



## **Acta de Correcciones al Proyecto de Grado Ingeniería Electrónica**

**Fecha:** 1 de septiembre de 2021

**Autores:** Christian Duane Calle Erazo y Fabio Andrés Bravo Granda

**Nombre del Proyecto de Grado:** Diseño y fabricación de un sistema semiautomático de pesaje de productos granulares entre 30 kg y 60 kg

**Director:** M. Sc. Juan David Contreras Pérez

Como indica el artículo 2.27 de las Directrices de Trabajo de Grado, he verificado que los estudiantes indicados arriba han implementado todas las correcciones que los Jurados del Proyecto de Grado definieron que se efectuaran, como consta en el Acta de Calificación correspondiente.

Firma de Director(a) del Proyecto de Grado


Nota de Aceptación

Aprobado por el Comité de Trabajo de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Pontificia Universidad Javeriana para optar el título de Ingeniero de Sistemas y computación.



---

**Dr. Hernán Camilo Rocha Niño**  
Decano de la Facultad de Ingeniería



---

**ING. Luis Eduardo Tobón Llano**  
Director Carrera Ingeniería Electrónica.



---

**ING. Juan David Contreras Pérez**  
Director(a) Trabajo



---

**ING. Alexander Martínez Álvarez**  
Jurado 1



---

**ING. Manuel Vicente Valencia Díaz**  
Jurado 2

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS**  
**DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA Y**  
**CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN**



Pontificia Universidad  
**JAVERIANA**  
Cali

**DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN SISTEMA SEMIAUTOMÁTICO**  
**DE PESAJE DE PRODUCTOS GRANULARES ENTRE 30 KG Y**  
**60 KG**

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TITULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

**Autor:** Christian Duane Calle Erazo  
Fabio Andrés Bravo Granda

**Director:** M. Sc. Juan David Contreras Perez

Santiago de Cali, 1 de septiembre de 2021  
Colombia

# Agradecimientos

*Agradecemos a Dios por permitirnos sortear las dificultades presentadas en los últimos meses y poder culminar nuestro trabajo de grado. A nuestros familiares, pues siempre contamos con su apoyo incondicional a lo largo de este proceso. A nuestros amigos, profesores y laboratoristas por brindarnos su colaboración. Reconocemos especialmente a Don Jesús Pabón, al profesor Juan David Contreras, al señor Carlos Lozano y al laboratorista Bleider Arizala, quienes estuvieron atentos a todas las preguntas y consultas que surgieron mientras realizábamos este proyecto. Les agradecemos por creer en nosotros, acompañarnos y darnos las mejores recomendaciones para hacer posible la entrega de este trabajo de grado.*

# Índice

<b>Resumen</b>	<b>9</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>11</b>
1.1. Objetivos	12
1.1.1. Objetivo general	12
1.1.2. Objetivos específicos	12
1.2. Justificación	12
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>14</b>
2.1. Fundamentos teóricos	14
2.1.1. Motores	14
2.1.2. Compuertas para tolvas	16
2.1.3. Características de los instrumentos	19
2.2. Definición de Términos Básicos	23
2.3. Antecedentes	23
<b>3. Diseño de la Solución</b>	<b>28</b>
3.1. Requisitos del Proyecto	28
3.1.1. Restricciones	28
3.2. Diseño Sistema Mecánico	29
3.2.1. Diseño Mecánico de Compuerta	29
3.2.2. Diseño de apertura y cierre de compuerta	32
3.3. Diseño del sistema electrónico	44
3.3.1. Procesamiento	45
3.3.2. Driver del motor	48
3.3.3. Alimentación	51
3.3.4. Interacción con el usuario	53
3.3.5. Selección del sistema de pesaje	54
<b>4. Implementación</b>	<b>58</b>
4.1. Implementación del sistema mecánico	58
4.1.1. Implementación de la compuerta	59
4.1.2. Implementación del cierre y apertura de la compuerta	62
4.2. Implementación del sistema electrónico	65
4.3. Software	74
4.3.1. Requisitos del Software	74
4.3.2. Diagrama de flujo del código del sistema	74

---

4.3.3. Calibración de la báscula por software . . . . .	76
4.3.4. Funciones . . . . .	78
<b>5. Pruebas</b>	<b>80</b>
5.1. Montaje de la prueba . . . . .	80
5.2. Pruebas de control de peso . . . . .	83
5.2.1. Estrategia de control #1 . . . . .	83
5.2.2. Estrategia de control #2 . . . . .	85
5.3. Producto Final . . . . .	87
<b>6. Conclusiones y Trabajos Futuros</b>	<b>94</b>
6.1. Conclusiones . . . . .	94
6.2. Trabajos Futuros . . . . .	95
<b>Bibliografía</b>	<b>96</b>

# Índice de figuras

2.1. Configuración compuerta simplex diagonal [8] . . . . .	17
2.2. Configuración compuerta simplex vertical [8] . . . . .	17
2.3. Diseño compuerta dúplex [8] . . . . .	17
2.4. Compuerta dúplex física [8] . . . . .	18
2.5. Compuerta tipo guillotina de la empresa Saniaguas S.A.S [9] . . . . .	19
2.6. Sistema manual mecánico de empaque [20] . . . . .	24
2.7. Tolva embolsadora casera [21] . . . . .	25
2.8. Ejemplo de sobrepeso en empaque [22] . . . . .	26
3.1. Diseño contenedor secundario a tolva. (Autoría propia) . . . . .	29
3.2. Diseño compuerta en SolidWorks. (Autoría propia) . . . . .	30
3.3. Caso colisión de compuerta. (Autoría propia) . . . . .	31
3.4. Diseño Compuerta SolidWorks. (Autoría propia) . . . . .	31
3.5. Prueba de torque con masa de 200 g. (Autoría propia) . . . . .	34
3.6. Prueba de torque con masa de 300 g. (Autoría propia) . . . . .	34
3.7. Prueba de torque con masa de 400 g. (Autoría propia) . . . . .	35
3.8. Prueba de torque con masa de 500 g. (Autoría propia) . . . . .	35
3.9. Prueba de torque con masa de 700 g. (Autoría propia) . . . . .	36
3.10. Prueba de torque con masa de 1 kg. (Autoría propia) . . . . .	36
3.11. Procedimiento con el pie de rey. (Autoría propia) . . . . .	37
3.12. Motor paso a paso Nema 23 57HM76-2804 ; Tomado de <a href="https://bit.ly/3s33sMS">https://bit.ly/3s33sMS</a> . . . . .	39
3.13. Diseño sistema de transmisión y reducción . . . . .	41
3.14. Correa 2GT de 6mm ; Tomado de <a href="https://bit.ly/3m1AonU">https://bit.ly/3m1AonU</a> . . . . .	42
3.15. Polea Gt2 20 dientes Correa 6mm Nema 23; Tomado de <a href="https://bit.ly/2VEfLDj">https://bit.ly/2VEfLDj</a> . . . . .	43
3.16. Polea Correa Gt2 60 Dientes Eje 8mm Aluminio; Tomado de <a href="https://bit.ly/3xAGpu1">https://bit.ly/3xAGpu1</a> . . . . .	43
3.17. Diagrama general del sistema electrónico (Autoría propia). . . . .	44
3.18. placa STM32 blue pill; Tomado de <a href="https://bit.ly/3jNsDPQ">https://bit.ly/3jNsDPQ</a> . . . . .	45
3.19. Placa Teensy 3.1 ; Tomado de <a href="https://bit.ly/3fRpWf5">https://bit.ly/3fRpWf5</a> . . . . .	46
3.20. Microcontrolador Arduino Uno; Tomado de <a href="https://store.Arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3">https://store.Arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3</a> . . . . .	47
3.21. Driver del motor DMA860H ; Tomado de <a href="https://bit.ly/3DF3Syn">https://bit.ly/3DF3Syn</a> . . . . .	48
3.22. Driver del motor TB6560 ; Tomado de <a href="https://bit.ly/3BzjhhN">https://bit.ly/3BzjhhN</a> . . . . .	49
3.23. Driver del motor TB6600 ; Tomado de <a href="https://bit.ly/2VJ2Ccj">https://bit.ly/2VJ2Ccj</a> . . . . .	50
3.24. Regulador de 5VDC ; Tomado de <a href="https://bit.ly/3xGY82W">https://bit.ly/3xGY82W</a> . . . . .	52
3.25. Teclado matricial 4x4; Tomado de <a href="https://bit.ly/37zPkBC">https://bit.ly/37zPkBC</a> . . . . .	53
3.26. Display LCD 20x4 con interfaz serial (I2C); Tomado de <a href="https://bit.ly/2X9AQ9m">https://bit.ly/2X9AQ9m</a> . . . . .	54
3.27. Celda de carga para 50 kg ; Tomado de <a href="https://bit.ly/3AvicHq">https://bit.ly/3AvicHq</a> . . . . .	55

3.28. Báscula balanza plataforma de piso; Tomado de <a href="https://bit.ly/3fWrODd">https://bit.ly/3fWrODd</a> . . . . .	56
3.29. Módulo Hx71 ;Tomado de <a href="https://bit.ly/3CG9Oa7">https://bit.ly/3CG9Oa7</a> . . . . .	57
4.1. Compuerta hecha con lámina de hierro de 2 mm . . . . .	58
4.2. Diseño 3D del acople de tolva (Autoría propia) . . . . .	59
4.3. Tolva hecha con lámina de hierro . . . . .	59
4.4. Soporte de 4 apoyos implementado . . . . .	60
4.5. Diseño 3D del buje . . . . .	61
4.6. Piezas terminadas . . . . .	61
4.7. Compuerta con los bujes instalados . . . . .	61
4.8. Diseño 3D de la base del motor (Autoría propia) . . . . .	62
4.9. Motor instalado en la base diseñada . . . . .	62
4.10. Motor instalado en la base diseñada . . . . .	63
4.11. Correa instalada en las poleas . . . . .	64
4.12. Diseño 3D del sistema mecánico (Autoría propia) . . . . .	64
4.13. Sistema mecánico completo . . . . .	65
4.14. Diagrama de conexiones entre el motor, el driver del motor y el procesador con su respectiva alimentación (Autoría propia) . . . . .	66
4.15. Diagrama de conexiones entre los finales de carrera y el Arduino con su respectiva alimentación (Autoría propia) . . . . .	67
4.16. Finales de carrera implementados . . . . .	67
4.17. Diagrama de conexiones entre la celda de carga,el módulo HX711 y el Arduino con su respectiva alimentación (Autoría propia). . . . .	68
4.18. Diagrama de conexiones del sistema electrónico (Autoría propia). . . . .	70
4.19. Diagrama de conexiones del sistema electrónico (Autoría propia) . . . . .	71
4.20. Implementación del sistema electrónico . . . . .	71
4.21. Implementación del sistema electrónico . . . . .	72
4.22. Implementación del sistema electrónico . . . . .	72
4.23. Resultado de la implementación del sistema . . . . .	73
4.24. Diagrama de flujo del sistema (Autoría propia). . . . .	75
4.25. Pesa de 20,500 gramos . . . . .	76
4.26. Pesa de 10,502 gramos . . . . .	77
4.27. Pesa de 5,394 gramos . . . . .	77
4.28. Pesa de 10,212 gramos . . . . .	78
5.1. Llenado de la tolva con el material granular . . . . .	80
5.2. Solicitud por pantalla para el ingreso del peso y confirmación del peso ingresado . . . . .	81
5.3. Posicionamiento del saco iniciar el pesaje . . . . .	81
5.4. Mensaje por pantalla para el usuario. . . . .	82
5.5. Evidencia del dato obtenido de la báscula del sistema. . . . .	82
5.6. Evidencia del dato obtenido de la báscula de precisión. . . . .	83
5.7. Diseño 3D de la caja . . . . .	87

---

5.8. Caja con los componentes acoplados . . . . .	88
5.9. Caja completa . . . . .	88
5.10. Peso de corrección establecido por medio del potenciómetro . . . . .	89
5.11. Láminas implementadas en el sistema . . . . .	89
5.12. Conteo de sacos y material utilizado mostrado por pantalla . . . . .	90
5.13. Sistema semiautomático para material granulado . . . . .	93

# Índice de cuadros

3.1. Tabla de comparación entre los tipos de motores. (Autoría propia) . . . . .	33
5.1. Resultados para 30kg. . . . .	84
5.2. Resultados para 50kg. . . . .	84
5.3. Resultados para 60kg. . . . .	84
5.4. Resultados para 45 kg. . . . .	86
5.5. Resultados para 60 kg. . . . .	86
5.6. Resultados para 30 kg. . . . .	86
5.7. Bill of materials. . . . .	92

# Resumen

La mayor parte de las pequeñas y medianas empresas (Pymes) realizan manualmente el proceso de empaque de sus productos en sacos. Este proceso no es muy preciso debido a que se requiere rectificar y corregir el peso de cada saco incrementando el tiempo y el esfuerzo que deben hacer los operarios. A pesar de que existen en el mercado alternativas completamente automatizadas, las Pymes no las adquieren por su elevado costo.

El principal objetivo de este proyecto fue desarrollar un sistema semiautomático capaz de llenar sacos de productos granulares en un rango de 30 a 60 kg, cumpliendo con un porcentaje de error no superior a  $\pm 2\%$  del peso requerido por saco y que sea asequible para una Pyme. El propósito del proyecto fue reducir el esfuerzo de los trabajadores y ayudar a estas empresas a ser más competitivas. Lo anterior se desarrolló aplicando la metodología CDIO (concebir, diseñar, implementar y operar) obteniendo los resultados esperados.

**Palabras Clave:** Pesaje automático, motor paso a paso, empaquetado de sacos, estrategia de control.

# Abstract

Most of the small and medium-sized companies (SMEs) carry out the process of packing their products in bags manually. This process is not very precise because it is necessary to rectify and correct the weight of each bag, which will increase the time and effort that the operators must do. Although there are fully automated alternatives in the market, SMEs do not purchase them due to their high cost.

The main objective of this project was to develop a semiautomatic system capable of filling bags of granular products in a range of 30 to 60 kg, complying with an error percentage not exceeding  $\pm 2\%$  of the required weight per bag and that would be affordable for a SMEs. The purpose of the project was to reduce the effort of workers and help these companies to be more competitive. The above was developed by applying the CDIO methodology (conceive, design, implement and operate) obtaining expected results.

**Keywords:** Automatic weighing, stepper motor, bag packing, control strategy.

# Introducción

---

Según el DANE, para el año 2019 en Colombia las pequeñas y medianas empresas (Pymes) representan un 35 % del producto interno bruto, generan el 80 % del empleo y figuran el 90 % de la productividad [1]. Dado el papel estratégico de las pymes en la economía, se deben apoyar procesos de producción mediante la implementación de herramientas y de tecnologías innovadoras que mejoren la eficiencia en la cadena productiva, reduciendo costos y tiempos en los procesos. Afianzando lo anterior, un estudio muestra que la mayoría de los propietarios de estas microindustrias y pymes ven una alta necesidad en la inversión de tecnologías y conservación de sus empleados [2]. Con el fin de contribuir en ello, este proyecto está enfocado a optimizar los procesos de empaque de empresas pequeñas y medianas en donde se procese material granular, tales como pequeñas canteras, mineras, productores de grano entre otros.

Durante el proceso de peso y empaque de sus producciones, las empresas suelen presentar pérdidas, penalizaciones y desorden dentro del mismo, dificultando llevar un control efectivo e impidiendo tener un margen de error mínimo. De acuerdo con las necesidades y problemáticas que se presentan dentro del sector, se encuentra que el proceso de empaque usualmente se realiza de forma manual y el material empacado no suele ser aproximado a la cantidad de producto esperado. Lo anterior, evidencia la necesidad de establecer un sistema automatizado económico que permita reducir el riesgo de presentar deficiencias o pérdidas en el proceso de empaque.

De forma general, este proyecto espera apoyar a las pequeñas industrias en mejorar su productividad y aumentar la efectividad en sus resultados. De forma particular, se espera que este trabajo le aporte a la empresa Cupertino Mármoles y Calizas SAS, la cual se dedica a la explotación y producción de granos de carbonato de calcio como materia prima de alimentos para animales, materiales de construcción y producción de abonos agrícolas. En la compañía se empacan sacos desde 30 kg hasta 2 toneladas con una estimación de producción de 2100 sacos de 50kg al día.

Para ello, se realizó una investigación con la cual se logró estructurar la idea para establecer un posible sistema semiautomático de bajo costo y de fácil accesibilidad para este tipo de empresa dentro del proceso de peso y empaque de los productos. Este prototipo fue caracterizado y se presenta en el documento un modelo 3D que consigue una mayor eficiencia en el proceso mediante la aplicación de tecnologías y también facilita la labor del operador. El diseño será desarrollado dinámicamente, basado en diversos métodos aplicados actualmente en la industria. En este proyecto se presenta un modelo simplificado capaz de realizar la función de empaque y que posibilita tener un control con mayor exactitud que logra disminuir costos, evitar pérdidas y aumentar la eficiencia en

la producción, principalmente de productos de grano pequeño dentro de los sectores alimenticios, agroindustriales y de construcción.

Con el sistema, se presenta una solución para empresas que permite evaluar y acondicionar los procesos de empaque en las industrias, demostrando así que la automatización es posible para todo el sector, llegando a tener un incremento en la productividad y disminuyendo las pérdidas que se presentan en los sistemas de empaque tradicionales.

En este trabajo de grado se presentan seis capítulos, en el primero se muestran los objetivos y la justificación, en el segundo, el marco teórico, en el tercero, el diseño del sistema, en el cuarto, la implementación, en el quinto las pruebas de funcionamiento; por último las conclusiones y trabajos futuros.

## 1.1. Objetivos

Con el fin de disminuir el error en el proceso de empaque de sacos de las Pymes, se establecen los siguientes objetivos.

### 1.1.1. Objetivo general

Diseñar e implementar un sistema de pesaje semiautomático de material granular entre 30 y 60 kg.

### 1.1.2. Objetivos específicos

- Diseñar un modelo en 3D de una estructura para el pesaje de material granulado entre 30 y 60 kg.
- Diseñar e implementar un sistema de dosificación para la tolva de medición de peso de un material granulado.
- Diseñar e implementar un sistema electrónico de control para pesaje con un error menor al 2%.
- Diseñar e implementar una interfaz hombre-máquina donde el usuario pueda fijar las opciones de operación del sistema.

## 1.2. Justificación

El proceso de empaquetado dentro de las empresas medianas o pequeñas comúnmente se realiza por medio de un sistema de empaquetamiento manual como consecuencia de los altos costos que implica invertir en la automatización de dicho proceso mediante maquinaria importada. Por otra parte, los sistemas manuales presentan un error aproximado de  $\pm 10\%$  de imprecisión debido a la

manipulación directa de los operarios, los cuales deben revisar el peso del saco para validar que este tiene el peso indicado.

Este error conlleva a que los operarios tengan que realizar una actividad adicional de extraer o verter cantidades de producto hasta lograr el peso requerido, generando retrasos en la línea de producción, o para evitar estos, sellan los sacos con pesos distintos al deseado. Adicionalmente, las pequeñas y medianas empresas no cuentan con el capital suficiente para la adquisición de básculas para camiones de todos los tamaños, por lo que tienen que recurrir a pagar el alquiler de una, lo que aumenta los costos de producción.

El sistema de empaque de los productos es fundamental para su comercialización y se deben considerar las exigencias del mercado, las preferencias y también la comodidad al momento del uso. Actualmente, la mayoría de los productos están empaquetados con pesos específicos basados en las necesidades del cliente. No obstante, los métodos manuales ejercidos para este proceso son complejos a raíz de que se trabajan cargas con bastante peso, lo que aumenta la dificultad de manipulación, el riesgo de lesión y probabilidad de cometer un error del operario que lo vaya a maniobrar. Estas problemáticas disminuyen la calidad y la eficiencia del proceso haciendo que la empresa sea menos competitiva y afectan la calidad de vida de los trabajadores.

En términos económicos las empresas se ven afectadas por diferentes factores como retraso en la producción diaria, multas a los transportadores en las vías, pérdida de material, entre otras. Por ejemplo, en una empresa que vende productos derivados de las piedras se venden 2100 sacos de 50 kg al día, asumiendo el porcentaje de error, se está hablando de  $\pm 5$  kg por saco, multiplicando por el total vendidos son 10.5 toneladas perdidas al día para la empresa reflejadas en material, o en clientes al quedar inconformes por recibir menos material del que pagaron.

# Marco Teórico

---

## 2.1. Fundamentos teóricos

Las máquinas de embalaje generalmente incluyen un sistema de medición de peso separado o integrado. Usualmente, las máquinas operan midiendo la pérdida de peso del sistema, la medición del peso se realiza mediante celdas de carga que generalmente miden el peso de todo el conjunto y se detectan las cantidades de peso agregadas o eliminadas de la máquina [3].

El presente trabajo parte de teorías y estudios como base fundamental para el entendimiento, el análisis y el desarrollo de una solución al problema observado en los procesos de empaque de productos granulares en las Pymes. También se presentan conocimientos en el área de la electrónica y mecánica que ayudan a diseñar alternativas para automatizar el proceso de empaquetamiento de sacos.

**Sistemas de control:** Los sistemas de control son de gran importancia cuando se requiere automatizar procesos, debido a que estos sistemas deben ser capaces de garantizar la estabilidad del sistema y robustez ante perturbaciones, así como controlar las variables por medio de señales de control para que los resultados sean los esperados.

Los elementos básicos que forman parte de un sistema de control y permiten su manipulación son los siguientes:

- **Sensores:** Permiten conocer los valores de las variables medidas del sistema.
- **Controlador:** Utilizando los valores determinados por los sensores y siguiendo una lógica de control programada el controlador calcula la acción que debe aplicarse para modificar el estado de los actuadores y así realizar las acciones requeridas en el proceso.
- **Actuador:** Es el mecanismo que ejecuta la acción calculada por el controlador y que modifica las variables de control [4].

