



Diseño de un sistema de almacenamiento para el forraje de maíz mediante la automatización de silos

Design of a storage system for corn forage through silo automation

Mariana Yairrel Neria Galindo


Tecnológico Nacional de México/I. T. S. Huauchinango, Ingeniería Mecatrónica, México
j23312167@huauchinango.tecnm.mx
ORCID: 0009-0008-2177-1281

José Guadalupe Gómez Gómez ✉

Tecnológico Nacional de México/I. T. S. Huauchinango, Ingeniería Mecatrónica, México
j23312157@huauchinango.tecnm.mx
ORCID: 0009-0005-4510-1053

Gregorio Castillo Quiroz

Tecnológico Nacional de México/I. T. S. Huauchinango, Ingeniería Mecatrónica, México
gregorio.cq@huauchinango.tecnm.mx
ORCID: 0000-0002-1904-4172

 <https://doi.org/10.36825/RITI.14.33.010>

Recibido: Octubre 6, 2025

Aceptado: Junio 11, 2026

Resumen: Los silos son contenedores verticales herméticos esenciales para almacenar y conservar productos agrícolas, lo que permite el control de plagas, favoreciendo procesos de fermentación vitales para la calidad del forraje. Las prácticas actuales enfrentan múltiples desafíos como la degradación por hongos o la falta de automatización. El presente proyecto tiene como objetivo desarrollar el diseño de un sistema para la automatización de silos para el almacenamiento de forraje de maíz a través de un monitoreo, capaz de medir la temperatura, el nivel de presión y la humedad, mediante el uso de las tecnologías de la información y comunicación (TIC) por medio de un sistema que permita la recopilación de datos y su procesamiento, trabajando en conjunto con tecnologías electromecánicas como la robótica, electrónica y sistemas de control basados en Arduino. La implementación de silos automatizados y sistemas de conservación eficientes contribuye directamente a mejorar la seguridad alimentaria ganadera, aumentando la eficiencia en la producción del forraje de maíz, enfocado en el control de las condiciones ambientales internas para conservar el valor nutricional y la calidad. El proyecto busca impulsar la automatización del proceso, la sostenibilidad agrícola y ganadera, generando un impacto positivo en la economía regional, promoviendo la protección y cuidado del medio ambiente.

Palabras clave: Silos, Control, Forraje de Maíz, Sistema, Monitoreo.

Abstract: Silos are essential airtight vertical containers used to store and preserve agricultural products, enabling pest control and supporting fermentation processes that are vital for forage quality. Current practices face multiple challenges, such as fungal degradation and a lack of automation. This project aims to develop the design of a system for automating silos used for storing corn forage through monitoring capable of measuring temperature,

pressure level, and humidity, using information and communication technologies (ICT) through a system that allows data collection and processing, working together with electromechanical technologies such as robotics, electronics, and Arduino-based control systems. The implementation of automated silos and efficient preservation systems directly contributes to improving livestock food security, increasing efficiency in corn forage production, with a focus on controlling internal environmental conditions to preserve nutritional value and quality. The project seeks to promote automation of the process, agricultural and livestock sustainability, generating a positive impact on the regional economy, and promoting environmental protection and care.

Keywords: Silos, Control, Corn Forage, System, Monitoring.

1. Introducción

En México, la agricultura es una de las actividades más importantes, formando parte de las actividades del sector primario, brindando alimentos para la población. En México y el estado de Puebla, uno de los productos agrícolas más producidos es el maíz, donde, de acuerdo con un artículo publicado por la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural en 2021, México es el 7° productor de este grano a nivel mundial.

Existen diversas formas de producir el forraje, pero una de las más comunes es el ensilaje, que consiste en esencia en la conservación de estos cultivos verdes mediante la fermentación anaeróbica (sin oxígeno). El propósito de este proceso es preservar sin deterioro por varios meses el alimento y mantener un alto valor nutricional para el ganado.

En la ganadería, el maíz se utiliza en diversas formas, como grano, ensilaje de planta entera y rastrojo destinado a suplementación animal. Estudios realizados en México han demostrado que la calidad forrajera y el rendimiento del maíz dependen en gran medida de factores como la etapa de corte, el manejo agronómico y el tipo de híbrido utilizado. Asimismo, se ha observado que híbridos adecuadamente manejados pueden incrementar la producción de materia seca y mejorar el valor nutricional del forraje, favoreciendo la producción lechera y cárnica en sistemas de alimentación animal. Debido a ello, el maíz forrajero representa un recurso estratégico dentro de los sistemas mixtos de agricultura y ganadería en México [1].

La calidad y el rendimiento del maíz forrajero varían según variedad (nativa vs. híbrida), manejo agronómico y región agroclimática. Revisiones y estudios mexicanos han mostrado que ciertas variedades nativas presentan ventaja en digestibilidad de la fracción fibrosa (NDF) y, por lo tanto, en eficiencia alimenticia al convertir forraje en producto animal, mientras que híbridos bien manejados tienden a producir más biomasa por hectárea. Esto implica que la elección de germoplasma y el manejo (fecha de corte para ensilaje, ingredientes complementarios, compactación y buen sellado del silo) determinan en gran medida el aporte nutricional al rebaño y la productividad final [2].

El ensilaje se divide en varias formas, como el silo de tipo trinchera, que consiste en una zanja cubierta de plástico; el silo de montón o bolsa, que es un cúmulo sobre el suelo cubierto con lona; el silo vertical o torre, que es una estructura cilíndrica de concreto o metal; y el silo bolsa, que consiste en bolsas plásticas alargadas donde se introduce el forraje mecánicamente.

Existen diversas dificultades que tienen que enfrentar los agricultores, como la variabilidad climática (lluvias irregulares y sequías prolongadas), la humedad inadecuada al momento de realizar el ensilaje, desarrollo de hongos en la fermentación, dificultades en el sellado hermético y pérdida en los nutrientes durante el almacenamiento. Son problemas comunes que enfrentan en su proceso de producción.

Una correcta elección del híbrido y el momento óptimo de cosecha son esenciales para asegurar una buena fermentación. El contenido ideal de materia seca debe estar entre 30% y 35%, ya que niveles más bajos pueden provocar fermentaciones indeseables y pérdidas de nutrientes. Destacando que una mala compactación del silo permite la entrada de oxígeno, generando mohos y disminuyendo la calidad del ensilado [3].

El principal problema relacionado con hongos en forrajes almacenados en silos herméticos surge cuando el material entra con humedad excesiva o el sello del silo queda comprometido: la presencia de oxígeno (por filtraciones, roturas o sellos deficientes) y puntos calientes favorece el crecimiento de mohos (*Aspergillus*, *Fusarium*, *Penicillium* y entre ellos reportes recientes como *Monascus ruber* en ensilajes mexicanos), lo que puede conducir a la producción de micotoxinas y riesgos sanitarios para el ganado. Además, los daños físicos al cultivo (granizo, daños por insectos o mal picado) aumentan la probabilidad de colonización fúngica aun en condiciones que, en teoría, serían protectoras [4], [5], [6].

La humedad y la temperatura representan factores críticos durante el almacenamiento y conservación del ensilaje, ya que condiciones inadecuadas favorecen fermentaciones indeseadas, deterioro microbiológico y pérdidas de nutrientes. Un contenido excesivo de humedad o la presencia de condensación dentro del silo pueden propiciar el desarrollo de hongos y la formación de micotoxinas, afectando la calidad del forraje y su valor nutricional.

