

**Instituto Tecnológico de Costa Rica**

**Escuela de Ingeniería Electrónica**



**Medidor de la masa neta del café de un silo en el beneficio  
CoopeVictoria**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en  
Electrónica con el grado académico de Licenciatura**

**José Alberto Bogantes Hidalgo**

**Cartago, Noviembre 2016**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**  
**PROYECTO DE GRADUACIÓN**  
**ACTA DE APROBACIÓN**

**Defensa de Proyecto de Graduación**  
**Requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica**  
**Grado Académico de Licenciatura**  
**Instituto Tecnológico de Costa Rica**

El Tribunal Evaluador aprueba la defensa del proyecto de graduación denominado Medidor de masa del café de un silo en el Beneficio CoopeVictoria, realizado por el señor José Alberto Bogantes Hidalgo y, hace constar que cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

**Miembros del Tribunal Evaluador**

  
Ing. Faustino Montes de Oca Murillo

Profesor lector

  
Ing. Marvin Hernández Cisneros

Profesor lector

  
Ing. Néstor Hernández Hostaller

Profesor asesor

Cartago, noviembre 2016

## **Declaratoria de autenticidad**

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado, en su totalidad, por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que se ha utilizado material bibliográfico, se ha procedido a indicar las fuentes mediante citas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.



José Alberto Bogantes Hidalgo

Cédula: 207150723

## Resumen

La presente tesis explica detalladamente cuáles son los pasos que se realizan para medir el nivel de producto en un silo que almacena café pergamino seco (por días, semanas o meses), utilizando un procedimiento por medio de la velocidad de la luz. Se analizó la forma de abarcar la mayor cantidad de puntos (más de mil) para tener una buena precisión por medio de tres equipos fundamentales: el primero es un medidor de nivel, el segundo es un dispositivo que ejerce movimiento en dos direcciones (azimut y elevación) y el tercero un controlador. Esto es con el objeto de calcular el volumen del contenido, y posteriormente la masa neta del café del silo que es el objetivo general del proyecto. La idea de medir el peso del café en kilogramos, es para establecer un control del inventario de las ventas del producto en el Beneficio CoopeVictoria, ya que actualmente se carece de un control apropiado en el inventario, lo que produce un manejo incorrecto del producto, generando así, el descontento de los clientes, el desequilibrio en la relación con los agricultores y la cooperativa, adicional a ellos, todo ello conlleva un efecto directo en la economía de la empresa.

Tomando como punto de partida, los problemas anteriormente indicados, se procedió a desarrollar una propuesta de solución que presente a los directivos de la cooperativa, una forma viable y robusta que les permita tener el control de la cantidad de producto en el silo por medio de un sistema de control electrónico.

Palabras claves: silo, pergamino seco, nivel, medidor de nivel, azimut, elevación, controlador

## **Abstract**

The following thesis meticulously explains what the steps are for measuring product level. This is through the speed of light in a silo that contains dry parchment coffee during days, weeks or months. The best form to embrace the majority of points and to get precision was analyzed through three fundamental pieces of equipment: the first one was a level measurement, the second one was a device that ejects bidirectional movement and the third one was a controller. The aim of this study and the general objective of this project is to obtain the volume of the content and the net weight of the coffee in the silo. The goal of measuring the weight of the coffee is to establish an inventory control in product sales at the Beneficio CoopeVictoria, because there is a lack of an appropriate inventory performance. Consequently, this leads to bad organization of assets, generating discontent with customers, the imbalance of the relationship between farmers and the Beneficio, and additionally, a deficit in business economics.

Taking as a starting point the above stated problems, a solution was developed which presented to the managers of CoopeVictoria, a viable and robust way that allows them to have control of the quantity of product in the silo by means of an electronic control system.

Keywords: silo, dry parchment, level, measure of level, azimuth, elevation, controller

## **Dedicatoria**

Este proyecto es dedicado a mis padres José Bogantes Rojas y Xinia Hidalgo Oviedo, ya que han sido dos personas fundamentales que me han apoyado, aconsejado y se han preocupado porque mi persona salga adelante en los estudios desde niño hasta la actualidad. Siempre he contado con su presencia durante mis estudios en la escuela, el colegio, en la universidad y en cada uno de los traslados a la provincia de la sede central del Tecnológico de Costa Rica. Siempre he contado con su apoyo durante la realización del proyecto de graduación. A ellos va dedicado este proyecto pues los logros obtenidos no se habrían alcanzado respaldo incondicional.

## **Agradecimientos**

Agradezco primeramente a Dios por haberme permitido alcanzar los objetivos a los cuales he llegado como futuro ingeniero electrónico. Porque gracias a Él las pruebas, los obstáculos fueron superados y con su infinita misericordia me ha acompañado en cada momento de mi vida. El título primero es por Él y para Él.

Agradezco a CoopeVictoria R.L. por abrirme las puertas para poder desarrollar el proyecto de graduación y cursar por el título de licenciatura de ingeniería electrónica.

Agradezco en especial a Don Allan Núñez gerente y propietario de NV Tecnologías por brindarme la asesoría y corresponder su conocimiento para solventar el problema de la mejor forma posible.

Agradezco al TEC como universidad por ofrecer una carrera con alta demanda laboral y además a los profesores del TEC de los que fui estudiante, entre ellos a los de la Escuela de Electrónica, sobre todo a Néstor Hernández que fue mi asesor, quien me instruyó y me dio confianza para elaborar como ingeniero el proyecto de graduación.

Agradezco a mis abuelos que, aunque no son mis padres biológicos actúan como tal, puesto que también se preocupan y desean lo mejor para mí.

Agradezco a todos los que colaboraron para llevar a cabo el proyecto: profesores, compañeros colegas y de otras carreras.

Agradezco de igual forma a todos los familiares y amigos por sus oraciones, motivaciones, consejos y demás que no influyeron directamente pero sí moralmente en la realización del proyecto.

# Índice general

<b>Resumen</b> .....	3
<b>Abstract</b> .....	4
<b>Dedicatoria</b> .....	5
<b>Agradecimientos</b> .....	6
<b>1. Introducción:</b> .....	12
<b>2. Descripción del Problema</b> .....	17
<b>3. Propuestas de solución</b> .....	20
<b>3.1. Presión del Café</b> .....	20
<b>3.1.1. Justificación de solución</b> .....	21
<b>3.2. Celdas de carga</b> .....	23
<b>3.2.1. Justificación de Selección</b> .....	24
<b>3.3. Nivel del café en el silo</b> .....	25
<b>3.3.1. Justificación de Selección:</b> .....	26
<b>4. Meta y Objetivos</b> .....	28
<b>4.1. Meta</b> .....	28
<b>4.2. Objetivo general</b> .....	28
<b>4.3. Objetivos Específicos</b> .....	28
<b>5. Desarrollo de Solución Escogida</b> .....	29
<b>5.1. Diagramas de Nivel</b> .....	29
<b>5.1.1. Nivel 1</b> .....	29
<b>5.1.2. Nivel 2</b> .....	30
<b>5.1.3. Nivel 3: Modelo de control</b> .....	32
<b>5.2. Modelo matemático</b> .....	39
<b>5.2.1. Análisis físico-matemático</b> .....	41
<b>5.2.2. Análisis en el eje azimut</b> .....	44
<b>5.2.3. Análisis en el eje de elevación</b> .....	44
<b>5.3. El software</b> .....	46
<b>5.3.1. Diagrama de bloques del PLC</b> .....	46
<b>Sección 5.3.2 Diagrama flujo</b> .....	55
<b>5.4. Equipo: Componentes</b> .....	61
<b>5.4.1. Sensor láser LM80</b> .....	61

5.4.2.	Gimbal .....	63
5.4.3.	Controlador (PLC) .....	64
5.4.4.	Sensor con codificador óptico.....	65
5.4.5.	Motor con reducción .....	67
5.4.6.	Servomotor MG996R.....	67
6.	Otras formas de Medir Nivel.....	69
6.1.	Medición de nivel por tiempo de retorno .....	69
6.1.1.	Radar libre de Micropolit.....	70
6.1.2.	Radar guiado del Levelflex M .....	71
6.1.3.	Radar ultrasónico Prosonic S/M/T. ....	71
6.2.	Mapeo de superficies en 3D .....	72
7.	Resultados Obtenidos.....	73
8.	Análisis de objetivos realizados y resultados obtenidos .....	79
9.	Presupuesto .....	83
10.	Conclusiones .....	85
11.	Recomendaciones .....	86
	Bibliografía .....	87
Apéndice A.1	Vistas e Isométrico del Gimbal.....	90
Apéndice A.2	Lógica del programa del PLC .....	93
Anexo B.1	Especificaciones del Motor .....	94
Anexo B.2	Especificaciones del Servomotor .....	95

# Índice de Figuras

Figura 1.1. Café fruta .....	14
Figura 1.2. Café pergamino húmedo (Scheffler. J, 2010) .....	14
Figura 1.3. Café pergamino seco, (Martin. M, 2012).....	14
Figura 1.4. Café oro, (2000 Agro, 2014).....	15
Figura 1.5. Pulpa .....	15
Figura 3.1 Silo (Dan Cosgrove Ltd, 2014).....	20
Figura 3.2 Configuración Puente Wheanstone.....	23
Figura 3.3 Celdas de carga en el silo (montaje, célula).....	24
Figura 5.1 Ángulos azimut y elevación.....	33
Figura 5.2. Llenado del silo.....	35
Figura 5.3. Vaciado del silo .....	35
Figura 5.4. Base para el Gimbal .....	37
Figura 5.5. Posición inicial del sensor y el Gimbal.....	39
<i>Figura 5.6. Eje de coordenadas de la planta .....</i>	<i>45</i>
Figura 5.7. Diagrama de flujo .....	59
Figura 5.8. Sensor LM80.....	62
Figura 5.9. PLC AC500 PM554-ETH y acople AX561.....	64
Figura 5.10. Sensor codificador óptico .....	66
Figura 5.11. Motor con reducción para eje azimut.....	67
Figura 5.12. Servomotor para eje de elevación .....	67
Figura 5.13 Sistema Gimbal con todos los componentes.....	68
Figura 5.14 Gimbal en el silo .....	68
Figura 6.1 Radar libre de Micropolit.....	70
Figura 6.2 Radar guiado del Levelflex M .....	71
Figura 6.3 Radar ultrasónico Prosonic .....	71
Figura 6.4 Curvas de nivel .....	72
Figura 6.6 Sensor VM3D .....	72
Figura 1.1 Salida de tensión de amplificar la señal del sensor a 4mA .....	75
Figura 1.2 Salida de tensión de amplificar la señal del sensor a 20 mA .....	75
Figura 1.3. Altura vs Tensión.....	76
Figura 1.4 Masa del café en el silo vs señal del sensor .....	78
Figura A 1.1 Vista frontal de la vista del Gimbal .....	91
Figura A 1.2 Vista lateral izquierda del Gimbal .....	91
Figura A 1.3 Vista superior del Gimbal .....	92
Figura A 1.4 Isométrico del Gimbal.....	92
Figura A 2.1 Código del Controlador.....	94
Figura B. 1.1 Dimensiones del Motor .....	95
Figura B. 2.1 Dimensiones del Servomotor .....	96

## Índice de Tablas

<b>Tabla 5.1. Entradas y salidas por bloque del diagrama de nivel 2</b> .....	30
<b>Tabla 5.2 Definición de las variables del diagrama de nivel 3</b> .....	34
Tabla 5.3. Secuencia de la lógica del software.....	48
<b>Tabla 5.4. Resumen de Tabla 1 con todos los ángulos de elevación</b> .....	53
<b>Tabla 5.5. Datos de entrada del programa</b> .....	56
<b>Tabla 5.6. Declaración de los datos</b> .....	56
<b>Tabla 5.7. Rango de altura según la corriente</b> .....	62
<b>Tabla 5.8. Especificaciones del sensor laser LM80</b> .....	62
<b>Tabla 5.9. Entradas y salidas al PLC</b> .....	64
<b>Tabla 7.1. Altura de silo respecto a la señal de corriente del sensor</b> .....	74
<b>Tabla 7.2. Altura y masa según la corriente de entrada</b> .....	78
<b>Tabla 8.1 Porcentaje de error entre pesos</b> .....	81
<b>Tabla 9.1. Presupuesto del proyecto</b> .....	84
<b>Tabla A 1.1 Parámetros de la planta del Gimbal</b> .....	90
<b>Tabla B. 1.1 Parámetros del motor</b> .....	95
<b>Tabla B. 2.1 Parámetros del Servomotor</b> .....	96

## Índice de Diagramas

Diagrama 5.1 Bloque de nivel 1 .....	29
Diagrama 5.2 Bloque de nivel 2.....	30
Diagrama 5.3 Modelo de control y diagrama de nivel 3 .....	32
Diagrama 5.4 Entradas y salidas del PLC .....	47
Diagrama 5.5 Diagrama de bloques después de capturar todos los datos .....	61

## 1. Introducción:

La Cooperativa Agrícola e Industrial Victoria R.L., mejor conocida como Cooperativa Victoria R.L. o simplemente CoopeVictoria (este nombre genérico se seguirá utilizando en todo el documento para referirse a la empresa) está ubicada en San Isidro de Grecia, Alajuela, Costa Rica. Fue fundada en 1943 como propiedad del Banco Nacional de Costa Rica y posteriormente en julio de 1965 se establece como entidad autónoma gracias al esfuerzo de pioneros de la zona. Cuando se fundó contaba con veinte socios y actualmente cuenta con cerca de 3000 asociados, 232 empleados fijos y 60 empleados ocasionales. Se dedica a labores agrícolas tales como la producción de azúcar a partir de la caña y su comercialización, y al procesamiento, elaboración y comercialización de productos a base de café. La empresa también elabora biodiesel a partir de desechos de aceites.

Como empresa ofrece a todo el público servicios importantes para el campo, la construcción, el vehículo, a nivel personal y familiar. Por eso cuentan con: el jardín de paz, que es un camposanto de más de 3000 lotes para construcción de lápidas. El taller de suministros, que ofrece productos de ferretería, para el hogar y por supuesto para el campo agrícola. La estación de servicios, donde se venden accesorios para el vehículo, además brinda el servicio de venta de combustibles, cambios de aceite y mucho más.