### 2.1.1. Motores

Para el control del sistema de dosificación será necesario la elección de un motor eléctrico que permita controlar la apertura y cierre de la compuerta. Por lo tanto, se presentan algunos tipos de motores que pueden ser usados para esta aplicación.

**Motor de corriente continua con escobillas:** Los Motores de Corriente Directa (CD) o Corriente Continua (CC) son esencialmente una máquina que convierte energía eléctrica en movimiento o trabajo mecánico a través de medios electromagnéticos. Estos se utilizan en casos en los que es importante el poder regular continuamente la velocidad del motor, y, además, se utilizan en aquellos casos en los que es imprescindible utilizar corriente directa como es el caso de motores accionados por pilas o baterías [5].

**Motor paso a paso:** El motor paso a paso, es un motor eléctrico sin escobillas que está constituido por un estator cuyos devanados se llaman fases y un rotor de un elevado número de polos. Su funcionamiento es síncrono y la alimentación cíclica de sus fases debe originar en cambio de configuración un giro elemental del rotor, constante, llamado paso.

Existe una gran diversidad de modelos de estos motores dependiendo del número de fases de su estator, de si la alimentación de estas es unipolar o bipolar, del número de paso por vuelta y de si su rotor es de reluctancia variable, imanes permanentes o híbridos.

En cuanto al control, existen tres modos de realizarlos, paso entero, medio paso y micro paso. En el paso entero, cada vez que se modifica la alimentación de las fases del estator se avanza un paso disponiendo de par nominal del rotor. En el medio paso, se avanza sólo medio paso con lo que se dispone de mejor resolución, pero el par en las posiciones situadas entre pasos regulares se reduce a la mitad. Estos dos tipos de funcionamiento disponen en el mercado de gran variedad de integrados para su control. Y el funcionamiento en micro paso, consiste en alimentar al mismo tiempo varias fases a la vez con corrientes medias distintas, de modo que la posición media del flujo en el entrehierro se puede fijar en cualquier posición. Con este funcionamiento se consigue una resolución inmejorable y existen en el mercado distintas tarjetas de control basadas en microprocesador.

Merece la pena comentar que el motor paso a paso es la primera de las máquinas eléctricas que no puede funcionar sin el uso de la electrónica, pues siempre es necesario usar un driver o controlador para la conmutación ordenada de las bobinas.

El control de posición de motores paso a paso se puede efectuar en lazo abierto siempre que se tomen las precauciones necesarias para no perder ningún paso. Con la programación adecuada de aceleración y desaceleración, y sin interferencias mecánicas se puede trabajar perfectamente en lazo abierto mientras las variaciones del par de carga sean conocidas de antemano.

Es en estas aplicaciones de carga conocida donde el motor paso a paso tiene sus posibilidades industriales. En el caso de tener que accionar cargas desconocidas, su funcionamiento en lazo cerrado sería del todo perfecto, pero el precio del transductor de realimentación generalmente no justifica esta aplicación [6].

**Servomotor de corriente alterna:** Se podría decir que un servomotor es un motor, pero con varias características especiales. La principal propiedad es que cuenta con un sistema de realimentación (encoder o resolver), el cual le indica al servo drive (controlador del servomotor) la posición en la que se encuentra el eje del servomotor, y le corrige la posición en caso de que no fuese la correcta. De este modo, puede enmendar (en tiempo real) los errores de posición, y obtener una muy alta precisión. La referencia del nivel de precisión que se puede conseguir se evidencia en los servomotores de Micro, que pueden alcanzar una resolución de hasta un millón doscientos ochenta mil (1.280.000) pulsos por vuelta [7].

Además de su precisión, otra de las propiedades logrables es la capacidad de mantener un torque constante en toda su gama de revoluciones (hasta 3.000 rpm). Esta característica los diferencia de los motores asíncronos convencionales y de los motores paso a paso, puesto que si se quisiera mantener la posición en un motor común, se necesitaría recurrir a dispositivos adicionales como son frenos, frenos de polvo magnético, conjuntos frenos-embrague, reductores de velocidad, etcétera [7].

### 2.1.2. Compuertas para tolvas

De la necesidad de almacenamiento de productos con diferentes características en las industrias, surge el impulso de crear un mecanismo que permitiera la dosificación o salida del producto de manera que el usuario pueda controlar la distribución. Para esto, se implementan compuertas que son utilizadas para el efectivo control de flujo. Para las compuertas hay modelos eléctricos o manuales que cuentan con una variedad de diseños y son fabricados de diferentes materiales que dependen de factores relacionados con el producto que se desplace por las mismas. Seguidamente, se muestran los tipos de compuertas para tolvas según su diseño de acuerdo con el artículo [8].

**Simplex:** Las compuertas simplex tienen las configuraciones de ser con cuerpo vertical o cuerpo diagonal contando con una sola compuerta a controlar para el cierre y apertura del flujo del material contenido en la tolva, al ser un modelo más sencillo permite una fácil implementación y control de la misma.

Las compuertas para tolvas Sweet® con el montaje para descarga vertical o lateral son diseñadas para montarse a los lados verticales o al fondo de silos, transiciones, y tolvas. Las compuertas laterales son similares en diseño a las compuertas simplex Sweet® salvo que el material de descarga está dirigido diagonalmente fuera o hacia un lado. Las conexiones brindadas están pre-taladradas para una instalación simple.

**Dúplex** Las compuertas de descarga para tolva tipo cuchara Sweet® están todas soldadas en acero grueso y pesado con los refuerzos de ángulo. Las compuertas están equilibradas para abrirse y cerrarse fácilmente y son reemplazables. Cada compuerta para tolva recibe dos capas de pintura esmalte industrial. Cualquier modelo de compuerta para tolva puede ser adaptado fácilmente a operación neumática e hidráulica.

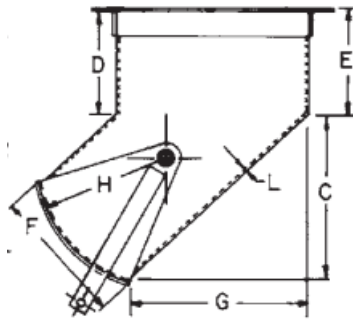


Figura 2.1: Configuración compuerta simplex diagonal [8]

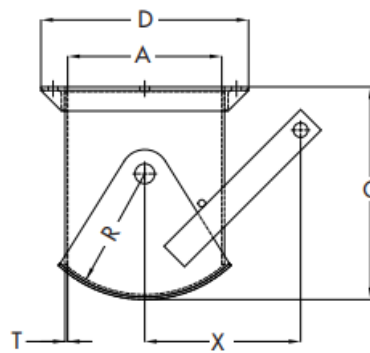


Figura 2.2: Configuración compuerta simplex vertical [8]

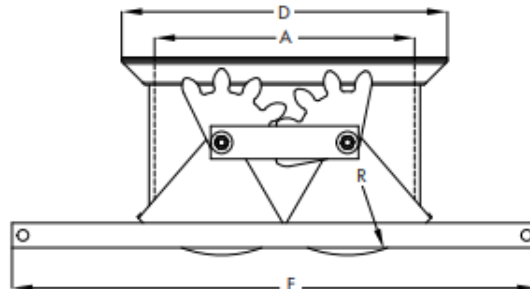


Figura 2.3: Diseño compuerta dúplex [8]

Las variables D,A,R,F son modificables según el modelo y la necesidad del comprador. Los cilindros neumáticos o hidráulicos proveen operación simple y control remoto en situaciones de distancia. Su construcción en acero inoxidable y acero resistente de abrasión están disponibles. Ambas compuertas se abren y se cierran juntas en el centro con un solo movimiento de la palanca de control siendo acoplables fácilmente a tolvas, silos y transiciones.

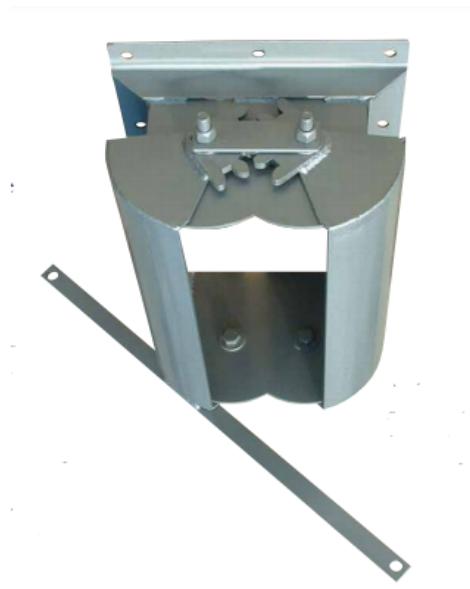


Figura 2.4: Compuerta dúplex física [8]

**Compuerta de guillotina:** Este tipo de compuertas son más sofisticadas brindando una amplia variedad de materiales para su elaboración dependiendo de la necesidad del cliente. Sin embargo, son de compleja instalación pues requiere un área de trabajo amplio y adecuado para acoplarse. Estas compuertas permiten el flujo de material realizando un deslizamiento en sentido de su riel lo cual su accionamiento permite ser bastante rápido [9].



Figura 2.5: Compuerta tipo guillotina de la empresa Saniaguas S.A.S [9]

### 2.1.3. Características de los instrumentos

Para las mediciones en el proyecto, es fundamental documentarse sobre las características de los instrumentos y su debido proceso para obtener resultados correctos. A continuación, se toma información del libro *Instrumentos industriales, su ajuste y calibración* [10] para profundizar y aclarar los diferentes términos y procesos del tema anteriormente mencionado.

**Generalidades:** Los instrumentos de medición y control empleados en las industrias de proceso como la química, la petroquímica, la alimenticia, la metalúrgica, la energética, la textil y la del papel tienen su propia terminología que define sus características de medida y de control. Estos instrumentos pueden ser indicadores, registradores, controladores, transmisores y válvulas de control.

**Campo de medida:** Espectro o conjunto de valores de la variable medida que están comprendidos dentro de los límites superior e inferior de la capacidad de medida, de recepción o de transmisión del instrumento. Viene expresado estableciendo los dos valores extremos. Ejemplo: un manómetro de intervalo de medida 0 - 10 bar (0 - 1.000 kPa), un transmisor de presión electrónico de 0 - 25 bar (0 - 2.500 kPa) con señal de salida 4 - 20 mA c.c. o un instrumento de temperatura de 100 - 300 °C. Otro término derivado es dinámica de medida o rangeabilidad (rangeability), que es el cociente entre el valor de medida superior e inferior de un instrumento. Por ejemplo, una válvula de control lineal que regule linealmente el caudal desde 2% hasta 100% de su carrera tendrá una rangeabilidad de  $100/2 = 50$ .

**Alcance:** Es la diferencia algebraica entre los valores superior e inferior del campo de medida del instrumento. En los ejemplos anteriores es de 10 bar (1.000 kPa) para el manómetro, de 25 bar (2.500 kPa) para el transmisor de presión y de 200 °C para el instrumento de temperatura.

**Características de los errores en los instrumentos de medición:** La cantidad determinada en un proceso de medida se llama mensurando (measurand). La especificación completa del mensurando, es decir, lo que se ha medido, requiere especificar las variables (presión, temperatura, humedad, ...) que pueden afectar su valor. Por ejemplo, en la medición de la densidad de un gas a 15 °C y 1 bar (100 kPa) de presión, el mensurando es “densidad del gas a 15 °C y 1 bar (1.000 kPa)”, lo que evidencia que la temperatura y la presión pueden afectar la cantidad medida (mensurando).

Si el proceso está en condiciones de régimen permanente existe el llamado error estático. En condiciones dinámicas el error varía considerablemente debido a que los instrumentos tienen características comunes a los sistemas físicos: absorben energía del proceso y esta transferencia requiere cierto tiempo para ser transmitida, lo cual da lugar a retardos en la lectura del aparato (error dinámico). En lo que sigue se estudiará el error estático.

El verdadero valor del mensurando está libre de errores, es decir, que es un valor verdadero. Como ejemplo, la densidad de una sustancia es la relación entre su masa y su volumen. Si fuera posible determinar la masa y el volumen sin tener errores de medida, entonces sería posible tener el valor verdadero de la densidad. Pero como esto no es posible, se infiere que no puede obtenerse el verdadero valor de la densidad, así que, generalizando, no es posible obtener experimentalmente el verdadero valor de una cantidad.

El valor nominal es un valor aproximado redondeado de la medida de un material o de la característica de un instrumento de medida. Por ejemplo, un peso patrón de valor nominal 1 Kg tiene un peso verdadero de 0,9999 Kg.

El valor verdadero convencional se obtiene por comparación con un patrón de alta calidad y en condiciones determinadas. El valor del error siempre es desconocido, pero se puede acotar estimando su incertidumbre. Por tanto, si existen errores de importancia desconocida, en vez de utilizar la palabra error debe más bien hablarse de incertidumbre. Siempre que una incertidumbre puede cuantificarse se convierte en un error y puede compensarse. Los diferentes tipos de errores de cualquier causa, conocida o desconocida, se manifiestan a través del operador, del instrumento, del mensurando y de los agentes externos.

- **Operador:** En los instrumentos de lectura no digital, los datos se obtienen de una lectura sobre escalas. De estas lecturas resultan errores de apreciación, interpolación, coincidencia, etc. Si además las escalas o elementos que componen estos sistemas de lectura están situados en diferentes planos, aparece el error de paralelaje cuando la visual del operador no es perpendicular a estos planos. Y así, un operador optimista lee 5,5 y el pesimista 5 cuando el valor indicado es 5,25. Y así, si el operador está cansado, y tiene algo de dislexia, es posible que lea 6 en vez de 9.

- **Instrumento:** Puede tener un error de deriva (aumenta con el tiempo), un error de fabricación y errores por desgaste debido a vibraciones, corrosión química, etc.
- **Mensurando:** La variable que se mide puede influir en el instrumento de medida. A manera de ejemplo, la variación de composición del petróleo según su origen puede afectar las variables de control de una refinería.
- **Agentes externos:** Las variaciones de densidad de un líquido hacen que varíe la indicación del nivel medido con transmisores que tienen en cuenta la densidad, aunque de hecho no se aprecie visualmente dicha variación.

El valor verdadero convencional es el valor que se atribuye al mensurando, incluyendo la magnitud de la incertidumbre asociada.

Un patrón es un elemento cuyo valor verdadero convencional es aceptado. De esta manera, al medir repetidas veces con el patrón el instrumento en cuestión, la diferencia entre el promedio de los diferentes resultados y el valor verdadero convencional permite corregir los resultados de las mediciones efectuadas con el instrumento, mientras que la desviación típica del conjunto de resultados, o un múltiplo aceptado de ella, constituye la incertidumbre.

Esta es otra manera de considerar el proceso de calibración, definiéndolo como el conjunto de operaciones que establecen, bajo condiciones específicas, la relación entre los valores indicados por un instrumento y el correspondiente valor del mensurando, materializado en un patrón utilizado como referencia.

Como el error absoluto es imposible de conocer, se utiliza el error absoluto convencional que es el hallado a través de un muestreo estadístico de un gran número de mediciones, y que se adopta como valor verdadero convencional:

$$\text{Error absoluto convencional} = \text{Valor medido} - \text{Valor verdadero convencional} \quad (2.1)$$

El error relativo, que permite comparar los resultados de las mediciones efectuadas, es:

$$\text{Error Relativo} = \frac{\text{Error absoluto convencional}}{\text{Valor verdadero convencional}} = \frac{\text{Valor medido} - \text{Valor verdadero convencional}}{\text{Valor verdadero convencional}} \quad (2.2)$$

**Exactitud:** La exactitud (accuracy) de una medida es el grado de aproximación al valor verdadero. En otras palabras, es la cualidad de un instrumento de medida por la que tiende a dar lecturas próximas al verdadero valor de la magnitud medida. La exactitud (accuracy) tal como la considera el fabricante del instrumento, define los límites de los errores cometidos cuando el instrumento se

emplea en condiciones normales de servicio durante un período de tiempo determinado (normalmente 1 año).

La exactitud varía en cada punto del campo de medida, si bien el fabricante la especifica en todo el margen del instrumento indicando a veces su valor en algunas zonas de la escala. Cuando se desea obtener la máxima exactitud del instrumento en un punto determinado de la escala, puede calibrarse únicamente para este punto de trabajo, sin considerar los valores restantes del campo de medida. Por ejemplo: un termómetro de 0-150 °C y de + 1 % de exactitud situado en un baño de temperatura constante a 80 °C, puede ser calibrado a este valor, de modo que su exactitud en este punto de trabajo será la máxima que se pueda obtener con un termómetro patrón.

Es obvio que para los valores restantes, en particular los correspondientes a los extremos de la escala, la exactitud se apartará de + 1 %. Hay que señalar que los valores de la exactitud de un instrumento se consideran en general establecidos para el usuario, es decir, son los proporcionados por los fabricantes de los instrumentos. Sin embargo, estos últimos suelen considerar también los valores de calibración en fábrica y de inspección. Con ello se pretende tener un margen de seguridad para compensar los efectos de las diferencias de apreciación de las personas que efectúan la calibración, las diferentes exactitudes de los instrumentos de medida utilizados, las posibles alteraciones debidas al desplazamiento del instrumento de un punto a otro, los efectos ambientales y de envejecimiento, etc.

**Precisión:** La precisión de una medida es el grado de dispersión del resultado de la medida cuando esta se repite un número determinado de veces bajo condiciones especificadas. En otras palabras, la precisión es la cualidad de un instrumento por la que tiende a dar lecturas muy próximas unas a otras, es decir, es el grado de dispersión de las mismas.

Un instrumento puede tener una pobre exactitud pero al mismo tiempo una gran precisión. Por ejemplo, un manómetro de intervalo de medida de 0 a 10 bar puede tener un error de cero considerable marcando 2 bar sin presión en el proceso y diversas lecturas de 7,049, 7,05, 7,051, 7,052 efectuadas a lo largo del tiempo y en las mismas condiciones de servicio, para una presión del proceso de 5 bar. Tendrá un error práctico de 2 bar, pero los valores leídos estarán muy próximos entre sí con una muy pequeña dispersión máxima de  $7,052 - 7,049 = 0,003$ , es decir, el instrumento tendrá una gran precisión.

Por tanto, los instrumentos de medida estarán diseñados por los fabricantes para que sean precisos, y como periódicamente se descalibran, deben reajustarse para que sean exactos. Se debe señalar que el término precisión se asocia en ocasiones a la repetibilidad, resolución o exactitud, por lo que es preferible utilizar estos últimos términos y evitar el uso de precisión para evitar confusiones.

## 2.2. Definición de Términos Básicos

A continuación se presenta la definición de algunos términos básicos que se necesitan para comprender el documento.

**Sistemas de control:** Un sistema de control es un tipo de sistema que se caracteriza por la presencia de una serie de elementos que permiten influir en el funcionamiento del sistema. La finalidad de un sistema de control es conseguir, mediante la manipulación de las variables de control, un dominio sobre las variables de salida, de modo que estas alcancen unos valores prefijados [4].

**Tolva:** Recipiente o depósito abierto por abajo, generalmente en forma de tronco de pirámide o de cono invertido, que se utiliza para dosificar el paso de algo como granos, monedas, bolas, abonos, líquidos, etc. [11].

**Microcontrolador:** Un microcontrolador es un circuito integrado que en su interior contiene una unidad central de procesamiento (CPU), unidades de memoria (RAM y ROM), puertos de entrada y salida y periféricos. Estas partes están interconectadas dentro del microcontrolador, y en conjunto forman lo que se conoce como micro computadora. El propósito fundamental de los microcontroladores es el de leer y ejecutar los programas que el usuario le escribe [12].

## 2.3. Antecedentes

Con base en la información obtenida, se logra identificar similitudes presentes en los artículos analizados [3] [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19]. Cada uno de estos busca dar soluciones y alternativas a los procesos ineficientes implementados en el empaquetamiento de productos fabricados por la industria. Se encontró que este problema tiende a presentarse en la fabricación de productos alimenticios, dando resultados ineficientes y pérdidas para las empresas. Asimismo, Bhende y Fating determinan que un gran porcentaje de las industrias indias están trabajando en operaciones manuales. “Estas operaciones conducen a reducir la precisión y la eficiencia del trabajo, lo que resulta en pérdidas de tiempo y dinero. También aumenta el tiempo de producción y el costo de mano de obra adicional” [14].

Los artículos e incluyendo el trabajo de grado desarrollado, se estructuran a partir de la idea de lograr reducir el tiempo y esfuerzo de la mano de obra al realizar esta operación, utilizando procesos automáticos o semiautomáticos que permitan el desarrollo de estas actividades de manera eficaz, aplicando teorías y componentes electrónicos, algunos de bajo costo. Sin embargo, los proyectos analizados tienen como objetivo dar soluciones a problemáticas con enfoques de distinta índole, siendo más específicos en el tipo de industria a la cual se le aplicaría el método. En ciertos artículos se menciona con precisión el proceso de sellado del empaque al vacío y otras especificaciones, las cuales no son información pertinente para el desarrollo del trabajo de grado. En su mayoría se plantea un proceso completamente automatizado dejando de lado la importancia del involucramiento de un

operador, alejándose así de uno de los objetivos del proyecto.

Como mercado objetivo se encontró una clara afinidad hacia las pequeñas y medianas empresas, ya que estas están en una constante evolución en sus procesos y en la calidad de sus productos con el fin de ser más competitivas en el mercado. Los factores comunes que afectan las operaciones de las Pymes son el capital humano, el capital de trabajo, la innovación tecnológica y el entorno empresarial. Además, la creciente competencia global obliga a las Pymes a adaptarse y cambiar para sobrevivir [15]. Dicho lo anterior, se encontró que uno de los mayores retos para estas empresas es encontrar un proceso de empaque por medio de un sistema semiautomático que sea rentable a comparación de sistemas en el mercado automatizados que tienen un valor económico elevado. Esto se debe a que las máquinas importadas de países de ultramar no sólo son costosas, sino también una inversión desigual [15].

