalidad, hasta no terminar la consulta o cumplirse un cierto tiempo de *timeout*.

Automáticamente se enciende la pantalla LCD, y se muestran los diferentes pesos que están registrando los sensores en ese momento, con el siguiente formato:

S1= XXX S2= XXX
S3= XXX S4= XXX

Figura 73: 1er pantalla de mantenimiento.

En este primer paso, podremos identificar rápidamente si el inconveniente está relacionado con la balanza. Se procede a reemplazar la celda de carga y/o el amplificador de instrumental colocados bajo la estructura. Si el error persiste, se podría suponer una falla en la placa principal (en los convertidores analógicos-digital) por lo que debería reemplazarse por completo la placa.

Si se vuelve a presionar el pulsador, la pantalla mostrará: fecha y hora actual del dispositivo, tensión de batería, temperatura del agua, temperatura ambiente y humedad relativa.

hhmm ddmmyy VBAT
TA=XX T=XX H=XX

Figura 74: 2da pantalla de mantenimiento.

En este segundo caso es fundamental verificar el horario y fecha del sistema, ya que es esencial para la sincronización del sistema y el registro de datos. En caso de presentar una inconsistencia, deberá reemplazarse la batería de 3,3V utilizada para el reloj RTC y reprogramar la hora.

Si se presiona nuevamente el pulsador, la pantalla mostrará una cuenta regresiva de 5 segundos y luego de transcurrido ese tiempo se activará el lector RFID. Si se colocó un TAG frente al lector, se mostrará en la pantalla el número de ID y se creará un archivo .TXT en la tarjeta SD, con el nombre “ddmmyE.txt”. Si la creación de dicho archivo fue exitosa, se mostrará un vector de cuatro elementos, los cuales serán todos ceros. Caso contrario, el vector tendrá algún elemento distinto de cero y se podrá comprobar en qué momento se da la falla en la escritura, por ejemplo: el primer elemento se corresponde con el montaje de la tarjeta, el segundo elemento a la creación del archivo, en el tercer elemento la escritura dentro del archivo anteriormente creado y el cuarto elemento corresponde al cierre de dicho archivo.

TAG:XXXXXXXXXXXXX SD_OK (0,0,0,0)

Figura 75: 3er pantalla de mantenimiento.

En caso de existir un error en la tarjeta SD, puede verificarse la correcta colocación de la misma sobre el conector y/o reemplazar la misma por una nueva tarjeta. En el caso del RFID, se deberán probar con varios TAGs y en caso de no poder identificar ninguno de ellos, deberá reemplazarse el lector. En ambos casos, si la falla continua luego de reemplazar los correspondientes componentes, se podrá suponer que el error proviene de la placa principal y la misma deberá ser reemplazada.

Presionando el pulsador por cuarta vez, se activa el módulo XBee. Si dicho módulo pudo conectarse con su par (en la central de monitoreo, o uno utilizado por el equipo de soporte tecnico), comienza la transmisión. El módulo transmitirá lo que tiene almacenado en el archivo de texto que se creó previamente en el tercer paso. Si la transmisión es exitosa se mostrará un “OK” en la pantalla. Si la transmisión no fue exitosa porque no se encontró el módulo receptor, se mostrará un “ERROR”. En caso de que el error sea por no haber podido leer la tarjeta SD, se mostrará un vector de cuatro elementos definidos como el paso anterior, con la salvedad de que el elemento 3 del vector se refiere a no haber podido leer la línea que se quiere enviar. Posteriormente se podrá realizar una prueba en la cual se transmitan datos *dummy* a fin de verificar el vínculo radioeléctrico.

Pulsando nuevamente el pulsador o habiéndose cumplido el tiempo de *timeout* (5 minutos) se sale del modo mantenimiento. Así mismo, si el pulsador es presionado por error o no se vuelve a presionar luego de un minuto, automáticamente el sistema sale del modo mantenimiento y continúa con el estado de funcionamiento normal.

11. Conclusiones

11.1. Excelencias. Objetivos alcanzados

Mediante la construcción del prototipo descripto, se comprobó la factibilidad de realizar un sistema de pesaje automático para ganadería capaz de recopilar datos precisos y ser un soporte para las decisiones del productor ganadero.

Los principales objetivos del proyecto fueron alcanzados. El equipo logra obtener los pesos, identificar a los animales y almacenar dicha información para luego transmitirla y visualizarla. Además, se cumplieron algunos de los objetivos en cuanto a información adicional, como la medición de temperatura (ambiente y del agua) y humedad.

Debido a los tiempos involucrados en un seguimiento sistemático del ganado, no se ha podido evaluar hasta ahora el sistema con una cantidad de datos estadísticamente significativa. Comprobar todas las funcionalidades del sistema requeriría de la utilización del mismo durante varios ciclos de engorde, contrastando así los resultados obtenidos con los conocimientos de expertos del sector. De todas formas, las mediciones obtenidas arrojaron resultados muy prometedores, evaluando las funcionalidades del sistema mediante la corroboración de pesos de animales de porte conocido.