Aunque los sistemas herméticos permiten reducir pérdidas y mejorar la conservación del material almacenado, continúan presentándose problemas relacionados con el manejo, tales como compactación insuficiente, llenado no uniforme y deficiencias en el sellado o mantenimiento de la estructura. Por ello, el monitoreo constante de variables como humedad y temperatura resulta fundamental para minimizar pérdidas de materia seca y preservar la calidad del ensilaje durante el almacenamiento [6], [7], [8].

Frente a las múltiples problemáticas que enfrenta la producción del forraje, es clave desarrollar soluciones tecnológicas que evolucionen y se mantengan viables a largo plazo. El ensilaje, al ser un método eficaz para conservar el maíz, puede optimizarse mediante la automatización para mejorar la alimentación del ganado. Las empresas buscan constantemente innovar y perfeccionar tecnologías para hacer más eficientes sus procesos y adaptarse a las necesidades específicas que se requieran con las condiciones que se estén dando.

Prado Silos ofrece sistemas que integran sensores multizona para medir temperatura en diferentes puntos del silo. Estos sensores están conectados a una plataforma digital que permite activar ventiladores automáticos cuando se detectan zonas calientes, previniendo fermentaciones indeseadas y crecimiento de hongos [9].

La implementación de diferentes sensores es algo esencial para mediciones más precisas y Smart4Agro desarrolló el sistema Smart Silo, que utiliza sensores colocados en trincheras de ensilaje para monitorear temperatura interna en tiempo real. Estos datos se integran en un software que genera alertas y mapas térmicos, permitiendo detectar zonas en mal estado antes de que se desarrollen pérdidas significativas [10].

TecnoAgro México promueve el uso de sensores IoT para controlar automáticamente la ventilación en silos. Estos sensores monitorean temperatura y humedad relativa, y activan extractores o deshumidificadores cuando los valores superan los umbrales críticos. Así se mantiene un ambiente estable, evitando fermentaciones secundarias y degradación de nutrientes [11].

El dispositivo HST-1 de Agratronix, está disponible en México, el aparato permite medir humedad y temperatura del forraje directamente en campo o en silos. Su tecnología de compensación automática por densidad mejora la precisión, y sus datos pueden descargarse vía USB para análisis [12].

Al existir diversas soluciones, también se crean oportunidades de mejora con base en las limitaciones que presentan los diseños de otros, las empresas, organizaciones o personas pueden desarrollar soluciones que se adapten a las necesidades y presupuestos que presentan, debido a que no todos poseen el mismo poder adquisitivo o de inversión, así reducir el rezago tecnológico en la agricultura.

En el presente artículo se presenta una propuesta de innovación para el proceso de almacenamiento del forraje del maíz por el método del ensilaje, el proyecto propone el diseño de un sistema automatizado para el almacenamiento de forraje de maíz a través de silos. Busca que a los agricultores les permita conservar el producto de manera más eficiente, contrarrestando las pérdidas por hongos, manteniendo el valor nutricional y la calidad, promoviendo una agricultura sostenible, aumentando la eficiencia de producción, mediante el control preciso de las condiciones ambientales como lo son la presión, temperatura y humedad dentro del silo.

Las principales herramientas tecnológicas que se integran son sensores que midan la presión, la temperatura y la humedad, donde se añaden ventiladores al interior del silo para controlar de manera automática la fluctuación de aire y se pueda liberar la humedad, si los parámetros que se establecen se sobre pasan, el sistema deberá actuar para volver al adecuado con el objetivo de la prevención de pérdidas, la información recolectada por los sensores se proyectan en una pantalla colocada al exterior del silo.

2. Estado del arte

En el pasado, los productores mexicanos utilizaban métodos como el almacenamiento a través de graneros, donde eran protegidos del sol o la lluvia, para evitar el deterioro o la reproducción de hongos, pero el sistema presentaba grandes fallas debido a la falta de control sobre la atmósfera interna y el uso excesivo de la mano de obra, ya que se revisaba meticulosamente cada grano antes de cosechar para evitar guardarlo con plagas.

Se implementaba el uso de insecticidas en todos los sacos, graneros y equipos utilizados en las labores de manejo de granos, con el tiempo estos métodos reducían la calidad del forraje y no eran muy efectivos, la adición

de químicos provocaba que la actividad aeróbica degradará los nutrientes, especialmente las proteínas y azúcares, a menudo estos métodos resultaban poco eficientes ya que producían pérdidas significativas por plagas, humedad y deterioro [13].

La evolución tecnológica ha impulsado la integración de la automatización de silos, buscando superar las limitaciones del monitoreo manual, optimizando las condiciones de almacenamiento, permitiendo conservar el valor nutricional y la calidad del forraje, algunos ejemplos de estas tecnologías;

2.1. Prado Silos

Es una empresa española que se dedica a la fabricación de silos de almacenamiento, especialmente para el sector agrícola, ofreciendo soluciones personalizadas para cada proyecto, como silos de fondo plano y silos con tolva, que implementan soluciones con sensores multizona, los cuales se encargan de medir la temperatura en diferentes puntos del silo. Estos sistemas integran los datos en plataformas digitales, que permite la activación automática en los ventiladores para contrarrestar fermentaciones indeseadas y la proliferación de hongos por humedad [14].

2.2. Monitoreo inteligente de forraje SmartSilo

SmartSilo cuenta con un sistema de monitoreo integrado, utiliza sensores en su interior para monitorear las temperaturas internas, cada sensor se encuentra ubicado estratégicamente dentro de la estructura, para supervisar en tiempo real que las temperaturas no sobrepasen el umbral. La conectividad de estos sensores permite la gestión de los datos, mediante un software especializado que genera alertas y mapas térmicos, permitiendo la detección temprana de zonas con exceso de humedad. Este sistema ha reportado reducciones de hasta un 75% en pérdidas por deterioro [15].

2.3. Sistemas de monitoreo

Diversas innovaciones se centran en la integración de capacidades de monitoreo y control ambiental para los forrajes almacenados. Estos sistemas emplean sensores para el control automático de la ventilación, además de contar con sistemas de monitoreo para la temperatura y la humedad, activando extractores o deshumidificadores cuando los valores superan umbrales críticos. Estas soluciones representan un enfoque en la integración de capacidades de monitoreo que buscan mantener un ambiente óptimo para evitar fermentaciones secundarias y la consecuente degradación de nutrientes [16].

Existen diversas propuestas modernas estructuradas y comerciales en diferentes lugares del mundo, esto lleva a plantear una comparación del proyecto en contraste con las marcas existentes y para eso en la Tabla 1 se reflejan diversos puntos de comparación.

Tabla 1. Comparación ante otras marcas.

Prados Silos	SmartSilo	Sistemas de monitoreo	Propuesta
Soluciones personalizadas para el productor	Sistema integrado de monitoreo	Monitoreo y control ambiental	Monitoreo interior automatizado
Sensores multizona de temperatura	Sensores ubicados de forma estratégica por toda la estructura	Sistema de monitoreo para humedad y temperatura	Sistema de sensores de humedad, temperatura y presión
Recopilación de datos en plataformas digitales	Software especializado para alertas y mapas térmicos	Cuidado para un ambiente óptimo	Datos reflejados a través de un LCD
Activación automatizada de ventiladores	Supervisión en tiempo real de la temperatura Reporta hasta un 75% en reducción de pérdidas	Control automático de la ventilación	Activación automatizada de ventilador Indicadores de capacidad

Fuente: Elaboración propia

De las principales ventajas que se busca ante otras marcas o métodos es que sea de fácil acceso que el precio no sea tan elevado, mantener la calidad del proyecto y los materiales, si hay métodos más baratos, exponer este como un calidad-precio que se busca que sea. La implementación tecnológica difiere siendo más fácil de manipular para el sector al que va dirigido, siendo un proceso automatizado, pero en un concepto fácil de entender.