El sistema manual mecánico, usualmente improvisado de forma casera en diferentes empresas por el alto costo en el mercado de los sistemas automáticos de empaque, consiste en el vertimiento de material o producto en una tolva para su respectivo empaque.



Figura 2.6: Sistema manual mecánico de empaque [20]

En este caso se observa cómo la tolva no posee un sistema de compuertas inferiores con la capacidad de bloquear o permitir el paso del material al saco, por lo que no se está controlando de manera precisa la dosificación en el saco y a su vez muestra cómo se desperdicia cierta parte del material.

Para el siguiente caso del sistema manual mecánico, se observa como el operario debe acercar el saco o contenedor del material a la parte inferior de la tolva, y luego, por medio de su pie acciona un mecanismo que abre y cierra la compuerta inferior de la tolva permitiendo la dosificación del material en el saco.



Figura 2.7: Tolva embolsadora casera [21]

El accionamiento manual por medio del pie disminuye en gran manera la precisión, ya que los sacos suelen pasarse o no alcanzar el peso que se ha establecido llenar, haciendo que el operario tenga una actividad adicional de agregar o sustraer material como se muestra en la figura 2.8.

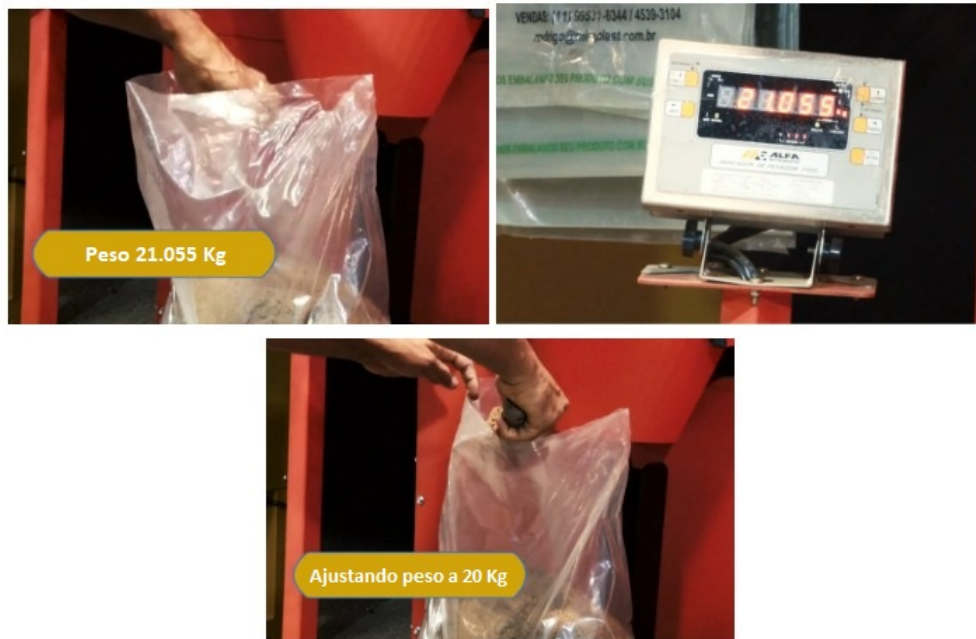


Figura 2.8: Ejemplo de sobrepeso en empaque [22]

En el ejemplo mostrado anteriormente se ha establecido llenar el saco con 20 kg del material, sin embargo, este marca al ser pesado con la báscula 21.055 kg, así que el operario procede a realizar un ajuste quitando material del saco por medio de una herramienta apropiada. Esta actividad, consecuencia de no poder controlar con mayor precisión el flujo del material, produce un aumento del tiempo en la línea de producción y un aumento del riesgo por lesión al operario al tener que agacharse más veces para realizarla.

Implementar un sistema semiautomático que facilite la labor del operador en el sistema de empaque y permita tener un control exacto en la medición del peso del producto es de suma importancia para la efectividad de los resultados del proceso en general. Tal como lo menciona Frank Gilbreth, la reducción de movimientos permite que la eficiencia de la actividad en una labor establecida y repetitiva sea mayor y así también se reduce el riesgo para la persona que lo efectúa. Implementarlo permitiría que el operador no deba reducir o adicionar manualmente la cantidad que se desea empaquetar y solo realizaría el movimiento para iniciar el proceso (colocación del empaque), la finalización (retiro y cierre del mismo) y supervisión de cada paso a ejecutar [23].

Las metodologías implementadas en los artículos analizados se rigen bajo la estructura de la concepción, diseño, implementación y finalmente la ejecución de un modelo a pequeña escala “I. Hacer un bosquejo del modelo - II. Elaboración del modelo CAD - III. Recolectar los componentes requeridos después de hacer la lista. - IV. Programación en Arduino Uno -V. ETAPA 1 -VI. ETAPA 2 -VII. Colocar el embudo debajo del utensilio de pesaje para que el material caiga directamente en él” [16].

Esta metodología sigue las pautas fundamentales para la obtención de los objetivos propuestos y se ha puesto en práctica en el desarrollo de proyectos a lo largo de la carrera de Ingeniería Electrónica dentro de la Pontificia Universidad Javeriana de Cali.

El proyecto desarrollado se enfocó en la precisión del llenado del producto, siendo un objetivo operacional importante. En los resultados observados previamente se encuentran discrepancias en la calidad de los resultados en términos de peso y sello de vacío. Estas irregularidades suelen presentarse debido a la calidad de la celda de carga y problemas menores de diseño con el titular añadiendo algunas inconsistencias cuando se trata de la calidad de pesaje y sellado [17].

Se encuentra en algunos de los artículos que el buen uso del sistema de empaque semiautomático debe ser estrictamente utilizado con las normas de seguridad establecidas propiamente por la empresa y que el producto ingresado no posea una diferencia de peso significativa entre los distintos artículos a empacar. En consecuencia, no seguir estas normas podría generar una ineficiente distribución de espacio en el contenedor al que se vaya a empacar, porque al llenarlo con artículos irregulares y posiblemente de diferentes tamaños se puede incrementar significativamente las probabilidades de una distribución sustancial no uniforme de la masa en un contenedor potencialmente problemático para la integridad estructural antes y durante el transporte [18].

En comparación a los artículos relacionados, este trabajo de grado plantea un enfoque más versátil que permita la implementación no sólo para la industria de productos alimenticios, sino que pueda generalizarse su uso para el empaque de cualquier tipo de producto que cumpla con las características de granulado. Se determina que utilizar un sistema para la apertura y cierre de las compuertas encargadas de dosificar el producto empacado es una ventaja que hace el proceso más preciso. Además de esto, se apunta a que la interacción sea sencilla para el operador por medio de una interfaz amigable dentro de su operación, lo cual no se presentaba en algunos de los artículos consultados.

# Diseño de la Solución

---

## 3.1. Requisitos del Proyecto

Se espera que este proyecto contribuya en los procesos de empaque que se llevan a cabo dentro de las Pymes colombianas, poniendo a su alcance la implementación de sistemas automatizados.

Para definir los requisitos a partir de un sistema real, se presentó el proyecto al ingeniero Carlos Lozano, quien cuenta con una empresa de producción de materiales granulares con las condiciones necesarias para ejecutar el proyecto. El Señor Lozano se mostró interesado en patrocinar el desarrollo teniendo en cuenta ciertas consideraciones que giran en torno a la capacidad económica y tecnológica de la empresa. Contando con él como principal implicado en el rol de cliente, se definieron los requisitos del sistema a partir de discusiones y talleres de trabajo. Como resultado se obtienen los siguientes requisitos:

- El sistema deberá lograr la dosificación en el menor tiempo posible, pero cumpliendo con el rango de error establecido.
- El sistema deberá contar con una compuerta que permita ser acoplable a otras tolvas.
- El sistema deberá hacer uso de la báscula brindada por usuario final.
- El sistema deberá tener una interfaz que permita al usuario establecer los comandos y poder observar las instrucciones del sistema.
- El sistema deberá mostrar por pantalla información como el conteo de sacos y la cantidad de material utilizado.
- El sistema deberá permitir al usuario establecer el peso deseado a llenar.
- El sistema deberá ser funcional para productos granulares.

### 3.1.1. Restricciones

- Las dimensiones de la compuerta estarán acotadas por un área de salida de la tolva de 12x12cm.
- El tipo de alimentación debe ser de 110V monofásica.
- El desarrollo del proyecto debe cumplir con el presupuesto establecido para materiales menor a COP \$ 2.000.000.

## 3.2. Diseño Sistema Mecánico

Para el diseño del sistema mecánico se tuvo en cuenta las sugerencias y opiniones a lo largo del proceso por medio de consultas realizadas expertos en el tema como el Magíster en ingeniería e ingeniero mecánico Juan David Contreras y el Magíster en ingeniería computacional y eléctrica e ingeniero electrónico Carlos Alberto Lozano, los cuales orientaron el proyecto de manera que se determinó un diseño del sistema mecánico factible. El sistema se dividió en dos partes, en el diseño mecánico de la compuerta y el diseño de apertura y cierre de la misma.

### 3.2.1. Diseño Mecánico de Compuerta

La primera idea para el diseño de la compuerta fue realizar un contenedor adicional a la tolva ya existente en la empresa, cuyo objetivo sería recibir la cantidad de material requerida por el usuario, de manera que, en esta sección añadida tuviera los sensores de peso y controlara la apertura de la tolva grande, y en la tolva pequeña residiera el material con la cantidad correcta para ser guardada en un saco, y finalmente abrir la segunda compuerta a través de un pedal.

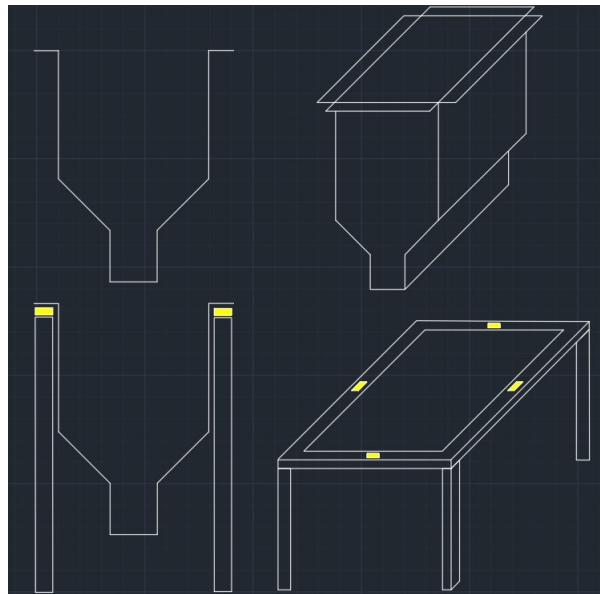


Figura 3.1: Diseño contenedor secundario a tolva. (Autoría propia)

En la figura 3.1 se muestra el diseño del contenedor desde diferentes ángulos, señalando la ubicación de las celdas de carga que sensan el peso del material. Al analizar la estructura de este diseño, se encontró que al añadir una sección más al sistema elevaría los costos sobrepasando el presupuesto, también, se necesitaría más espacio para la construcción de la estructura y al tener un montaje más invasivo y complejo no se adaptaría fácilmente a otros tipos de tolvas.

Considerando lo anterior, con el objetivo de encontrar un diseño que fuera acoplable a diferentes tipos de tolvas sin hacer demasiadas modificaciones se investigaron otros modelos de compuertas. En consecuencia, se eligió el modelo de las compuertas tipo SIMPLEX, debido a que en esta estructura se observa que el acople a la tolva resulta más simple que con los otros sistemas de compuerta, adicionalmente, su mecanismo de apertura y cierre permite una manipulación cómoda para un sistema de control.

Al investigar y analizar más a fondo la compuerta, se observó que en su orientación vertical esta soporta la presión y el peso del material almacenado en la tolva, por lo que se necesitaría más torque para ejercer el movimiento de apertura y cierre de la misma. Por otra parte, en su orientación inclinada, la presión y el peso también juegan un papel importante en la salida, puesto que cuando la tolva esté totalmente llena, la salida va a tener una distancia de caída del material al saco, pero esa distancia va a disminuir a medida que el contenedor vaya bajando su nivel, por lo que se requiere una plataforma de pesaje lo suficientemente grande para que abarque todo el rango de variación de esa distancia de caída, evitando que el material quede por fuera y así poder obtener un valor de peso confiable.

A pesar de los inconvenientes encontrados en el modelo SIMPLEX, surgió la idea de diseñar una compuerta basada en el modelo anterior pero con algunas modificaciones que permitan mejorar su rendimiento y operatividad. El diseño fue inspirado en el sistema que existe en los recipientes de mondadientes, donde una tapa es inmóvil y perforada, y encima de esta se encuentra una tapa movible que permite la salida de estos. Partiendo de esa idea, el tubo interior estaría con la tapa seccionada y el exterior con una tapa semicircular cubriría esa parte que le falta al tubo interior. Ver en la figura 3.3.

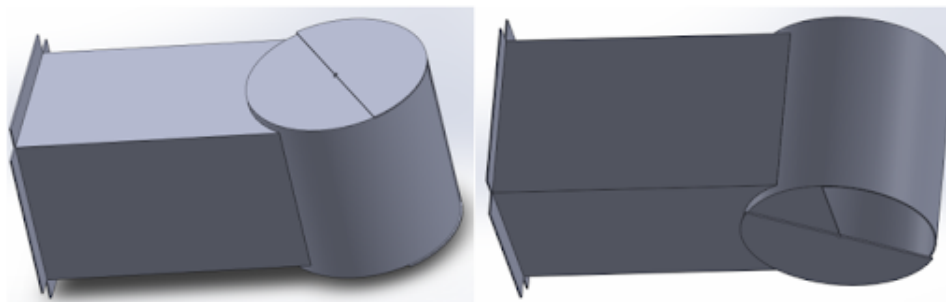


Figura 3.2: Diseño compuerta en SolidWorks. (Autoría propia)

El diseño propuesto es detallado en SolidWorks donde se analizó la compuerta para comprobar que el mecanismo permitiera la entrada y salida de granos. Después de analizar el modelo 3D, se identificaron dos grandes problemas: Primero, en el interior de la compuerta queda retenida una cantidad del material que fluye y puede llegar a afectar el funcionamiento de la compuerta por sedimentos o partículas de polvo que se van atascando por causa del material que queda en

ese lugar. Segundo, la compuerta no alcanza su máxima apertura, medio cilindro, sino un cuarto teniendo como consecuencia la reducción del área de salida y la disminución de la cantidad de material. Lo anterior se puede observar en la figura 3.3 en donde se resalta en azul la colisión de las partes que impiden la apertura máxima.

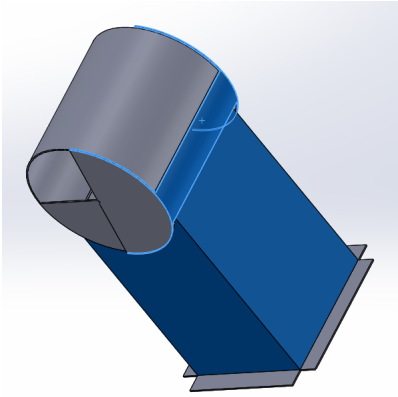


Figura 3.3: Caso colisión de compuerta. (Autoría propia)

Para darle solución a estas fallas de la compuerta cilíndrica mencionadas anteriormente se hizo un estudio y se modificó el diseño, de tal forma que los cilindros no estuvieran verticales, sino horizontales, y el orificio de salida se hiciera en el centro para que el material no se acumule en los lados, sino que por efectos de la gravedad este saliera. Ya con estas nuevas modificaciones se procedió a actualizar el diseño en SolidWorks y realizar un nuevo análisis donde el resultado fue el deseado. Ver el modelo final en la figura 3.4.

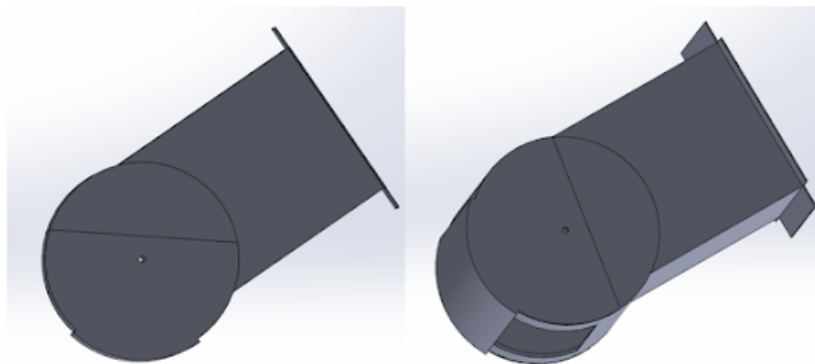


Figura 3.4: Diseño Compuerta SolidWorks. (Autoría propia)

### 3.2.2. Diseño de apertura y cierre de compuerta

En la investigación y planeación se encontraron tres mecanismos diferentes que en general cumplían con la tarea de realizar el trabajo mecánico con su respectiva adecuación de rotar la compuerta permitiendo o interrumpiendo el flujo del material, según fuera el caso. A continuación se analizan cada uno:

**Actuador lineal neumático:** Con este actuador y un sistema neumático se planeó implementar un mecanismo capaz de ejercer la apertura y cierre de la compuerta, no obstante, su rápido accionamiento no permite ejercer un control preciso sobre la posición y velocidad de la compuerta. Por otra parte, la implementación de un sistema neumático requiere una instrumentación compleja de tuberías, válvulas y compresor lo que aumentaría los costos de fabricación. Basado en estas justificaciones se descartó la alternativa de usar un actuador neumático como mecanismo de apertura y cierre de la compuerta.

**Actuador de Solenoide:** Con el actuador de solenoide se buscó reemplazar el pistón de manera que después de generar la apertura de la compuerta, ésta caería por gravedad y cortaría el flujo del material, pero no se asegura el cierre total de la compuerta ni tampoco se podría controlar la velocidad de cierre; así que se descartó.

**Motor eléctrico:** Se identificó que usar un motor eléctrico sería el actuador más adecuado al cumplir con las expectativas para el proyecto, ya que es el mecanismo que permite la mayor controlabilidad de posición y velocidad. Por consiguiente, se procede a desglosar los diferentes tipos de motores para decidir cuál brinda mejores resultados y cual se acopla mejor para la implementación.

Gracias a la investigación de los diferentes tipos de motores se presentan tres clases, el servomotor, el paso a paso y el motor DC; los cuales tienen diferentes características que dependiendo de su aplicación resaltan unos más otros. Seguidamente se presenta la tabla 3.1 que resume y compara las características más relevantes entre ellos.

	<b>Servomotor AC</b>	<b>Motor Paso a Paso</b>	<b>Motor con escobillas</b>
<b>Velocidad</b>	Alta velocidad de rotación	Menor velocidad	Alta velocidad de rotación
<b>Torque</b>	Torque constante	A mayor velocidad, menor torque	Torque bajo
<b>Precisión</b>	Rotación precisa con ángulo limitado	Menor precisión	Uso en aplicaciones que requieran altas RPM
<b>Controlabilidad</b>	Control de posición y velocidad realimentado	Control de posición y velocidad en lazo abierto	Control de velocidad en lazo abierto
<b>Costo</b>	Precio elevado respecto al presupuesto	Precio asequible respecto al presupuesto	Precio asequible respecto al presupuesto

Cuadro 3.1: Tabla de comparación entre los tipos de motores. (Autoría propia)

El Servomotor presenta cualidades que cumplen con los requerimientos necesarios para ejercer un efectivo control de posición, apertura y cierre de la compuerta, pues cuenta con buena velocidad de rotación, torque constante y una rotación precisa. No obstante, su alto costo y sus características sobredimensionan lo que el proyecto necesita y como conclusión se descarta.

Por otro lado, analizando el motor paso a paso se logró identificar que posee características que se aproximan a lo que puede otorgar un Servomotor, ya que a bajas velocidades cuenta con suficiente torque, y adicionalmente es el que tiene una mejor relación funcionalidad-precio de los tres tipos de motores analizados.

Al haber decidido que el motor adecuado es el motor paso a paso, se procede a realizar los cálculos para determinar el torque suficiente para girar la compuerta y la velocidad de giro, y de esta manera poder seleccionar el motor.

### 3.2.2.1. Toma de datos para selección de referencia del motor

#### Torque

Para calcular el torque necesario se hicieron pruebas con distintas masas a una distancia específica hasta encontrar el valor que cause que la compuerta se mueva. Las figuras 3.5, 3.6, 3.7 y 3.8 muestran la posición de la compuerta y su comportamiento respecto al peso ubicado.



Figura 3.5: Prueba de torque con masa de 200 g. (Autoría propia)



Figura 3.6: Prueba de torque con masa de 300 g. (Autoría propia)



Figura 3.7: Prueba de torque con masa de 400 g. (Autoría propia)



Figura 3.8: Prueba de torque con masa de 500 g. (Autoría propia)



Figura 3.9: Prueba de torque con masa de 700 g. (Autoría propia)

En la figura 3.9, con la masa de 700 g se observó que la compuerta empezaba a realizar el movimiento de apertura, no obstante, la fuerza ejercida no era la suficiente para desplazar la compuerta en su totalidad.



Figura 3.10: Prueba de torque con masa de 1 kg. (Autoría propia)

Como se ve ilustrado en la figura 3.10, la masa de 1kg ejerció la fuerza precisa para realizar el movimiento de apertura de manera completa, por ende, se escoge el valor de 1Kg para continuar con el cálculo del torque.

Después de ver el comportamiento con la masa de 1 Kg se procede a medir la distancia del eje de rotación de la compuerta hasta el punto donde se ejerce la fuerza, por medio de un calibrador digital. El procedimiento se muestra en la figura 3.11 y la distancia obtenida fue de 49.16 mm.