A lo largo del desarrollo del producto, se verificó que la solución propuesta fue adecuada para resolver el problema de escasez de datos durante el engorde de bovinos. Se observó incluso la aparición de productos similares, avalando en cierta forma el correcto enfoque del proyecto.

Se detectaron también sub-productos que podrían desprenderse del sistema, los cuales son demandados y buscados por algunos productores ganaderos: digitalización de balanzas; identificación de ganado mediante tecnología RFID.

Se comprobó entonces que las tecnologías elegidas para el desarrollo del equipo fueron adecuadas, confiables y eficientes, como así también económicas y escalables. Permitiendo de esta forma una futura comercialización del mismo como así también una fácil introducción de diferentes mejoras.

En cuanto a los plazos estimados para la realización del proyecto, es probable que su incumplimiento se haya debido tanto a factores externos (tiempos de aduana; factores climatológicos durante la instalación; etc.) como a la falta de experiencia ya sea en este tipo de proyectos como en la misma estimación de tiempos. Sin embargo, cabe destacar que el diseño y desarrollo del sistema sí estuvo terminado en tiempo y forma, siendo los mayores retrasos atribuibles a la implementación final en el campo.

En resumen, el producto resultante ofrece una buena combinación de funcionalidades contra costo, como a la vez un diseño relativamente simple con tiempos de desarrollo bajos y una buena confiabilidad.

11.2. Fallos. Recomendaciones para futuros diseños

Tanto durante el desarrollo como en la puesta en marcha del sistema, se detectaron algunas fallas menores como así también algunos puntos a tener en cuenta para futuras mejoras a fin de mejorar el funcionamiento del equipo.

Medición del caudal de agua

No se logró implementar una medición del caudal de agua, debido en parte a la escasez de caudalímetros adecuados para este caso puntual, y probablemente también atribuible al desconocimiento por parte de los integrantes del proyecto en este tipo de equipos.

PCB de la placa

Debido a la inexperiencia en la fabricación de placas electrónicas y a la falta de conocimiento de fabricantes de PCB (se buscó disminuir costos contactando determinados proveedores), se implementó el sistema en una placa de una sola capa. Para futuros diseños se podría redimensionar la placa y rediseñarla en 2 o 4 capas.

Colocación de tamper

Instalación de una terminal “anti-sabotaje” conectada al microcontrolador mediante un pin de entrada de propósito general, la cual detecte que la caja contenedora del sistema (ubicada en el corral) ha sido abierta. De esta forma se podría notificar la posible manipulación del equipo mediante una alerta o simplemente dejando registrado en un archivo el día y horario en el cual se realizó la apertura.

Rediseño de firmware

En el sistema actual, se utilizó una arquitectura *super-loop* para la implementación del firmware. Sin embargo, esto recae en una gran fragilidad del código a la hora de realizar cambios o mejoras. Gracias a la gran capacidad del microcontrolador elegido, se podría optar entonces por hacer una migración del sistema hacia una arquitectura basada en un sistema operativo de tiempo real (RTOS), lo que permitiría homogeneizar y mejorar la comprensibilidad del código, brindar mayor robustez al mismo y facilitar el agregado de funcionalidades al equipo.

Diseño de lector RFID

Durante el desarrollo se utilizó un lector RFID comercial, el cual presenta un consumo eléctrico elevado incluso en modo de espera. Por ello se tuvo que implementar una llave de corte para su alimentación, lo cual podría reducir la vida útil del equipo. Para evitar esto, se podría diseñar por completo un lector propio, mejorando tal vez incluso no solo el consumo sino también el rango de lectura.

Accesibilidad a internet

En un futuro se podría agregar un módulo de conexión celular (por ej. GPRS) que reporte a un servidor remoto, lo cual permitiría acceder a la información de cada corral desde cualquier lugar del mundo. En esta versión se optó por no agregar esta funcionalidad, tanto por complejidad de desarrollo como por la escasez de señal celular en la mayoría de los campos de Argentina.

Software de monitoreo

Debido al poco conocimiento respecto a la implementación de interfaces gráficas, base de datos y otros aspectos relacionados con el software, se podría realizar un estudio en profundidad de los requerimientos necesarios para la implementación de una aplicación con mayores funcionalidades, mejor rendimiento y la experiencia del usuario.

Otras especies

Se podría analizar la factibilidad de utilizar este sistema, con mínimos cambios, para el pesaje automático de otras especies animales: porcinos, ovinos, equinos, etc.