Al ser un proyecto en desarrollo existen limitaciones como la cantidad de producción o las entrega a tiempo del trabajo, poco foco de alcance en el mercado. Posibles fallas en algún sensor, el cual se debería cambiar o reparar, según el caso. El mantenimiento que se le dará es relevante y se le da un punto mayor al cómo hacerlo para que una falta de conocimiento e investigación no reduzcan el valor del trabajo.

3. Materiales y métodos

La implementación de silos modernos y sistemas de conservación eficientes contribuyen directamente a mejorar la seguridad alimentaria de las personas y de los animales ganaderos, los silos son estructuras de almacenamiento, generalmente verticales y de gran tamaño, diseñadas para contener y proteger materiales a granel.

Existen métodos tradicionales que a menudo generan pérdidas significativas causadas por plagas y hongos, comprometiendo la calidad del forraje. Frente a esta problemática el presente proyecto propone el diseño de un sistema automatizado para el almacenamiento de forraje de maíz a través de silos, que permita a los agricultores conservar sus productos. El proyecto se encuentra vinculado a un agricultor experto en el área, el cual es dueño de campos de siembra ubicados en Las Lajas, Zacatlán, Puebla.

3.1. Metodología de la investigación de campo

En esta investigación se utilizó la metodología de campo generalmente implica una combinación del método de observación de participante, entrevistas y análisis, se muestra el desarrollo de esta metodología en la Figura 1 [17].



Figura 1. Descripción del proceso de la metodología de campo. Fuente: Elaboración propia.

- **Definición del problema.** En esta fase se define la problemática a resolver.
- **Selección de muestra.** Seleccionar productores de forraje de maíz o expertos agrícolas en la región de Zacatlán que tengan experiencia directa con el ensilado.
- **Recolección de datos.**
Entrevistas: Realizar conversaciones estructuradas, semiestructuradas o abiertas con agricultores para obtener información cualitativa sobre sus desafíos y necesidades.
Observación directa de las prácticas actuales de ensilado, las condiciones de los silos y el grado de degradación del forraje en situaciones del mundo real.
Recopilación de datos técnicos, recopila datos de sensores (temperatura, humedad, presión).
- **Análisis.** Examina los datos obtenidos para establecer las causas de los defectos e identificar dónde se puede mejorar el proceso.
- **Interpretación de resultado.**
- **Solución Innovadora:** Se lleva el desarrollo de una solución la cual sea una innovadora y eficiente para el problema.

3.1.1. Definición del problema y selección de muestra

Se plantea el problema específico en el área a atacar; este caso fue el forraje del maíz, debido a que se tiene la necesidad de optimizar el proceso de almacenamiento, buscando una forma de conservarlo sin que pierda su valor nutricional.

Se busca una persona experta en el campo, en este caso se encontró a un agricultor dispuesto a colaborar, se trata de un agricultor que lleva toda su vida dedicándose al maíz forrajero desde su cosecha hasta su procesamiento, utiliza el método del ensilaje. Se acudió a su lugar de trabajo para realizarle una entrevista al agricultor, de este modo se obtiene un panorama más amplio de las adversidades que conlleva el forraje de maíz. En la Figura 2 se presenta el lugar de trabajo del agricultor asociado.



Figura 2. Campo de cultivo del agricultor. Fuente: Elaboración propia.

Durante la entrevista se le realizaron diversas preguntas al agricultor para indagar sobre cuáles eran sus principales necesidades dentro del proceso, a continuación, se presentan las preguntas realizadas al agricultor, donde se escogió una fase del proceso para ser mejorado, el enfoque se dirigió al almacenamiento:

1. ¿Cuál es el proceso que utiliza para cultivar y cosechar el maíz?
2. ¿Qué actividades del cultivo o cosecha del maíz le resultan más difíciles?
3. ¿Actualmente cuenta con alguna maquinaria o herramienta que le permita facilitar su trabajo?
4. ¿Qué limitaciones tiene su equipo actual?
5. ¿Le resulta fácil mantener sus herramientas o equipo?
6. ¿Qué tareas usualmente realiza completamente a mano por qué no cuenta con la herramienta necesaria?
7. ¿En qué época del año siente que necesita más apoyo o equipo de trabajo?
8. ¿Cuáles son los principales problemas que enfrenta al cosechar?
9. ¿Cómo almacena el forraje de su maíz cuando ya está listo?
10. ¿Cuáles son los principales problemas al almacenar el forraje de maíz?
11. Si pudiera tener algún equipo que le ayudara, ¿Cuál sería?
12. ¿Tiene algún acceso a electricidad en su plantío o le es mejor tener herramientas a gas o baterías?
13. ¿Qué tan dispuesto está a invertir en maquinaria y equipo?

3.1.2. Recolección de datos y análisis

A través de la entrevista se analizan los lugares con mayores deficiencias en todo el proceso que se lleva a cabo para el forraje. El análisis llega al almacenamiento, el agricultor usa el método de trinchera, posee una zanja que es el lugar a donde lleva todo su forraje y luego lo cubre (Figura 3), a continuación, en la Figura 3a se muestra el lugar de almacenamiento junto al campo completo donde se cultiva el maíz, Figura 3b.



(a) Zona de almacenamiento actual



(b) Campo de cultivo de forraje

Figura 3. Almacenamiento. Fuente: Elaboración propia.

Durante este proceso el forraje de maíz es cubierto con un plástico para su almacenamiento y uso posterior para las épocas de sequía, el proceso actual que usa tiene varias ventajas como:

- Bajo costo de construcción: No requiere una estructura compleja o de materiales costosos, debido a que solo consiste en una zanja en el suelo.
- Buena compactación del material: Al estar enterrado, las paredes de tierra permiten una mayor presión lateral cuando se pisa el ensilado.
- Buena protección contra el clima: Al ser ciertamente encerrado, el ensilaje está más protegido contra el sol y el viento, así reduciendo la deshidratación o calentamiento excesivo.

Pero, así como posee diversas ventajas, también hay varias desventajas en el proceso, las cuales pueden ser mejorados para un mejor desempeño en las actividades. Algunas de las siguientes desventajas son:

- Riesgo de contaminación por agua: Si no se hace un correcto drenaje, la trinchera puede llenarse de agua de lluvia, afectando la calidad del ensilaje por fermentación no deseada o moho.
- Riesgo en la presencia de roedores o animales: Estando cerca del suelo y en contacto directo con el entorno, puede atraer fauna que dañe el forraje.
- Posible pérdida en los nutrientes en capas superiores: Si la compactación y cobertura no son adecuadas, las capas superiores pueden exponerse al aire, teniendo consecuencias sobre el valor nutricional.
- Dificultad de manejo en suelos arcillosos: Pueden existir colapsos en las paredes o problemas de acceso cuando hay constantes lluvias o excesos de humedad en el suelo.

El agricultor mencionó que sobre gran parte del terreno es arcilloso lo cual complica sus actividades para cultivar y también almacenar el forraje que produce, entonces se atiende a la problemática con una solución la cual sea innovadora y convincente.

3.1.3. Interpretación de los resultados y solución innovadora

El correcto análisis e interpretación de los datos recolectados funcionan para la valoración de soluciones innovadoras. Existen deficiencias en el almacenamiento del forraje, no solo por las desventajas que presenta el método utilizado actualmente, sino también las complicaciones del terreno arcilloso, sobre todo en épocas de lluvia, pone en riesgo la estructura de la trinchera, pudiendo colapsar y arruinar todo lo que se encuentre almacenado en el momento.