Figura 3.11: Procedimiento con el pie de rey. (Autoría propia)

Con los datos del peso y la distancia obtenidos en el experimento anterior, se calcula el valor del torque aplicando la ecuación 3.1 y realizando el siguiente procedimiento matemático.

$$\tau = F * d \quad (3.1)$$

$$Fuerza = F = masa * gravedad$$

$$masa = 1 \text{ kg}$$

$$Gravedad = 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$F = 1\text{kg} * 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$F = 9,8 \text{ N}$$

$$\text{Distancia} = d = 49,16 \text{ mm}$$

$$d = 0,04916 \text{ m}$$

Reemplazando en 3.1

$$\tau = 9,8N * 0,04916 \text{ m}$$

$$\tau = 0,411208 \text{ Nm}$$

$$\tau = 4,193 \text{ kgcm}$$

Se debe tener en cuenta que 3.1 solo es válido cuando la fuerza aplicada es perpendicular al radio de rotación.

## Velocidad

Para encontrar la velocidad necesaria se trabajó con dos variables, el ángulo recorrido al cerrar la compuerta y el tiempo en que hace ese recorrido; seguidamente se analiza cada una.

**Ángulo recorrido:** Con el transportador como herramienta de medición se procede a tomar el ángulo correspondiente desde el cierre total hasta la posición de máxima apertura, dando como resultado un ángulo de  $93^\circ$

**Tiempo del recorrido:** Se grabaron dos videos para determinar el tiempo que debería tardar en cerrarse la compuerta haciéndolo manualmente. En el primer video se trata de cerrarla lo más rápido posible, y en el otro, se muestra un cierre gradual de la compuerta. Luego, mediante la herramienta de análisis de video y modelación, Tracker, se establece el momento de inicio y finalización del cierre de la compuerta, para así obtener el tiempo recorrido en ambos videos.

Los tiempos obtenidos fueron los siguientes:

$$t_1 = 0,468 \text{ s} \tag{3.2}$$

$$t_2 = 1,902 \text{ s} \tag{3.3}$$

Finalmente, haciendo uso de 3.2, tiempo obtenido del experimento de cerrar la compuerta de forma manual lo más rápido posible, se calcula la velocidad suficiente que permita cerrar la compuerta en el menor tiempo:

$$\theta = 93^\circ \rightarrow 1,623 \text{ rad}$$

$$\text{Velocidad} = \nu = \frac{1,623 \text{ rad}}{0,468 \text{ s}}$$

$$\nu = 3,467 \text{ rad/s}$$

$$\nu = 33,107 \text{ rev/min}$$

$$\tau = 4,193 \text{ kg cm} \quad (3.4)$$

$$\nu = 33,107 \text{ RPM} \quad (3.5)$$

Una vez obtenido el torque en la ecuación 3.4 y la velocidad en la ecuación 3.5, se realiza la búsqueda del motor paso a paso que cuenta con dichas especificaciones. Posteriormente se muestran las características del motor elegido.

### Stepper motor NEMA 23 57HM76-2804

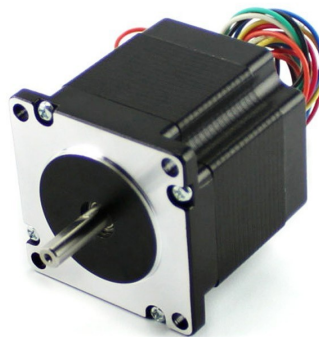


Figura 3.12: Motor paso a paso Nema 23 57HM76-2804 ; Tomado de <https://bit.ly/3s33sMS>

Sus características son las siguientes:

- Tamaño: NEMA 23
- Número de fases: 2

- Ángulo por paso:  $0.9^\circ$
- Voltaje: 3.2V
- Pasos por revolución: 400
- Consumo de corriente por fase: 2.8A
- Resistencia:  $1.15 \Omega$  por fase
- Torque: 18 kg-cm
- Inductancia: 5.6mH
- Clase de aislamiento (Insulation class): B
- Peso: 1.1kg
- Precio: COP \$197.540

### 3.2.2.2. Sistema de transmisión y reducción

Debido a la fuerza con la que sale el material por la compuerta, se encontró la necesidad de utilizar una reducción de 3 a 1 para garantizar el suficiente torque del motor y conseguir un cierre fluido de la compuerta sin que el material la obstruya. A continuación se presentan los componentes necesarios para la puesta en marcha del sistema.

Para transmitir la rotación del motor en movimiento de cierre y apertura de la compuerta se requiere la selección de una correa y para ello hay que tener en cuenta la tensión que va a soportar. Por consiguiente, se procede a calcular dicha tensión haciendo uso de la ecuación 3.6.

#### Tensión de trabajo de la correa

$$\tau = 4,193 \text{ kgcm}$$

$$\text{Radio polea grande} = 2,2 \text{ cm}$$

$$\text{Tensión de trabajo} = \frac{\text{Torque}}{\text{radio polea grande}} \quad (3.6)$$

$$\text{Tensión de trabajo} = \frac{4,193 \text{ kgcm}}{2,2 \text{ cm}}$$

$$\text{Tensión de trabajo} = 1,905 \text{ kg}$$

$$Tensión\ de\ trabajo = 18,681\ N$$

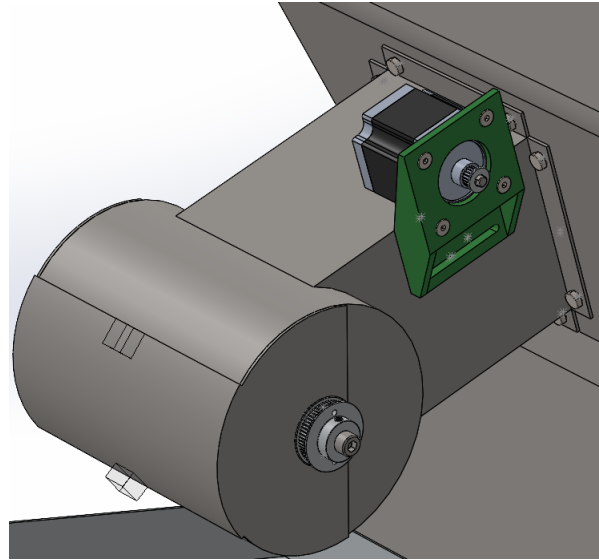


Figura 3.13: Diseño sistema de transmisión y reducción

### Longitud necesaria

$$Radio\ polea\ grande = 2,2\ cm$$

$$Radio\ polea\ pequeña = 0,8\ cm$$

$$Distancia\ entre\ ejes = 17\ cm$$

$$Longitud\ de\ la\ correa = 17cm * 2 + \frac{2\pi * 0,8cm}{2} + \frac{2\pi * 2,2cm}{2}$$

$$Longitud\ de\ la\ correa = 43,425\ cm$$

Con los datos obtenidos se analizan las características de diferentes correas dentadas y se encuentra que las correas 2GT tiene una tensión de trabajo de 27 N cumpliendo con la tensión de 18.681 N que se calculó. La correa dentada GT2 (2GT 6 mm) de sincronización está hecha de neopreno y tiene cuerdas de fibra de vidrio como refuerzo. Con respecto a la longitud de la correa, se escogió la referencia 2GT de 400 mm que es la que más se acerca a la longitud necesaria. A continuación se presentan las características específicas de esta:

Correa dist cerrada 400mm 2GT o GT2 6mm



Figura 3.14: Correa 2GT de 6mm ; Tomado de <https://bit.ly/3m1AonU>

#### Características:

- Correa dentada con dientes de un solo lado.
- Material: Neopreno, Nylon (recubrimiento), fibra de vidrio (refuerza).
- Ancho: 6 mm
- Temperatura de trabajo:  $-34^{\circ}\text{C}$  a  $+85^{\circ}\text{C}$
- Punto de quiebre: 516N
- Tensión de trabajo: 27N
- Precio : COP \$ 4.165

Para la selección de las poleas se escoge las que se adaptan a la correa dentada 2GT siendo estas de 20 dientes y la otra de 60 dientes, obteniendo así una relación 3 a 1, lo cual permite aumentar el torque y la precisión que ofrece el motor por la razón de evitar posibles estancamientos.

**Polea Gt2 20 dientes Correa 6mm Nema 23**



Figura 3.15: Polea Gt2 20 dientes Correa 6mm Nema 23; Tomado de <https://bit.ly/2VEfLDj>

**Características:**

- Polea de 20 Dientes
- Paso de 2mm
- Eje 6.35mm
- Para correa de 6mm
- Precio COP \$13.500

**Polea Correa Gt2 60 Dientes Eje 8mm Aluminio**



Figura 3.16: Polea Correa Gt2 60 Dientes Eje 8mm Aluminio; Tomado de <https://bit.ly/3xAGpu1>

**Características:**

- Número de modelo: 2GT
- Paso de 2mm
- Número de dientes: 60
- Para correa de 6mm
- Material: aleación de aluminio.
- Precio: COP\$18.000

**3.3. Diseño del sistema electrónico**

El diseño del sistema electrónico presenta en etapas: la recolección de datos del sensor de peso, el procesamiento de los datos, la interacción con el usuario, la alimentación del circuito y el control del motor a través de las señales que se le envían al driver. En la figura 3.17 se presenta el diagrama general del sistema electrónico separado en etapas.

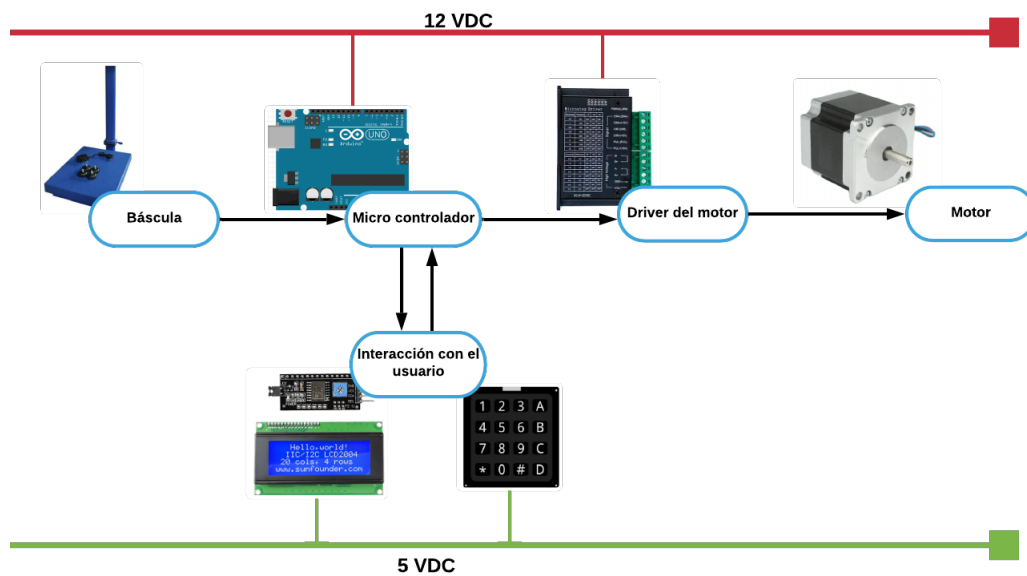


Figura 3.17: Diagrama general del sistema electrónico (Autoría propia).

### 3.3.1. Procesamiento

En la etapa de procesamiento se realiza la obtención de datos provenientes de la báscula para luego interpretarlos y emitir señales de control al driver del motor permitiendo la ejecución de las instrucciones programadas. Asimismo, la interacción con el usuario se realizará a través de una botonera en dónde se ingresaría el peso deseado, y en el display se observarían las estadísticas y el peso alcanzado en cada momento por la báscula. Para lograr lo anterior se precisa un microcontrolador con las siguientes características:

- Un pin salida digital para generar los pulsos que mueven el motor.
- Un pin salida digital para la dirección del motor.
- Que soporte comunicación I2C para el visualizador.
- Ocho pines para las entradas digitales de la botonera.
- Dos pines para el botón de emergencia.
- Dos entradas analógicas para recibir la información de la celda de carga.
- Dos entradas digitales para los dos finales de carrera.

#### 3.3.1.1. Alternativas para el procesamiento

##### STM32 Arm Cortex M3 Stm32f103c8t6 Blue Pill

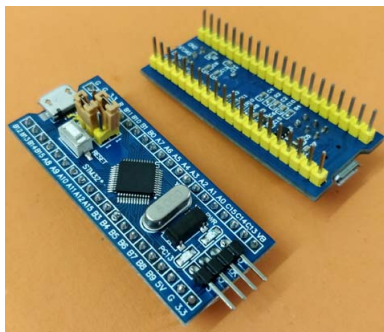


Figura 3.18: placa STM32 blue pill; Tomado de <https://bit.ly/3jNsDPQ>

La placa STM32 que se muestra en la figura 3.17, también conocida como Blue Pill, es una placa de desarrollo para el microcontrolador ARM Cortex M3. El hardware es de código abierto y puede programarse con el IDE de Arduino. Aparte del microcontrolador, la placa también tiene dos osciladores de cristal, uno es un cristal de 8MHz y el otro es un cristal de 32 KHz, que se puede usar para impulsar el RTC (reloj de tiempo real) interno. Debido a esto, la MCU puede funcionar en modo de suspensión, lo que la hace ideal para aplicaciones que funcionan con baterías.

**Características:**

- Consumo (multimodo): 150mA - 6,5mA - 400uA
- IO: 26 pin GPIO
- Tamaño: 53 x 22 mm
- Reloj interno
- Memoria: 64 ó 128 KB, 20 KB de SRAM
- Rangos de trabajo: -65°C a 150°C.
- Precio: COP \$20.000

**Teensy**

Figura 3.19: Placa Teensy 3.1 ; Tomado de <https://bit.ly/3fRpWf5>

El Teensy 3.1 tiene un microprocesador ARM Cortex de 32 bits integrado para que pueda hacer aplicaciones un poco más robustas. Este microprocesador cuenta con un gestor de arranque para que el programa pueda utilizar la conexión USB; no necesita un programador externo. Teensy puede programarse utilizando C o puede instalar el plug-in Teensyduino para el IDE de Arduino y escribir programas Arduino para Teensy.

**Características:**

- Procesador: 32 bit ARM Cortex-M4 72 MHz CPU (MK20DX256VLH7)
- Memoria: 256K, 64K RAM, 2K EEPROM
- 14 pines analógicos de alta resolución (13 bits usables y 16 bit en hardware)
- 34 pines digitales I/O (10 son compartidos con los analógicos)
- DMA de 16 canales

- 12 salidas PWM
- DMA dedicado para USB
- 3 puertos UARTs (serie)
- Protocolos soportados: SPI, I2C, I2S, modulador IR
- I2S (para interfaz de audio de alta calidad)
- Soporta RTC añadiendo un cristal de 32.768 KHz y batería externa.
- 4 canales DMA para uso general (separados del USB)
- Dimensiones: 35x18 mm
- Consumo (multimodo):100 mA - 10.7mA - 0.04mA
- Reloj interno.
- Memoria: 64Kb RAM
- Precio: COP \$70.000

### Arduino Uno

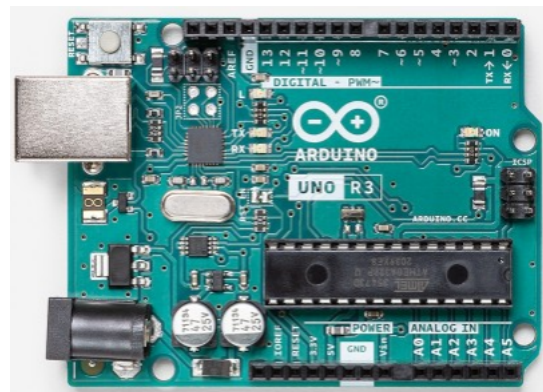


Figura 3.20: Microcontrolador Arduino Uno;Tomado de <https://store.Arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>.

El Arduino Uno es una placa de microcontrolador de código abierto basado en el microchip ATmega328P. La placa está equipada con conjuntos de pines de I/O digitales y analógicas que pueden conectarse a varias placas de expansión y otros circuitos. Esta placa tiene 14 pines digitales, 6 pines analógicos y programables con el Arduino IDE a través de un cable USB tipo B. Puede ser alimentado por el cable USB o por una batería externa de 9 voltios, aunque acepta voltajes entre 7 y 20 voltios.

### Características:

- Microcontrolador: ATmega328P.
- Velocidad de reloj: 16 MHz.
- Voltaje de trabajo: 5V.
- Voltaje de entrada: 7,5 a 12 voltios.
- Pinout: 14 pines digitales (6 PWM) y 6 pines analógicos.
- 1 puerto serie por hardware.
- Memoria: 32KB Flash (0,5 para bootloader), 2KB RAM y 1KB Eeprom
- Precio: COP \$ 80.000

Finalmente, se establece que el Arduino Uno cumple con todos los requisitos mencionados en la sección 3.2.1, pues cuenta con la cantidad de pines digitales y analógicos necesarios, también posee la comunicación I2C. Adicionalmente, Arduino cuenta con una amplia documentación que permite realizar la programación a partir de las librerías disponibles, reduciendo los costos de desarrollo y la complejidad del software. También es importante que esta tarjeta de desarrollo trabaje con señales de control de 5V, por lo que no es necesario utilizar conversores de nivel lógico a diferencia de las otras opciones.

### 3.3.2. Driver del motor

#### Driver motor paso a paso DMA860H



Figura 3.21: Driver del motor DMA860H ; Tomado de <https://bit.ly/3DF3Syn>.

El DM860H es un driver de motores paso a paso de alta tensión, funciona a través de tecnología DSP lo que lo convierte en una solución rápida y versátil para el manejo de motores paso a paso, este controlador trae integrada tecnología anti-resonancia y control de corriente hasta 7.2 A para cada motor. Además, durante su funcionamiento la operación es suave precisa pues cuenta hasta 51200 pasos/revolución, y con muy bajo ruido.

#### Características:

- Voltaje de Operación: 18 - 80 VDC.
- Corriente Máx : 7,2 A, Resolución: 0,1 A.
- Motor paso a paso de 2 fases, 4,6,8 líneas.
- Frecuencia de operación: 200 KHz.
- Precio: COP \$326.800

#### Driver motor paso a paso TB6560

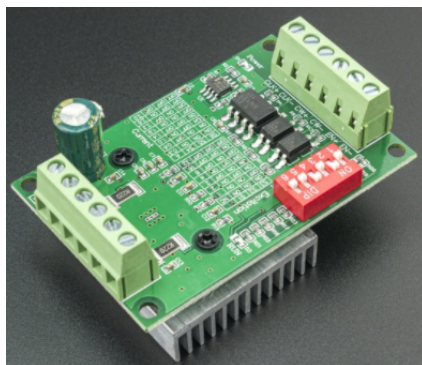


Figura 3.22: Driver del motor TB6560 ; Tomado de <https://bit.ly/3BzjhhN>

Este controlador de motores paso a paso es ajustable, permitiendo satisfacer la necesidad del usuario dependiendo de la aplicación a llevar a cabo, es de un uso sencillo y usa acoplamiento óptico de alta velocidad para garantizar que esta no influya en pérdidas en el control de pasos que el motor proporciona. El driver tiene impreso sobre la placa las instrucciones de uso para llevar a cabo conexiones de forma correcta. También, trae consigo un disipador de calor el cual permite que el módulo se mantenga a una temperatura adecuada y el funcionamiento del mismo no se vea afectado, pero no cuenta con un circuito de protección por lo que se debe tener mucho cuidado al usar, pues de lo contrario el chip TB6560 podría llegar a quemarse.

**Características:**

- Voltaje de Operación: 10 – 35 Vdc
- Corriente Máx : 3 A
- Control de ajuste de Corriente
- Ajuste de paso: 1, 1/2, 1/8 y 1/16
- Frecuencia de operación: 16KHz.
- Compatible con shield match3 y arduino (GRBL)
- Precio: COP \$33.000

**TB6600 Controlador Driver Motor a pasos 9-42 VDC - 4A**

Figura 3.23: Driver del motor TB6600 ; Tomado de <https://bit.ly/2VJ2Ccj>

Este controlador de motores paso a paso bipolares está basado en el chip TB6600 y permite controlar motores de hasta 3.5A por canal (4A max). Adicionalmente, tiene limitación de corriente ajustable, protección contra sobre corriente y 7 resoluciones diferentes de microstepping. El TB6600 es un controlador profesional para motores paso a paso bipolares. Es compatible con microcontroladores como Arduino y otros que puedan generar señales de pulsos de 5V. Soporta una gran variedad de voltajes de entrada de 9 a 42V DC. Es capaz de proporcionar hasta 3.5A de corriente de forma continuada y 4A de pico por cortos periodos de tiempo, de esta forma puede controlar una gran variedad de motores. También puede configurarse para microstepping mediante unos microinterruptores incluidos. Hay 7 valores posibles: 1, 2 / A, 2 / B, 4, 8, 16 y 32 además de 8 posiciones para el ajuste de corriente: 0.5A, 1A, 1.5A, 2A, 2.5A, 2.8A, 3.0A y 3.5A. Todas las señales están protegidas internamente mediante optoacopladores de alta velocidad para evitar interferencias y

mejorar el aislamiento del circuito de control. Viene ensamblado en una caja de metal para una mejor refrigeración. Este se controla mediante 2 señales (DIR y PUL), que significan dirección y pulso respectivamente, las cuales son enviadas por el microcontrolador.

#### Características:

- Modelo: TB6600
- Voltaje de funcionamiento: DC 9V - 40V.
- Corriente nominal máxima: 3.5A , 4A pico.
- Ajustes para corriente: 8
- Ajustes para resolución de pasos: 8 (NC, 1, 2/A, 2/B, 4, 8, 16, 32)
- Frecuencia de operación: 20KHz.
- Carcasa de protección metálica.
- disipador de calor de aluminio.
- Precio: COP \$68.900

Finalmente, después de analizar las alternativas presentadas para el controlador del motor, se evidencia que el DM860H es un controlador muy completo, sin embargo, su precio es demasiado elevado para el presupuesto del proyecto. Ahora bien, los drivers TB6560 y TB6600 tienen características similares, pero se decidió usar el TB6600 ya que es capaz de proporcionar más corriente que el TB6560 (3.5A de corriente de forma continua y 4A de pico por cortos periodos de tiempo), también se resalta que es el que mayor frecuencia posee y cuenta con un case protector del circuito, lo cual para el entorno de la industria es preferible esta característica adicional.