Solución de domótica

Existe la posibilidad de expandir el producto a una solución integral de domótica para el establecimiento ganadero. Para ello se podría analizar la implementación de, por ejemplo:

- Apertura y cierre de tranqueras.
- Control de tanques de agua.
- Instalación de central meteorológica.
- Monitoreo del campo mediante videocámaras.
- Etc.

12. Anexos técnicos

Placa del amplificador

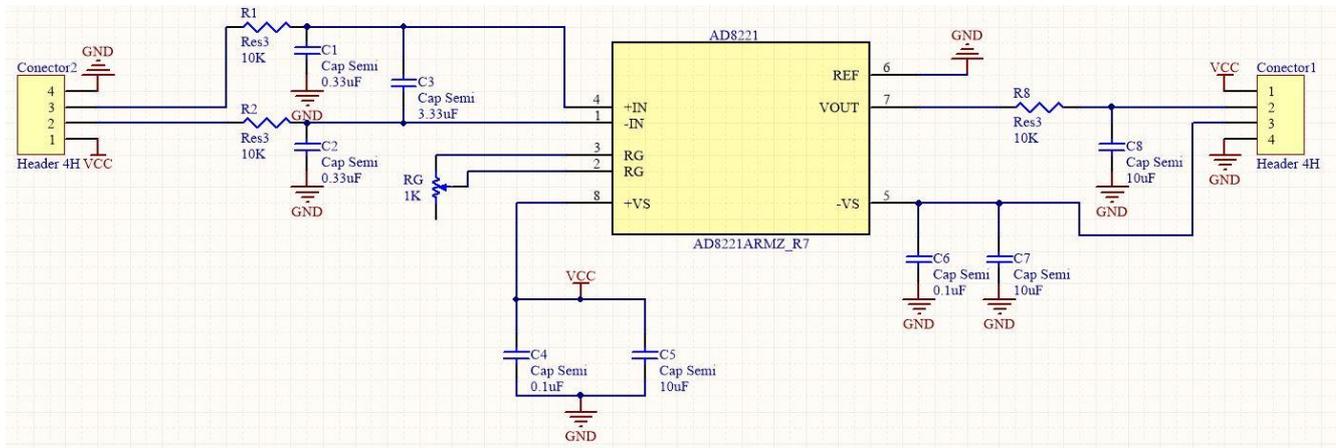


Figura 76: esquemático del circuito amplificador.

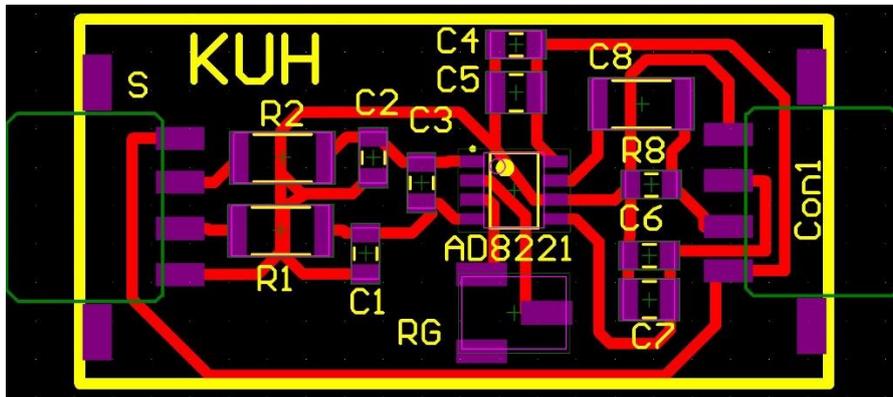


Figura 77: PCB del amplificador.

Placa del XBee

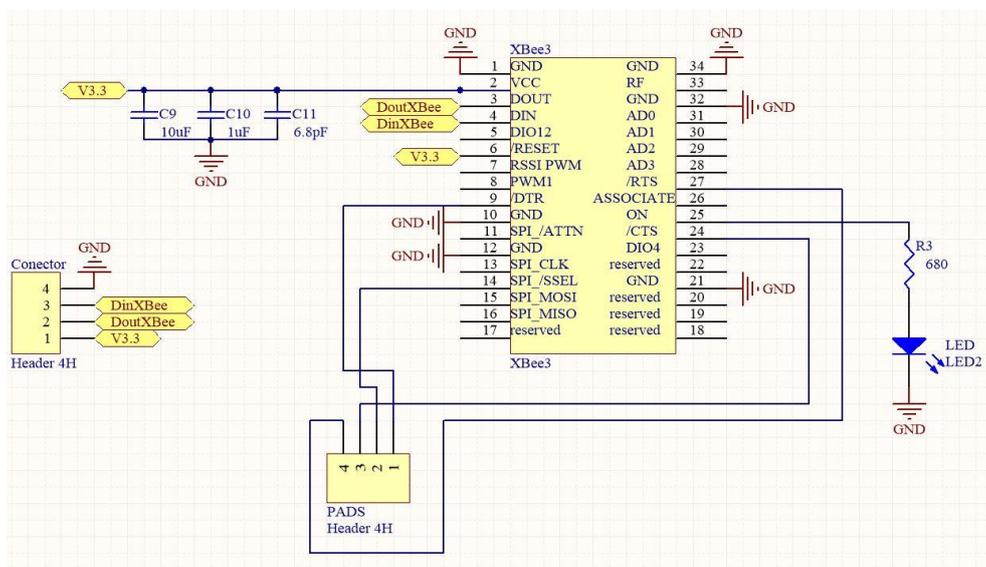


Figura 78: esquemático de la placa del XBee.