Como principales objetivos se establece mejorar la forma de almacenamiento, mejorar la estructura y mantener el valor nutricional. El método es sustituido por el silo de torre, donde se incorporan mejoras para automatizar e innovar, el método tiene diversa cantidad de ventajas las cuales pueden ser aprovechadas, ventajas como las siguientes:

- Excelente conservación del forraje: Al tener una forma cilíndrica favorece a la fermentación más uniforme y anaeróbica, reduciendo las pérdidas en los nutrientes.
- Optimización del espacio: Al ser una estructura vertical tiene poca demanda en el espacio de manera horizontal.
- Protección ante condiciones climáticas: Debido a su estructura cerrada, el forraje se encuentra protegido de la lluvia, el sol, el viento e incluso de animales.

- Reducción del contacto con el aire: Por la forma en la que se extrae el material conlleva a un menor contacto con el aire lo cual lleva a un menor deterioro.
- Una larga vida útil: Con una buena construcción y buenos materiales, pueden durar varias décadas.

Como el silo de trinchera, también posee ciertas desventajas las cuales se investigan para ser mejoradas, brindando un mejor rendimiento convirtiendo estas deficiencias en beneficios, algunas de las desventajas son las siguientes:

- Alto costo inicial: Requiere de una mayor inversión inicial en materiales, diseño e ingeniería.
- Riesgo de gases por mal manejo: Una mala compactación en el material o una de ventilación puede provocar que se acumulen gases como el CO_2 .
- Riesgo de compactación excesiva: Sucede cuando el ensilaje lleva mucha humedad el cual causa escurrimiento el cual aumenta el peso o provoca una mala fermentación.

Se muestra un ejemplo en la Figura 4 sobre cómo son este tipo de estructuras en una escala baja, existen pequeños y grandes silos, van de productores pequeños hasta grandes empresas, dependiendo de la cantidad que se produce y se almacena.



Figura 4. Ejemplos de silos metálicos de almacenamiento. Fuente: Basado en [18].

El sistema de silo vertical es el que se toma en cuenta debido a todas las ventajas presentadas sobre el silo de trinchera, ventajas como el tiempo de duración, la estructura más estable y una mejor conservación del forraje, en la Tabla 2 se presenta una comparación entre ambos métodos.

Tabla 2. Comparación de ambos métodos.

Aspecto	Silo de Torre	Silo de Trinchera
Forma	Posee una forma cilíndrica la cual trae varios beneficios	Es rectangular y es excavado en el suelo
Costo de construcción	Tiene un costo relativamente alto debido a los materiales necesarios para su construcción	Su costo es bajo debido a que solo se necesita excavar y un plástico grande de protección
Número de pérdidas	Las pérdidas son bajas con el cuidado debido	Las pérdidas son mayores y más si no se compacta correctamente
Durabilidad	Tiene una alta durabilidad que puede ir de los 15 hasta los 35 años	La durabilidad es variada, pero puede ir de los 5 a 10 años
Riesgos	Puede presentar riesgo en la acumulación de gases	Los principales riesgos se dan por inundaciones, roedores o un colapso en la estructura
Aprovechamiento de espacio	Aprovecha el espacio de buena forma al ser una torre vertical	El espacio que requiere es mayor esto porque es más ancho que alto

Protección contra la intemperie	Al estar cerrado posee buena protección contra animales o clima	Al ser un sistema abierto depende fuertemente de la protección que le brinda el plástico
Estabilidad estructural	Bien diseñado tiene una gran capacidad para soportar el peso	Depende mucho del terreno y en este caso es ciertamente baja
Mantenimiento	Requiere poco de mantenimiento, pero este debe ser especializado	Su mantenimiento es más constante por la necesidad de cambiar el plástico

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Materiales

Se hace una búsqueda de que tipo de materiales son adecuados, realiza una tabla con los materiales seleccionados meticulosamente para el proyecto, se evaluó cada material donde son considerados solo lo más adecuados y necesarios para su correcta ejecución (véase la Tabla 3).

Tabla 3. Lista de materiales utilizados para el proyecto.

Material	Descripción
Sensor de humedad	Es un dispositivo encargado de medir la cantidad de vapor del agua presente en el aire
Sensor de presión	Es un dispositivo encargado de medir la presión de un gas o líquido
Sensor de temperatura	Es un dispositivo que detecta y mide la temperatura
Acero galvanizado	Es un tipo de metal con una capa de zinc para protegerlo contra la corrosión
Extractor	Es un dispositivo que se usa para remover el aire húmedo de algún lugar cerrado
LDC (Pantalla de cristal)	Pantalla plana cual sirve para crear imágenes o mostrar datos
Arduino Uno	Es una plataforma para el desarrollo de proyectos interactivos
Jumper	Puente o conector que se usa para establecer o interrumpir una corriente eléctrica
Leds	Semiconductor capaz de convertir energía eléctrica en luz visible

Fuente: Elaboración propia.

3.3. Diseño desarrollado

Los bocetos se dieron mediante diversas propuestas optando por una torre vertical con forma de cilindro o un prisma rectangular, el más eficiente después de una evaluación fue el diseño de un cilindro, además de ser el diseño más común.

El diseño de cilindro tiene un objetivo, no solo es un por que sí, debido a todas las ventajas que se presentan en él, como una mayor resistencia a la presión, mejor compactación y fermentación, mayor eficiencia volumétrica y facilidad de descarga por gravedad, por mencionar algunas de las ventajas de optar por un diseño cilíndrico antes que el prisma rectangular.

3.3.1. Piezas diseñadas

Diferentes piezas son diseñadas para un ensamble final, se diseñan de forma separada para poder realizarse de una manera más óptima y efectiva. Las medidas calculadas del contenedor son para una capacidad que van de 1 a 3 toneladas, las medidas del contenedor constan de un diámetro de 1.4 metros y una altura de 2.6 metros, dando como resultado un volumen de $5m^3$ y una densidad del forraje de $600 \text{ kg}/m^3$ el cuál es el tamaño ideal para albergar un máximo de 3 toneladas.

Como primera parte del diseño está el LCD (Pantalla de cristal), la cual se implementa para que sean visibles los datos recolectados del interior del silo, en la Figura 5 se muestra el diseño del LCD.

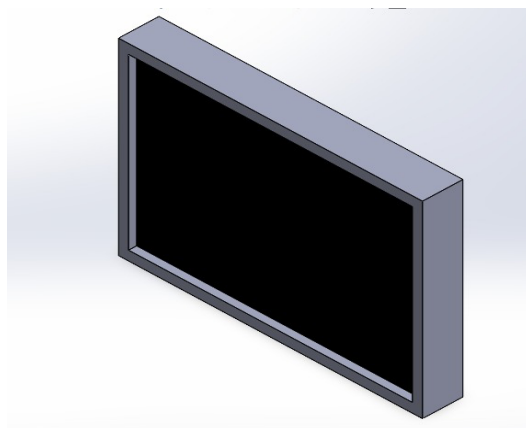


Figura 5. Pantalla LCD diseñada, SolidWorks. Fuente. Elaboración propia.

El ventilador o extractor es una parte fundamental, teniendo una doble función en el interior del silo, las cuales son una adecuada ventilación y si existe un exceso en los gases producidos dentro del silo puedan ser expulsados de forma óptima, ayudando a mantener buenas condiciones y atender a la deficiencia de acumulación de gases. En la Figura 6 se muestra el diseño del extractor.