#### 3.3.3. Alimentación

La red eléctrica disponible es de 110 VAC, pero los componentes necesitan Voltaje DC, por tanto, se requiere de fuentes DC y reguladores. El voltaje de trabajo del motor y del Arduino es de 12V, y, el display, el Hx711 y los finales de carrera se alimentan de 5V. A raíz de que el motor es un elemento que demanda corriente de forma no continua, se dispuso de una fuente independiente de 12V 5A teniendo en cuenta que el motor consume un máximo de 4A, y para los demás componentes se usó una fuente de 12V 3A que a su vez se deriva en 2 salidas, la primera es para el Arduino y la segunda va a un regulador de voltaje a 5V que alimenta a los componentes restantes. Seguidamente, se presenta el regulador de 5V, el Módulo X16009

### Módulo XL6009 Convertidor Dc-Dc Step Up Elevador de Tensión



Figura 3.24: Regulador de 5VDC ; Tomado de <https://bit.ly/3xGY82W>

El módulo regulador de tensión DC-DC que se ve en la figura 3.24 está basado en el chip XL6009. Para asegurar niveles de tensión a la salida entre 5V 35V, el voltaje de entrada debe oscilar entre 3V 32V, estos valores son ajustables y regulables. Estos módulos de potencia se caracterizan por trabajar a muy altos rangos de frecuencia, y para este módulo la frecuencia de operación es de 400KHz. El módulo proporciona un nivel de potencia máximo de 30W a la salida.

#### Características:

- Voltaje de entrada 3V - 32V
- Voltaje de salida (ajustable) 5V - 35V
- Corriente de entrada 4A (máximo)-18 mA (sin carga)
- Eficiencia -90 %
- Frecuencia de operación 400KHz
- Rizado de salida 50mV
- Potencia -30W
- Regulación de carga  $\pm 0.5\%$
- Regulación de Voltaje  $\pm 0.5\%$
- Temperatura de operación -40°C-85°C
- Precio: COP \$5.600

### 3.3.4. Interacción con el usuario

En la etapa de interacción con el usuario se determinó que se necesitaba un teclado que posibilite ingresar el peso a llenar y algunos comandos para utilizar el sistema de una manera cómoda complementándose con una ayuda visual por medio de un display LCD. En consecuencia, se utilizaron los siguientes componentes:

#### Teclado Matriz 4x4 Matricial Botones Plásticos



Figura 3.25: Teclado matricial 4x4; Tomado de <https://bit.ly/37zPkBC>

El teclado matricial 4x4 que se observa en la figura 3.25, ofrece números 0-9, letras A-D y símbolos estándar de estrella (\*) y hash (#), permitiendo el ingreso de información de manera cómoda.

#### Características:

- Matriz 4x4
- Botones del 0-9 # \* A-D
- Fácil comunicación con cualquier microcontrolador
- Se conecta por medio de 8 entradas digitales
- Precio: COP \$16.000

**DISPLAY LCD 20x4 FONDO AZUL INTERFAZ SERIAL (I2C) SOLDADO.**

Figura 3.26: Display LCD 20x4 con interfaz serial (I2C); Tomado de <https://bit.ly/2X9AQ9m>

Este display LCD cuenta con un tamaño adecuado para brindar una buena visualización, y viene con el adaptador para la comunicación I2C lo cual reduce el número de pines que se necesitan del display de 16 pines a tan solo 4 pines.

**Características:**

- Dirección I2C: 0X3F - 0x20 - 0x27
- Retro iluminación: Azul con blanco carbón
- Voltaje de alimentación: 5V
- Interfaz: I2C / TWI x1
- Contraste ajustable con potenciómetro interno.
- Tamaño: 82mm x 35mm x 18mm
- Ángulo de visión: 6H
- Precio: COP \$30.000

**3.3.5. Selección del sistema de pesaje**

En la búsqueda del sistema de pesaje para el desarrollo de este trabajo de grado, se encontraron dos alternativas de celdas de carga que permiten obtener la medición de peso en el rango que se necesita (30 a 60 kg). Estas se presentan a continuación.

### Celdas de carga de 50 kg

Esta celda de carga permite pesar hasta 50 kg, pero se pueden realizar conexiones que combinen de 2 a 4 celdas, consiguiendo aumentar su rango de medida de 100 a 200 kg. En la figura 3.27 se muestra la celda de carga para 50 kg y se describen sus especificaciones técnicas.



Figura 3.27: Celda de carga para 50 kg ; Tomado de <https://bit.ly/3AvicHq>

La celda de carga resistiva con una capacidad de 50 kg es ideal para poder medir variaciones sobre presión en una superficie. Es un sensor que se utiliza para convertir una fuerza en una señal eléctrica, así que el peso de un objeto corresponde a un determinado voltaje.

#### Especificaciones técnicas:

- Voltaje de operación: 5V-10V
- Capacidad: <50 kg
- Sensibilidad de salida:  $1.0 \pm 0.1 \text{ mv} / \text{v}$
- No linealidad: 0,03 % FS
- Repetibilidad: 0,03 % FS
- Histéresis: 0.03 % FS
- Resistencia de entrada:  $1000 \Omega \pm 20$
- Resistencia de salida:  $1000 \Omega \pm 20$
- Temperatura de funcionamiento: 0 – 50°C
- Precio: COP \$ 9.000

Para la implementación de esta alternativa es necesario tener una base completamente plana que sirva como superficie donde reposen los 4 puntos de las celdas de carga, y además, se necesita otra lámina suficientemente gruesa que soporte el peso sin que se deforme. En consecuencia, la implementación significa un costo elevado y mayor grado de complejidad para acoplar.

### Celda de carga de 300 kg

La celda de carga de 300 kg contenida en una báscula posibilita reutilizar su estructura como sistema de pesaje para el trabajo de grado. La misma cuenta con las siguientes características y se muestra en la figura 3.28.

### Báscula balanza plataforma de piso 300 Kg 40\*50 Cm - Azul



Figura 3.28: Báscula balanza plataforma de piso; Tomado de <https://bit.ly/3fWrODd>

### Especificaciones técnicas:

- Marca TEK.
- Cuatro memorias directas
- Plataforma de 40 x 50 cm. en Alfajor
- Capacidad = 300kg
- Precio COP \$ 299.700
- Color AZUL.

La celda de carga de 300 kg funciona al ubicar un peso sobre ella produciendo una deformación en la mitad, generando un cambio de la resistencia que se lee por medio de cuatro cables que vienen desde la celda. Sin embargo, este cambio es demasiado sensible y tiene demasiadas variaciones haciendo que los datos que se obtienen sean complejos de utilizar para lograr establecer una medición de peso puntual, y, por ende, se hace uso del módulo Hx711.

El sistema para pesaje a utilizar es el de la báscula debido a que al precio es menor y su puesta en funcionamiento es menos compleja porque se puede utilizar la estructura y la celda de carga para 300 kg de la báscula, evitando así menores errores en la medición.

### Módulo Hx711

Para la lectura del peso se escogió el módulo Hx711 que cuenta con un puente de wheatstone que transforma la variación resistiva de la celda de carga en una variación de voltaje que puede ser leída con facilidad. En adición, cuenta con un ADC (convertidor análogo digital) de 24 bits que, en comparación con los ADCs integrados en los microcontroladores, admite una mayor cantidad de niveles, mejorando la precisión en la lectura.

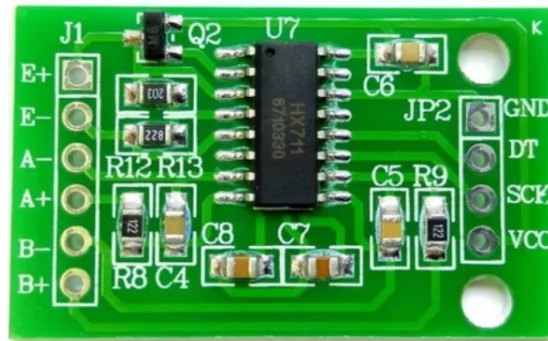


Figura 3.29: Módulo Hx71 ;Tomado de <https://bit.ly/3CG9Oa7>

Este modulo se encarga de acondicionar y calibrar las señales de las celdas de carga para enviarlas al microcontrolador en un formato digital.

#### Características:

- Voltaje diferencias de entrada=  $\pm 40$  mV (tensión de entrada diferencial a Full escala es de  $\pm 40$  mV)
- Exactitud de los datos= 24 bits ( ADC de 24 bits)
- Frecuencia de Muestreo= 80 Hz
- Voltaje de funcionamiento= 5V DC
- Corriente de funcionamiento=  $<10$  mA
- Tamaño= 38mm x 21mm x 10mm
- Precio: COP \$7.000

# Implementación

---

Una vez seleccionados los componentes que se adaptan al proyecto, se procede a realizar la implementación del sistema, en donde se desarrolla todo el montaje, calibración y programación. A lo largo de este capítulo se presenta de manera explícita en tres etapas; el sistema mecánico, el sistema electrónico y el software.

## 4.1. Implementación del sistema mecánico

En el sistema mecánico se presenta el proceso de montaje de la compuerta como también su respectiva adaptación para generar el movimiento de cierre y apertura de manera fluida. Para el desarrollo del sistema mecánico se tuvo el asesoramiento y apoyo del laboratorista del CAP de la Pontificia Universidad Javeriana Cali.

Como punto de partida, haciendo uso del diseño de la compuerta presentado en el capítulo anterior, se recurre a un centro de taller y soldadura, donde con los planos y el asesoramiento del empleado se estableció fabricar la compuerta con lámina de hierro de 2mm de espesor. En la figura se observa el producto entregado.

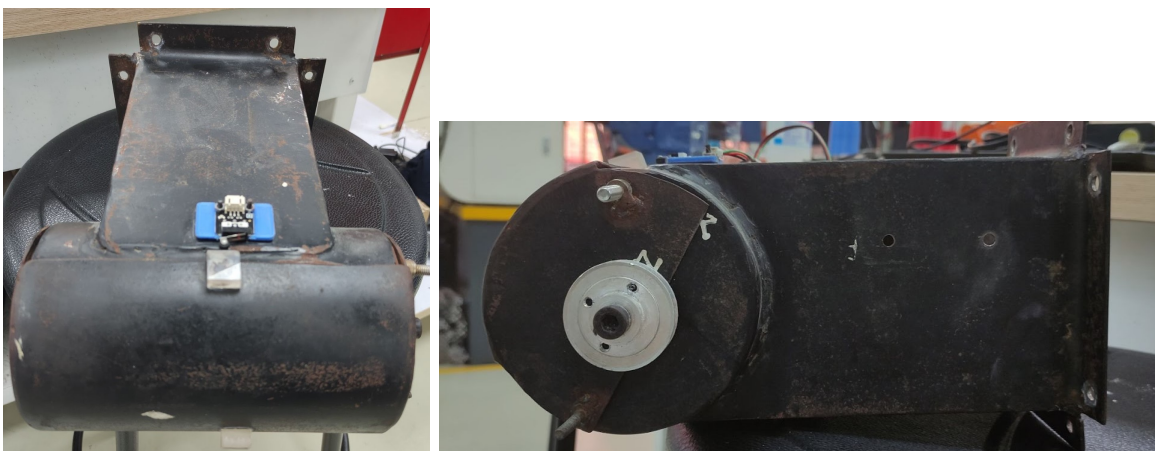


Figura 4.1: Compuerta hecha con lámina de hierro de 2 mm

### 4.1.1. Implementación de la compuerta

A partir de la compuerta fabricada, se realizan diferentes implementaciones que permiten corregir detalles y mejorar el funcionamiento de esta.

#### Acople de tolva

Para poner en marcha el sistema se necesitó un mecanismo (tolva pequeña) que simula el comportamiento de una tolva de dimensiones normales. Esto con el fin de acoplar la compuerta y agregar el material a llenar para demostrar que el sistema funciona. Esta tolva se diseñó en 3D como se muestra en la figura 4.2 y se realiza con el mismo material de la compuerta en el centro de taller y soldadura, obteniendo así el acople de la tolva que se observa en la figura 4.3.

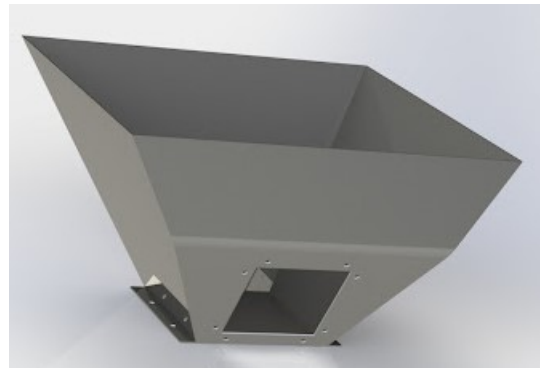


Figura 4.2: Diseño 3D del acople de tolva (Autoría propia)



Figura 4.3: Tolva hecha con lámina de hierro

## Soporte

Por otro lado, un detalle era que la compuerta necesitaba tener la altura adecuada para poder realizar el llenado de los sacos, así que se implementa un soporte de 4 apoyos para añadir comodidad y permitir el correcto funcionamiento de la compuerta a la hora de llenar los sacos. Esta se ubica como base para la tolva, fijándose con tuercas sobre la mesa metálica aumentando la altura de la compuerta respecto al suelo, con la finalidad de tener el espacio necesario para llenar sacos de hasta 60kg y darle estabilidad a la tolva. Se presenta la tolva instalada en el soporte en la figura 4.4.



Figura 4.4: Soporte de 4 apoyos implementado

## Bujes

Para el eje de rotación de la compuerta, el cual permite que el movimiento de apertura y cierre sea suave y sin fricción, se diseñó en 3D un buje con la herramienta SolidWorks como se observa en la figura 4.5. Para implementar los dos bujes, se tomó una varilla de media pulgada de material de bronce y se les dio la forma previamente diseñada por medio de un torno, consiguiendo así las piezas que se muestran en la figura 4.6 .

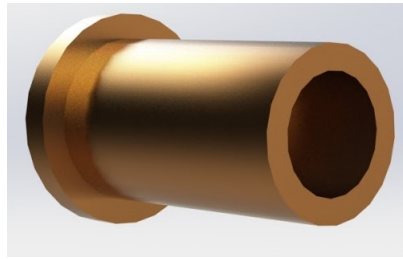


Figura 4.5: Diseño 3D del buje



Figura 4.6: Piezas terminadas

Se procede a instalar los dos bujes en ambos lados del eje de rotación de la compuerta, permitiendo que el movimiento de apertura y cierre sea suave y sin atascamientos. En la figura 4.7 se puede observar la compuerta con sus bujes instalados.

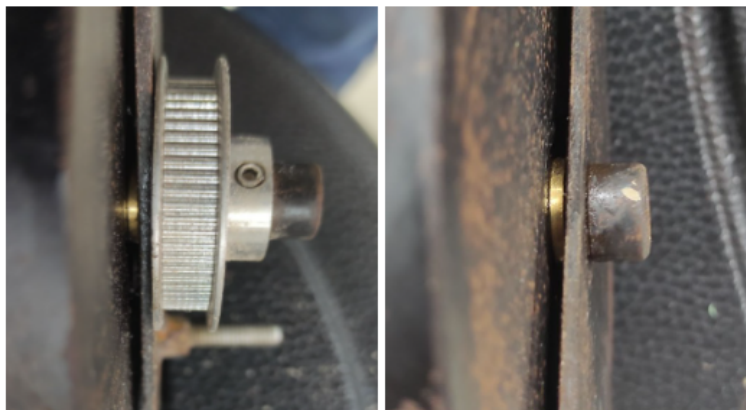


Figura 4.7: Compuerta con los bujes instalados

### 4.1.2. Implementación del cierre y apertura de la compuerta

Después de desarrollar las adecuaciones para la compuerta, se procede a realizar la implementación de la base del motor, las poleas y la correa. Los cuales permiten que la compuerta pueda ejercer los movimientos de cierre y apertura.

#### Diseño e instalación de la base del motor

Para acoplar el motor en la compuerta, se realizó un diseño en SolidWorks que tiene en cuenta las dimensiones del motor y posee unas ranuras en su parte inferior; Ver figura 4.8, que permiten desplazar la base con la finalidad de tensionar las correas y después ajustar. Con el modelo 3D se realizó una impresión 3D en PLA y se acopló el motor a la base y asegurando por medio de tornillos como se muestra en la figura 4.9.

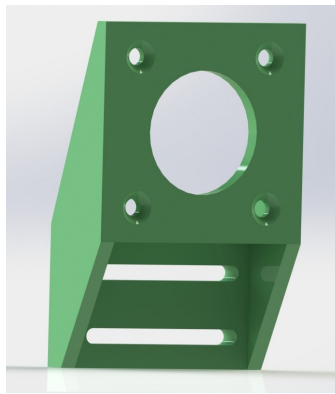


Figura 4.8: Diseño 3D de la base del motor (Autoría propia)

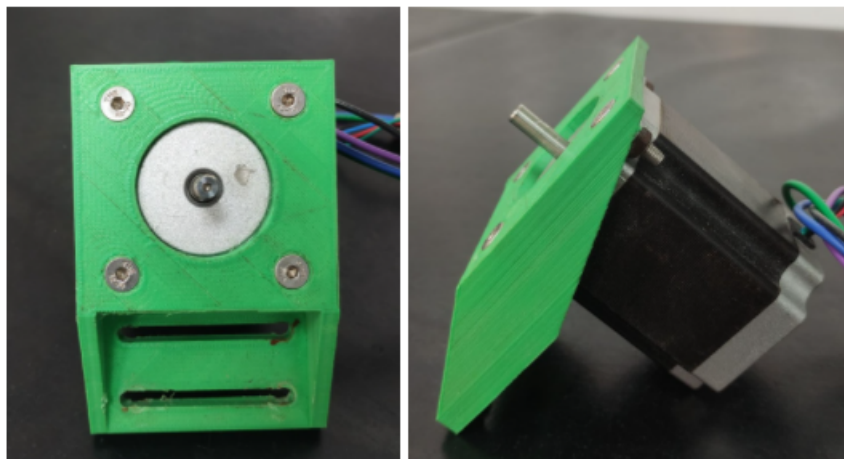


Figura 4.9: Motor instalado en la base diseñada

### Instalación de las poleas

Para la instalación de la polea de la puerta se hace uso de prisioneros ajustándose a la compuerta y para la polea del motor se utilizó un prisionero para adecuarlo de tal manera que quede fija como se muestra en la figura 4.10.



Figura 4.10: Motor instalado en la base diseñada

### Instalación de la correa

Posteriormente a la instalación de las poleas y de la base del motor, se utiliza la correa mencionada en el capítulo de diseño para transferir el movimiento del motor a la compuerta. La correa se tensiona por medio del desplazamiento de la base del motor permitiendo un mejor agarre entre los dientes de la correa con los dientes de las poleas. Teniendo como resultado lo que se observa en la figura 4.11.

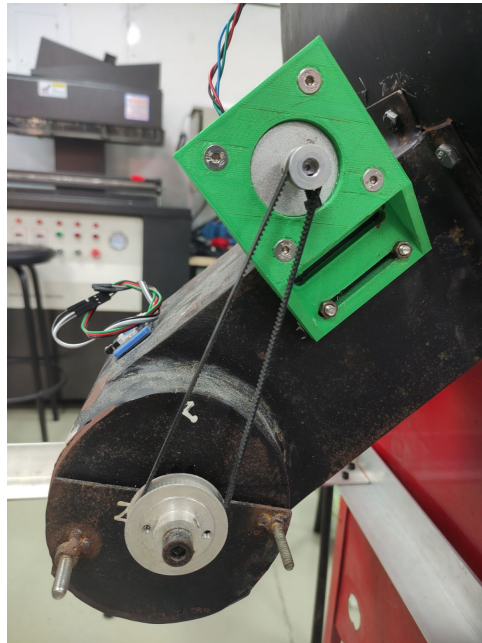


Figura 4.11: Correa instalada en las poleas

### Diseño 3D y resultado de la implementación del sistema mecánico

Finalmente, al ensamblar todas las partes mecánicas mencionadas anteriormente, la figura 4.12 presenta el diseño en 3D realizado en solidWorks de todo el sistema mecánico y en la figura 4.13 se muestra el sistema mecánico con todas las implementaciones mencionadas anteriormente.

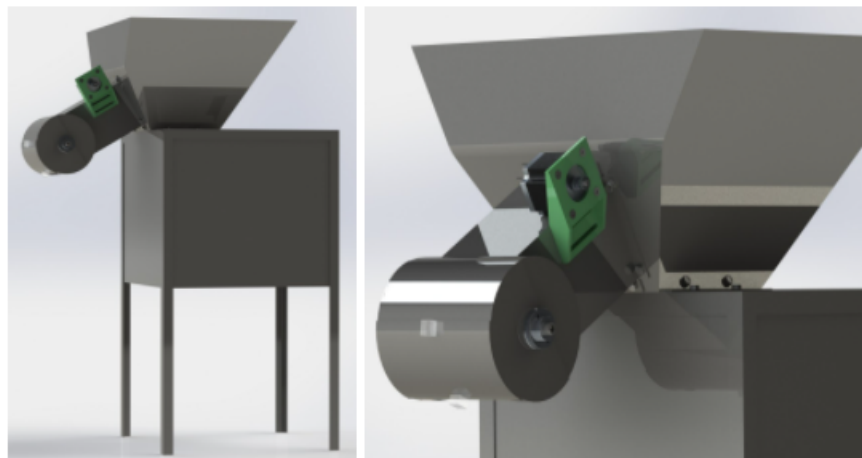


Figura 4.12: Diseño 3D del sistema mecánico (Autoría propia)



Figura 4.13: Sistema mecánico completo

## 4.2. Implementación del sistema electrónico

Después de tener el sistema mecánico instalado, se continúa a realizar las conexiones e implementación de los diferentes componentes electrónicos que permiten el control, procesamiento de datos e interacción con el usuario.