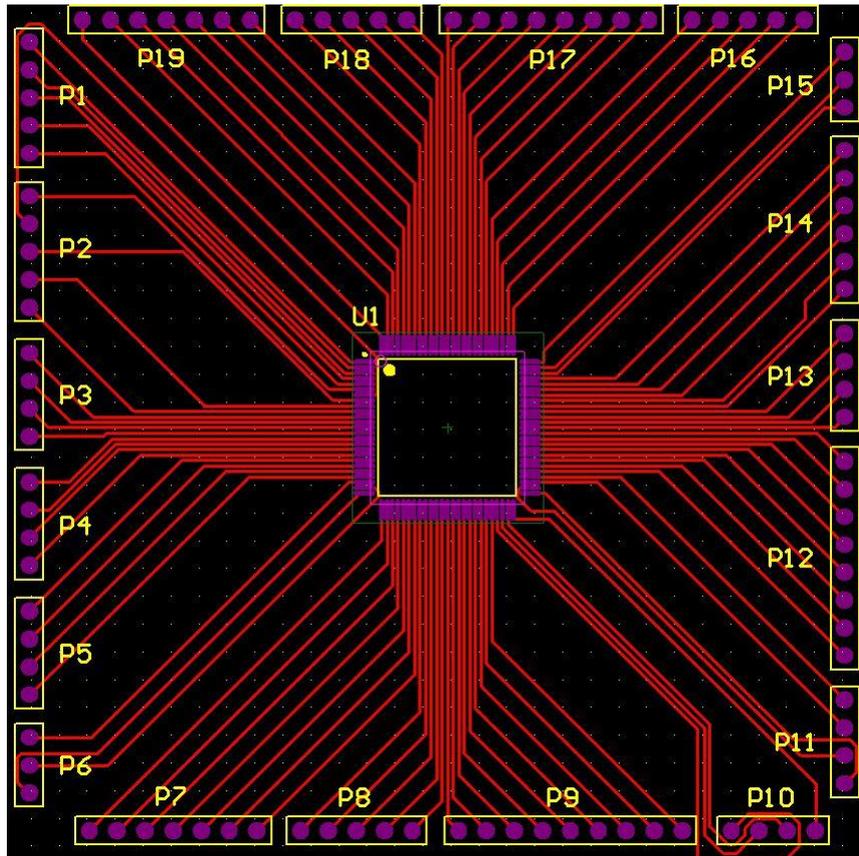


Figura 81: PCB de la placa del adaptador LQFP100.

Placa del sistema integrado (4 esquematicos interconectados)

Se dividió el archivo esquemático de Altium en 4 secciones conectadas entre sí por diferentes redes. Se observan en las figuras 82 a la 85:

1. Microcontrolador. Capacitores de desacople.
2. Conectores de balanza. Conector de RFID con circuito adaptador con MAX3232. ICL7660. Circuito para medición de temperatura del agua.
3. Fuentes buck (3,3V y 10V). Circuito para medición de temperatura y humedad ambiente. Circuito para sensado de voltaje de batería.
4. XBee. Pantalla LCD con circuito para mantenimiento.