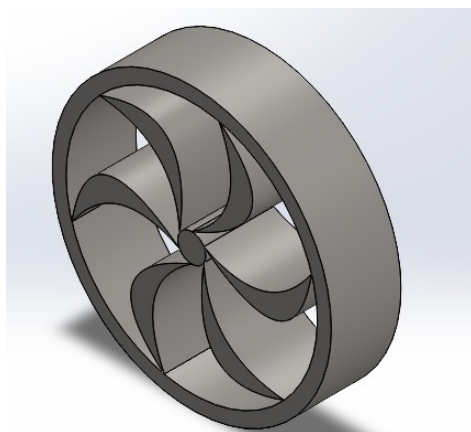


Figura 6. Extractor diseñado, SolidWorks. Fuente: Elaboración propia.

El contenedor se arma por partes donde se incluyeron una salida de aire para el extractor y otra salida que funciona como una forma de descarga, el lugar de descarga lleva una compuerta que impide que todo el contenido salga y el contenedor quede vacío. El cilindro es la base estructural de todo, a partir de ello se ensambla el resto de las piezas, se muestra en la Figura 7.

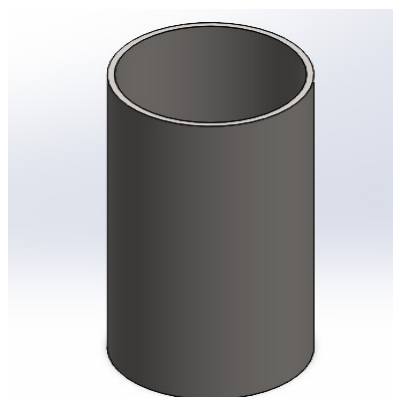
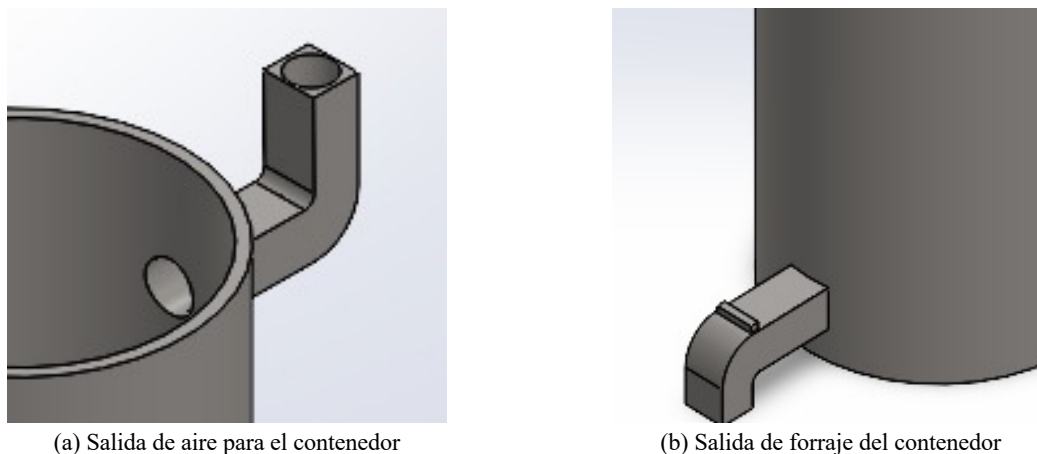


Figura 7. Contenedor cilíndrico diseñado, SolidWorks. Fuente propia.

Las dos salidas previamente mencionadas se instalan, la forma tomada no fue la común en silos de torre comunes, las salidas cumplen un funcionamiento, en la Figura 8 se muestran ambas salidas ya instaladas en la torre cilíndrica.

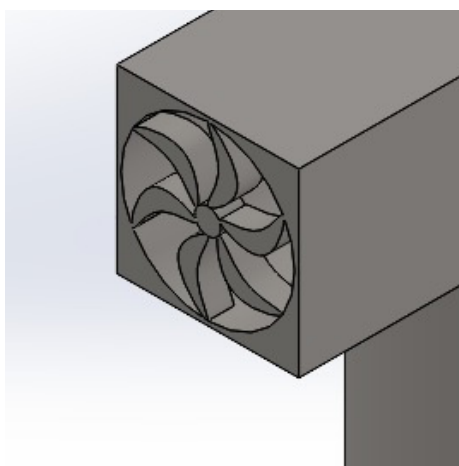


(a) Salida de aire para el contenedor

(b) Salida de forraje del contenedor

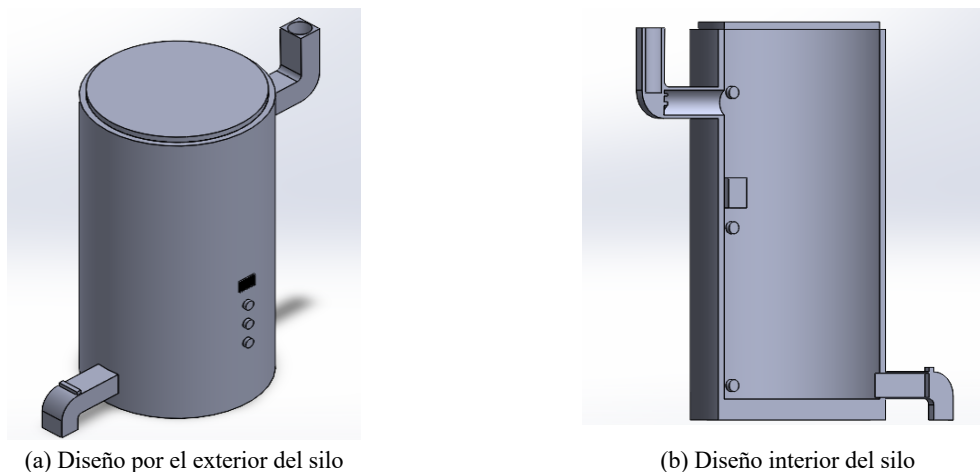
Figura 8. SolidWorks. Fuente propia.

El extractor diseñado se instala por el interior del conducto para mantenerlo oculto, funcional y a su vez el silo sea estético, se muestra en Figura 9.

**Figura 9.** Extractor instalado en el interior del conducto, SolidWorks. Fuente: Elaboración propia.

Una parte es destinada para el espacio de la pantalla, optando por una altura media para facilitar la visibilidad de los datos que se presenten, se añadió la tapa para un sellado hermético para proteger el contenido, las últimas partes son construidas y ensambladas como la pantalla que se integra al diseño.

El diseño ensamblado y el interior se muestran en la Figura 10, los sensores se encuentran a tres diferentes alturas, las alturas tienen que ver con sus funciones, el que está más cerca del suelo del silo es el sensor de humedad porque el drenaje y la condensación se acumulan abajo, el de temperatura se encuentra en la parte media por la concentración del material para la fermentación, y el de presión en la parte más alta para medir la presión de los gases acumulados.



(a) Diseño por el exterior del silo

(b) Diseño interior del silo

Figura 10. SolidWorks. Fuente: Elaboración propia.

3.4. Programación

3.4.1. Diagrama de flujo

Un diagrama de flujo es una representación gráfica de un algoritmo de programación, mediante el cual se detallan los pasos a seguir para realizar una tarea, en la Figura 11, se muestran la secuencia lógica para ejecutar el sistema de monitoreo dentro de los silos.