### Motor y Driver

Para implementar el motor paso a paso Stepper motor NEMA 23 JK57HM76-2804 se necesita realizar las respectivas conexiones con el controlador. Haciendo uso del driver, mencionado en el capítulo tres, se envían dos señales digitales de los pines 12 y 13 llamados DIR y PUL, respectivamente, desde el Arduino hasta el controlador, con el objetivo de controlar la dirección y el número de pulsos o pasos que deberá realizar el motor. A su vez del driver se conectan los puntos A+ A- B+ B- al motor, los cuales se encargan de suministrar la corriente. Y, por último, la alimentación del controlador se realiza enviando el pin GND a tierra y suministrando 12 voltios de corriente directa al pin de VCC.

### Conexiones

Ahora, se muestran las respectivas conexiones entre el motor, el controlador Arduino y su alimentación en la figura 4.14.

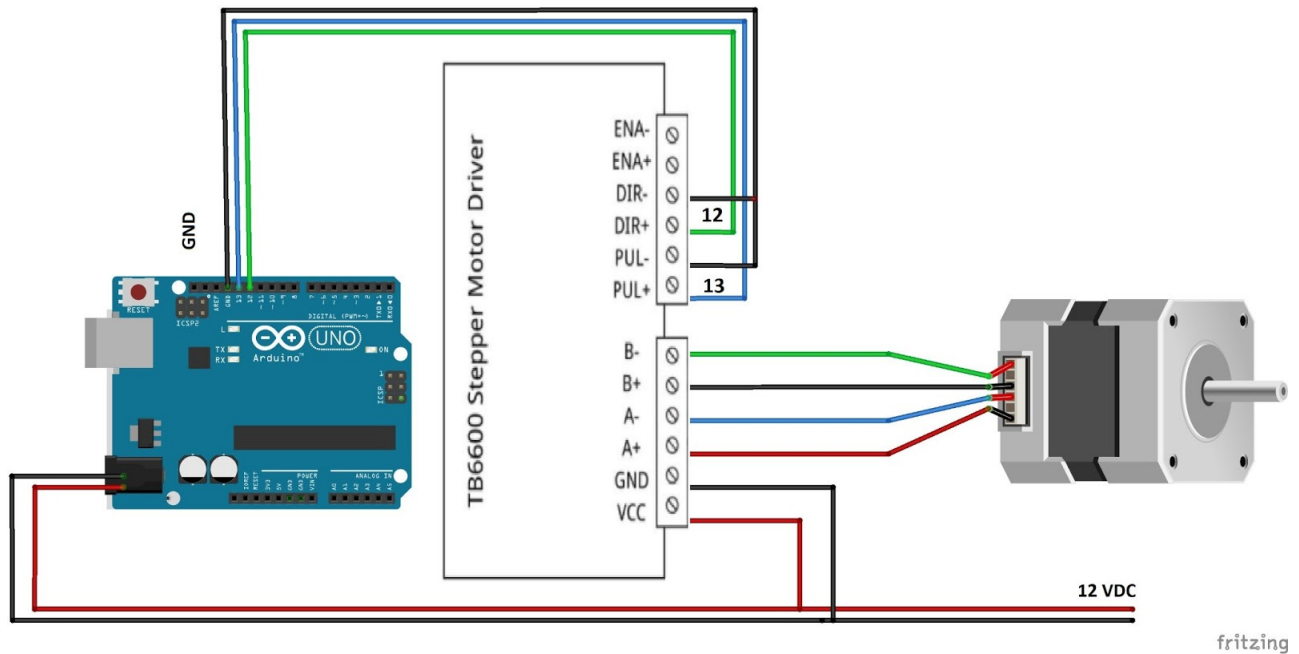


Figura 4.14: Diagrama de conexiones entre el motor, el driver del motor y el procesador con su respectiva alimentación (Autoría propia)

## Finales de carrera

Después de la implementación física de los topes de acrílico en la compuerta, encargados de hacer contacto y activar los finales de carrera, se procede a ubicar estos en la parte superior e inferior de la puerta, con la función de evitar que el movimiento de la compuerta sobrepase los bordes y genere daños. También, permiten establecer la posición inicial de la compuerta, la cual se utiliza cada vez que se va a llenar un saco. Cada final de carrera posee tres pines, GND, VCC y DATA. Los dos pines de alimentación van conectados a la salida del regulador de 5V, mientras que los pines de DATA de los dos finales de carrera van conectados a las entradas digitales del Arduino dos y tres.

## Conexiones

El diagrama de la figura 4.15 presenta las conexiones de los finales de carrera con el Arduino y su respectiva alimentación y en la figura 4.16 se observa su implementación a la compuerta.

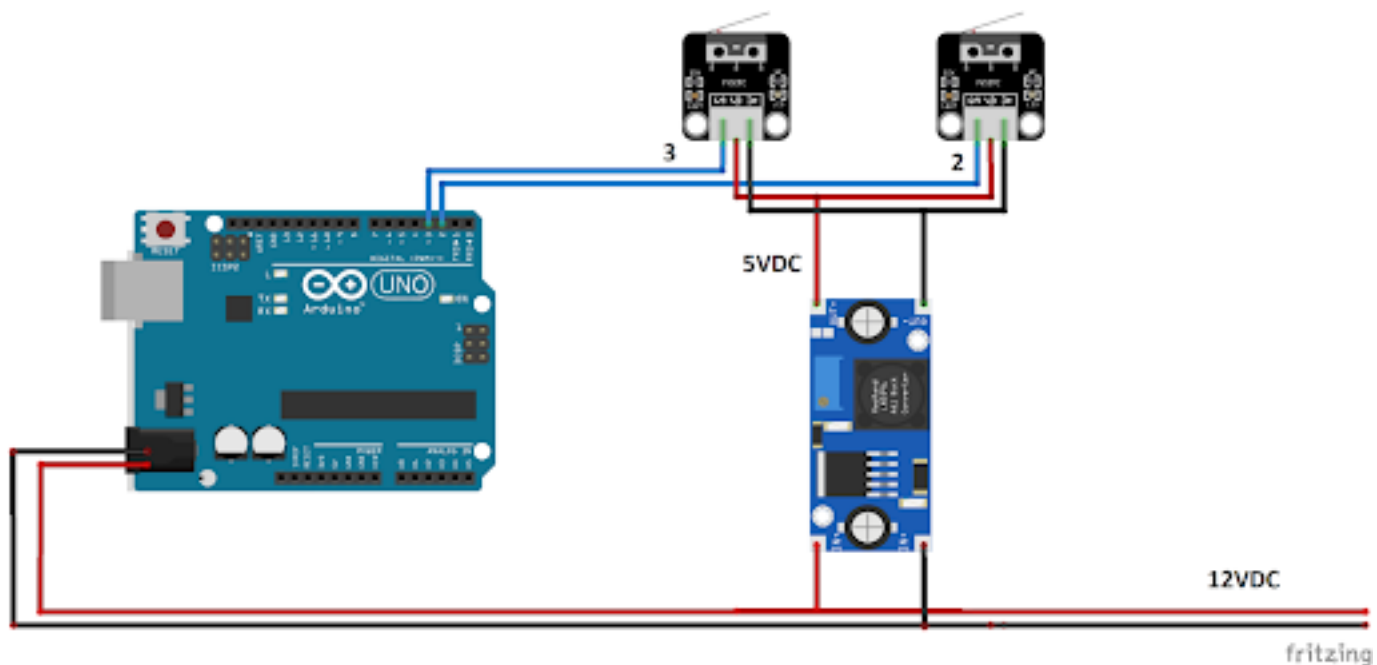


Figura 4.15: Diagrama de conexiones entre los finales de carrera y el Arduino con su respectiva alimentación (Autoría propia)

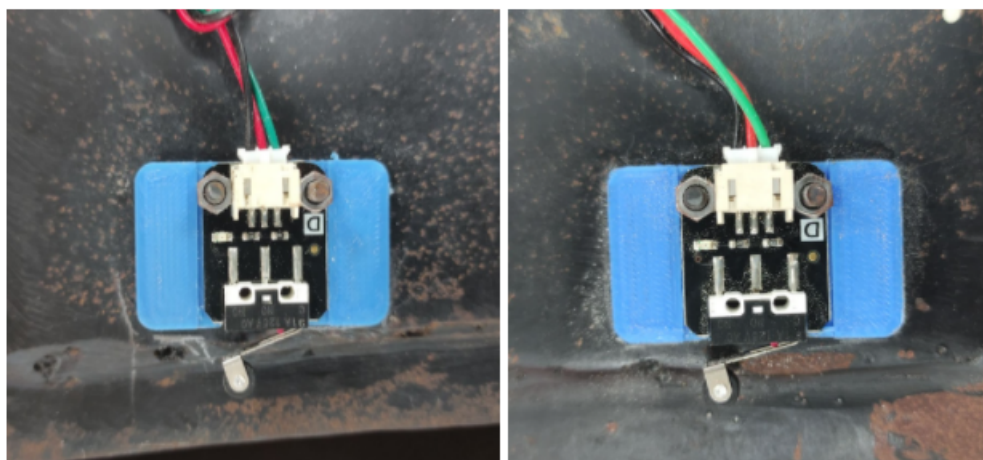


Figura 4.16: Finales de carrera implementados

### Lectura de datos

Se utiliza la estructura y el sensor de peso de la báscula asignada para el proyecto. Se extraen los datos y se realiza un tratamiento para lograr mejores resultados, todo este proceso se explicará

con más detenimiento en los siguientes ítems.

### Báscula y módulo Hx711

Para hacer uso de la báscula se utilizan los cuatro cables que provienen de la celda de carga para 300 kg, los cuales contienen los datos que arroja la deformación existente por el peso encima de la celda. No obstante, como se mencionó en el capítulo tres, estas variaciones son demasiado sensibles por lo que se procede a conectar los cables de la celda de carga en el módulo Hx711.

El módulo Hx711 es un transmisor que permite leer el peso de la celda de carga de manera sencilla, se comunica por el protocolo de tipo serial mediante dos pines (CLK - DO) y se alimenta con 5V DC. Este módulo se conecta a dos entradas analógicas de Arduino para transmitir los datos provenientes de la celda de carga. El módulo amplifica la variación de la celda y permite la correcta lectura de los datos, para más adelante hacer el tratamiento de este y convertirlos en valores de peso. Después, para reducir el ruido en la señal se añade un condensador de 47  $\mu\text{F}$  a la línea de alimentación de 5V DC del módulo.

### Conexiones

El diagrama de la figura 4.17 muestra las respectivas conexiones entre el Arduino, el módulo Hx711, la celda de carga de la báscula y la alimentación del sistema.

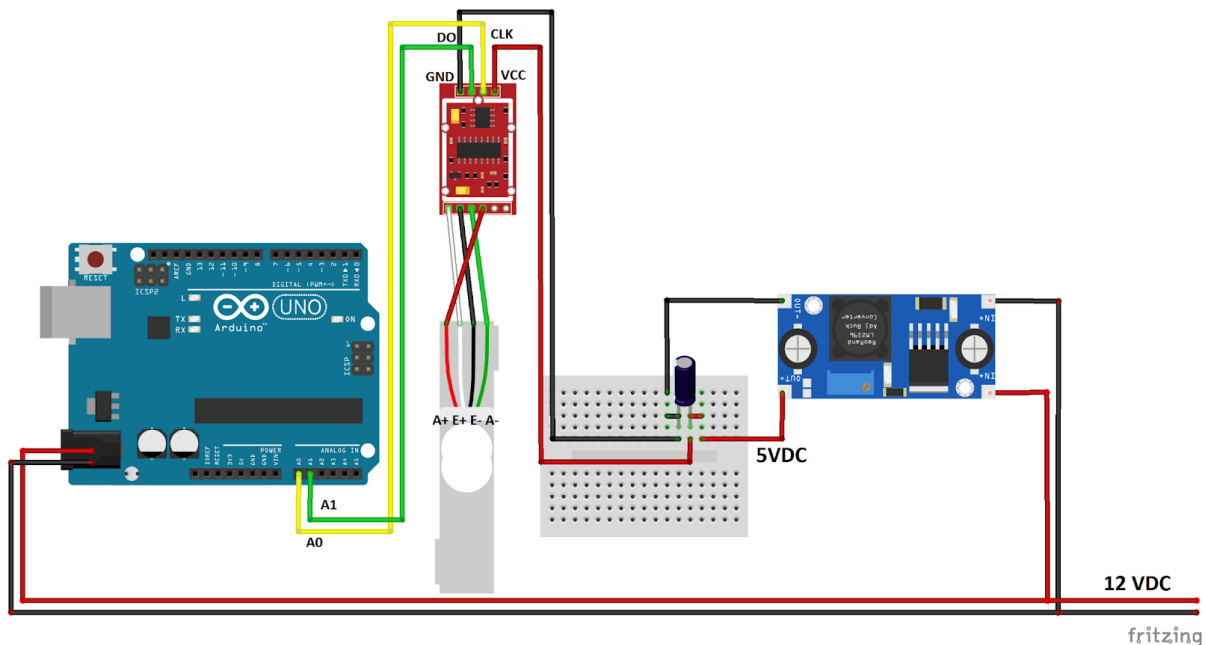


Figura 4.17: Diagrama de conexiones entre la celda de carga, el módulo HX711 y el Arduino con su respectiva alimentación (Autoría propia).

## Interfaz hombre-máquina

Para esta etapa se añaden los componentes electrónicos que permiten al usuario poder visualizar, ingresar datos y manipular el sistema efectivamente de una manera sencilla.

### Display y botonera

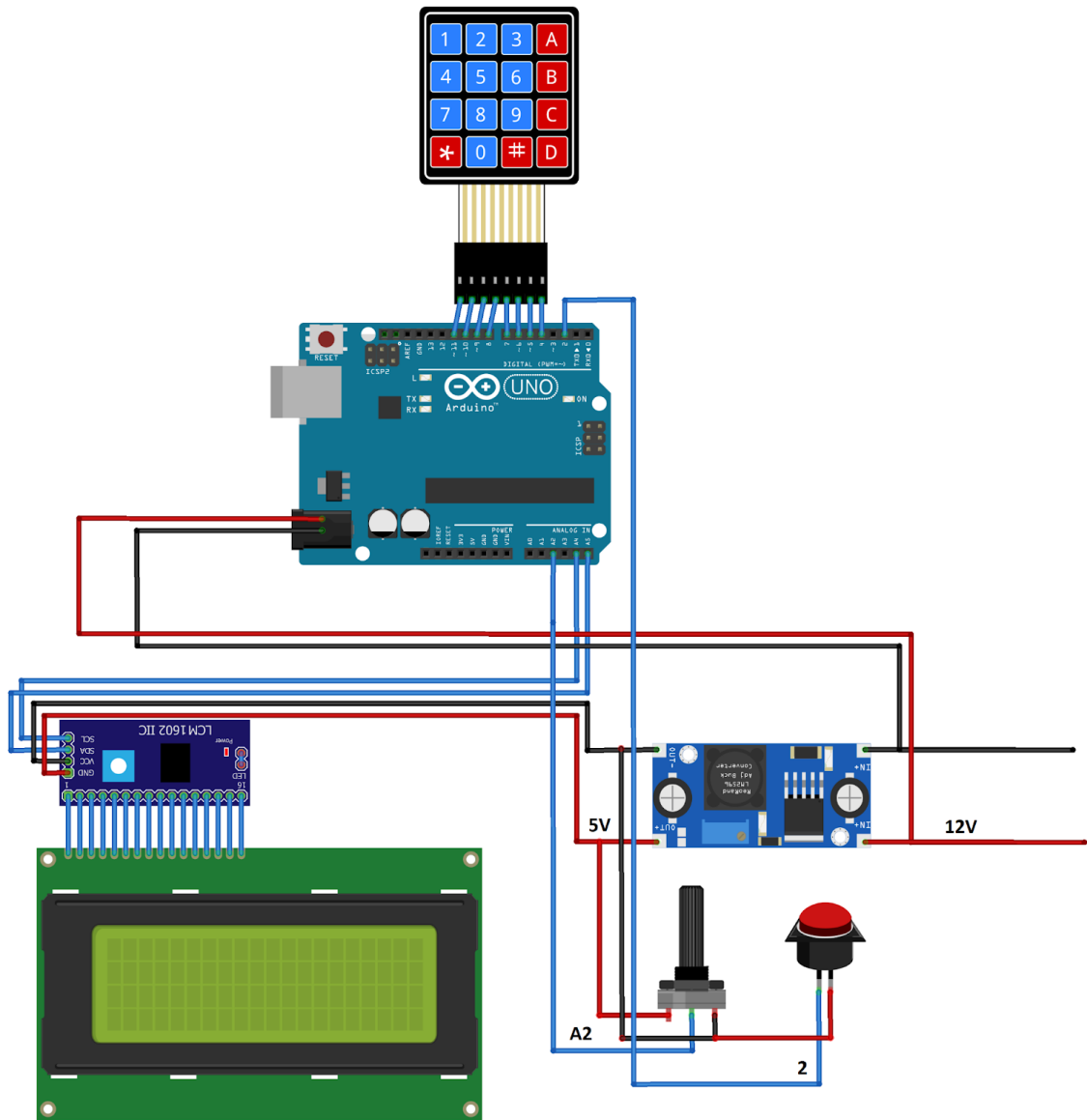
Haciendo uso del display LCD 20x4 y la botonera 4x4 mencionados en el capítulo 3, se muestra en pantalla al usuario una serie de indicaciones para que por medio de la botonera ingrese los comandos como el peso del saco a llenar, confirmación del peso indicado, solicitar al sistema que realice otro llenado de saco y entre otras funciones. El display LCD requiere de 16 pines para ser manipulado, no obstante, viene acoplado con un adaptador de comunicación I2C disminuyendo el requerimiento a solo 4 pines para su uso, siendo 2 pines para la alimentación de 5V DC y los restantes para los pines analógicos de Arduino. Posteriormente, de la botonera se envían 8 pines, correspondientes a 4 filas y 4 columnas, a las entradas digitales de Arduino para así efectuar su conexión con el microcontrolador.

### Botón de emergencia

Como medida de seguridad se añade un botón que al ser accionado cierra la compuerta enviándola a su posición inicial. Pues, en caso de presentarse una situación inesperada, el sistema interrumpirá el flujo del material. Este botón se conecta al Arduino por una entrada digital de PULLUP y se programa como una interrupción.

### Conexiones

En la figura 4.18 se presentan las respectivas conexiones para los componentes de la interfaz hombre-máquina.



fritzing

Figura 4.18: Diagrama de conexiones del sistema electrónico (Autoría propia).

Como resultado de toda la implementación, la figura 4.19 presenta el diagrama de conexiones de todo el sistema electrónico y las figuras 4.20, 4.21 y 4.22 muestran su implementación.