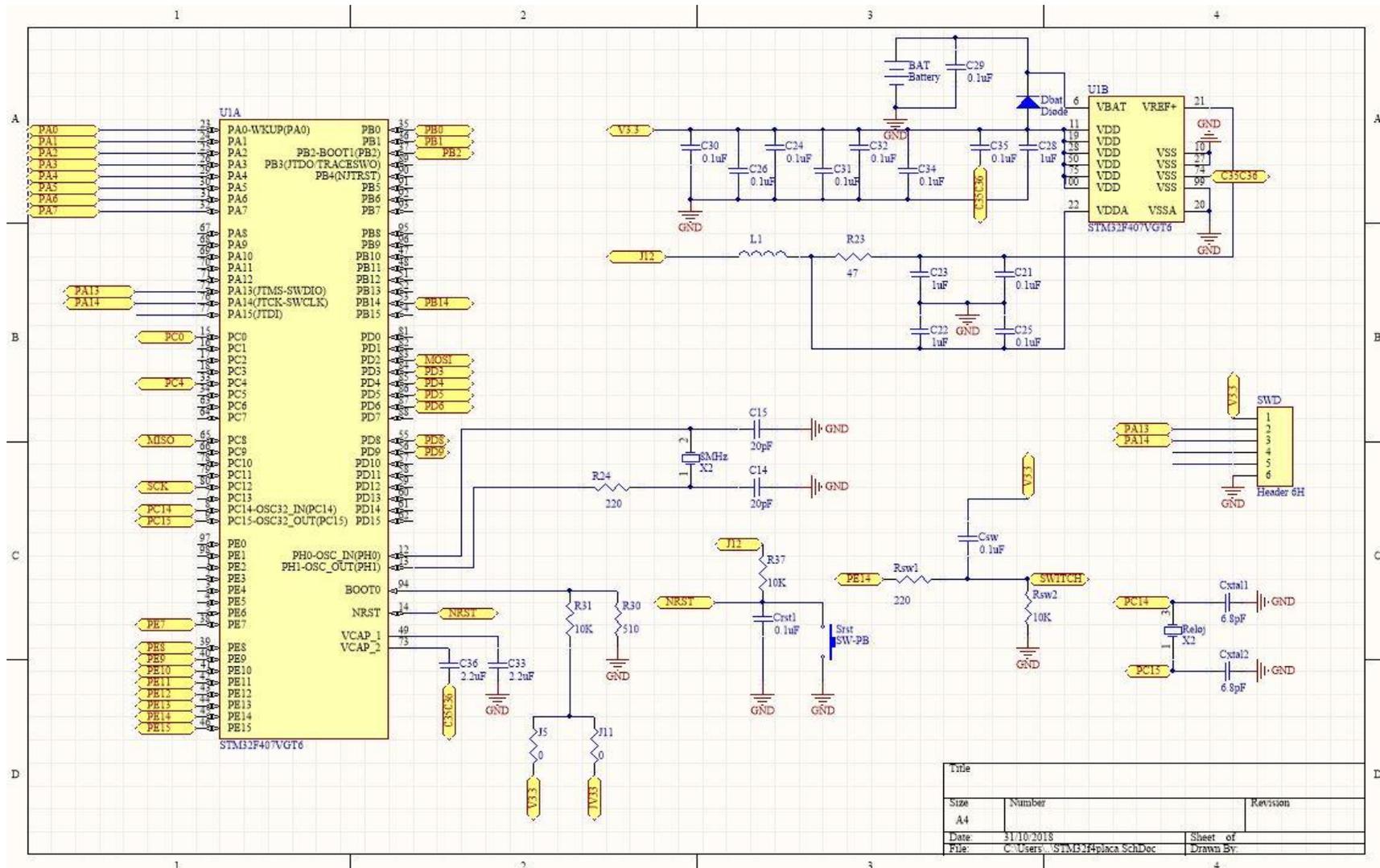


Figura 82: 1er hoja del esquemático de la placa final.