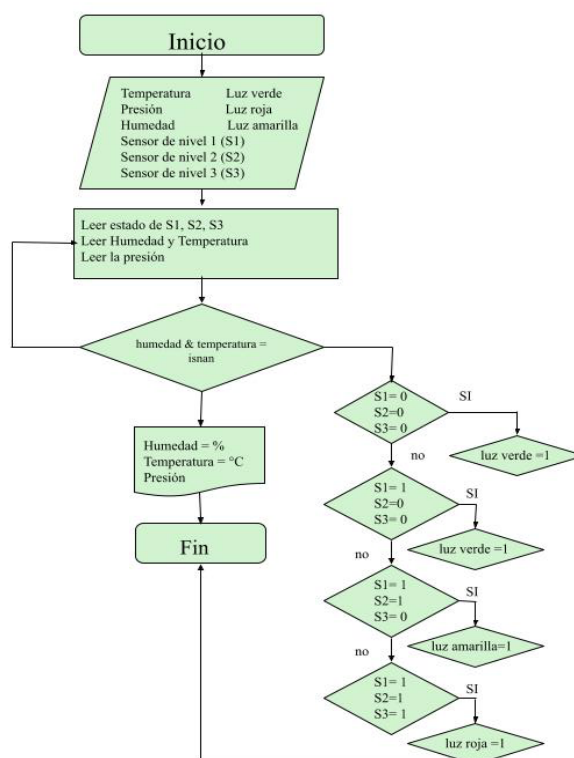


Figura 11. Diagrama de flujo. Fuente: Elaboración propia.

3.4.2. Código de programación

La programación es esencial para coordinar los sensores ya que son ampliamente utilizados para desarrollar algoritmos que permitan:

- Procesar datos de entrada.
- Sistema de control.

- Muestra los datos recopilados.

En la Figura 12 se muestra las librerías que usa el programa y las variables de entrada (temperatura, humedad y presión).

```
#include <DHT.h>
#define DHTTYPE DHT11
#define DHTPIN 13
DHT dht (DHTPIN, DHTTYPE);

const int sensor_fuerza = 0;

#include <LiquidCrystal.h>
int rs = 2;
int e = 3;
int d4 = 4;
int d5 = 5;
int d6 = 6;
int d7 = 7;
LiquidCrystal lcd(rs,e,d4,d5,d6,d7);

int S1 = 8 ;
int S2 = 9 ;
int S3 = 10 ;

int lv = 11;
int la = 12;
int lr = 1;
```

Figura 12. Código de programación, entrada de variables, a través de la interfaz de Arduino. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 13 se muestra la función *void setup*, en donde se inicializa el programa a 9600 baudios y se establece el modo de los pines que ayudan a controlar el programa (pueden ser salidas o entradas).

```
void setup()
{

Serial.begin (9600);
dht.begin();
lcd.begin(16,2);
pinMode (sensor_fuerza, INPUT);
pinMode (S1, INPUT);
pinMode (S2, INPUT);
pinMode (S3, INPUT);
pinMode (lv, OUTPUT);
pinMode (la, OUTPUT);
pinMode (lr, OUTPUT);

}
```

Figura 13. Código de programación inicialización del programa, a través de la interfaz de Arduino. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 14 se visualiza el inicio de *void loop* (bucle del programa) en donde inicia la secuencia repetitiva para leer el estado de los sensores, se muestra la primera condición en caso de que el sensor falle en la lectura, habrá un reset en el programa.

```
void loop()
{
int ES1 = digitalRead(S1);
int ES2 = digitalRead(S2);
int ES3 = digitalRead(S3);

float Humedad = dht.readHumidity();
float Temperatura = dht.readTemperature();

if (isnan(Humedad) || isnan (Temperatura))
{
Serial.println ("ERROR EN EL SENSOR");
return;
}
```

Figura 14. Inicialización del programa en *loop* mediante la interfaz de Arduino. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 15 se visualiza el bucle del LCD, en donde se muestra la lectura de los sensores a través de una pantalla (temperatura °C, humedad % y presión).

```

lcd.setCursor (0,0);
lcd.print ("Humedad: ");
lcd.print (Humedad);
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print ("Temperatura: ");
lcd.print(Temperatura);
Serial.println ("Humedad: ");
Serial.println (Humedad);
Serial.println ("Temperatura:");
Serial.println (Temperatura);
delay (10000);
lcd.clear ();
int valorfuerza = analogRead (sensor_fuerza);
Serial.print ("Sensor de fuerza: ");
Serial.println (valorfuerza);
delay(500);
delay (10000);
lcd.clear ();

```

Figura 15. Inicialización del LCD. Fuente: Elaboración propia.

El sistema de silos cuenta con un indicador de semáforo, el cual muestra al operador el nivel de almacenamiento con el que cuenta, encenderá una luz verde cuando el silo se encuentre vacío, amarilla cuando contenga un 50% de capacidad y una luz roja cuando el silo este completamente lleno, en la Figura 16 se muestra las condiciones que debe cumplir el programa para indicar el nivel de almacenamiento dentro del silo.

```

if ((ES1==LOW) && (ES2 == LOW) && (ES3 == LOW))
{
    digitalWrite (lv, HIGH);
    digitalWrite (la, LOW);
    digitalWrite (lr, LOW);
}
if ((ES1==HIGH) && (ES2 == LOW) && (ES3 == LOW))
{
    digitalWrite (lv, HIGH);
    digitalWrite (la, LOW);
    digitalWrite (lr, LOW);
}
if ((ES1==HIGH) && (ES2 == HIGH) && (ES3 == LOW))
{
    digitalWrite (lv, LOW);
    digitalWrite (la, HIGH);
    digitalWrite (lr, LOW);
}

```

Figura 16. Inicialización del programa en *loop* mediante la interfaz de Arduino. Fuente: Elaboración propia.

3.5. Diagrama eléctrico

Los sistemas electrónicos son el núcleo del funcionamiento del sistema de control en los silos, los Microcontroladores son dispositivos como Arduino, que procesan datos de los sensores y ejecutan instrucciones para los actuadores, en la Figura 17 se muestran las conexiones eléctricas del LCD y los sensores.