Otro campo importante donde ha incursionado la cooperativa es en los servicios financieros, donde ofrecen crédito a los asociados con base en las producciones entregadas a la cooperativa. Desde hace un poco más de 7 años, cuenta con una planta para la elaboración de biodiesel, ésta se creó también con el fin de incentivar a los estudiantes de escuelas y colegios a reciclar el aceite<sup>1</sup> desechado en los hogares y transformarlo en materia prima como combustible poco contaminante para los vehículos, de esta forma, CoopeVictoria ayuda a disminuir el impacto ambiental que genera el mal manejo de los aceites y a su vez premia a las instituciones que mayor cantidad de aceite aportan por mes.

---

<sup>1</sup> Aceites de latas de atún, de frituras.

CoopeVictoria, cuenta con un departamento dedicado a brindar asesoraría técnica agronómica a sus asociados, brindándoles los conocimientos y cuidados de los terrenos donde se cosecha café y caña de azúcar (esto es con el fin de mantener las certificaciones del café que comercializa) en lo que corresponde al uso correcto y responsable de los fertilizantes y herbicidas para la protección del medio ambiente. También les brinda asesoría en lo aspecto de salud ocupacional y primeros auxilios.

En sus instalaciones, CoopeVictoria cuenta con un ingenio<sup>2</sup> donde se produce azúcar de alta calidad que comercializa, ésta se ofrece al público en tres presentaciones: crudo, blanco y refinado.

Finalmente, y no menos importante, también cuenta con un beneficio<sup>3</sup> donde el café es procesado y empacado para su posterior comercialización.

CoopeVictoria está certificada con el sello de Comercio Justo. Esta certificación lo que busca es que las entidades cumplan con criterios relacionados con el área administrativa, de aspectos sociales y medio ambientales. Si un producto tiene este sello significa que mantiene los estándares más altos de calidad. En otras palabras, CoopeVictoria ha adquirido un compromiso con los clientes, el cual consiste en ofrecer productos y servicios de alta calidad.

Tiene un compromiso con el asociado, los colaboradores, la comunidad y el ambiente de tal forma que las actividades agrícolas, industriales y comerciales se desarrollen eficientemente (CoopeVictoria, 2016). Parte del compromiso ambiental incluye reutilizar todos los desechos provenientes del café y la caña de azúcar para producir abono orgánico para los terrenos cafetaleros y otros cultivos.

CoopeVictoria produce dos tipos de café de alta calidad: CoopeVictoria y Monte Camejo que son vendidos a nivel nacional e internacional. La alta calidad se logra gracias a dos aspectos que son, la calidad de los terrenos donde se siembra el cafeto<sup>4</sup> y el manejo que realiza de la fruta en el beneficio.

---

<sup>2</sup> Ingenio: Se le llama al lugar donde se procesa la caña de azúcar para la elaboración del azúcar.

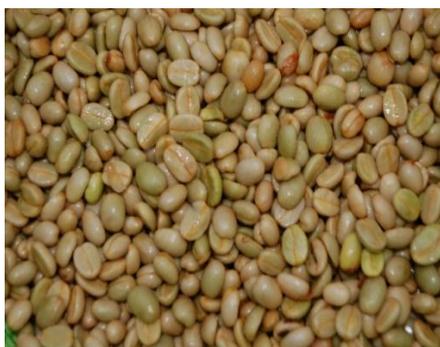
<sup>3</sup> Beneficio: Es el lugar donde se procesa el café en fruta para generar el que llega a la mesa de los costarricenses y en el extranjero.

<sup>4</sup> Cafeto: Planta donde se cosecha café.

La forma del café que llega a CoopeVictoria recolectado se le conoce como café fruta (ver figura 1). El proceso del beneficiado del café, comienza recibiendo el producto en fruta y hacerlo pasar por una serie de equipos y máquinas que procesan la fruta en café oro (ver figura 4) que es la forma del granulado listo para la venta. Durante el proceso el grano de café va generando diferentes subproductos, tales como pergamino húmedo (figura 2), la cáscara de la fruta conocida como pulpa (5.1) y el pergamino seco (ver figuras 3), el cual es almacenado en contenedores cilíndricos conocidos como silos. Después de cierto tiempo el café se extrae de estos cilindros, y por medio de una máquina llamada peladora, se extrae la cáscara del pergamino obteniendo así el grano en café oro, al cual se le mide su peso, su tueste y se muele para luego ser empacado y comercializado.



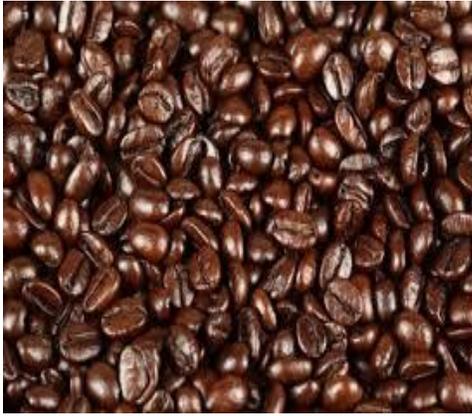
*Figura 1.1. Café fruta*



*Figura 1.2. Café pergamino húmedo (Scheffler, J, 2010)*



*Figura 1.3. Café pergamino seco, (Martin, M, 2012)*



*Figura 1.4. . Café oro, (2000 Agro, 2014)*



*Figura 1.5. Pulpa*

Es importante indicar, que la calidad del producto final, está determinada por el origen de donde fue cultivado el grano y por el peso del mismo, es por esto que los agrónomos establecieron un rango que determina el alcance de la calidad<sup>5</sup> del café, dicho rango se encuentra entre un 10% y 12% de humedad. Si se encuentra por debajo del rango mínimo el café tendrá mala calidad, es un producto que se pierde y es difícil de vender porque la consistencia no es la adecuada. Si se encuentra por encima del rango, el café tendrá mucha agua y el resultado final no será atractivo para el cliente (Café de Colombia, 2010). Por esta razón, es común que los beneficios cuenten con secado mecánico para obtener el rango de secado adecuado del producto.

---

<sup>5</sup> Calidad del café se refiere a que este tenga buen sabor y aroma

Para llegar al rango de porcentaje se debe equilibrar la humedad con la temperatura del grano, ya que un café de baja calidad se transforma en pérdidas para la cooperativa y un descontento en los clientes. Es por eso que CoopeVictoria se esmera por ofrecer un producto de alta calidad para los consumidores.

Para llegar a esa alta calidad es importante como empresa realizar un eficiente inventario, el cual sirve para conocer financieramente cuánto hay de materia prima en una empresa. Así como un supermercado que realiza inventario una vez por año para saber cuánto dinero hay en mercadería, la CoopeVictoria necesita conocer cuánto café tiene durante el proceso de elaboración antes de llevarlo a la venta de una forma eficiente que no se engañe así misma y tampoco comprometan a los clientes.

Otro factor que determina el valor del café es su peso. Es importante conocer todos los factores que hacen variar la masa del grano del café, como son la humedad, la temperatura y la densidad. Este último aspecto constantemente varía durante la elaboración de café oro, debido que se van extrayendo materiales propios del grano, que hacen disminuir su volumen. La densidad del grano en fruta no es la misma que la del pergamino o la del café oro, ya que la fruta presenta diferentes densidades dependiendo de la etapa de la cosecha, es decir, al inicio, a mediados y al final la densidad es diferente, lo que genera a su vez una variación en la densidad del pergamino y por ende del oro.

La razón por la que varía la densidad del café se debe por varias razones como son, el tratamiento de los terrenos cafetaleros, el exceso o escases de agua y el punto correcto de maduración

Por otra parte, es importante saber que, tanto la densidad como la humedad y la temperatura influyen en la masa del café, y que el producto se vende según la calidad y el peso de este. Tomando en consideración estos aspectos, es que CoopeVictoria, desea tener un sistema que le permita conocer cuánto café pergamino almacena en sus silos, ya que esta será la herramienta que le permitirá conocer su inventario y así estructurar sus metas de venta.

## 2. Descripción del Problema

Además de la humedad, la temperatura y la densidad se deben tener cierto cuidado a la hora de estimar la medida de masa de un café durante el proceso de elaboración del grano oro. Ese cuidado consiste en ubicar un lugar en el beneficio donde el café se encuentre estático, ya que desde el momento en que el producto fruta llega a la empresa, el café está en constante movimiento pasando de una máquina a otra. Por tanto, establecer una medida de masa cuando el granulado se mueve es muy impreciso.

Ese lugar donde el café permanece inmóvil por cierto período de tiempo<sup>6</sup> es en el silo, por lo que el problema se basa en medir masa del café en el silo. En el beneficio, CoopeVictoria puede relacionar la masa del café pergamino seco con la masa del producto en oro por medio de un porcentaje estimado. Según la gerencia, hay una pérdida del 20% en la masa entre ambos subproductos, por ejemplo, si un quintal de café pergamino seco pesa 100 libras (lb), el quintal de café oro tiene una capacidad aproximada de 80 lb. Sin embargo, la media que se obtiene actualmente carece de precisión, puesto que se obtiene según la experiencia de los trabajadores, teniendo el factor humano como una de las causas de la imprecisión. En otras palabras, CoopeVictoria carece de un sistema que le permita estimar de forma más precisa el valor neto de la masa del café pergamino seco dentro del silo.

Las preguntas que se pueden hacer ahora es, ¿por qué CoopeVictoria quiere estimar la masa neta del café en el silo?, ¿Qué ventaja trae establecer esa medición? La razón es porque CoopeVictoria desea realizar inventario de una forma eficiente en el pergamino seco de tal forma que pueda tomar decisiones y fijar el horizonte en las ventas de sus productos de café.

---

<sup>6</sup> Período de tiempo pueden ser días, semanas o meses según las necesidades de CoopeVictoria.

Es importante para toda empresa así también para CoopeVictoria establecer objetivos, controlar las ganancias, tomar buenas decisiones, organizar las ventas, así como realizar inventarios para desarrollarse como compañía ahora y en el futuro, sobre todo en estos tiempos donde la situación es cada vez más difícil, puesto que la tendencia es escoger un mercado económico y el cliente es cada vez más exigente con la calidad de los productos, la presentación, así como el sabor o aroma del mismo. Es por eso que una compañía debe adecuarse al cliente y para ello es importante manejar las ventas eficazmente, según lo aclara Lefcovich en un artículo web denominado *Las Pequeñas empresas y sus fracasos* (Lefcovich, M., 2004). La falta de planeación lleva al gerente a no establecer los objetivos en el momento adecuado ni de forma clara y concisa. Al no tener un plan en un negocio hace que este carezca de enfoque, es decir, el público al que va dirigido, la satisfacción del cliente y el compromiso de la empresa. La ausencia de un enfoque tiende a un mal manejo en el inventario y por consiguiente los insumos, los productos de venta, la liquidez de la empresa descienden y esto provoca la insatisfacción de los consumidores, los empleados, los gerentes, y todo ello puede llevar a la ruina. Para evitar el fracaso es necesario mantener estable una compañía, es decir, fijar buenos objetivos, organizar las ideas, ubicar el horizonte y no perder el rumbo en cuanto a la relación con el cliente, saber cuáles puntos se debe corregir y cuáles eliminar para permitir que la empresa se supere.

CoopeVictoria sabe de esto puesto que tiene más de setenta años consolidada en el país y cuenta con el sello de Comercio Justo, sin embargo, es necesario e importante aplicar el inventario eficientemente. Se dice que una empresa que mantenga un buen control de su inventario obtiene beneficios tales como tomar buenas decisiones, reducir costos, mayor rentabilidad y clientes satisfechos, según página web referido a las ventajas y desventajas de los inventarios (Hernández. D, 2013). Al tener un control en el inventario evita a cualquier empresa adquirir productos en exceso, de tal forma que se establece un equilibrio entre los ingresos y egresos. La importancia radica en un único objetivo que toda compañía debe tener, como es obtener utilidades. En otras palabras, sin inventario no hay ventas como se menciona en una publicación anónima en Buenosnegocios.com (Buenosnegocios.com, 2013).

En síntesis el problema de CoopeVictoria es la inseguridad en las ventas de café debido al ineficiente inventario en la materia prima como consecuencia de no conocer la medida de la masa del café pergamino seco dentro del silo.

### 3. Propuestas de solución

Para buscar una solución al problema de medir la masa del café en un silo, se analizaron tres opciones, las cuales se plantean a continuación, así como un análisis de cada una de ellas donde se incluyen los pros y los contras que finalmente permitirán determinar la opción más viable para la cooperativa.

Un silo es una estructura cilíndrica tal como se observa en la figura 5 de siete metros de diámetros y diez metros de altura que según dato de la empresa, estos contenedores tienen capacidad para almacenar alrededor de 3400<sup>7</sup> quintales de café pergamino seco aproximadamente.



*Figura 3.1 Silo (Dan Cosgrove Ltd, 2014)*

#### 3.1. Presión del Café

Para medir la masa del café en un silo, se puede realizar por medio de dos principios físicos conocidos como la II Ley de Newton y la presión de un objeto sobre una superficie. (Sears, 2004). La presión ‘P’, expresada en pascales (Pa), de un objeto sólido se define como la relación entre la fuerza ‘f’ expresada, en N éwtones (N), que un objeto ejerce sobre una superficie ‘S’ cuya unidad es el metro cuadrado (m<sup>2</sup>).

$$P = \frac{f}{S} \quad (3.1)$$

---

<sup>7</sup> Un quintal de café equivale a 100 libras y una libra son 0.453 kilogramos (kg), por tanto el silo puede almacenar cerca de 154200 kg.

Consiste en colocar varios medidores de presión por todo el silo de forma que se obtenga dicho valor donde el café aplica una fuerza sobre la superficie del silo. Partiendo del hecho que se conoce la segunda ley de Newton en caída libre:

$$f = m * g \quad (3.2)$$

Donde m es la masa del objeto y g la gravedad terrestre.