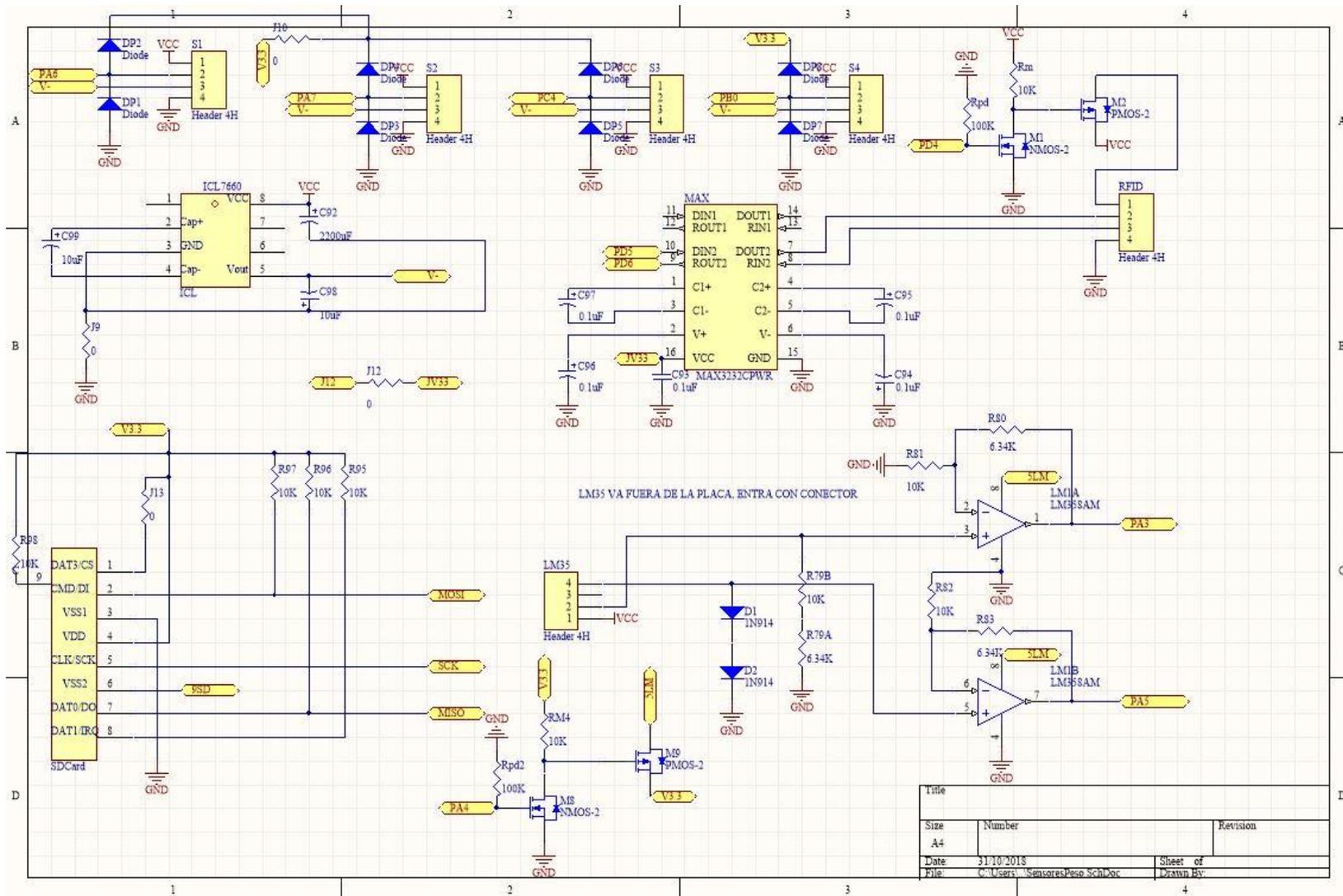


Figura 83: 2da hoja del esquemático de la placa final.