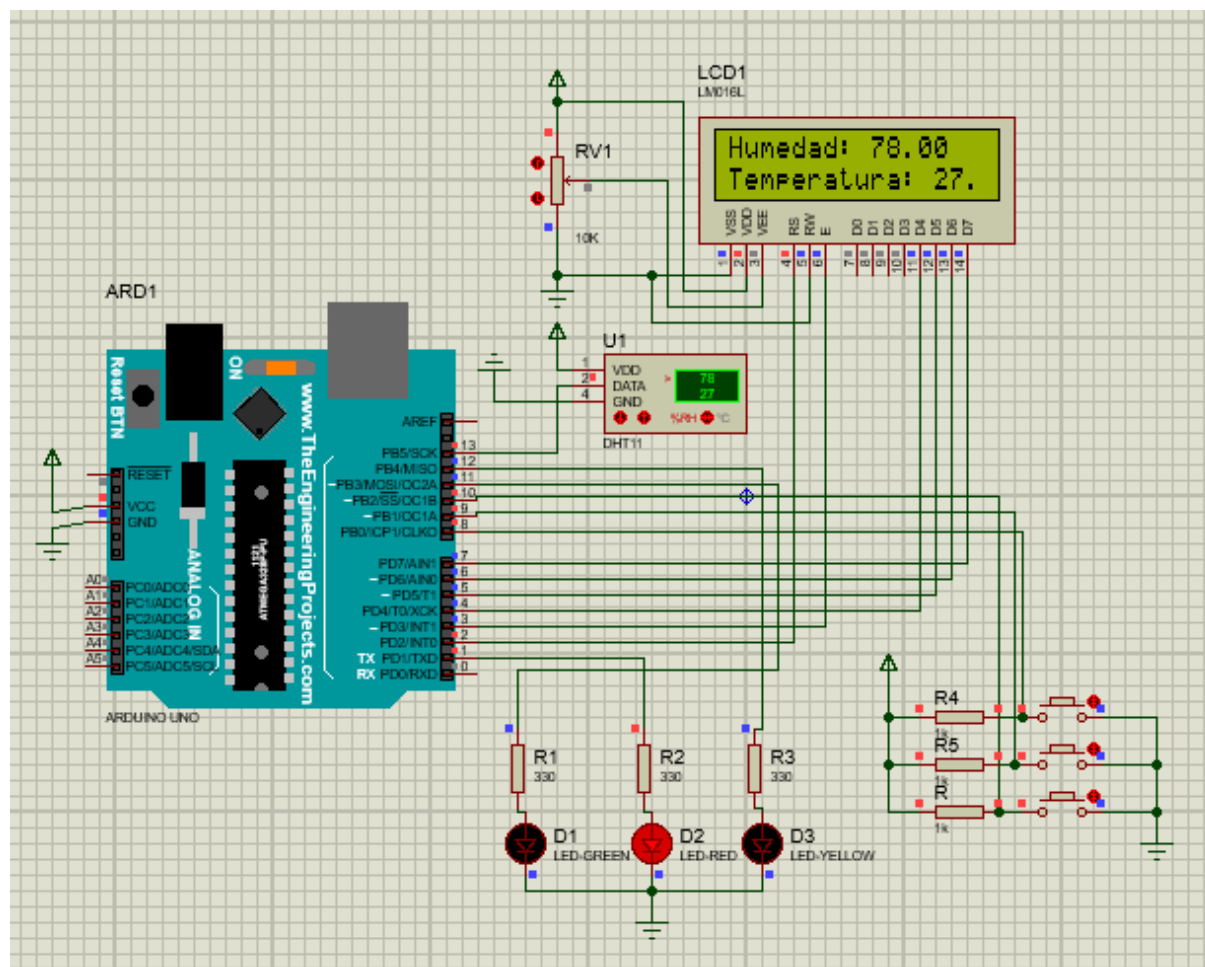


Figura 17. Diagrama de conexiones eléctricas, Proteus. Fuente: Elaboración propia.

4. Resultados

El diseño final para el almacenamiento de maíz forrajero emplea tecnología con un mejor rendimiento que los métodos convencionales, en el interior y exterior del contenedor se encuentran los siguientes componentes (Véase la Figura 18):

- A. Contenedor de almacenamiento para una capacidad máxima de 3 toneladas de forraje, compuesto por acero galvanizado.
- B. Sensores de humedad, temperatura y presión, colocados en el interior del contenedor de abajo hacia arriba según su función para el aprovechamiento óptimo de las herramientas.
- C. Indicadores LED, funcionan para señalar la cantidad de forraje que se encuentra almacenado en ese momento en el interior del contenedor.
- D. Extractor, el componente ayuda para expulsar los gases que se encuentren acumulados al interior del silo.
- E. Salida de extractor, brinda la salida para los gases que el extractor este expulsando del interior silo a la intemperie.
- F. Salida de descarga, el contenido almacenado en el silo puede fluir a través de esta salida para ser utilizado posteriormente.
- G. Seguro, impide que el contenido del silo salga de manera desmedida y sin control, permite que salga solo lo necesario.
- H. Protector de Arduino, esta al interior del silo para que el Arduino sea colocado y no se contamine o sea aplastado por todo el forraje almacenado.
- I. Pantalla LCD, muestra los datos recolectados por los sensores.
- J. Tapa del silo, tiene un tamaño adecuado para un sello hermético y se produzca la fermentación anaeróbica.

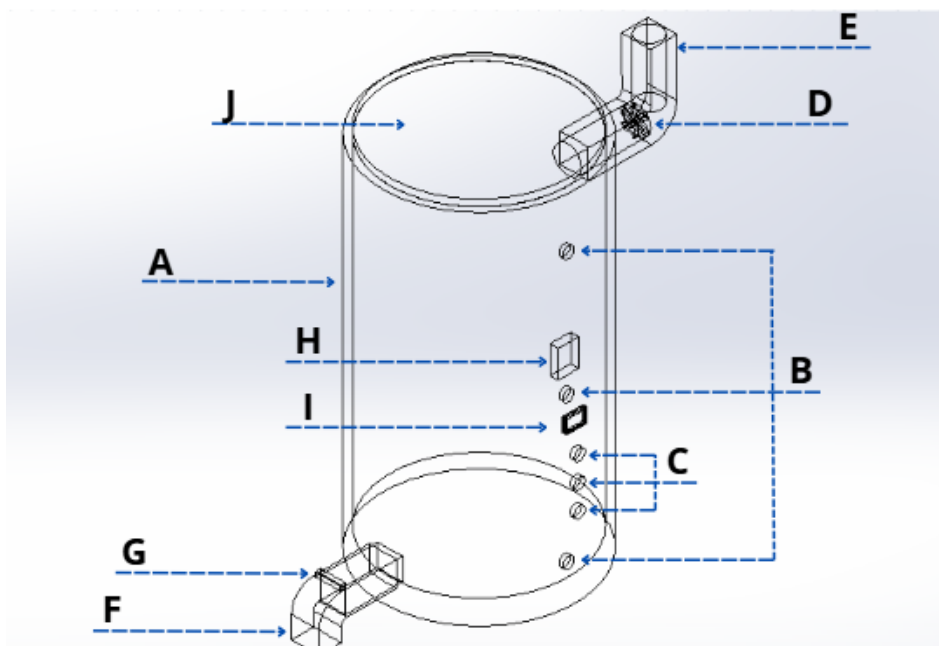


Figura 18. Componentes del sistema de almacenamiento para el forraje de maíz. Fuente: Elaboración propia.

El desarrollo de las tecnologías en el sector primario de la agricultura es de vital importancia, ya que las soluciones actuales demuestran el uso de diversas tecnologías de la información y comunicación permiten desarrollar entornos controlados que mejoren la gestión de calidad en el forraje de maíz, adaptando nuevos procesos tecnológicos con el fin de tener una mayor eficiencia, a continuación, en la Figura 19 se presenta el diseño del proyecto.

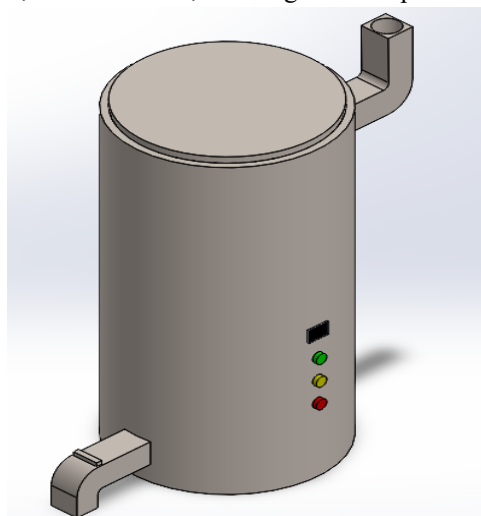


Figura 19. Diseño del sistema de almacenamiento para el forraje de maíz, SolidWorks. Fuente propia.

El sistema de almacenamiento se automatiza para monitorear constantemente las condiciones al interior del silo y el forraje de maíz se mantenga en un cuidado adecuado [19], [20], tras la implementación de tecnología se forman mejores condiciones y rendimiento en el método de ensilaje vertical, no solo siendo una mejor opción comparado con el método actual de almacenamiento sino volviendo se incluso una forma más efectiva que el método vertical convencional.

La fermentación ocurre de forma correcta cuando existen condiciones adecuadas, en el artículo [21] diseñaron un sistema de proceso para la repetibilidad en la fermentación del café, en este caso la repetibilidad de los parámetros conllevan a un mejor forraje y con una buena conservación en el valor nutricional, teniendo el control de las condiciones al interior del silo, la repetibilidad se brinda cuando se establecen las medidas a los sensores aunque se puede añadir una nube para que los datos se puedan conservar.