Entonces si se sustituye 3.2 en 3.1, se tiene que:

$$P = \frac{m * g}{S} \quad (3.3)$$

Despejando m de 3.3:

$$m = \frac{P * S}{g} \quad (3.4)$$

Con la ecuación 3.4, se obtiene la relación entre la masa de un objeto y la presión que ejerce el mismo sobre un área determinada. Sin embargo, para contar con un sistema que mida la presión dentro del silo, se vuelve un problema muy grande, dado que se trabaja con sólidos granulados, la presión de cada grano va a estar apuntando en diferentes direcciones y no solo en dirección hacia abajo, es decir que la presión general será muy irregular, dado que también se ejerce presión en las paredes del silo, por lo que necesitaría medir la misma en todo el perímetro del silo y no solo en la base.

### **3.1.1. Justificación de solución**

Como se indicó anteriormente, la presión de un sólido granulado almacenado en un cilindro, apunta en varias direcciones, haciendo necesario la utilización de una gran cantidad de medidores tanto en la base como en las paredes del silo, posteriormente sería necesario unificar todos estos datos y aplicar una serie de operaciones matemáticas para poder obtener un resultado final, todo esto representaría una inversión de alto costo y a su vez un poco imprecisa, ya que se podrían dejar puntos importantes del silo por fuera de las mediciones, lo que generaría al final un dato falso de la masa contenida en el silo. Luego de revisar la propuesta con los representantes

de CoopeVictoria y analizar los costos que implicarían el implementar la solución y la posibilidad tan alta de que el valor obtenido no fuera el real, se decidió descartar la misma.

### 3.2. Celdas de carga

Una segunda opción, que se puede utilizar para medir la masa en un silo son las llamadas células de carga, son un tipo de báscula industrial diseñadas para silos, éstas cambian la fuerza que ejerce un cuerpo sobre una estructura metálica por una señal eléctrica que aumenta o disminuye de acuerdo al peso de la carga. Utiliza el principio físico de elasticidad<sup>8</sup>, como se indica en el libro Física Universitaria (Sears, 2004), que se coloca en una configuración de puente Wheatstone<sup>9</sup> (figura 3.2)

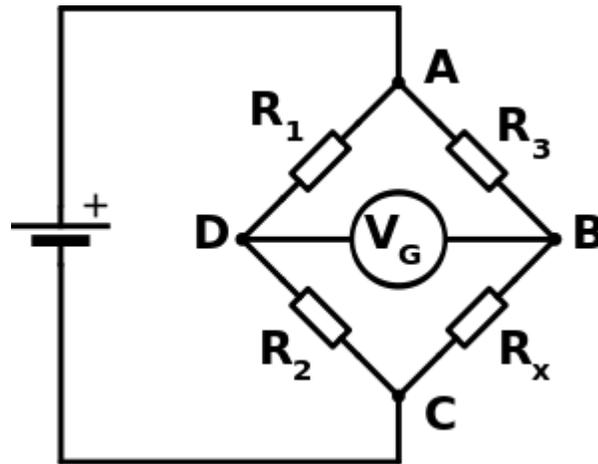


Figura 3.2 Configuración Puente Wheanstone

Existen diversos medidores de este tipo, en el mercado se pueden encontrar desde analógicos, digitales, electromagnéticos e híbridos (Sistema de Pesaje y Control, 2016). Se debe conocer el peso del silo cuando está en vacío, la celda se programa con el peso del silo como medida fija, cuando recibe el peso del contenido junto con la del silo, el software instalado en un computador, realiza la diferencia de pesos y proporciona el peso real del contenido del silo. La figura 3.3 muestra físicamente como se verían las celdas de carga puestas en el silo. Las bases de color verde en forma de triángulo es la configuración tipo Wheatstone que se mencionó anteriormente.

<sup>8</sup> También conocida como la Ley de Hook, se refiere al cociente del esfuerzo que causa el cambio de forma y la deformación que describe el cambio de forma resultante

<sup>9</sup> El circuito más sensitivo que existe para medir impedancia de un componente ()

Es un sistema de pesaje un poco complejo, pero muy preciso. Sin embargo, para poder instalar una celda de estas en los silos de CoopeVictoria, se requeriría que la misma tuviera la capacidad de soportar pesos de al menos 200 toneladas, el problema es que el precio de cada celda con esa capacidad, ronda un precio de 413 euros. Además se debe hacer un trabajo adicional ya que el silo de CoopeVictoria tiene sus bases en el suelo y está construido de un material compacto y al mismo tiempo de peso muy elevado. Se tiene que realizar el trabajo que trae como consigo la modificación de activos de la compañía, no solo en el silo sino en los tubos por donde se descarga el café en el contenedor. Trabajo que aumenta los costos de esta solución. Además que no es bien visto por CoopeVictoria, debido a la modificación que se tendría que hacer en un equipo que actualmente y desde que se construyó marcha perfectamente.



*Figura 3.3 Celdas de carga en el silo (montaje, célula)*

### **3.2.1. Justificación de Selección**

Además del aspecto económico existe otro punto técnico importante, se trata de que el silo de la Cooperativa está sentado en el suelo, no es una estructura cónica como habitualmente se conoce, por lo cual sería necesario realizar un gran trabajo extra para hacer el montaje las celdas. Al igual que se hizo con la propuesta 1, se presentó al gerente del beneficio de CoopeVictoria donde se analizó ampliamente sus muchos beneficios, pero también los altos costos que se requerirían para su implementación, con base en esos análisis, se llegó al acuerdo de que esta propuesta no es viable para implementarla, por lo tanto la solución fue descartada

### 3.3. Nivel del café en el silo

La propuesta consiste en obtener la medida de la masa (P) del café dentro del silo de forma indirecta, conociendo el volumen y el nivel de ocupación del silo. Sin embargo, es importante saber que la altura del café dentro del silo es muy variable. Debido a que se trabaja con sólidos granulados la altura es inestable, dado que tiende a hacer múltiples alturas o niveles diferentes en el interior del silo. Cuando es el momento del llenado del contenedor la tendencia es la formación de montañas de café, pero cuando es el momento de la descarga, lo que sucede es la formación de conos irregulares (ver figuras 5.3 y 5.4), haciendo así que el nivel sea muy variable.

La solución radica en obtener una altura promedio ( $H_{prom}$ ) midiendo el nivel del silo en diferentes puntos de forma que la variación de alturas mencionada no afecte el procedimiento.

El siguiente factor es el área (S) de la base del silo, que es circular con radio constante (r) de 3.5 metros aproximadamente.

Conociendo la altura promedio, la densidad volumétrica del café pergamino ( $\rho^{10}$ ), y el área, se puede obtener la masa mediante la ecuación 5 donde los tres factores son proporcionales a P.

$$P = \rho * S * H_{prom} \text{ [kg]} \quad (3.5)$$

Donde S es el área del silo:

$$S = \pi * r^2 \quad (3.6)$$

La forma de medir el nivel es por medio de un medidor diseñado para tal fin que detecta la distancia desde la parte superior del silo a un punto determinado, ya que trabaja con láser, por tanto, la distancia es el producto de la velocidad de la luz y el tiempo que dura en propagarse la luz a un punto determinado.

$$d = v * t \quad (3.7)$$

---

<sup>10</sup> Letra griega Rho

Donde:

v: velocidad de la luz a 299 792 458 (m/s)

t: tiempo (s)

d: distancia (m)

Se debe conocer la altura máxima (Hmax) del silo que abarca desde el suelo hasta la salida del láser<sup>11</sup>. El nivel se obtiene de la diferencia entre la distancia d y dicha altura.

$$H = Hmax * d \quad (3.8)$$

Donde H es la altura genérica que resulta del cálculo anterior.

Para hacer una medida de nivel con mayor precisión se deberá obtener más datos alrededor del silo, ya que el nivel en un punto es diferente al de otro incluso visto desde el mismo ángulo. De esta forma también se obtendría una distancia promedio  $d_{prom}$ . Cambiando este dato en la ecuación 8, el resultado sería la altura promedio.

$$d_{prom} = \frac{d1+d2+d3+\dots+dn}{n} \quad (3.9)$$

Donde n es la cantidad de datos obtenidos. Por lo que la ecuación 3.8 se modifica como:

$$H_{prom} = Hmax - d_{prom} \quad (3.10)$$

### 3.3.1. Justificación de Selección:

Con relación a la propuesta 2, esta solución es de bajo costo, y ofrece una precisión acorde a lo que se requiere. Además, no se requiere modificar el silo para instalarla y además, necesita sólo un componente, el medidor de nivel.

---

<sup>11</sup> El sistema estaría en el centro del silo y en la parte superior del mismo donde se ubica el medidor láser.

Finalmente, al ser analizada con ingenieros del beneficio como del TEC y posteriormente con la gerencia de CoopeVictoria, se acordó que esta propuesta es la forma más viable, dado que es robusta y tiene un precio alrededor de \$3000 USD, lo que la hace factible a ser implementada en un futuro cercano.

Luego de hacer el análisis de las tres propuestas, se determinó que el proyecto se realizará con base en la propuesta número 3, dado que la que técnicamente es robusta y con precisión aceptable, además de que es la que a CoopeVictoria le interesó por las características anteriormente indicadas.

## **4. Meta y Objetivos**

### **4.1. Meta**

El proyecto tiene como meta establecer un aporte en el control del inventario del café pergamino almacenado en los silos.

### **4.2. Objetivo general**

Diseñar un sistema de medición que calcule la masa neta del café pergamino seco almacenado en un silo.

Indicador: el personal de CoopeVictoria sabe cuál es el peso de café pergamino que se requiere para obtener un quintal de café oro, por lo cual después de medir la masa por medio del sistema, se medirá el café oro tal como se mide actualmente y se compara con el valor establecido por la cooperativa.

### **4.3. Objetivos Específicos**

1. Investigar las distintas formas que se pueden utilizar para de medir el nivel de producto almacenado en un silo. Indicador: internet, libros, hoja de datos, expertos.
2. Analizar un sistema que permita medir la altura del café pergamino almacenado en un silo. Indicador: por medio de un medidor de nivel.
3. Diseñar un sistema que permita al medidor de altura obtener la mayor cantidad de puntos del volumen del silo. Indicador: Gimbal.
4. Diseñar la lógica para que un controlador maneje las señales de altura y genere un valor único. Indicador: Controlador lógico programable (PLC por sus siglas en inglés).

## 5. Desarrollo de Solución Escogida

En este capítulo se presenta el desarrollo de la propuesta seleccionada. Para ello se utilizarán diagramas de nivel, los cuales por medio de bloques mostraran las entradas y salidas del sistema, para posteriormente realizar un análisis por medio de un modelo matemático y un diagrama de flujo del software que será analizado de forma analítica. Finalmente, se hablará del equipo a utilizar.

### 5.1. Diagramas de Nivel

En esta sección se analiza el sistema desde un punto de vista general hacia lo específico explicando el funcionamiento del sistema de medición por medio de diagramas de nivel.

#### 5.1.1. Nivel 1

En el diagrama 5.1 muestra un bloque que representa el conjunto de todo el sistema de medición, que comienza con un entra principal denominada *Start* y una salida general denominada *Masa* expresada en kilogramos (kg).



*Elaborado en Paint*

*Diagrama 5.1 Bloque de nivel 1*

El sistema inicia cuando el usuario presiona un botón de inicio. Es importante resaltar, que por ahora no se describirá la parte interna del bloque, pero en las siguientes dos subsecciones se ampliará el bloque denominado *Sistema de Medición*. El resultado que se desea obtener de este bloque, es el valor de la masa del café almacenado en el silo en kilogramos.

### 5.1.2. Nivel 2

Se observa en el diagrama 5.2 un desglose de lo que hay en el bloque *Sistema de Medición* del diagrama 5.1 pero no a un nivel avanzado como el de nivel 3. En el diagrama de nivel 2 se observan bloques, denominados: *Nivel*, *Superficie* y *Densidad*, donde la salida del primero es la entrada del segundo y así sucesivamente. En la tabla 1, se presenta el contenido y salida de cada una de las entradas y salidas de los bloques.



*Elaborado en Paint*

*Diagrama 5.2 Bloque de nivel 2*

**Tabla 5.1. Entradas y salidas por bloque del diagrama de nivel 2**

Bloque	Entradas	Salida
Nivel	Start (S)	Hprom
Superficie (m <sup>2</sup> )	Hprom (m)	V (m <sup>3</sup> )
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	V (m <sup>3</sup> )	Masa (kg)

Microsoft Word

Como se dijo en la sección 5.1.1, el proceso inicia cuando el usuario presiona el botón de *Start*. La señal la recibe el bloque denominado *Nivel*, éste se encargará de procesar la señal y ejecutar una serie de rutinas que realizan la medición del contenido del silo tomando, para esto se utilizara el principio físico, que dice que la distancia se define como el producto de la velocidad y el tiempo que dura en llegar a un punto determinado.