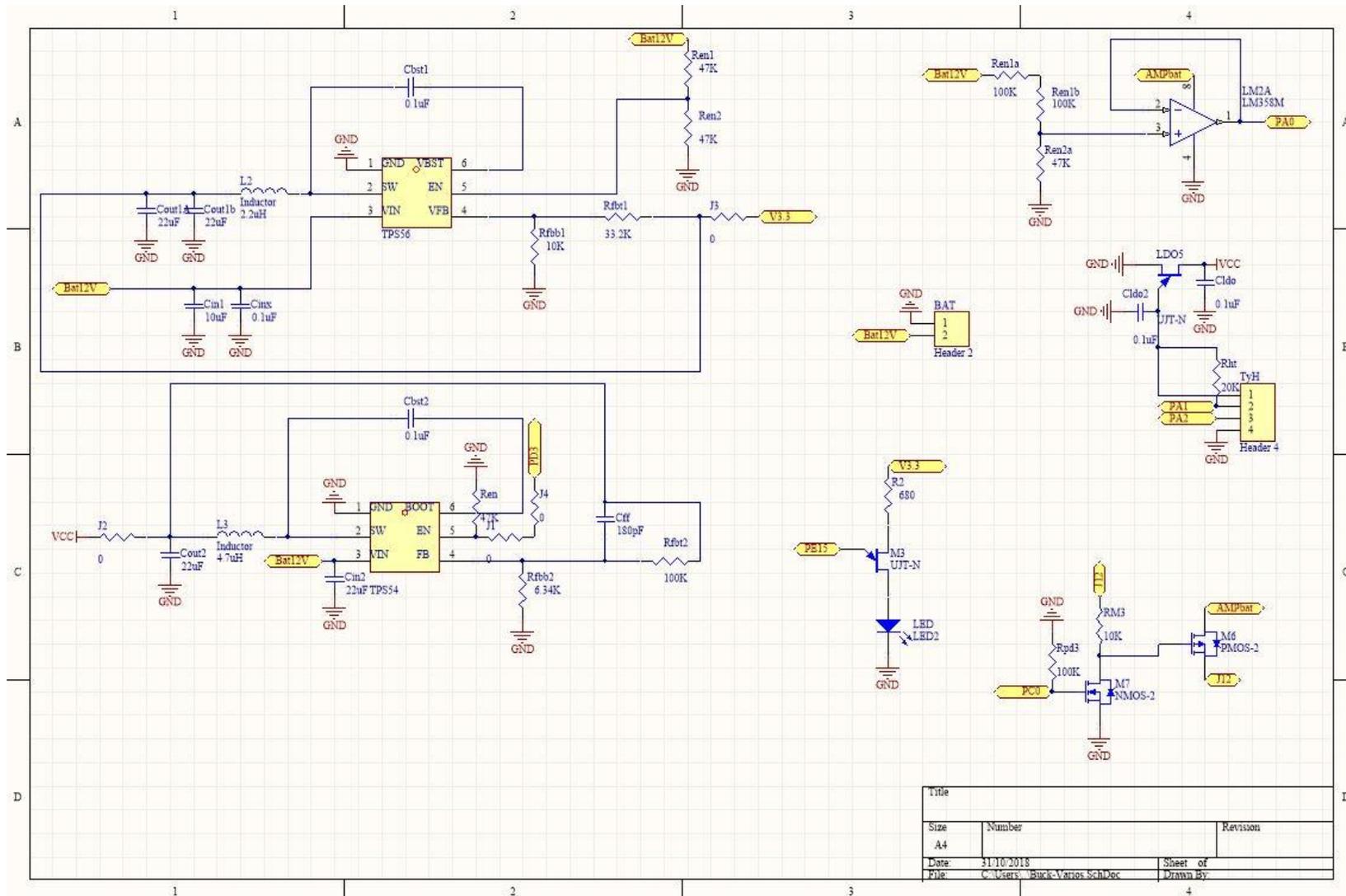


Figura 84: 3er hoja del esquemático de la placa final.

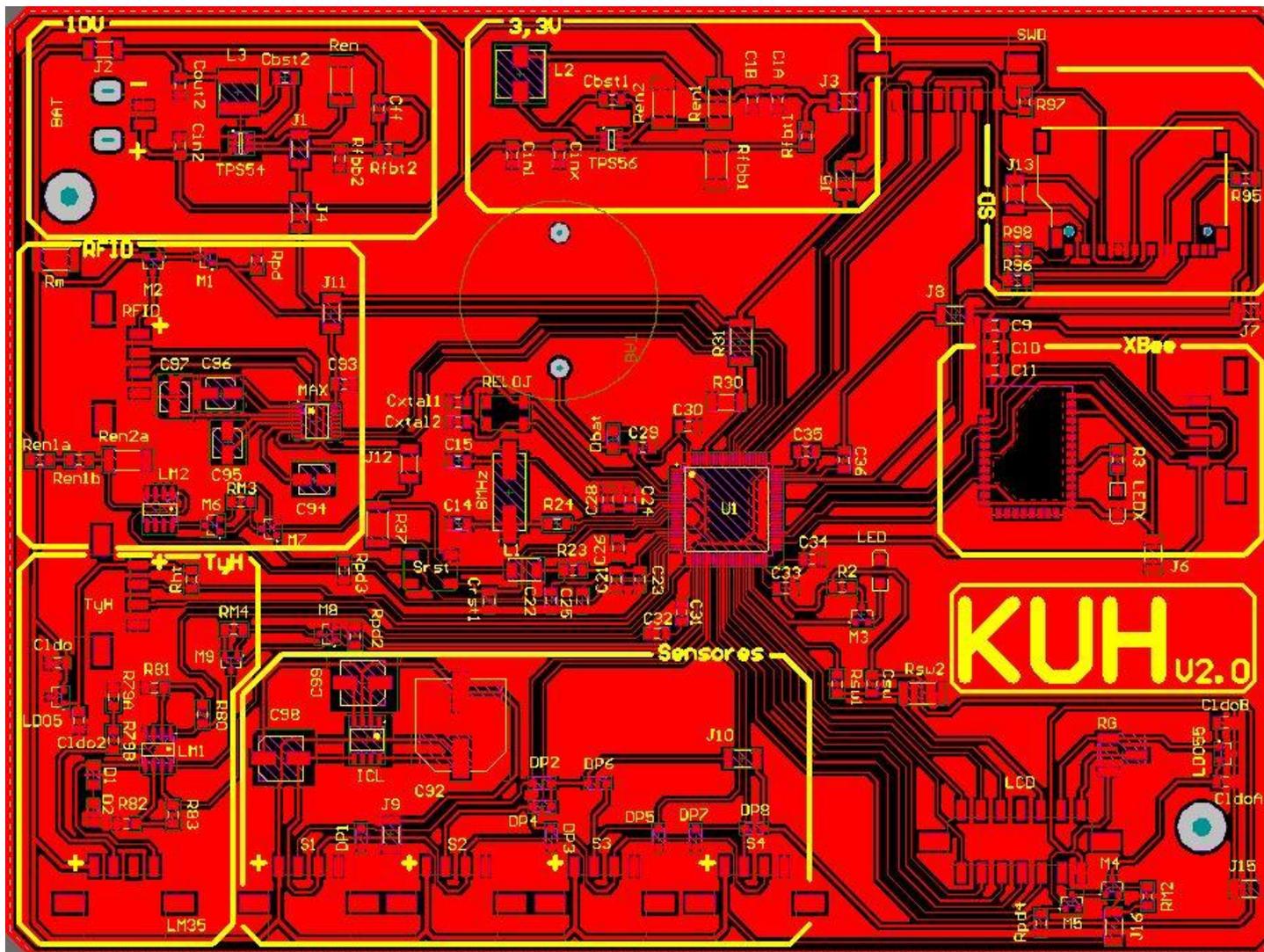


Figura 86: PCB con plano de masa de la placa final (versión 2).