5. Conclusiones

Implementar los sensores son de una gran utilidad para automatizar todo el sistema, brindando parámetros para mantener cuidado el contenido en el interior del silo, combinado con la pantalla y los leds indicadores se da la información correcta para que el agricultor se mantenga informado del estado de su forraje.

El diseño del silo se enfoca en la practicidad, pero agregar cosas como sensores a un diseño simple lleva a poder adentrarse en un desarrollo tecnológico, con la salida para una fluctuación de aire se regulan las condiciones y con una salida fácil para que el agricultor pueda disponer del forraje.

La integración de los sensores son clave para la automatización del sistema de monitoreo, el cual se propone como un sistema fácil de entender y de manipular, un sistema de monitoreo que combina sensores de humedad, temperatura, presión y ventiladores, que monitorean y regulan el interior del silo.

Desarrollar un sistema de almacenamiento lleva a un avance en la integración de la tecnología hacia la agricultura, dejando a un mayor alcance prácticas más sofisticadas y precisas para productores que no tienen un fácil acceso a estos medios.

El avance en componentes, algoritmos de control y pruebas reales pueden llevar la investigación hacia otros cultivos además del forraje de maíz, como lo son granos secos como el trigo, arroz o avena; semillas como girasol, soya o ajonjolí; desembocando en la capacidad de seguir desarrollando el sistema con las especificaciones que requiera otro tipo de cultivo, abarcando y mejorando más áreas del sector agrícola para innovar con mayor tecnología, reduciendo la brecha tecnológica que enfrenta un sector de agricultores al almacenar sus productos.

6. Agradecimientos

Agradecemos a la carrera de Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico Superior de Huauchinango por su colaboración con el desarrollo del presente artículo, así como al agricultor de Las Lajas, Zacatlán, Puebla por compartir sus conocimientos en esta área.

7. Referencias

- [1] González Castañeda, F., Peña Ramos, A., Núñez Hernández, G. (2006). Etapas de corte, producción y calidad forrajera de híbridos de maíz de diferente ciclo biológico. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 29 (Especial 2), 103–107. https://doi.org/10.35196/rfm.2006.Especial_2.103
- [2] Zaragoza-Esparza, J., Tadeo-Robledo, M., Espinosa-Calderón, A., López-López, C., García-Espinosa, J. C., Zamudio-González, B., Turrent-Fernández, A., Rosado-Núñez, F. (2019). Rendimiento y calidad de forraje de híbridos de maíz en Valles Altos de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10 (1), 101-111. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i1.1403>
- [3] Producción Animal. (2010). *Maíz para ensilaje*. http://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_reservas/reservas_silos/143-maiz_ensilaje.pdf
- [4] García Leños, M. L., Aguirre Gómez, J. A., Narro Sánchez, J., Cortés Baheza, E., Rivera Reyes, J. G. (2007). Silo hermético para el control de plagas de granos almacenados en Guanajuato, México. *Agricultura técnica en México*, 33 (3), 231-239. <https://www.scielo.org.mx/pdf/agritm/v33n3/v33n3a2.pdf>
- [5] Velázquez-Guerrero, J. J., Ríos Valadez, R., Cerna Chávez, E., Delgado Ortiz, J. C., Landeros Flores, J., Quezada Tristán, T., Ochoa Fuentes, Y. M. (2021). Primer reporte de *Monascus ruber* en ensilaje de maíz (*Zea mays*) y alfalfa (*Medicago sativa*) en México. *Scientia Fungorum*, 52, (e1385), 1-5. <https://doi.org/10.33885/sf.2021.52.1385>
- [6] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2024). *Guía de Buenas Prácticas en Centros de Almacenamiento de Granos*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/924076/BUENAS_PRACTICAS_ALMACENAMIENTO_DE_GRANOS_17062024_DEFINITIVO_compressed.pdf
- [7] Kung, L., Shaver, R. D., Grant, R. J., Schmidt, R. J. (2018). Silage review: Interpretation of chemical, microbial, and organoleptic components of silages. *Journal of Dairy Science*, 101 (5), 4020–4033. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13909>
- [8] Martínez Gámiz, S. (2025). *Tips para el almacenamiento de granos con silos metálicos herméticos*. CIMMYT Noticias. <https://www.cimmyt.org/es/noticias/tips-para-el-almacenamiento-de-granos-con-silos-metalicos-hermeticos/>

- [9] Prado Silos. (2023). *Sistemas de control de temperatura para silos*. <https://pradosilos.com/es/sistemas-de-control-de-temperatura-para-silos/>
- [10] Smart4Agro. (2025). *Smart Silo: control de calidad del ensilado*. <https://smart4agro.com/es/silo/>
- [11] TecnoAgro. (2025). *Innovaciones en cosecha y post-cosecha: Almacenamiento inteligente de granos*. <https://tecnoagro.com.mx/2025/04/01/innovaciones-en-cosecha-y-post-cosecha-almacenamiento-inteligente-de-granos/>
- [12] Agratronix. (s. f.). *Medidor de humedad HST-1 para heno y ensilaje*. <https://www.agratronix.com/product/new-hst-1-advanced-hay-straw-and-silage-tester/>
- [13] Meprosa. (2021). *Los silos: una historia más allá de la conservación de alimentos*. <https://meprosa.mx/los-silos-una-historia-mas-alla-de-la-conservacion-de-alimentos/#:~:text=Cuando%20se%20empezaron%20a%20desarrollar,consumidores%20del%20grano%20en%20cuesti%C3%B3n>
- [14] Prado Silos. (2025). *Nuevo silo granja: más resistencia, más eficiencia y mayor durabilidad*. <https://pradosilos.com/es/nuevo-silo-granja-mas-resistencia-mas-eficiencia-y-mayor-durabilidad/>
- [15] Smart4Agro. (2025). *Smart4Agro – Servicios Intelectuales de Monitoreo, Análisis y Pronóstico del Estado de Agronegocios*. <https://www.smart4agro.com/es/>
- [16] Monnet. (2023). *Monitoreo de Productos en Silos: Ventajas e Importancia*. <https://monnet.com.bo/monitoreo-de-productos-en-silos/>
- [17] QuestionPro. (2025). *Investigación de campo*. <https://www.questionpro.com/es/investigacion-de-campo.html>
- [18] Aguirre San Juan, R. (2019). *Silo metálico capacidad 20 kg y 100 kg*. https://www.engormix.com/agricultura/miscellaneous/silo-metalico-capacidad-20kg_f72363/
- [19] Aguilar Alvarez, S., Hinojosa Altamirano, R., Hidalgo Lascano, P., Cruz Dávalos, P. (2021). Monitoreo y control remoto de un dispensador de alimento para mascotas basado en IoT. *Revista de Investigación en Tecnologías de la Información (RITI)*, 9 (17 Especial), 77–88. <https://doi.org/10.36825/RITI.09.17.008>
- [20] Castillo Quiroz, G., Cruz Garrido, A., Gonzaga Licona, E., Luna Mejía, E. (2019). Diseño e implementación de sistema de monitoreo automatizado en granja avícola. *Revista de Investigación en Tecnologías de la Información (RITI)*, 7 (14), 122–136. <https://doi.org/10.36825/RITI.07.14.011>
- [21] Camacho García, J. M., Aguilar Cisneros, J. R., Muñoz-Arteaga, J., Fernández-y-Fernández, C. A., Utrilla Vázquez, M., López Jiménez, J. A. (2024). Desarrollo de un sistema y de un proceso como un medio para lograr la repetibilidad de resultados en la fermentación de café de baja altura. *Revista de Investigación en Tecnologías de la Información (RITI)*, 12 (27 Especial), 81–94. <https://doi.org/10.36825/RITI.12.27.009>