El principio físico varía en que la velocidad es una constante conocida, la cual es la velocidad de la luz<sup>12</sup>, ya que el medidor trabaja por medio de un láser. Por lo tanto, para este caso, la distancia a cualquier punto se obtiene de multiplicar la velocidad de la luz con el tiempo que dura en propagarse el haz desde la salida del medidor hacia ese punto que ronda los nanosegundos (ver ecuación 3.7),

Se obtiene el nivel que no es más que una altura, sin embargo, al ser sólido granulado la superficie del café es irregular, no mantiene el mismo nivel en un mismo ángulo del láser. En este caso, lo que se hace es no abarcar un punto sino la mayor cantidad de puntos de tal forma que se promedie una altura. Esta salida va dirigida al bloque de *Superficie* el cual realiza una operación matemática que da producto el volumen ( $v$ ), ya que el valor de la superficie es contante y conocido, gracias a que el radio así lo es. Matemáticamente se expresa en la ecuación 5.1 se calcula con la ecuación siguiente.

$$v = H_{prom} * S \quad (5.1)$$

El volumen pasa al siguiente bloque denominado densidad  $\rho$ . Que por medio de la ecuación 5.2 se obtiene la masa como producto final que a la vez es salida del sistema. Cabe destacar que este nivel resume en tres pasos, cuál es la forma de medir masa en un silo, en este caso es café, pero podría aplicarse para cualquier otro tipo de granulado.

$$P = \rho * v \quad (5.2)$$

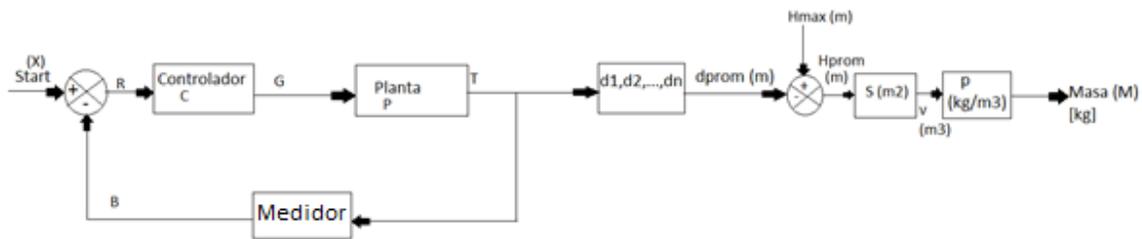
---

<sup>12</sup> Velocidad de la luz equivale a 299 792 548 m/s.

### 5.1.3. Nivel 3: Modelo de control

En esta parte se desarrolla el bloque que en la sección anterior se le denominó *Nivel*. Este diagrama (5.3) es un modelo de control, ya que consiste en una planta, un medidor y un controlador. La planta, que se observará más adelante en esta misma sección, tiene como función realizar movimientos bidireccionales, pero de forma coordinada, es decir, los dos movimientos no se dan al mismo tiempo. Para esto se necesita de un controlador que no solo va a estabilizar la planta sino que también recibirá la señal de inicio y la señal de los medidores.

Como se explicó en la sección 5.1.2, el objetivo no es medir un punto sino abarcar gran parte de la superficie del contenido. Esto quiere decir que se generará un ciclo entre Controlador-Planta-Medidor, que no termina hasta que el láser haya recorrido todo el interior del silo. En la tabla 2 se muestra qué función tiene cada variable del diagrama 5.3, así como las unidades de medidas según el Sistema Internacional de Unidades (SIU)

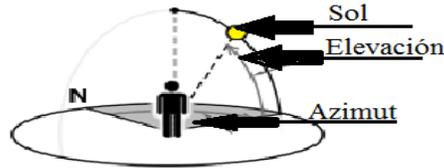


*Plant*

Diagrama 5.3 Modelo de control y diagrama de nivel 3

De todos los datos capturados se obtiene un promedio ( $d_{prom}$ ) para luego determinar la altura promedio ( $H_{prom}$ ), que se logra haciendo una diferencia entre la altura máxima ( $H_{max}$ ) del silo y  $d_{prom}$ . Como puede observarse los bloques siguientes se mantienen igual al diagrama del nivel 2. Solo que para reducir términos se le denominó 'S' a la bloque superficie y 'ρ' al bloque densidad, por lo que el resultado final es el valor estimado de la masa neta del café pergamino seco en el silo.

Para efectuar el análisis analítico que se hará en la sección 5.2 se ha recurrido al movimiento de un giroscopio en dos direcciones: denominados azimut<sup>13</sup> y elevación<sup>14</sup>. El primero rota en 360 grados (°) y el segundo gira 90°.



*Figura 5.1 Ángulos azimut y elevación*

El sistema consiste en tres partes fundamentales:

a. Medidor de nivel: Sensor láser

A partir de aquí cuando se mencione sensor láser se va a referir el medidor de nivel. Este dispositivo tiene como función medir distancia en un punto determinado por medio del principio físico que se mencionó en la sección 3.3. Como el contenedor es un cilindro sin tapa y se trabaja con sólidos granulados es difícil definir el nivel con un único punto medido por el haz, lo recomendable es abarcar todo el volumen posible para medir gran cantidad de puntos (más de mil) y de esta forma promediar el nivel. Las figuras 5.3 y 5.4 representan como se ve un silo con café en el momento de llenado y de vaciado. Se observó un problema que se da en este tipo de sólidos en los silos, el cual corresponde a que cuando se está llenando el silo la tendencia del café es formar montañas irregulares en el interior del silo; por lo contrario cuando se está vaciando lo que se sucede es la formación de conos, también irregulares. En otras palabras, es muy difícil medir nivel en un solo punto porque no se sabe con certeza cuál es el nivel real del silo. Por eso se promedia la distancia y luego la altura del contenido después de haber capturado más de mil datos. Sin embargo, medir en todo el silo no es posible únicamente con el sensor, son necesarias las dos partes siguientes.

---

<sup>13</sup> Azimut: se le conoce al ángulo que se forma entre la referencia (el norte) y la dirección hacia un cuerpo celeste (luna o sol) en sentido horario en el mismo plano de la referencia alrededor del horizonte del observador (ver figura 5.5).

<sup>14</sup> Elevación: ángulo vertical que se forma entre la posición del cuerpo celeste y el horizonte o plano del observador (ver figura 5.5).

**Tabla 5.2 Definición de las variables del diagrama de nivel 3**

<b>Variable</b>	<b>Función</b>	<b>Unidades</b>
Start (X)	Señal de inicio	True/False
Controlador (C)	Controlar el sistema	No Aplica
Planta (P)	El sistema	No Aplica
Sensor (Hs)	Medir distancia	No Aplica
dx	Distancias de Hs	metros
S	Superficie	Metros cuadrados
p	Densidad	Kilogramo por metro cúbico
R	Error de Modelo	M. Control
B	Salida de Hs	M. Control
G	Salida de C	M. Control
T	Salida de P	M. Control
dprom	Salida de dx	M. Control
Hmax	Altura máxima	Metros
Hprom	Diferencia Hmax y dprom	Metros
v	Volumen	Metros cúbicos
Masa (M)	Salida del sistema	Kilogramos

Microsoft Word



*Figura 5.2. Llenado del silo*



*Figura 5.3. Vaciado del silo*

## b. El Gimbal

Para abarcar todo el silo se requiere de un dispositivo que permita al sensor moverse, ya que por sí solo el medidor de distancia no lo hace. Lo única función del sensor es medir lo que le corresponde. Después de realizar una investigación para determinar que dispositivo puede mover el sensor para que abarque gran cantidad de volumen del silo, se llegó a que el Gimbal es una buena opción. Este aparato trabaja de forma controlada por medio de dos movimientos según los ejes: elevación y azimut. Parte de que es una aplicación de un giroscopio, que en este caso no se le adapta una cámara sino un sensor, y se mueve en dos direcciones de forma controlada. También se realizó una investigación de estos componentes en el mercado, posterior a ello se llegó a la conclusión de que resulta más factible construirlo que comprarlo puesto tiene un precio muy elevado para los costos de CoopeVictoria y además se le debe adaptar el sensor, lo cual hace que los del mercado se vuelvan inservibles para el proyecto. La figura 5.5 muestra el principio del que se ha basado para construir el Gimbal obtenida del artículo denominado *Cascade Control System for two Axis Gimbal System with Mass Unbalance* (Abdo. M, 2013). El cilindro de la imagen representa el sensor láser. La base es una plataforma que, no se ha diseñado como tal sino de una forma distinta por el hecho de que va a quedar boca abajo y al mismo instante pueda sostener el Gimbal en el techo, de tal forma que se eviten caídas o entrecruces de cables a la hora de girar.

El dispositivo se diseñó con un servomotor y un motor que permiten realizar los dos movimientos. El eje azimut cuenta con el motor, que gira el aparato 360 grados en ese eje, mientras que el eje de elevación está dirigido por el servomotor que tiene como requisito rotar el Gimbal 90 grados en ese otro eje, tomando como referencia una línea vertical imaginaria que divide el silo en dos partes iguales (ver figura 5.6). El eje azimut requiere de un sensor adicional como el de la figura (en la sección 5.4 se explica el sensor que se utilizó) que tiene como función detener el movimiento después de haber cruzado los 360 grados, esto con el fin de impedir que se mueva más de lo que se necesita en ese eje.

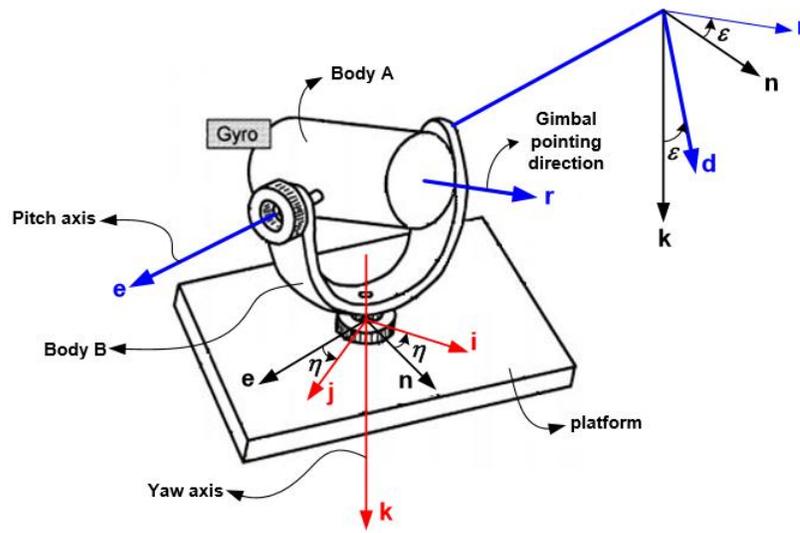


Figura 5.4. Base para el Gimbal

El movimiento bidireccional no sería posible sin el tercer paso, debido a que este permite controlar los ejes y los dos sensores. Este es la parte que acapara la mayor parte de la ingeniería, puesto que requiere controlar un sistema bastante complejo que se mueve en dos direcciones, por lo cual el modelo matemático también es muy avanzado, se debe considerar torques, ángulos, velocidad angular, momentos de inercias, momentos angulares y las masas involucradas.

### c. El controlador

Este es el diseño de la lógica de un controlador que recibe como entradas a los dos sensores y la general del sistema (*Start*). El usuario presiona el botón dando inicio al movimiento del Gimbal que comienza con el sensor láser apuntando hacia la pared del silo en ángulo de 90 grados con respecto a la vertical imaginaria (ver figura 5.6).

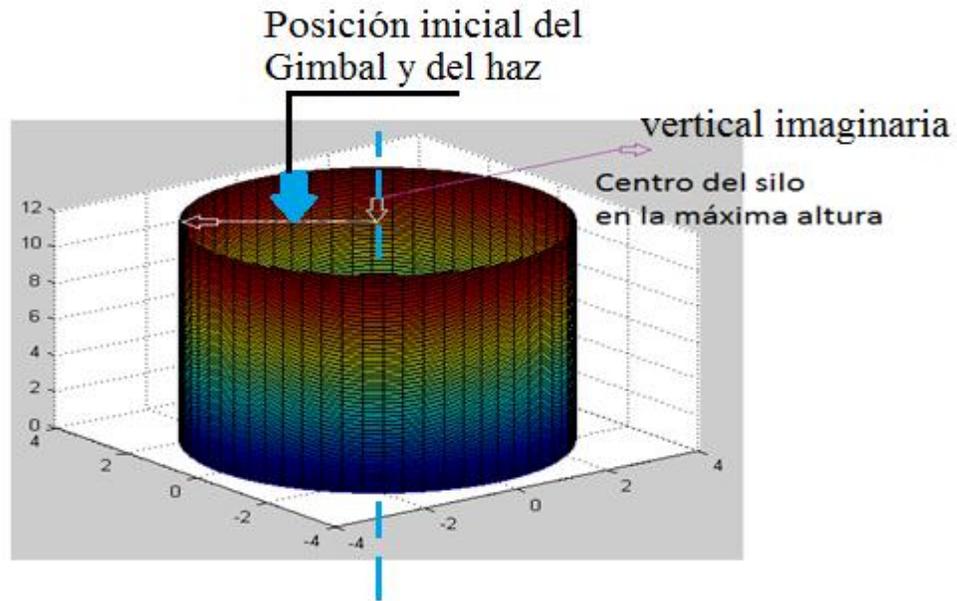
El controlador recibe dicha señal y hace que el eje azimut se mueva y cada 4 grados el dato medido por el láser se va guardando en el mismo controlador y después de 360 grados se habrá realizado 90 medidas. Cuando se termina de hacer el giro, el segundo sensor se activa para detener el movimiento y realizar un cambio en el eje de elevación bajando seis grados de manera que quede a 84 grados con respecto al eje de referencia. Luego volverá a realizar el movimiento en azimut y así seguirá la lógica hasta que el ángulo de elevación sea cero.

En la sección 5.3 se ampliará la explicación de la lógica del sistema por medio de un diagrama de flujo así como del equipo utilizado como controlador.

Después de hacer todo estos movimientos se tomarán más de mil datos de los cuales unos son rechazados (los que corresponde a la pared del silo) y los demás se guardaran para ser utilizados una vez que se termine de capturar los datos y es acá donde se promedia todos los datos capturados los cuales representan distancias. El promedio se manipula digitalmente haciendo operaciones matemáticas para dar al final con la masa neta estimada del café dentro del silo.

La figura 5.6 es un cilindro que fue dibujado con ayuda de la herramienta Matlab que representa el silo, de altura 10 metros y de radio 3,5 metros. La línea blanca en la parte superior del cilindro indica la posición inicial del sensor. Desde ahí el Gimbal comienza a realizar barridos en el eje azimut y cuando vuelve a pasar por la posición cero se detiene el movimiento y se mueve el eje de elevación.

En el apéndice A.1 se mostrará la vista frontal, lateral izquierda y superior junto con las dimensiones de la figura 5.7.



Elaborado en Matlab®

Figura 5.5. Posición inicial del sensor y el Gimbal

## 5.2. Modelo matemático

Según el diagrama de nivel 3 de la sección 5.3.1 el modelo de control cuenta con un lazo de realimentación. Lo siguientes son cálculos para expresar la ganancia  $T/X$  en términos de la planta, el controlador y el sensor.