Hojas de datos

STM32F4 Discovery

https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user_manual/70/fe/4a/3f/e7/e1/4f/7d/DM00039084.pdf/files/DM00039084.pdf/jcr:content/translations/en.DM00039084.pdf

STM32F407

https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/reference_manual/3d/6d/5a/66/b4/99/40/d4/DM00031020.pdf/files/DM00031020.pdf/jcr:content/translations/en.DM00031020.pdf

AD620

<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad620.pdf>

AD8221

<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8221.pdf>

TAG Higgs3

<http://www.alientechnology.com/wp-content/uploads/Alien-Technology-Higgs-3-ALC-360.pdf>

TAG Monza 4 QT

<https://support.impinj.com/hc/en-us/articles/202756908-Monza-4-RFID-Tag-Chip-Datasheet>

ICL7660

<https://www.intersil.com/content/dam/intersil/documents/icl7/icl7660.pdf>

LM35

<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>

LM358

<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm158-n.pdf>

MAX3232

<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/max3232.pdf>

Mosfet N

<http://www.onsemi.com/pub/Collateral/NTR4003N-D.PDF>

Mosfet P

<https://www.onsemi.com/pub/Collateral/NTR4502P-D.PDF>

TPS 54202

<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps54202.pdf>

TPS 565201

<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps565201.pdf>

HTUF 3535

https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FHPC213_2%7FA%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_DS_HPC213_2_A.pdf%7FCAT-HSA0005

XBee3

https://www.digi.com/pdf/ds_xbee-3-zigbee-3.pdf

Notas de aplicación

ADC del STM32

https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/group/0/3f/4c/a4/82/bd/63/4e/92/CD00211314/files/CD00211314.pdf/jcr:content/translations/en.CD00211314.pdf

Analog Devices – Amplificadores de instrumentación

<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-244.pdf>

XBee3 – Manual de referencia de hardware

<https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/pdfs/90001543.pdf>

13. Bibliografía

- Cámara Argentina de Feedlot (2018). Accedido el 02/02/2018.
<http://www.feedlot.com.ar/sitio/>
- Instituto de Promoción de la Carne Vacuna (2018). *Faena y producción de carne vacuna*. Accedido el 03/03/2018.
http://www.ipcva.com.ar/documentos/1864_1528722311_informedefaenayproduccion1trimestre2018.pdf
- Servicio nacional de sanidad y calidad agroalimentaria (2018). *Informes y estadística*. Accedido el 03/03/2018.
<http://www.senasa.gob.ar/cadena-animal/bovinos-y-bubalinos/informacion/informes-y-estadisticas>
- Canton, G (2014). *Hipomagnesemia*. Accedido el 04/07/2018.
http://intelintec.com.ar/platform/paloma/mailler/26_pdf15.pdf
- O. N. Di Marco (2011). *Tipo de animal y performance en el Feedlot*. Accedido el 04/03/2018.
<https://www.ganaderia.com/destacado/Tipo-de-animal-y-performance-en-el-Feedlot>
- Ente nacional de comunicaciones (2018). *Bandas no licenciadas*. Accedido el 05/06/2018.
https://www.enacom.gob.ar/bandas-no-licenciadas_p680
- Darmindra D. Arumugam , Daniel W. Engels (2009). *Tasas de absorción específicas en humanos en frecuencias de 915MHz*. Accedido el 05/06/2018.
<http://www.ursi.org/proceedings/procGA08/papers/DO1p8.pdf>
- Comisión internacional para la protección de radiación no ionizante (2018). *Guía para limitar la exposición a campos electromagnéticos*. Accedido el 05/09/2018.
https://www.icnirp.org/cms/upload/consultation_upload/ICNIRP_RF_Guidelines_PCD_2018_07_11.pdf
- Electronic Code of Federal Regulations (2018). *Parte 15 – Dispositivos de radiofrecuencia*. Accedido el 05/09/2018.
https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=5c1e0b81394d2a40a60f235a54e2f31b&mc=true&node=pt47.1.15&rgn=div5#_top
- Texas Instrument (2018). *Bridge Measurement System*. Accedido el 06/04/2018.
<http://www.ti.com/lit/ml/slyp163/slyp163.pdf>
- Sparkfun (2018). *Introducción a celdas de carga*.
<https://learn.sparkfun.com/tutorials/getting-started-with-load-cells>
- Omega (2018). *Introducción a celdas de carga*.
<https://www.omega.co.uk/prodinfo/load-cells.html>