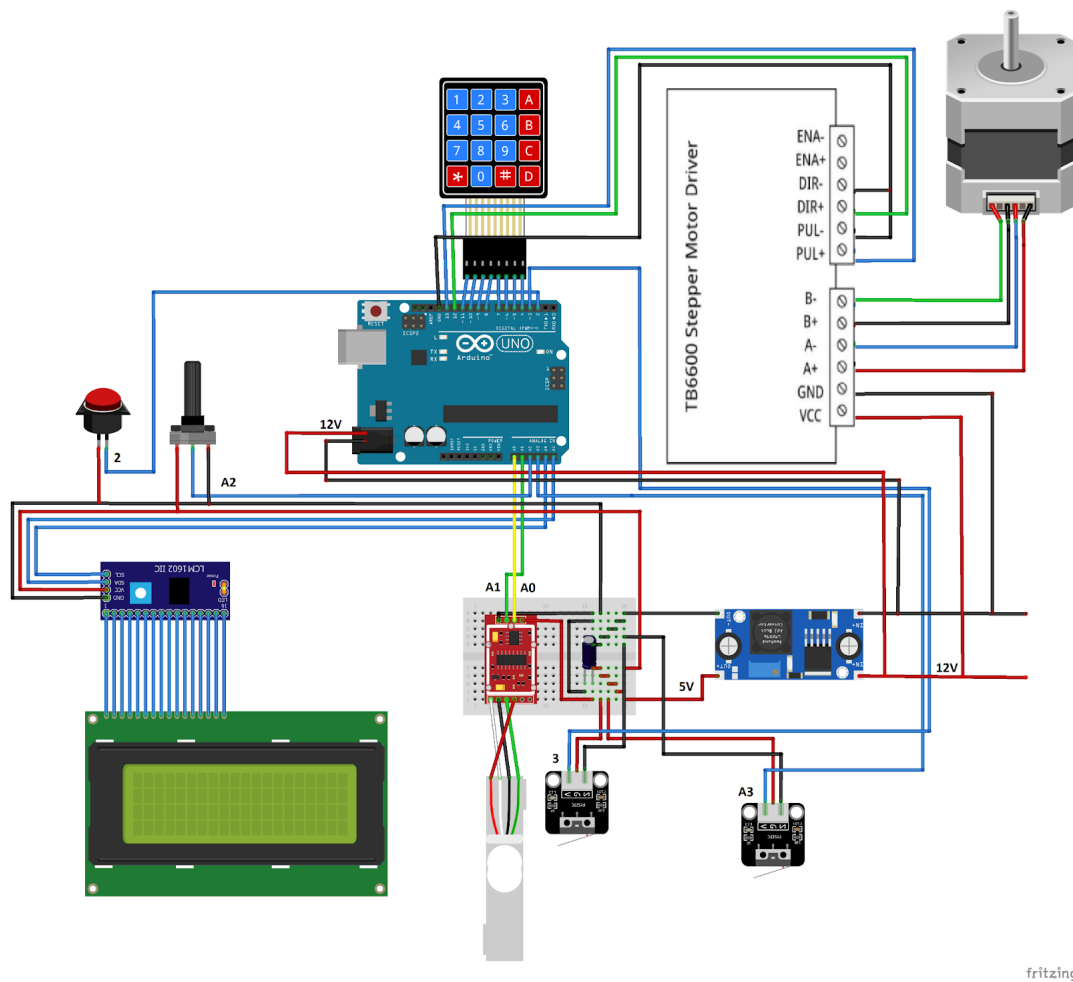


Figura 4.19: Diagrama de conexiones del sistema electrónico (Autoría propia)

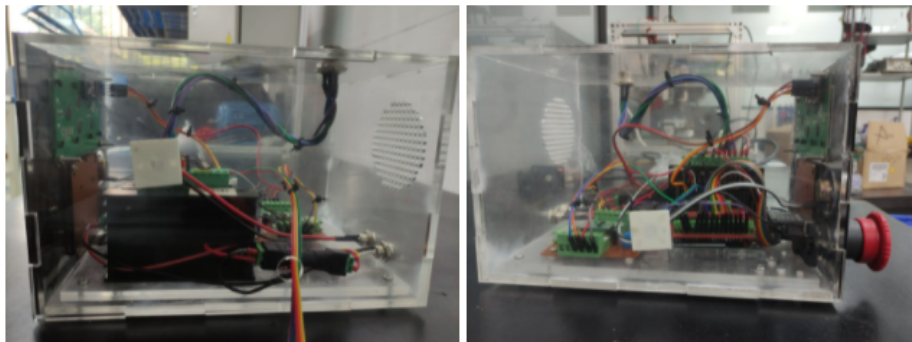


Figura 4.20: Implementación del sistema electrónico

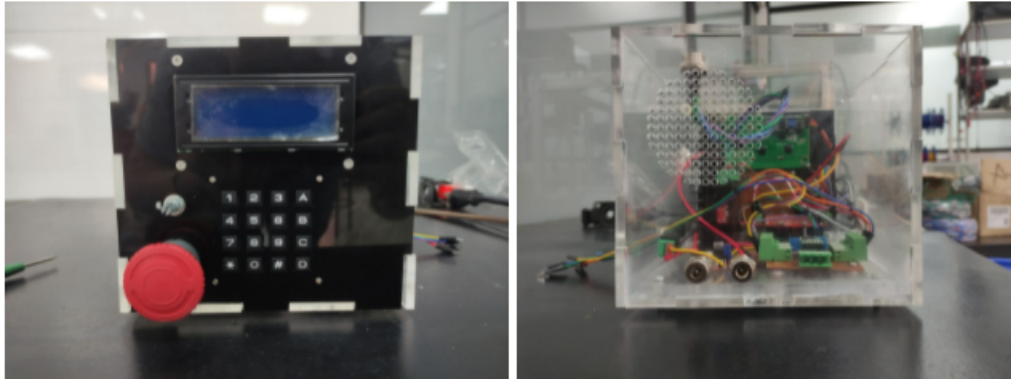


Figura 4.21: Implementación del sistema electrónico

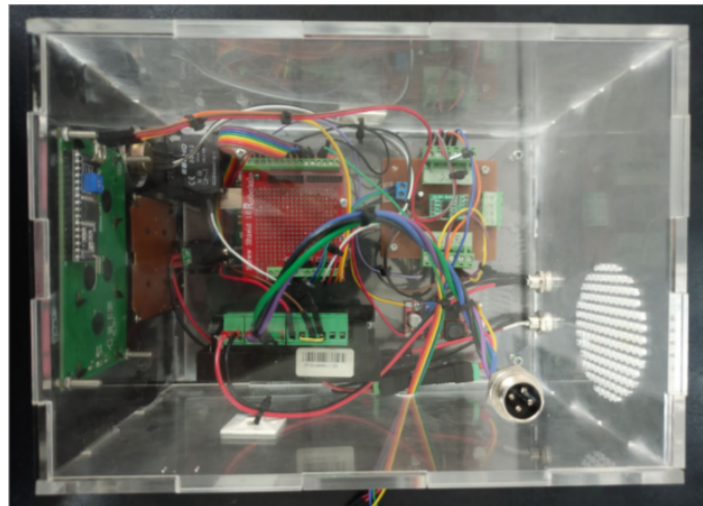


Figura 4.22: Implementación del sistema electrónico

Finalmente, como resultado de toda la implementación mecánica y electrónica da como resultado el sistema que se observa en la figura 4.23.



Figura 4.23: Resultado de la implementación del sistema

### 4.3. Software

Después de haber realizado las implementaciones anteriores, se procedió a construir el código que permite que todo el sistema unificado funcione cumpliendo los siguientes requerimientos del sistema.

#### 4.3.1. Requisitos del Software

1. El sistema deberá recibir los datos del peso que ingrese el usuario por medio de una botonera.
2. El sistema deberá mostrar en pantalla una secuencia de instrucciones para el usuario.
3. El sistema deberá confirmar si el peso ingresado por el usuario es correcto, de lo contrario, deberá solicitar de nuevo el peso.
4. El sistema deberá calibrar la báscula con el peso de tara al inicializar el programa.
5. El sistema deberá solicitarle al usuario oprimir una tecla para iniciar el llenado del saco.
6. El sistema deberá llenar el saco con un error menor al 2% de la cantidad solicitada.
7. El sistema deberá mostrar por pantalla el peso actual sobre la báscula.
8. El sistema deberá llevar el conteo de los sacos.
9. El sistema deberá permitir el llenado de un nuevo saco oprimiendo una tecla.
10. El sistema deberá volver a la posición inicial cuando el botón de emergencia sea accionado por el usuario.

#### 4.3.2. Diagrama de flujo del código del sistema

La figura 4.24 presenta el diagrama de flujo que describe el funcionamiento del código del sistema.

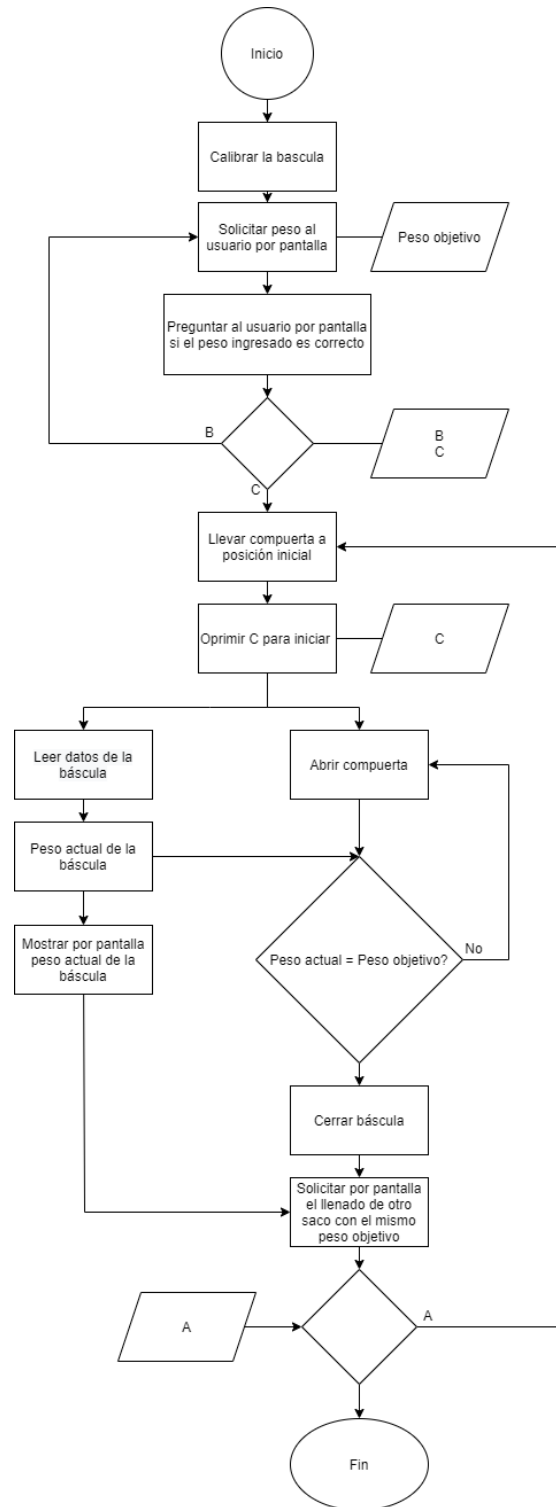


Figura 4.24: Diagrama de flujo del sistema (Autoría propia).

### 4.3.3. Calibración de la báscula por software

Para la calibración de los datos que se obtienen de la celda de carga de la báscula, se hace uso de la librería <HX711 ADC.h>, la cual contiene un código llamado “Calibration” que entrega un valor de calibración a partir de la lectura de los datos de la báscula sin peso y la lectura de un peso conocido.

La referencia para el valor de cero se establece sin peso sobre la báscula, luego solicita ubicar un peso conocido e ingresar el valor de este, permitiendo establecer un valor de calibración. En el caso del trabajo de grado, se utilizaron pesas de gimnasio, las cuales fueron medidas en una báscula con precisión de 1 gramo para asegurar su respectivo valor de peso como se muestran en las figuras 4.25, 4.26, 4.27, 4.28



Figura 4.25: Pesa de 20,500 gramos



Figura 4.26: Pesa de 10,502 gramos

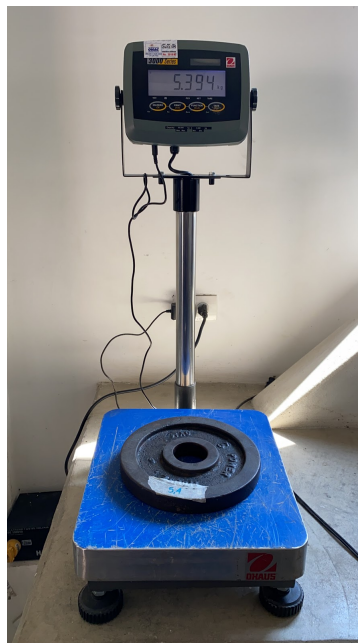


Figura 4.27: Pesa de 5,394 gramos



Figura 4.28: Pesa de 10,212 gramos

Por lo tanto, al poner un equivalente de 46,608 gramos en el procedimiento del código “Calibration” se obtiene un valor de calibración de 10.58, el cual se utiliza para el desarrollo del código principal del sistema, porque con este valor se obtienen las mejores mediciones posibles, más aproximadas y estables en un rango de 30 hasta 60 kg.

#### 4.3.4. Funciones

En la parte del software, para que la programación sea modular se crean funciones que permiten una estructura organizada y más entendible a la hora de revisar el código. En seguida, se presenta una breve explicación de las más importantes.

1. **initPos:** La función `initPos` permite fijar una posición de origen desde donde se mide el ángulo al que se debe mover la puerta para obtener una apertura total de la salida, y luego recorrer el mismo para el cierre de esta. Para ello, primero se enciende el motor y se le envía la orden de cerrar la compuerta hasta que se active el final de carrera inferior. Después, desde la posición donde quedó, se devuelve una cantidad de pasos considerables que consiguen que el final de carrera se desactive.
2. **getValue:** La función `getValue` ejecuta una serie de instrucciones para mostrar en la pantalla mensajes de los procedimientos que el operario debe realizar para fijar un peso. Como primera medida se le indica que ingrese el valor al cual desea llenar los sacos, seguidamente, pregunta si el valor ingresado es el correcto, y si lo es, se guarda el valor ingresado en la variable del peso de referencia, de lo contrario, solicita que ingrese el valor de nuevo.

3. **moveStepper:** La función `moveStepper` contiene un bucle donde se genera la señal cuadrada que permite el movimiento del motor. Esta función recibe como único parámetro la dirección del movimiento, `Open` o `Close`, y tiene un ángulo constante, pues la apertura de la compuerta siempre parte de la posición de origen.

Para revisar el código completo, haga click en el siguiente enlace:

Código Trabajo de Grado

[https://javerianacaliedu-my.sharepoint.com/:t:/g/personal/cristiancalle\\_javerianacali\\_edu\\_co/ERn\\_jtkNuSJl1-5j7Z6ieJUB5A45xVjqkU5g2AyjVqWPTw?e=0deIxr](https://javerianacaliedu-my.sharepoint.com/:t:/g/personal/cristiancalle_javerianacali_edu_co/ERn_jtkNuSJl1-5j7Z6ieJUB5A45xVjqkU5g2AyjVqWPTw?e=0deIxr)

## 5.1. Montaje de la prueba

Para realizar las pruebas se hace uso de la báscula de precisión Bench Scale de la marca OHAUS la cual se caracteriza por soportar cargas de hasta 150 kg con una escala de precisión de 20 gramos, siendo una herramienta esencial para comparar los resultados obtenidos por la báscula del sistema. Por otra parte, el material granular utilizado para las diferentes pruebas fue granos de maíz. A continuación, se presenta la secuencia de pasos para cada prueba:

1. Llenar completamente la tolva del sistema con el material granular, figura 5.1.



Figura 5.1: Llenado de la tolva con el material granular

2. Ingresar el peso que se quiere llenar, figura 5.2

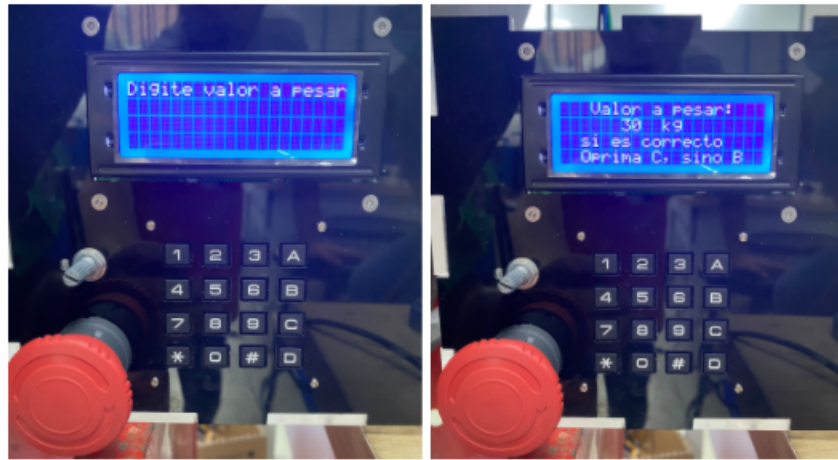


Figura 5.2: Solicitud por pantalla para el ingreso del peso y confirmación del peso ingresado

3. Posicionar el saco en la báscula, figura 5.3.



Figura 5.3: Posicionamiento del saco iniciar el pesaje

4. Oprimir la tecla C para empezar a llenar el saco, figura 5.4.



Figura 5.4: Mensaje por pantalla para el usuario.

5. Al finalizar el llenado, anotar el dato sobre el peso que marca la báscula del sistema como se muestra en la figura 5.5.



Figura 5.5: Evidencia del dato obtenido de la báscula del sistema.

6. Pesar el saco que se llenó en la báscula de precisión como se muestra la figura 5.6 y anotar el dato.



Figura 5.6: Evidencia del dato obtenido de la báscula de precisión.

7. Ingresar los datos en una hoja de cálculo para llevar el registro.

Teniendo claro el montaje y los pasos a realizar, se procede con las pruebas.

## 5.2. Pruebas de control de peso

Para las pruebas de control de peso se busca una estrategia de control que permita cumplir con el objetivo de un margen de error menor del 2% entre el peso objetivo y el peso dosificado con el sistema.

### 5.2.1. Estrategia de control #1

En esta estrategia de control, se establece el cierre de la compuerta a una velocidad constante al momento en que el peso que se lee de la báscula cumple con el porcentaje establecido del peso objetivo. Esto debido a que el material que queda en el aire al momento de cerrar la compuerta aún no ha sido registrado en la báscula, por lo tanto, se realizan las pruebas con diferentes pesos objetivos y diferentes porcentajes obteniendo los resultados que se muestran en las tablas 5.1 5.2 y 5.3.

Cabe aclarar que:

- Los datos de la columna Peso real (kg) son obtenidos de las mediciones con la báscula de mayor precisión.
- Los datos de la columna llamada Peso (kg) son obtenidos de las mediciones de la báscula del sistema.
- El error respecto a la báscula se obtiene calculando el error relativo entre el peso real y el peso.
- La desviación del objetivo determina en porcentaje que tanto se aleja el peso medido por la báscula del sistema con el peso objetivo.

Cuadro 5.1: Resultados para 30kg.

Objetivo (Kg)	90%		85%		80%	
	Peso (Kg)	Peso real (Kg)	Peso (Kg)	Peso real (Kg)	Peso (Kg)	Peso real (Kg)
30	30,98	31,00	29,32	29,30	27,38	27,40
	31,11	31,10	29,04	29,05	27,46	27,45
	31,12	31,10	29,01	29,00	27,48	27,45
<b>Promedio</b>	31,07	31,07	29,12	29,12	27,44	27,43
<b>Error respecto a la báscula</b>	0,011%		0,023%		0,024%	
<b>Desviación del objetivo</b>	3,567%		2,922%		8,533%	

Cuadro 5.2: Resultados para 50kg.

Objetivo (Kg)	95%		90%		85%	
	Peso (Kg)	Peso real (Kg)	Peso (Kg)	Peso real (Kg)	Peso (Kg)	Peso real (Kg)
50	50,20	50,15	48,72	48,70	45,81	45,80
	51,01	51,00	48,64	48,60	46,41	46,40
	50,96	50,95	48,68	48,70	46,44	46,45
<b>Promedio</b>	50,72	50,70	48,68	48,67	46,22	46,22
<b>Error respecto a la báscula</b>	0,046%		0,027%		0,007%	
<b>Desviación del objetivo</b>	1,447%		2,640%		7,560%	

Cuadro 5.3: Resultados para 60kg.

Objetivo (Kg)	95%		85%	
	Peso (Kg)	Peso real (Kg)	Peso (Kg)	Peso real (Kg)
60	61,03	60,95	54,27	54,3
	61,09	61	55,11	55,15
	60,93	60,85	54,64	54,65
<b>Promedio</b>	61,02	60,93	54,67	54,70
<b>Error respecto a la báscula</b>	0,137%		0,049%	
<b>Desviación del objetivo</b>	1,694%		8,878%	

### Resultados de estrategia #1

Para la estrategia de control número uno se observa que:

- El error respecto a la báscula no sobrepasa del 0.15 %.
- Al utilizar pesos que se acercan al límite inferior del rango (30 kg), los porcentajes que se utilizan se alejan del 100 % para obtener la menor desviación del objetivo.
- Al utilizar pesos que se acercan al límite superior del rango (60 kg), los porcentajes que se utilizan se acercan al 100 % para obtener la menor desviación del objetivo

Después de analizar los resultados, se determina que no es viable utilizar la estrategia de control del cierre a velocidad constante a falta de un porcentaje para el peso objetivo, a raíz de que se debe establecer un porcentaje para cada peso existente dentro del rango establecido (30 kg - 60 kg) para obtener un margen de error menor del 2 % entre el peso objetivo y el peso dosificado con el sistema.

#### 5.2.2. Estrategia de control #2

Para esta estrategia de control, se establece cerrar la compuerta a velocidad constante cuando el peso medido en la báscula sea igual al peso objetivo menos peso de corrección, el cual será el mismo para cualquier peso objetivo. La hipótesis bajo la que se presenta esta estrategia es que la cantidad de material que está cayendo entre la compuerta y la báscula (material que no ha sido sensado) es la misma para cualquier peso objetivo. Para probar esta hipótesis se propone llenar un saco con un peso objetivo de 45 kg (peso intermedio entre 30 kg y 60 kg), y variar el peso de corrección hasta que se cumpla con el margen de error menor del 2 % entre el peso objetivo y el peso dosificado con el sistema. Luego, con ese mismo peso de corrección se cambia el peso objetivo y se valida que el error siga por debajo del 2 % para cualquier peso objetivo en el rango de 30 kg a 60 kg.

En el desarrollo de la metodología se obtiene el promedio de tres pruebas realizadas con 45 kg con un peso de corrección de 0 g, dando como resultado una desviación del objetivo del 7,15 %. Luego se establece el peso de corrección con el valor de 3,220 kg que se obtiene a partir de la diferencia de 48,22 kg (promedio del peso medido en báscula) y el peso objetivo de 45 kg. Seguidamente, se obtiene el promedio de tres pruebas con 45 kg y un peso de corrección de 3,220 kg, alcanzando una desviación del objetivo del 1,10 %, la cual se encuentra dentro del margen de error permitido. Para mejorar aún más la desviación del objetivo, se incrementa el peso de corrección a un valor de 3,646 kg y se logra obtener una desviación del 0,43 % como se muestra en la tabla 5.4.

Asimismo, se realizan tres pruebas estableciendo el peso objetivo con el límite superior del rango (60 kg) y otras tres pruebas con el límite inferior del rango (30 kg) utilizando los 3,646 kg como peso de corrección obteniendo los resultados contenidos en las tablas 5.5 y 5.6.

Cuadro 5.4: Resultados para 45 kg.

Peso de corrección (gr)	0		3220		3646	
Objetivo (kg)	Peso (Kg)	Peso real (Kg)	Peso (Kg)	Peso real (Kg)	Peso (Kg)	Peso real (Kg)
45	48,45	48,40	45,45	45,40	45,14	45,15
	48,00	47,95	45,55	45,60	45,28	45,25
	48,20	48,12	45,48	45,45	45,16	45,10
Promedio	48,22	48,16	45,49	45,43	45,19	45,17
Error respecto a la báscula	0,12%		0,15%		0,06%	
Desviación del objetivo	7,15%		1,10%		0,43%	

Cuadro 5.5: Resultados para 60 kg.

Peso de corrección (gr)	3646	
Objetivo (kg)	Peso (Kg)	Peso real (Kg)
60	60,44	60,40
	60,21	60,20
	60,37	60,35
Promedio	60,34	60,32
Error respecto a la báscula	0,04%	
Desviación del objetivo	0,57%	

Cuadro 5.6: Resultados para 30 kg.