Tomando las variables que se definieron en la tabla 5.2, el análisis es el siguiente todo en términos de Laplace:

Se tiene como entrada  $Start$  ( $X$ ) y salida  $T$ . Como es un lazo que se realimenta, se tiene un error a la entrada del controlador que se establece como sigue:

$$R = X - B \quad (5.3)$$

Donde  $B$  es la salida del sensor y  $H$  la señal del sensor que se definen como:

$$B = T * Hs \quad (5.4)$$

Sustituyendo 5.4 en 5.3 se tiene lo siguiente:

$$R = X - T * Hs \quad (5.5)$$

Sin embargo T también se define de la siguiente forma por medio del bloque panta:

$$T = P * G \quad (5.6)$$

Donde G se define análogamente como:

$$G = C * R \quad (5.7)$$

Sustituyendo 5.7 en 5.6:

$$T = P * C * R \quad (5.8)$$

Luego se reemplaza 5.5 en 5.8 se llega a lo que siguiente:

$$T = P * C(X - T * Hs) \quad (5.9)$$

Ahora se distribuye el paréntesis y se despeja el término que no tiene T

$$T = PCX - PCHsT$$

$$T + PCHsT = PCX$$

Sacando T a factor común y haciendo la forma T/X el lazo final queda de esta forma

$$T(1 + PCHs) = PCX$$

$$\frac{T}{X} = \frac{PC}{1+PCHs} \quad (5.10)$$

La ecuación 19 es la ganancia en lazo abierto. Como se observa depende únicamente de los bloques.

### 5.2.1. Análisis físico-matemático

El siguiente análisis ha sido basado del libro Ingeniería Mecánica (Hibbeler. R, 1996, p. 511) y de una página web (Beal. R, 2003) el cual inicia con la II ley de Newton en el centro de masa G:

$$\sum F = ma_G \quad (5.11)$$

Por definición se conoce que la aceleración de un cuerpo es la derivada de la velocidad  $a_G = v'$  por tanto la ecuación 20 se reescribe como:

$$\sum F = mv' \quad (5.12)$$

Dada una distancia  $r$  que representa el vector de la posición relativa de una partícula con respecto a G, se realiza un producto cruz en ambos términos de tal forma que

$$r \times \sum F = r \times m\dot{v}$$

El primer término se conoce como la sumatoria de momentos ( $\sum M$ ), por tanto:

$$\sum M = r \times m\dot{v} \quad (5.13)$$

Dado un marco inercial  $x, y, z$ ; El momento angular de una partícula con respecto a este marco se define como:

$$H = r \times mv \quad (5.14)$$

Derivando la expresión se tiene que:

$$\begin{aligned} \frac{dH}{dt} &= \frac{d(r \times mv)}{dt} = \frac{dr}{dt} \times mv + r \times \frac{dmv}{dt} \\ \dot{H} &= \dot{r} \times mv + r \times m\dot{v} \end{aligned} \quad (5.15)$$

Así como la aceleración es la derivada de la velocidad, análogamente la velocidad es la derivada de la posición  $v = r'$ , por lo que:

$$\dot{H} = \dot{r} \times m\dot{r} + r \times m\dot{v}$$

Además el producto cruz de dos vectores es cero ( $r' \times r' = 0$ ), por lo que la expresión anterior se simplifica de la siguiente forma:

$$\dot{H} = r \times m\dot{v} \quad (5.16)$$

Sustituyendo en 22 se llega que:

$$\sum M = \dot{H} \quad (5.17)$$

Es decir, que la suma de momentos es equivalente a la derivada del momento angular.

Los momentos de inercia que siempre son positivos se definen como la integral del producto de la masa  $dm$  y el cuadrado de las distancias en coordenadas  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Mientras que el producto de inercia en relación a dos planos ortogonales se define como el producto de la masa del objeto y las distancias perpendiculares que se involucran. De esta forma:

$$\begin{aligned} I_{xx} &= \int r_x^2 dm = \int (y^2 + z^2) dm \\ I_{yy} &= \int r_y^2 dm = \int (x^2 + z^2) dm \\ I_{zz} &= \int r_z^2 dm = \int (x^2 + y^2) dm \end{aligned} \quad (5.18)$$

$$\begin{aligned} I_{xy} &= I_{yx} = \int xy dm \\ I_{xz} &= I_{zx} = \int xz dm \\ I_{yz} &= I_{zy} = \int yz dm \end{aligned} \quad (5.19)$$

Por consiguiente  $v = \omega \times r$  por lo que 23 se reescribe de la siguiente forma:

$$H = r \times m(\omega \times r)$$

Siendo  $\omega$  el vector de velocidad angular y  $r$  un vector de posición, representados como:

$$\omega_G = \omega_{GX}i + \omega_{GY}j + \omega_{GZ}k$$

$$r = xi + yj + zk$$

Mientras que el momento angular también tiene tres direcciones:

$$H_G = H_{GX}i + H_{GY}j + H_{GZ}k$$

Después de unos cálculos se obtiene el momento angular por coordenadas de esta forma:

$$\begin{aligned}
H_{GX} &= m((y^2 + z^2)\omega_x - xy\omega_y - xz\omega_z) \\
H_{GY} &= m(-xz\omega_x + (x^2 + z^2)\omega_y - yz\omega_z) \\
H_{GZ} &= m(-xz\omega_x - yz\omega_y + (x^2 + y^2)\omega_z)
\end{aligned} \tag{5.20}$$

Derivando cada coordenada de los momentos angulares en un diferencial de masa e integrando cada una de las expresiones se tiene al final:

$$\begin{aligned}
H_{GX} &= \omega_x \int (y^2 + z^2)dm - \omega_y \int xy dm - \omega_z \int xz dm \\
H_{GY} &= -\omega_x \int xzdm + \omega_y \int (x^2 + z^2)dm - \omega_z \int yzdm \\
H_{GZ} &= -\omega_x \int xzdm - \omega_y \int yzdm + \omega_z \int (x^2 + y^2)dm
\end{aligned}$$

Por medio de 5.18 y 5.19 las ecuaciones anteriores se reescriben como:

$$\begin{aligned}
H_{GX} &= \omega_x I_{XX} - \omega_y I_{XY} - \omega_z I_{XZ} \\
H_{GY} &= -\omega_x I_{XY} + \omega_y I_{YY} - \omega_z I_{YZ} \\
H_{GZ} &= -\omega_x I_{XZ} - \omega_y I_{YZ} + \omega_z I_{ZZ}
\end{aligned} \tag{5.21}$$

Por simetría los productos de inercia son cero ( $I_{XY}=I_{XZ}=I_{YZ}=0$ ). Por lo que 5.21 se simplifica como sigue:

$$\begin{aligned}
H_{GX} &= \omega_x I_{XX} \\
H_{GY} &= \omega_y I_{YY} \\
H_{GZ} &= \omega_z I_{ZZ}
\end{aligned} \tag{5.22}$$

La velocidad angular con la que gira el eje x, y, z. En el origen P y en el punto G (ver figura 5.7), la suma de momentos de ecuación 26 se puede expresar como:

$$\sum M_P = (\dot{H})_{XYZ} + \bar{\omega} x H_P \tag{5.23}$$

$$\sum M_G = (\dot{H})_{XYZ} + \bar{\omega} x H_G \tag{5.24}$$

Donde  $(\dot{H})_{XYZ}$  es la razón de cambio de H con respecto al eje x, y, z.

Por tanto la suma de momento por coordenadas, con  $I_x=I_{XX}$ ,  $I_y=I_{YY}$  e  $I_z=I_{ZZ}$ , se expresan de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
\sum M_X &= I_X \dot{\omega}_X - (I_Y - I_Z) \omega_Y \omega_Z \\
\sum M_Y &= I_Y \dot{\omega}_Y - (I_Z - I_X) \omega_Z \omega_X \\
\sum M_Z &= I_Z \dot{\omega}_Z - (I_X - I_Y) \omega_X \omega_Y
\end{aligned} \tag{5.25}$$

### 5.2.2. Análisis en el eje azimut

El análisis se divide en dos partes, el primero en el eje azimut (punto P) de ángulo  $\theta$ . La velocidad angular en dirección X es cero, no así en Y ni en Z. Sin embargo, todas las aceleraciones son cero.

$$\omega = 0i + (\dot{\theta} \cos\theta)j + (\dot{\theta} \sin\theta)k$$

Por tanto, de la ecuación 24 solo prevalece la componente en x:

$$\begin{aligned}
\sum M_{OX} &= -(I_{OY} - I_{OZ})(\dot{\theta})^2 \cos\theta \sin\theta \\
\sum M_{OY} &= 0 \\
\sum M_{OZ} &= 0
\end{aligned} \tag{5.26}$$

$I_{OY}=0$ ;  $I_{OZ}=\frac{1}{3}mL^2$ , donde L es la distancia desde P hasta la longitud máxima del Gimbal (ver figura 5.7). La ecuación 5.27 en la componente X se simplifica de tal forma que:

$$\sum M_{PX} = \frac{1}{3}mL^2(\dot{\theta})^2 \cos\theta \sin\theta \tag{5.27}$$

### 5.2.3. Análisis en el eje de elevación

La segunda parte del análisis es en eje de elevación (punto G) cuya velocidad angular es:

$$\omega = 0i + (\dot{\theta} + \dot{\theta} \cos\theta)j + (\dot{\theta} \sin\theta)k$$

De la ecuación 24, solo sobrevive la componente X de la suma de momentos.

$$\sum M_{GX} = \frac{-1}{2}\dot{\theta}\dot{\theta}m_w r^2 \sin\theta + \frac{-1}{4}m_w r^2(\dot{\theta})^2 \cos\theta \sin\theta \tag{5.28}$$

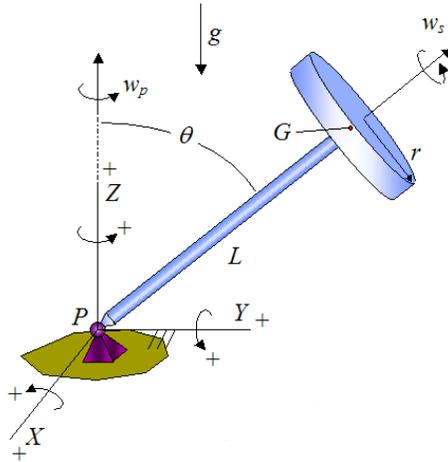


Figura 5.6. Eje de coordenadas de la planta

Como se puede observar en la ecuación 5.17, el movimiento azimutal depende la velocidad angular en ese eje, mientras que por lo contrario 5.18 depende tanto de esa velocidad y la propia de del eje de elevación, es decir, el movimiento de elevación no se da sin el de azimut.

Sustituyendo  $\sum M_{OX} = T_{OX}$  y  $\sum M_{GX} = T_{GX}$

$$T_{OX} = \frac{1}{3}mL^2(\dot{\theta})^2 \cos\theta \sin\theta \quad (5.29)$$

$$T_{GX} = \frac{-1}{2}\dot{\theta}\dot{\phi}m_w r^2 \sin\theta + \frac{-1}{4}m_w r^2(\dot{\theta})^2 \cos\theta \sin\theta \quad (5.30)$$

Por medio de este análisis se puede concluir que la suma de momentos (torques) depende de ángulos según el movimiento, éstas dos ecuaciones son las ecuaciones diferenciales que definen al Gimbal para esos movimientos. Donde se ejerce torque solo en la dirección que no participa en el movimiento. El eje azimut en la figura 5.7 se encuentra en el plano XY, girando alrededor de z, mientras que el eje de elevación es el plano YZ.

### **5.3. El software**

En la sección 5.1.3 se habló sobre el controlador cuya función, como su nombre lo dice, es mantener un control en los movimientos azimut y elevación del Gimbal y manipular las señales de los sensores. Realiza también el cálculo internamente para determinar la masa. Este controlador se le conoce como Programming Logic Computer (PLC). En esta sección se amplía la lógica del software con el que eventualmente se podrá programar el PLC.

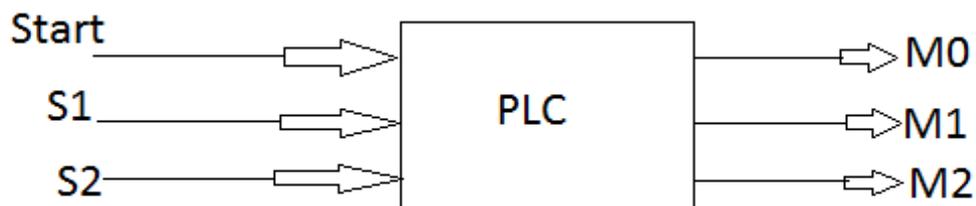
#### **5.3.1. Diagrama de bloques del PLC**

El diagrama 5.4 es un bloque que representa al PLC que recibe tres entradas y responde a tres salidas. La entrada inicial (Start) da inicio al PLC y al sistema en general, por lo que activa a los demás sensores en el orden correspondiente.

S1 representa la señal del sensor láser que se activa al instante de la señal Start. El sensor medidor de nivel cuando se activa da como primera salida a M1 que representa un motor que mueve el eje azimut en 360 grados, donde hará mediciones cada cuatro grados. Cuando se completa una vuelta se activa S2 para detener el movimiento y en seguida M2 responde a esa detección bajando en seis grados con respecto a la vertical imaginaria (figura 5.6). Se activa S1 nuevamente y la salida M1 también hasta volver a completar el giro. De nuevo se activa S2 y por consiguiente da como salida M2. De manera que se vuelve un ciclo que se repite catorce veces. En cada ocasión el ángulo de elevación va disminuyendo 6 grados, entonces cuando es la vuelta 14 el ángulo es precisamente de 6 grados y al finalizar el giro se activa S2 y nuevamente M2 baja otros 6 grados llegando a cero que es el centro del silo. En ese momento la medida es incondicional, es decir, siempre será realizada y es la última medición.