Peso de corrección (gr)	3646	
Objetivo (kg)	Peso (Kg)	Peso real (Kg)
30	30,17	30,20
	30,03	30,05
	29,83	29,80
Promedio	30,01	30,02
Error respecto a la báscula	0,02%	
Desviación del objetivo	0,03%	

## Resultados de estrategia de control #2

A partir de las tablas 5.4, 5.5 y 5.6 se analiza la estrategia del cierre de la compuerta a velocidad constante cuando el peso medido en la báscula sea igual al peso objetivo menos el peso de corrección. Se afirma que los resultados obtenidos estableciendo un peso de corrección, mejoran considerablemente la desviación del objetivo. También se hace evidente en las tablas 5.5 y 5.6 que con el peso de corrección de 3,646 kg el error sigue por debajo del 2 % para cualquier peso objetivo en el rango de 30 kg a 60 kg.

Posterior al análisis de los resultados conseguidos, se manifiesta que la hipótesis propuesta para el desarrollo de la estrategia dos, se cumple bajo la metodología mencionada anteriormente, logrando el llenado de los sacos en un tiempo menor en comparación a otras estrategias de control, y asegurando que el error sea menor al 2% en todo el rango de los pesos asignados para llenar.

Es importante resaltar que hay una predisposición a utilizar un control proporcional u otro tipo de control PID, debido a que se utilizan en aplicaciones de control de nivel, pero la naturaleza de este sistema no lo requiere, pues en este problema no hay acumulación de energía, por tanto, al cerrar la compuerta en el momento indicado no habría algún tipo de inercia que llevara al sistema a aumentar el peso una vez cerrada la compuerta.

### 5.3. Producto Final

Después de validar el funcionamiento del sistema, se realizan una serie de adecuaciones adicionales con el objetivo de cumplir cada uno de los requisitos y presentar el sistema de pesaje semiautomático para material granular como un producto funcional.

- Se diseña una caja en acrílico, donde se acoplan todos los componentes electrónicos con su respectiva alimentación que permiten al usuario una cómoda interacción con el sistema. Figuras 5.7, 5.8 y 5.9.

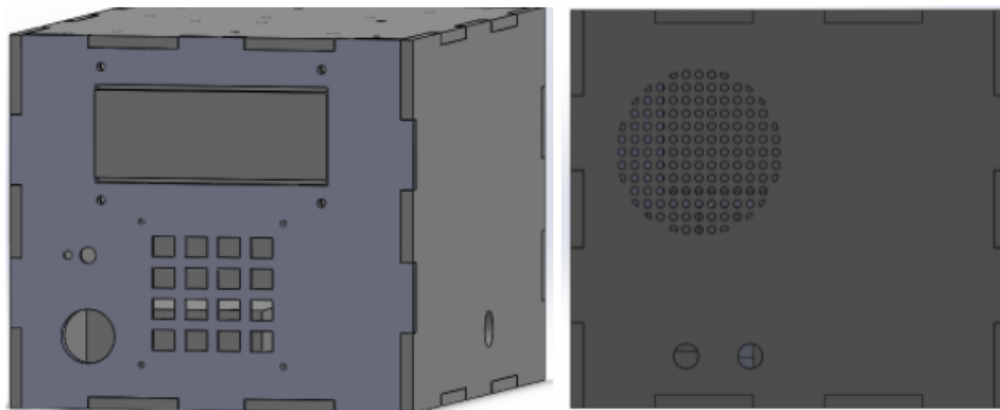


Figura 5.7: Diseño 3D de la caja

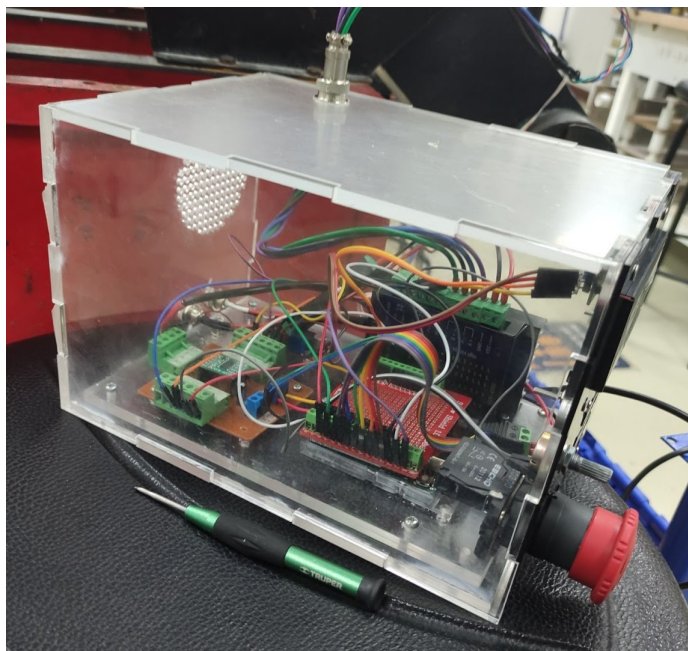


Figura 5.8: Caja con los componentes acoplados



Figura 5.9: Caja completa

- Se implementa un potenciómetro que permite al usuario variar el peso de corrección en un rango desde 0 hasta 10 kg, Figura 5.10.



Figura 5.10: Peso de corrección establecido por medio del potenciómetro

- Se implementan dos láminas que salen del soporte a una altura que permita posicionar el saco a llenar manteniendo la abertura completa del saco sin afectar la funcionalidad del sistema. Observar figura 5.11.



Figura 5.11: Láminas implementadas en el sistema

- Al sistema se le añade las funciones de mostrar en pantalla el conteo de sacos llenos y la cantidad de material utilizada hasta el último llenado permitiendo llevar un registro cómodo para el operario. Ver en la figura 5.12.



Figura 5.12: Conteo de sacos y material utilizado mostrado por pantalla

Desarrollando un bill of materials (BOM) se presenta en la tabla 8 una breve descripción con sus respectivos precios de todas las piezas y componentes que conforman el sistema semiautomático de pesaje para material granulado.

<b>Bill of Materials</b>				
<b>Pieza</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>	<b>Precio unitario (COP)</b>	<b>Precio (COP)</b>
<b>Piezas del sistema mecánico</b>				
Compuerta	Compuerta hecha de lámina de hierro de 2 mm	1	\$ 250.000	\$ 250.000
Tolva	Tolva hecha de lámina de hierro de 2 mm que permite el almacenamiento del producto granular antes del dosificación	1	\$ 150.000	\$ 150.000
Soporte	Aumenta la altura de la compuerta respecto al suelo, esto con el objetivo de tener el espacio necesario para llenar sacos de hasta 60 kg y darle estabilidad a la tolva. Hecha con lámina de hierro de 2mm.	1	\$ 100.000	\$ 100.000
Bujes	Implementación realizada para el movimiento fluido del eje, hecha de bronce.	2	\$ 2.500	\$ 5.000
Correa 2GT	Correa cerrada 400mm 2GT ó GT2 6mm	1	\$ 6.000	\$ 6.000
Polea de 60 dientes	Polea para correa 2GT de 60 dientes de sincronismo y eje de 8mm hecha de aluminio	1	\$ 18.000	\$ 18.000
Polea de 20 dientes	Polea para correa 2GT de 20 dientes de sincronismo y eje de 6.35mm hecha de aluminio	1	\$ 5.000	\$ 5.000
Base de motor	Realizado en impresión 3D, sirve de soporte para acoplar y tensar la correa que va entre las poleas del motor y la compuerta	1	\$ 60.000	\$ 60.000
Báscula	Báscula con plataforma de piso 300 Kg 40*50 Cm - Azul	1	\$ 300.000	\$ 300.000
Soporte para sacos	Soporte diseñado en forma de U que se acopla a la mesa permitiendo mantener abierto el saco para su llenado	1	\$ 50.000	\$ 50.000
Motor NEMA 23	Motor paso a paso NEMA 23 de referencia JK57HM76-2804	1	\$197.540	\$197.540

<b>Bill of Materials</b>				
<b>Pieza</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>	<b>Precio unitario (COP)</b>	<b>Precio (COP)</b>
<b>Piezas del sistema electrónico</b>				
Driver	TB6600 controlador driver motor a pasos 9-42 VDC - 4A	1	\$ 75.000	\$ 75.000
Arduino Uno	Microcontrolador de código abierto basado en el microchip ATmega328P. La placa está equipada con conjuntos de pines de I/O digitales y analógicas que pueden conectarse a varias placas de expansión y otros circuitos.	1	\$ 80.000	\$ 80.000
Módulo Hx711	Módulo Conversor Hx711 Analógico-digital 24 bits que permite la lectura de la celda de carga de la báscula	1	\$ 7.000	\$ 7.000
Elevador de tensión	Módulo XL6009 Convertidor Dc-Dc Step Up Elevador de Tensión	1	\$ 5.600	\$ 5.600
<b>Interfaz Hombre-Máquina</b>				
Botonera	Teclado Matriz 4x4 Matricial Botones Plásticos	1	\$ 16.000	\$ 16.000
Display LCD 20x4	Display LCD 20x4 fondo azul interfaz serial (I2C) soldado	1	\$ 16.000	\$ 16.000
Botón de emergencia	Botón de emergencia tipo hongo color rojo	1	\$ 27.000	\$ 27.000
Potenciómetro	Encargado de permitir al usuario la variación del peso de corrección	1	\$ 2.000	\$ 2.000
Caja de acrílico	Caja diseñada para contener los componentes electrónicos y fijar la interfaz para el usuario.	1	\$ 80.000	\$ 80.000
Final de carrera	Interruptor detector de obstáculos	2	\$ 16.000	\$ 16.000
<b>Total</b>				\$ 1.496.140

Cuadro 5.7: Bill of materials.

Observando el valor total del producto final en la tabla 8, se tiene que el precio de todos los materiales y componentes comprados para el desarrollo del sistema es de COP \$ 1.496.140, valor que se encuentra dentro del presupuesto para materiales del sistema semiautomático para productos granulares.

Por último, se presenta el producto final del sistema semiautomático para material granulado en la figura 5.13.

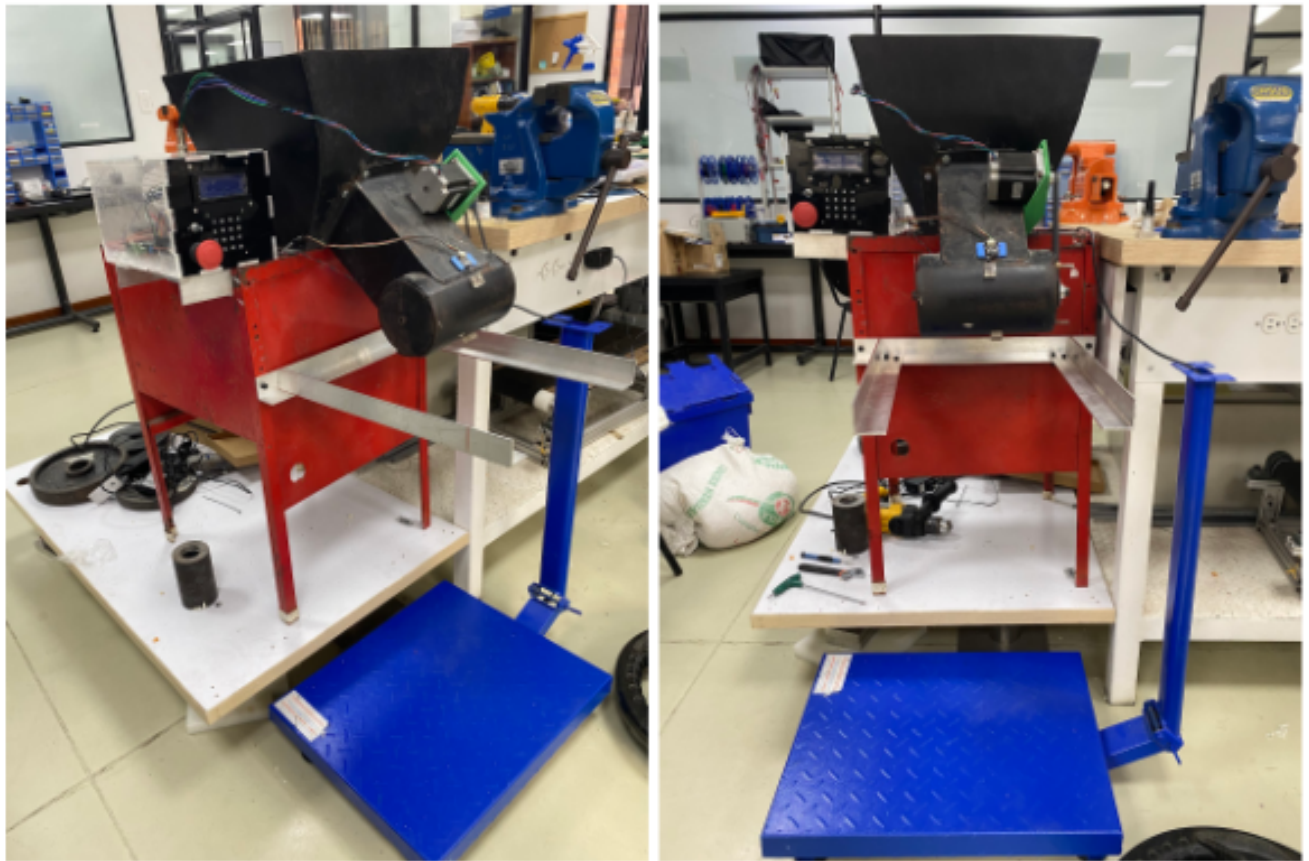


Figura 5.13: Sistema semiautomático para material granulado

# Conclusiones y Trabajos Futuros

---

## 6.1. Conclusiones

En la etapa de diseño se desarrollaron los componentes mecánicos, electrónicos y de software a partir de los requisitos previamente obtenidos. Asimismo, este diseño fue llevado a la implementación que integró: la construcción y montaje mecánico; la elaboración de circuitos eléctricos y electrónicos; y un desarrollo de software, dando como resultado final para este trabajo de grado el diseño e implementación de un sistema semiautomático capaz de pesar material granulado en un rango entre 30 y 60 kg.

En este orden de ideas, este trabajo presenta el diseño de un modelo en 3D, realizado con el software SolidWorks, de la estructura para el pesaje de material granular entre 30 kg y 60 kg permitiendo establecer las medidas necesarias para el desarrollo y construcción del sistema. A raíz de que sin este tipo de modelos se tendría que recurrir a construir mediante ensayo y error, lo que aumentaría los costos y mayor tiempo de ejecución para el proyecto. Al integrar modelos 3D se pudo simular el comportamiento del sistema y generar los planos de fabricación para pasar a la implementación de forma más certera.

El trabajo de grado logró diseñar e implementar un sistema de dosificación para la tolva de medición de peso con las características de que la compuerta sea acoplable a diferentes tipos de tolvas, y que su manejo del sistema sea sencillo a la hora de querer establecer cuánto peso se quiere llenar en el saco. Por otra parte, también se logró diseñar e implementar una estrategia de control, capaz de realizar el llenado de los sacos en un tiempo menor respecto a otras estrategias y cumpliendo con el objetivo de que el error sea menor al 2% en todo el rango de pesos establecidos, ya que esta no reduce el tiempo de cierre de la compuerta para lograr mejorar la precisión. Durante el desarrollo de la estrategia se pudo evidenciar que el sistema después de cerrar la compuerta, quedaba material en el aire sin ser sensado por la báscula, por lo que se logró tener en cuenta permitiendo así que la variación del peso fijo dependiera en mayor parte del material granular, significando que si se cambiaba el material, se deberá encontrar otro peso fijo que cumpla con el error menor al 2% logrando que el sistema sea genérico y que continúe su funcionalidad al usar diferentes materiales granulares.

Finalmente, se diseñó e implementó una interfaz hombre-máquina en donde el usuario puede fijar las opciones de operación del sistema y observar por pantalla el valor del peso de la báscula durante el proceso de llenado, adicionalmente, se incluye el requisito del usuario final de visualizar la cantidad de sacos llenos y el material utilizado hasta el momento por el sistema para poder llevar

un registro de estos datos.

## 6.2. Trabajos Futuros

Los trabajos futuros se enfocan en realizar incorporaciones tanto en la parte física como en la programación, aportándole al producto final un mayor grado de comodidad al usuario. Una de esas adecuaciones podría ser que el sistema realice la calibración para establecer el peso fijo de manera automática, en donde si se llena la tolva con un material diferente, el primer llenado de saco establezca automáticamente un peso fijo que permita obtener un error menor al 2% en las siguientes mediciones y llenados de material, sin que el usuario necesite calibrarlo por medio del potenciómetro existente en el producto final del trabajo de grado.

A partir de esta idea, también se puede presentar un menú de recetas pregrabadas por el usuario, en el cual se define un material granular con su respectivo valor de calibración de peso fijo ya establecido anteriormente. Entonces, el usuario podría guardar sus recetas y escogerlas cuando necesite cambiar de material granular.

Por otra parte, en el sistema se puede agregar un función capaz de establecer la cantidad de sacos llenados según su peso a lo largo del uso del sistema y que sean enviados a una base de datos que se encargue de guardar y permitir el monitoreo a distancia, esto con el objetivo de poder revisar y llevar un inventario de la producción de sacos.

Finalmente, se puede cambiar la caja de acrílico en donde se encuentran los componentes electrónicos del sistema por un panel industrial que permita proteger al circuito contra sobrecargas, cortocircuitos y fallas de tierra. Además, brinda protección contra golpes o tratos fuertes para que el sistema no llegue a presentar fallas por este tipo de situaciones.

# Bibliografía

- [1] Mintrabajo.gov.co. 2020. Mipymes Representan Mas De 90 Del Sector Productivo Nacional Y Generan El 80 Del Empleo En Colombia Ministra Alicia Arango - Ministerio Del Trabajo. [online] Available at: <https://cutt.ly/Hp5d9GM>. [Accessed 18 May 2020].
- [2] Payares, K., Parra, M., Navarro, E. and Naranjo, O., 2020. Biblioteca Santiago Cadena Copete - Bases De Datos. [online] Usc.elogim.com. Available at: <https://cutt.ly/RagVOzU>. [Accessed 18 May 2020].
- [3] Hambir, Joshi, Karande, Kolhe (2019), Automatic Weighing and Packaging Machine, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET).
- [4] "Sistemas de Control", Upcommons.upc.edu, 2020. [Online]. Available: <https://cutt.ly/Up5dGHL>. [Accessed: 25- Apr- 2020].
- [5] Boscan, A., Suniaga, A. and Vivas, B., 2013. Motores de corriente continua o directa. 1st ed. [ebook] Caracas: Universidad Alejandro De Humboldt, pp.[1-17]. Available at: <<https://bit.ly/3s49pJC>>[Accessed 19 May 2021].
- [6] Académica-e.unavarra.es. n.d. Control de un motor paso a paso. [online] Available: <https://bit.ly/3yA47Ij>. [Accessed 20 May 2021].
- [7] Editores-srl.com.ar. 2017. Servomotores : Control , precisión y velocidad. [online] Available at: <<https://bit.ly/2VwwRn4>>[Accessed 19 May 2021].
- [8] M. Sweet, "Compuertas para tolvas", Sweetmfg.com, 2016. [Online]. Available: <<https://bit.ly/3jPzIFg>>. [Accessed: 02- Jun- 2021].
- [9] "Compuerta TIPO GUILLOTINA | Saniaguas S.A.S", Saniaguas.com, 2021. [Online]. Available: <https://saniaguas.com/content/compuerta-tipo-guillotina>. [Accessed: 14- Jun- 2021].
- [10] A. Creus Solé, Instrumentos industriales, su ajuste y calibración. Barcelona: Marcombo, 2009, pp. 6-13.
- [11] R. ASALE, "tolva | Diccionario de la lengua española", «Diccionario de la lengua española» - Edición del Tricentenario, 2020. [Online]. Available: <https://dle.rae.es/tolva>. [Accessed: 25-Apr- 2020].
- [12] M. Talavera, "PICmicro® MCU Estudio - ¿qué es un microcontrolador?", Electronica Estudio, 2020. [Online]. Available: <<https://bit.ly/3AzSS2T>>. [Accessed: 25- Apr- 2020].
- [13] GÜLLÜ, A. KUŞÇU,H. & Others. (2017). Precision Filling Control Application with PLC for Big Bag Scale Automation. INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE UNITECH.

- 
- [14] Bhende, A. & Fating, R. (2017). Design & Fabrication of Automatic Weighing System for Pihkol Material. International Journal on Future Revolution in Computer Science & Communication Engineering.
- [15] Nimsiriwangso, B. Kummool, S. Julsereewong, A. & Ukakimaparn, P. (2015). Automatic weighing machine for improving competitiveness of Thai SMEs in seafood cold storage business, IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), Nagoya, pp. 771-776.
- [16] Mehta, Horelli (2018), Rice packaging automation, Mechanical Engineering and Production Technology Riihimäki - HAMK Hämeen Ammattikorkeakoulu Häme University of Applied Sciences.
- [17] Baldovino, R., Aquino, R., Cabalanan, M., Cruz, J. and Lao, F., 2020. An Automated Vacuum Packaging And Sealing Machine For Coconut Sugar Production. 1st ed. Manufacturing Engineering and Management (MEM) Department Gokongwei College of Engineering, De La Salle University.
- [18] Sender, S., 2020. SYSTEM AND METHODS FOR AUTOMATIC CONTAINER FILLING. Miami, FL (US): The Recon Group LLP.
- [19] Dande, M. Kota, N. & Manoharan, P. (2018). A Simple Robust IOT Sensor Based Weighing System. International Journal of Pure and Applied Mathematics.
- [20] G. Alvarez, Tolva Arena. Youtube, 2015.
- [21] D. Alaniz, TOLVA EMBOLSADORA CASERA. Youtube, 2012.
- [22] M. Dias, EnSaca Mini Bagging Machine. Youtube, 2017.
- [23] A. Andrade, C. Del Río and D. Alvear, Estudio de Tiempos y Movimientos para Incrementar la Eficiencia en una Empresa de Producción de Calzado, 3rd ed. Otavalo-Ecuador: Universidad de Otavalo, 2019.