Durante cada medida todos los datos capturados se irán guardando en el controlador para que al final se tome toda la información y se obtenga el promedio de las distancias. El sistema está programado para que realice 90 mediciones en 14 vueltas más la incondicional. En total son 1261 datos, de los cuales un pequeño porcentaje será descartado, que se debe a que a mediciones de la pared. Para descartar esas mediciones es necesario que el controlador sepa dónde está la pared y dónde la superficie del café. La siguiente sección se expone el diagrama de flujo del software donde se explica cómo se le indica al controlador que desprecie la medición en la pared del silo.

Con el total de datos que recoge el sensor guardados en el controlador se obtiene el promedio, luego conociendo la altura máxima se utiliza la ecuación 3.10 para tener como resultado la altura promedio. Con la altura promedio se obtiene el volumen puesto que se conoce el área de forma circular. Con ese volumen y la densidad del café pergamino seco que tiene un valor máximo de  $395.7 \text{ kg/m}^3$ , se puede calcular la masa del pergamino por medio de la densidad en este caso se va a tomar como constante, pero en proyectos posteriores será un dato variable donde el usuario puede modificarlo.



Elaborado en Paint

*Diagrama 5.4 Entradas y salidas del PLC*

La Tabla 5.3 se muestra como sucede cada salida según sea la entrada.

F es False: indica que el motor o sensor está desactivado.

T es True: indica que el motor o sensor está activado.

Tabla 5.3. Secuencia de la lógica del software

N	Motor AZ( $\emptyset$ )	$\emptyset$	Sensor Láser	Sensor Parada ( $\emptyset=360?$ )	Motor EL ( $\Theta$ )	$\Theta$	( $\emptyset=360?$ ) $\Theta=\Theta-6$	$\emptyset=\emptyset+4$
0	F	0	F	F	F	90	90	4
1	T	4	T	F	F	90	90	8
2	T	8	T	F	F	90	90	12
3	T	12	T	F	F	90	90	16
4	T	16	T	F	F	90	90	20
5	T	20	T	F	F	90	90	24
6	T	24	T	F	F	90	90	28
7	T	28	T	F	F	90	90	32
8	T	32	T	F	F	90	90	36
9	T	36	T	F	F	90	90	40
10	T	40	T	F	F	90	90	44
11	T	44	T	F	F	90	90	48
12	T	48	T	F	F	90	90	52
13	T	52	T	F	F	90	90	56
14	T	56	T	F	F	90	90	60
15	T	60	T	F	F	90	90	64
16	T	64	T	F	F	90	90	68
17	T	68	T	F	F	90	90	72
18	T	72	T	F	F	90	90	76
19	T	76	T	F	F	90	90	80
20	T	80	T	F	F	90	90	84
21	T	84	T	F	F	90	90	88
22	T	88	T	F	F	90	90	92
23	T	92	T	F	F	90	90	96
24	T	96	T	F	F	90	90	100
25	T	100	T	F	F	90	90	104
26	T	104	T	F	F	90	90	108
27	T	108	T	F	F	90	90	112
28	T	112	T	F	F	90	90	116
29	T	116	T	F	F	90	90	120
30	T	120	T	F	F	90	90	124
31	T	124	T	F	F	90	90	128
32	T	128	T	F	F	90	90	132
33	T	132	T	F	F	90	90	136

34	T	136	T	F	F	90	90	140
35	T	140	T	F	F	90	90	144
36	T	144	T	F	F	90	90	148
37	T	148	T	F	F	90	90	152
38	T	152	T	F	F	90	90	156
39	T	156	T	F	F	90	90	160
40	T	160	T	F	F	90	90	164
41	T	164	T	F	F	90	90	168
42	T	168	T	F	F	90	90	172
43	T	172	T	F	F	90	90	176
44	T	176	T	F	F	90	90	180
45	T	180	T	F	F	90	90	184
46	T	184	T	F	F	90	90	188
47	T	188	T	F	F	90	90	192
48	T	192	T	F	F	90	90	196
49	T	196	T	F	F	90	90	200
50	T	200	T	F	F	90	90	204
51	T	204	T	F	F	90	90	208
52	T	208	T	F	F	90	90	212
53	T	212	T	F	F	90	90	216
54	T	216	T	F	F	90	90	220
55	T	220	T	F	F	90	90	224
56	T	224	T	F	F	90	90	228
57	T	228	T	F	F	90	90	232
58	T	232	T	F	F	90	90	236
59	T	236	T	F	F	90	90	240
60	T	240	T	F	F	90	90	244
61	T	244	T	F	F	90	90	248
62	T	248	T	F	F	90	90	252
63	T	252	T	F	F	90	90	256
64	T	256	T	F	F	90	90	260
65	T	260	T	F	F	90	90	264
66	T	264	T	F	F	90	90	268
67	T	268	T	F	F	90	90	272
68	T	272	T	F	F	90	90	276
69	T	276	T	F	F	90	90	280
70	T	280	T	F	F	90	90	284
71	T	284	T	F	F	90	90	288
72	T	288	T	F	F	90	90	292

73	T	292	T	F	F	90	90	296
74	T	296	T	F	F	90	90	300
75	T	300	T	F	F	90	90	304
76	T	304	T	F	F	90	90	308
77	T	308	T	F	F	90	90	312
78	T	312	T	F	F	90	90	316
79	T	316	T	F	F	90	90	320
80	T	320	T	F	F	90	90	324
81	T	324	T	F	F	90	90	328
82	T	328	T	F	F	90	90	332
83	T	332	T	F	F	90	90	336
84	T	336	T	F	F	90	90	340
85	T	340	T	F	F	90	90	344
86	T	344	T	F	F	90	90	348
87	T	348	T	F	F	90	90	352
88	T	352	T	F	F	90	90	356
89	T	356	T	F	F	90	90	360
90	T	360	T	T	T	90	84	0

La tabla anterior se repite 14 veces, una vez por ciclo. La primera columna corresponde a cada estado que lleva a realizar todas las 1261 mediciones. La segunda columna pertenece al Motor AZ para el movimiento en el eje azimut que se mueve en ángulo phi ( $\phi$ ), casi toda la columna contiene T (true). Simbólicamente indica que recibe una señal del controlador que activa el motor destinado para ese eje y permanece activado durante 360 grados, excepto al inicio y al final de las 90 mediciones, cambiando a F (false). Entonces en la medición 91 cambia a F porque en ese momento el giro ha sido detenido. El ángulo  $\phi$  cambia a 0 (se reinicia). La columna siguiente es la del ángulo ( $\phi$ ) que va aumentando cada 4 grados. La siguiente columna es la señal del sensor láser que básicamente se activa cuando el motor AZ también lo hace. Seguido se encuentra la columna denominada sensor de parada el cual cambia a T cuando el ángulo  $\phi$  es de 360 esto con el objeto de impedir que el motor AZ siga girando en el eje azimut. La columna siguiente es la del Motor EL que es la señal que recibe el motor para el eje de elevación, se mueve en ángulo theta ( $\theta$ ) y no se activa hasta completar 90 mediciones. La siguiente columna es el ángulo theta ( $\theta$ ) que inicializa en 90°, las últimas dos columnas son de estados próximos, una

para cada ángulo. Mientras  $\varnothing$  cambia de cuatro en cuatro grados,  $\Theta$  lo hace de seis en seis pero después de que  $\varnothing$  sea de  $360^\circ$ .

El sistema tiene un primer estado donde Motor AZ, Motor EL, el sensor láser y el sensor de parada están desactivados, el ángulo  $\emptyset$  es de cero grados, el ángulo  $\Theta$  inicializa en  $90^\circ$ , se debe a que el sistema está a la espera de la señal de *Start*, es decir, que el usuario presione el botón que inicia el proceso. Una vez activado, el Motor AZ cambia a T e inmediatamente el ángulo  $\emptyset$  es de  $4^\circ$ , la señal del sensor láser se activa para realizar la medición en ese ángulo, pero el motor de elevación permanece inmóvil, de manera que se da un patrón durante  $360^\circ$  que se mueve  $\emptyset$ . Cuando se llega a este ángulo (una vuelta completa) se activa la señal del sensor de parada en el estado 91 para detener el giro del eje azimut. Sin embargo, en este estado todavía el Motor EL está desactivado pero el ángulo  $\Theta$  ha cambiado de  $90$  a  $84$ , por lo que en el estado 92, el Motor EL es el único en T, el ángulo  $\emptyset$  se pone nuevamente en cero, y vuelve a comenzar como lo hizo desde el estado 2 en adelante, repitiéndose ese patrón con la diferencia que cambia el ángulo de elevación.

En el estado 91, mientras el Motor AZ está en falso el valor presente del ángulo  $\Theta$  cambia a  $84^\circ$ , y se repite el patrón hasta el estado 181, luego en el siguiente estado se cambia el ángulo de elevación a  $78^\circ$ , posteriormente a  $72^\circ$ , luego a  $66^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $54^\circ$ ,  $48^\circ$ ,  $42^\circ$ ,  $36^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $24^\circ$ ,  $18^\circ$ ,  $12^\circ$ ,  $6^\circ$  y  $0^\circ$ .

Al final en los cero grados de  $\Theta$ , la medición se hace incondicionalmente, no es necesario seguir el patrón porque en ese ángulo se encuentra justamente el láser paralelo a la línea imaginaria tomada como referencia para el eje de elevación (figura 5.6). Luego se le indica al eje de elevación que regrese a la posición original ( $90^\circ$ ).

Se puede observar que el estado 1368 es exactamente igual al primero, eso quiere decir que vuelve a reiniciar todo el sistema.

*Tabla 5.4. Resumen de Tabla 1 con todos los ángulos de elevación*

N	Motor AZ( $\phi$ )	$\phi$	Sensor Láser	Sensor Parada ( $\phi=360?$ )	Motor EL ( $\theta$ )	$\theta$	( $\phi=360?$ ) $\theta=\theta-6$	$\phi=\phi+4$
0	F	0	F	F	F	90	90	4
1	T	4	T	F	F	90	90	8
2	T	8	T	F	F	90	90	12
88	T	352	T	F	F	90	90	356
89	T	356	T	F	F	90	90	360
90	T	360	T	T	T	90	84	0
91	F	0	F	F	F	84	84	4
92	T	4	T	F	F	84	84	8
93	T	8	T	F	F	84	84	12
179	T	352	T	F	F	84	84	356
180	T	356	T	F	F	84	84	360
181	T	360	T	T	F	84	78	0
182	F	0	F	F	T	78	78	4
183	T	4	T	F	F	78	78	8
184	T	8	T	F	F	78	78	12
270	T	352	T	F	F	78	78	356
271	T	356	T	F	F	78	78	360
272	T	360	T	T	F	78	72	0
273	F	0	F	F	T	72	72	4
274	T	4	T	F	F	72	72	8
275	T	8	T	F	F	72	72	12
361	T	352	T	F	F	72	72	356
362	T	356	T	F	F	72	72	360
363	T	360	T	T	F	72	66	0
364	F	0	F	F	T	66	66	4
365	T	4	T	F	F	66	66	8
366	T	8	T	F	F	66	66	12
452	T	352	T	F	F	66	66	356
453	T	356	T	F	F	66	66	360
454	T	360	T	T	F	66	60	0
455	F	0	F	F	T	60	60	4
456	T	4	T	F	F	60	60	8
457	T	8	T	F	F	60	60	12

543	T	352	T	F	F	60	60	356
544	T	356	T	F	F	60	60	360
545	T	360	T	T	F	60	54	0
546	F	0	F	F	T	54	54	4
547	T	4	T	F	F	54	54	8
548	T	8	T	F	F	54	54	12
634	T	352	T	F	F	54	54	356
635	T	356	T	F	F	54	54	360
636	T	360	T	T	F	54	48	0
637	T	0	F	F	T	48	48	4
638	T	4	T	F	F	48	48	8
639	T	8	T	F	F	48	48	12
725	T	352	T	F	F	48	48	356
726	T	356	T	F	F	48	48	360
727	T	360	T	T	F	48	42	0
728	T	0	F	F	T	42	42	4
729	T	4	T	F	F	42	42	8
730	T	8	T	F	F	42	42	12
816	T	352	T	F	F	42	42	356
817	T	356	T	F	F	42	42	360
818	T	360	T	T	F	42	36	0
819	T	0	F	F	T	36	36	4
820	T	4	T	F	F	36	36	8
821	T	8	T	F	F	36	36	12
907	T	352	T	F	F	36	36	356
908	T	356	T	F	F	36	36	360
909	T	360	T	T	F	36	30	0
910	F	0	F	F	T	30	30	4
911	T	4	T	F	F	30	30	8
912	T	8	T	F	F	30	30	12
998	T	352	T	F	F	30	30	356
999	T	356	T	F	F	30	30	360
1000	T	360	T	T	F	30	24	0
1001	F	0	F	F	T	24	24	4
1002	T	4	T	F	F	24	24	8
1003	T	8	T	F	F	24	24	12
1089	T	352	T	F	F	24	24	356
1090	T	356	T	F	F	24	24	360

1091	T	360	T	T	F	24	18	0
1092	F	0	F	F	T	18	18	4
1093	T	4	T	F	F	18	18	8
1094	T	8	T	F	F	18	18	12
1180	T	352	T	F	F	18	18	356
1181	T	356	T	F	F	18	18	360
1182	T	360	T	T	F	18	12	0
1183	F	0	F	F	T	12	12	4
1184	T	4	T	F	F	12	12	8
1185	T	8	T	F	F	12	12	12
1271	T	352	T	F	F	12	12	356
1272	T	356	T	F	F	12	12	360
1273	T	360	T	T	F	12	6	0
1274	F	0	F	F	T	6	6	4
1275	T	4	T	F	F	6	6	8
1276	T	8	T	F	F	6	6	12
1362	T	352	T	F	F	6	6	356
1363	T	356	T	F	F	6	6	360
1364	T	360	T	T	F	6	0	0
1365	F	0	F	F	T	0	0	0
1366	F	0	T	F	F	0	90	0
1367	F	0	F	F	T	90	90	0
1368	F	0	F	F	F	90	90	0

### Sección 5.3.2 Diagrama flujo

Se explicará la lógica del programa interno que se ha diseñado para la programación del controlador para que realice el trabajo requerido. La figura 5.9 es el diagrama de flujo del software.

El programa inicia con la señal *Start* como lo muestra el diagrama 5.4. El sistema comienza declarando seis datos: radio del silo (r), ángulo del eje de elevación (x), ángulo del eje azimut (y), distancia genérica (b), señal del sensor láser (d) y señal del sensor de parada (p).

La tabla 5.5 define cada dato con cada una de las letras que se observa en el diagrama de flujo y la tabla 5.6 indica cuáles son variables, cuáles son constantes, cuál es el valor de inicio y cuál es el valor final de cada dato.

**Tabla 5.5. Datos de entrada del programa**

<b>Nombre del dato</b>	<b>Simbología</b>
Radios del silo	r
Ángulo del eje de elevación	x
Ángulo del eje azimut	y
Distancia genérica	b
Señal del sensor láser	d
Señal del sensor de parada	p

**Tabla 5.6. Declaración de los datos**

<b>Simbología</b>	<b>Valor de inicio</b>	<b>Valor final</b>	<b>Definición del dato</b>
r (m)	3.5	3.5	Contante
x (°)	0/180	-90/270	Variable dependiente
y (°)	0	360	Variable independiente
b (m)	d	0	Variable dependiente
d (m)	Dada por el sensor láser	Dado por el sensor láser	Variable independiente
k (señal)	Señal	Señal	Señal dependiente

Como se observa la tabla 5.5 junto con la 5.6,  $r$  es el radio del silo que es valor conocido (3.5 metros) y es constante en todo el recorrido del sistema. El valor  $x$  es el ángulo de elevación que se mueve 90 grados con respecto al centro vertical del silo tomado como referencia para el sensor. El ángulo empieza en cero y terminar en -90 grados ( $^{\circ}$ ) o visto de otra manera inicia en  $180^{\circ}$  y finaliza en  $270^{\circ}$ , sin embargo, siempre recorrerá 90 grados.

Otra variable es la que representa el ángulo del eje azimut, el cual está encargado de ejecutar barridos en círculos por todo el silo. El ángulo comienza en posición cero en un punto determinado y se extiende hasta  $360^{\circ}$  que significa una vuelta completa retornando a la posición inicial.

La distancia  $b$  es un dato genérico que se obtiene con la ecuación (5.31).

$$b = d * \sin(x) \quad (5.31)$$

Cuando el ángulo de elevación es 90 (posición inicial del eje) la distancia  $b$  será igual al dato obtenido por el sensor ( $d$ ). Luego cuando el ángulo es cero, la distancia también lo es, pues esto quiere decir que se encuentra el haz apuntando al centro del silo, es decir, el sistema está en la posición final.

El sensor láser proporciona la distancia  $d$  que es incierto saber a ciencia cierta cuál es la medida que otorga el dispositivo, ya que como el nivel es irregular, no siempre los datos iniciales van a ser iguales entre sí y los datos finales tampoco. La distancia  $d$  se obtiene por medio de la ecuación (3.7). En la sección siguiente denominada componentes se explicará con profundidad el sensor y su forma en que opera.

Siguiendo con la explicación del diagrama, el radio es tomado como dato constante de valor conocido y el ángulo de elevación también se le asigna el valor inicial. A partir de aquí comienza la ejecución del programa. Los datos anteriores se asignan solo una vez, ya que mientras que el radio es constante, el ángulo “ $x$ ” va ir cambiando conforme avance el programa.

Se asigna un ciclo cuya variable es “y” que abarca desde el valor inicial hasta el final según tabla 5.6, con variación cada 4 grados. Esto es para que cada cuatro grados la medida del sensor se guarde y pueda ser utilizada posteriormente.

Posterior a eso se hace un cálculo para obtener b por medio de la ecuación 5.31. La idea de abarcar todo el silo tiene sus implicaciones, cuando se está midiendo el nivel con láser, puede suceder que el haz apunte a la pared del silo. Una característica del sensor es que siempre va estar midiendo mientras esté activo el sistema, por lo cual, la pared del contenedor es importante considerar ya que ese dato capturado debe ser eliminado, porque en realidad no pertenece al nivel indistintamente de que sea irregular. Para solucionar ese conveniente se le dice al sistema que descarte dicha información. La pregunta es: ¿Cómo hacerlo? La respuesta es muy sencilla. Como el sensor está ubicado en el centro del silo, en el momento de que el haz pegue en la pared significa que se está midiendo el radio del silo.

Se hace el cálculo de b, y se establece una condición: si la distancia genérica es equivalente al radio entonces ese dato se desecha. Si la condición es contraria se captura la información y se guarda para luego procesarla. Se debe tener en cuenta que la condición se estará preguntando cada cuatro grados mientras se hace el barrido en la circunferencia e interiores del silo. Puede suceder que, en un mismo giro, por un lado, la distancia sea equivalente del radio mientras que en otro es distinto, por lo tanto, la pregunta siempre debe hacerse. Es decir, por un lado puede el haz estar apuntando a la pared y por el otro en un mismo ángulo de elevación estar apuntando a la superficie del solido granulado.

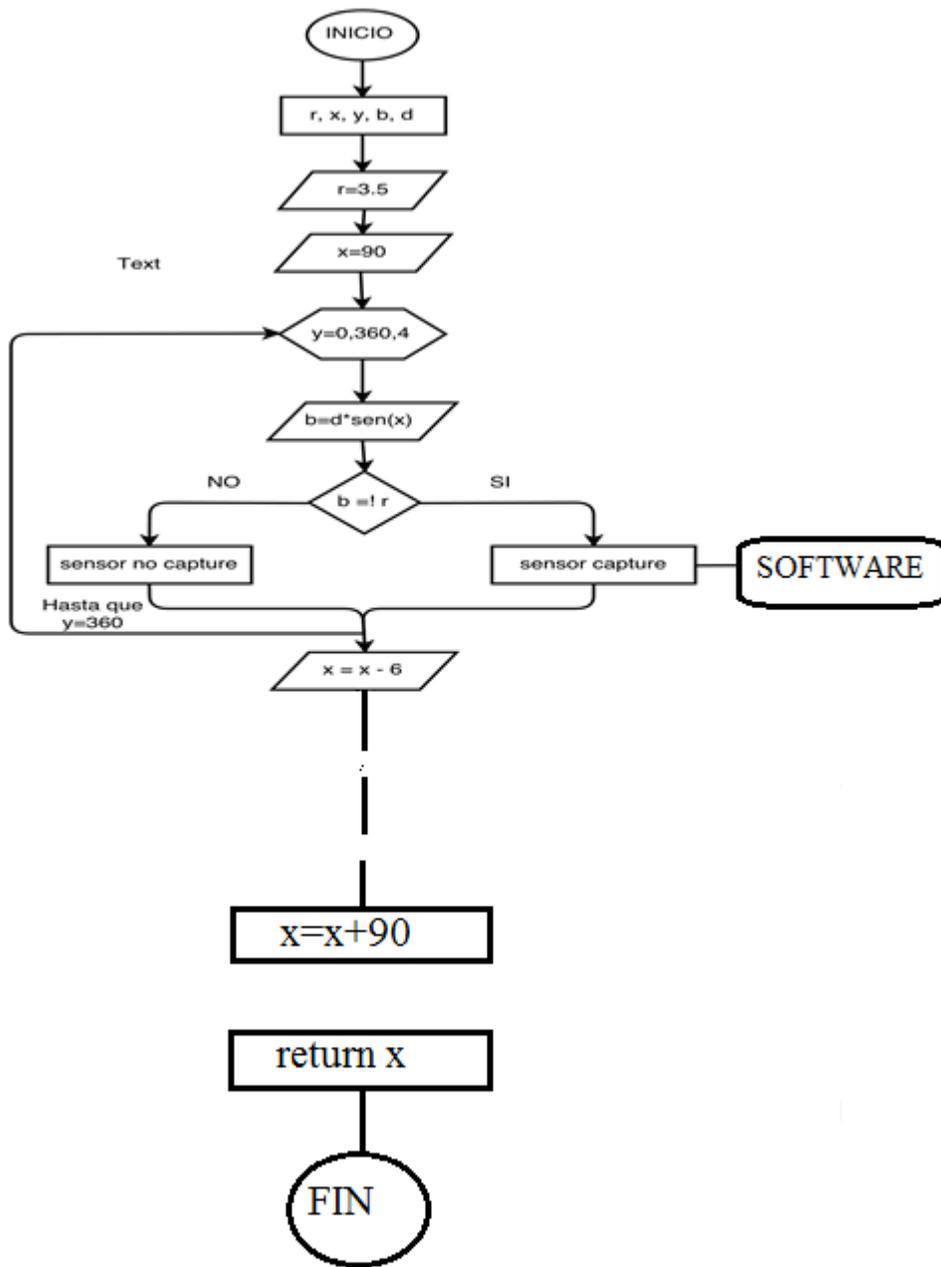


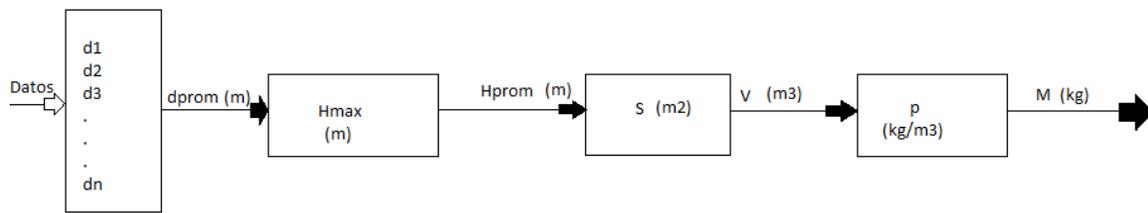
Figura 5.7. Diagrama de flujo

El ciclo no termina hasta haber girado  $360^\circ$ , al igual que la condición el cálculo de la distancia genérica también se calculará constantemente. Al finalizar el ciclo se activa otra variable “k” que es la señal de un segundo sensor con la intención de obligar al sistema a detener el giro en el eje azimut después de haber completado la vuelta, en seguida se pone un contador que disminuye el ángulo de elevación en 6 grados.

Se reinicia el ciclo con un nuevo ángulo de elevación (84) y se vuelve a hacer el barrido circular. Los datos que son distintos del radio se recopilan y se guardan, los demás son desechados. Se termina el ciclo y vuelve a activarse “k”, se detiene el movimiento y disminuye “x” en 6 grados más.

El barrido se reinicia con ángulo de elevación de  $78^\circ$  y el mismo ciclo se repite. El ángulo de elevación va disminuyendo hasta llegar a cero. En ese instante la medida es incondicional, es decir, siempre será realizada, entonces la condición no será preguntada simplemente se hará la medición se guarda el dato y posterior a eso se le asigna al sistema que regrese a la posición inicial del ángulo de elevación.

Computacionalmente toda la información capturada es manipulada para obtener como resultado el promedio de los datos guardados, cada uno representa distancias. El diagrama 5.5 representa el diagrama de bloques de lo que en la figura 5.9 se le denominó Software. Toda la información se acumula para obtener un promedio, donde “dn” es el último dato capturado. Por lo tanto,  $d_{prom}$  (ecuación 3.9) es la salida del primer bloque que es la entrada del siguiente en  $H_{max}$ , donde se restan (ver ecuación 3.10), la diferencia es la altura promedio  $H_{prom}$  medida en metros. Este es el nivel promedio de contenido del silo. El próximo bloque ‘S’ en metros cuadrados es el área de la base del silo que multiplicado por la altura máxima se obtiene el volumen y a la vez este último se multiplica con la densidad del café pergamino seco dada en kilogramos por metro cúbico. De esta forma el producto final es la masa (M) en kilogramos.



Elaborado en Paint

Diagrama 5.5 Diagrama de bloques después de capturar todos los datos

## 5.4. Equipo: Componentes

Los componentes y el equipo en que se compone el sistema del proyecto son los siguientes:

### 5.4.1. Sensor láser LM80.

Pertenece a la compañía ABB, tiene como función medir distancia a un punto dado por medio de un haz. Utiliza el principio físico en el que la distancia es proporcional a la velocidad de la luz y el tiempo en propagarse al punto que se está midiendo. Como se muestra en la ecuación 3.7. Está diseñado para medir distancia y nivel en silos contenidos por líquidos y sólidos granulados como es el café. Utiliza pulsos de alta velocidad con la que se emite el haz que rebota en la superficie y se refleja. Una de esas reflexiones regresa al sensor y por medio de un sensor óptico con el que cuenta el aparato se realiza el cálculo internamente. Según se menciona en la hoja de datos del sensor LM80 la característica principal que diferencia el sensor de otras tecnologías es la ventaja de tener mayor rendimiento, ya que este dispositivo puede medir el nivel. Dato importante es que el sensor da una señal de salida analógica de corriente entre 4 mA y 20 mA, Si el aparato está ubicado en el techo del silo, los 4 mA representan la distancia más corta y por ende la altura máxima del silo y los 20 mA son la distancia máxima que puede abarcar el láser que se refiere a la distancia mínima del silo. La tabla 5.7 indica algunas de las especificaciones más importantes. Se debe adecuar el rango de corriente a la longitud del silo. La tabla 5.8 indica que cuando se efectuando la distancia mínima a 4 mA, en el silo se está

apuntando a la altura máxima esto se debe a que el sensor se encuentra apuntando desde el techo (Fuente: ABB, 2015).



*Figura 5.8. Sensor LM80*

Para encontrar la distancia mínima basta con recordar que la posición inicial del sensor será 90 grados con respecto al centro del silo en la parte más alta del silo. Eso quiere decir que cuando haga la primera medida el haz está apuntando a la pared es ángulo recto, en otras palabras está midiendo el radio del silo, la distancia mínima no necesariamente es el radio del silo sino la distancia más corta entre la salida del sensor y la altura máxima que el contenido del silo pueda alcanzar.

*Tabla 5.7. Rango de altura según la corriente*

Corriente	Distancia	Altura
4 mA	Mínima	Máxima
20 mA	Máxima	Mínima

*Tabla 5.8. Especificaciones del sensor laser LM80.*

Función	Medir distancia y nivel en un punto
Alcance máximo para medir nivel	100 metros
Materiales que mide	Maíz, arroz, café, entre otros
Modo de operación	Láser
Salida de corriente	4-20 mA

Otra razón por la que se escogió el sensor es debido es utiliza tecnología de punta, lo que le permite ser bastante preciso en la medida de la distancia. El tiempo que dura en propagarse está en el orden de los nanosegundos. El tiempo máximo se alcanza cuando mide el suelo del silo.

#### **5.4.2. Gimbal**

a. Motor eje azimut:

Tiene como función realizar barridos en 360 grados en el eje azimut. En esta sección se muestra el motor a utilizar con posibilidad de variación.

b. Servomotor eje elevación:

Tiene como función moverse 90 grados en el eje de elevación. Las especificaciones más importantes se aprecian en el Apéndice A.4, al igual que el motor se observa el servo más adelante en esta misma sección.

c. Estructura metálica

Tiene forma de U y está basado en la figura 9, en un costado se coloca el servo y en el opuesto es solo un rol que además de girar junto con el servo equilibra cargas y en la base se ubica el motor. Además debe llevar dos brazos reemplazables que se ajustan al diámetro del LM80. El Apéndice A.2 se observan las vistas de la figura y el isométrico

En la figura 5.13 se observa la forma final del Gimbal.

### 5.4.3. Controlador (PLC)

El Controlador Lógico Programable (PLC<sup>15</sup>) que se ha planteado como dispositivo para controlar el Gimbal pertenece a la compañía ABB (ver figura 5.9 lado izquierdo) del tipo AC500 PM554-ETH. Tiene características ser escalable, flexible y fácil de manejar. Este tiene como característica ocho entradas digitales y seis salidas digitales. Contiene el acople AX561 de 4 entradas y 2 salidas todas analógicas (ver figura 5.9 lado derecho).

En general, el PLC para el sistema consiste en tres entradas y tres salidas tanto analógicas como digitales. La tabla 5.9 detalla lo anterior.

*Tabla 5.9. Entradas y salidas al PLC*

Entradas	Salidas
Botón de inicio (Digital)	Señal Motor (Analógica)
Sensor láser (Analógica)	Señal Servomotor (Analógica)
Sensor óptico (Digital)	Despliegue valor de la masa (Digital)



*Figura 5.9. PLC AC500 PM554-ETH y acople AX561*

<sup>15</sup> PLC: Programmable Logic Controller

El PLC recibe tres entradas: dos digitales y una analógica. Las primeras son: un pulso que da inicio al sistema y el sensor codificador óptico que en la tabla 5.4 se le denominó *sensor parada*. Las analógicas son las que ofrece el sensor láser que es manipulada y procesada de acuerdo a la lógica del software del mismo PLC.

El PLC realiza varias funciones a la vez: guardar la información que llega del sensor, controlar el Gimbal y procesar la información.

#### **5.4.4. Sensor con codificador óptico**

La función es detener el giro del movimiento azimut después de haber dado una vuelta completa, de esta forma el motor no continúe girando.

Por lo general un codificador de este tipo presenta algunas limitaciones tales como: perder información de la posición si no hay flujo de corriente, perder información cuando hay interfaces fuertes, requiere de contadores bidireccionales. Pueden ser de tipo magnético, eléctrico u óptico cuya salida normalmente son trenes de pulsos con 50% de ciclo de trabajo.

Los ópticos están basados principalmente en zonas opacas y transparentes, en sectores donde se pueda o no reflejar. Están constituidos de un LED infrarrojo y una foto detectora.

Los sensores con codificador óptico comerciales son como el de la figura 5.10 que muestra la parte interna del mismo y lo proveen fabricantes como GPI, SIKO, Codechamp, entre otras.



*Figura 5.10. Sensor codificador óptico*

#### 5.4.5. Motor con reducción

Tiene como función girar  $360^\circ$  en el eje azimut controlado por el PLC. Genera pulsos cada cuatro grados, instante mismo para que el sensor LM80 haga su trabajo. Cuando el equipo completo (figura 5.13) da una vuelta entera, se activa el codificador óptico para detener el movimiento del motor y en ese momento se activa la salida para el movimiento del servomotor en ángulo de elevación. Las especificaciones más importantes de acuerdo a la ficha técnica se muestran en el apéndice A.3.



*Figura 5.11. Motor con reducción para eje azimut*

#### 5.4.6. Servomotor MG996R

Es utilizado para realizar el movimiento en el eje de elevación debe mover el sensor en  $90^\circ$  coordinado con el motor de la figura 17. Especificaciones importantes del servo se muestran en el apéndice A.4 tales como dimensiones y de funcionamiento.



*Figura 5.12. Servomotor para eje de elevación*

La figura 5.13 muestra un dibujo de cómo se vería el sistema con la posición específica de cada componente, solo el PLC permanece externo, los demás dispositivos se encuentran contenidos en esa estructura. La figura 5.14 muestra cómo se vería el Gimbal en el silo.

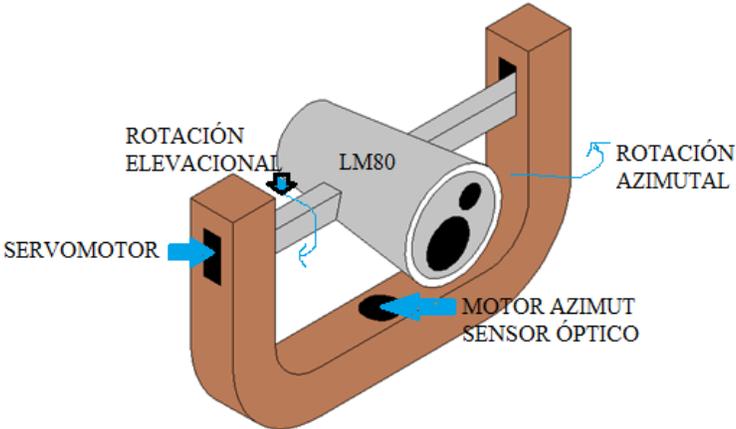


Figura 5.13 Sistema Gimbal con todos los componentes

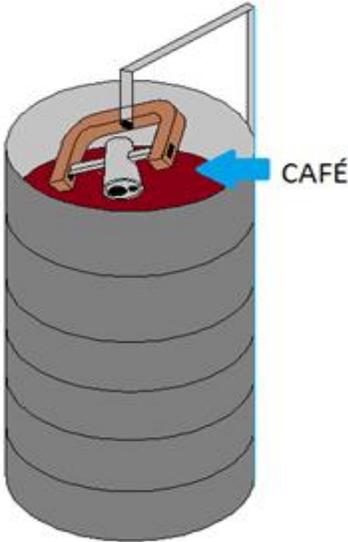


Figura 5.14 Gimbal en el silo

## **6. Otras formas de Medir Nivel**

Además de la solución diseñada, después de una ardua investigación, se encontró que existen varias maneras de detectar nivel en un silo de sólidos granulados. Es posible que existan distintas formas, pero las que se encontraron ninguna se salva de utilizar un sensor que mida precisamente el nivel. Además la mayoría de las otras opciones encontradas mantienen los bloques de superficie y densidad del diagrama 5.2.

Se puede decir que el sensor LM80 es en realidad de los más simples pero modernos sistemas de medición de nivel. En seguida se presentan algunas de esas soluciones, las cuales no se eligieron por el poco trabajo de ingeniería que lleva, ya que básicamente es adquirir el equipo y conocer su funcionamiento. Para efectos del proyecto se requería de un sistema que se le tuviera que aplicar una investigación exhaustiva y un diseño ingenieril.

### **6.1. Medición de nivel por tiempo de retorno**

Consiste en unos equipos que emiten microondas o ultrasonido, la superficie del material se obtiene por medio del tiempo de retorno (*time of flight*). El nivel se obtiene conociendo la altura del contenedor (silo). Hay tres tipos basados en el mismo principio, los cuales son: radar libre de Micropolit S/M, radar guiado del Levelflex M y ultrasónica del Prosonic S/M/T (Endress y Hauser S.A., 2014).

### 6.1.1. Radar libre de Micropolit

Consiste en una medición no intrusiva<sup>16</sup> de nivel por radar para líquidos y sólidos granulados. Opera con frecuencias entre 6 y 26 GHz (giga Hertz), la medición no se altera por altas temperaturas, presiones o por la presencia de capas de gas. Es segura ante el polvo y otras partículas. De la investigaciones realizadas se encontró que se puede medir nivel por medio de un transmisor radar o microondas, también conocida como el método del tiempo de retorno. El cual consiste en una antena que transmite pulsos de alta frecuencia que se refleja en la superficie del producto. Básicamente es el mismo principio del sensor LM80 solo que en este caso la distancia obtenida (d), que no es más que el volumen del contenido en el silo, es el producto de la velocidad de la luz (c) y el tiempo de retorno de la señal (t<sub>o</sub>) dividido por un facto de dos. Es decir:

$$d = \frac{c * t_o}{2} \quad (6.1)$$

Para encontrar el nivel (n) es necesario conocer la altura del contenedor tal como se hizo con el sensor láser.

$$n = h - d$$

A 6 GHz las microondas tienen de baja distorsión y a 26 GHz es insensible a los obstáculos con abertura del haz 4° y precisión 3 mm.



*Figura 6.1 Radar libre de Micropolit*

---

<sup>16</sup> Material o roca que penetra o atraviesa otros, rompiéndolos o deformándolos.

### 6.1.2. Radar guiado del Levelflex M

Funciona por medio de microondas guiados, también diseñados para líquidos y sólidos granulados. No depende de superficies del sólido. Puede servir en lugares donde hay polvo y es fácil de calibrar.



*Figura 6.2 Radar guiado del Levelflex M*

### 6.1.3. Radar ultrasónico Prosonic S/M/T.

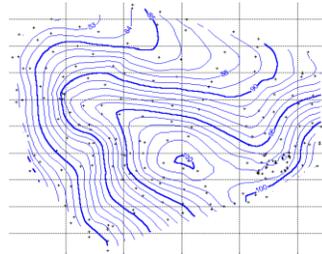
Este tipo de radar por tiempo de retorno funciona por medio de ultrasonidos en depósitos como los silos. Contiene integrado un sensor de temperatura, para compensar el tiempo de retorno.



*Figura 6.3 Radar ultrasónico Prosonic*

## 6.2. Mapeo de superficies en 3D

Este tipo de medidores opera en ambientes difíciles, cuya medición es continua, directamente calcula el volumen del contenido en el silo. Captura un gráfico en 3D (escaneo), tipo curvas de nivel (figura 6.5), analiza esa información y procesa el valor del volumen correspondiente, y con la densidad del café pergamino seco se hace una operación adicional para obtener la masa de ese café. Un ejemplo de un tipo de sensores 3D se observa en la figura 6.6.



*Figura 6.4 Curvas de nivel*



*Figura 6.5 Sensor VM3D*

## 7. Resultados Obtenidos

Como datos importantes a tomar en cuenta es que un silo de 3.5 metros de radio y 10 metros de altura tal como los de CoopeVictoria puede almacenar cerca de 3400 quintales de café pergamino seco que equivale a 154 200 kilogramos cuando está lleno, y suponiendo que la densidad es constante a  $395,7 \text{ kg/m}^3$ .

Lo que se obtuvo fue una simulación matemática del sensor ante la entrada del PLC para generar la masa correspondiente al nivel. Se comprobará que en el rango mínimo de salida del sensor LM80 se tiene virtualmente un valor cercano al que se estima en CoopeVictoria. Por contraparte el rango máximo establece que la altura es nula (se mide la base del silo).

Tal como se explicó en la sección 5.1.2, el diagrama 5.2 además de ser los bloques de segundo nivel también resumen el proceso en tres pasos fundamentales: nivel, volumen y masa. Se llevó a cabo una simulación que representa la salida del sensor LM80 en relación con la masa del café de forma aproximada.

La salida del dispositivo es una señal de corriente directa por lo que se tomará como una fuente de corriente que varía entre  $4 \text{ mA}^{17}$  y  $20 \text{ mA}$ . Esta señal entra a por dos amplificadores inversores en conexión cascada, el salida es una tensión que corresponde a la mitad de la señal de corriente (es una impedancia media en  $\Omega^{18}$ ), el primer amplificador mantiene la misma relación, y que es la mitad inversa de la entrada, para revertir el signo se acopló un segundo amplificador en configuración seguidor inversor de esta forma la salida del circuito completo es positiva. Antes del primer amplificador se diseñó un par de resistencias idealmente en paralelo donde una de ellas pertenece al primer inversor, con esto se puede utilizar el diferencial de potencial (tensión) como si viniera de la fuente y ser la entrada al primer amplificador. Las figuras 7.1 y 7.2 representan el diseño del circuito para simular el sensor, el primero a  $4 \text{ mA}$  y la segunda con salida de  $20 \text{ mA}$ .

---

<sup>17</sup> Miliamperios (mA), es la unidad de corriente que es mil veces menor que un Amperio.

<sup>18</sup> Letra griega ohm. Letra que se usa para representar la unidad de medida de una impedancia o resistencia, se obtiene del cociente de la diferencia de potencial (tensión) y la intensidad de flujo eléctrico (corriente eléctrica).

Como se observa a 4 mA la salida de tensión es de 2V, y con 20 mA la salida es de 10V, eso es porque la salida es la mitad de lo que es la entrada, es decir:

$$T = \frac{1}{2} * I \quad (7.1)$$

La corriente y la tensión al mismo tiempo son inversamente proporcionales a la altura así como se observa en la tabla 7.1

**Tabla**  
**7.1.**  
**Altura**  
**a de**  
**silos**

<b>Corriente I (mA)</b>	<b>Tensión T(V)</b>	<b>Altura H(m)</b>
4	2	10
20	10	0

*respecto a la señal de corriente del sensor*

Estableciendo estos rangos se obtiene una relación lineal entre tensión y altura. Como se aprecia en el gráfico de la figura 6.3.

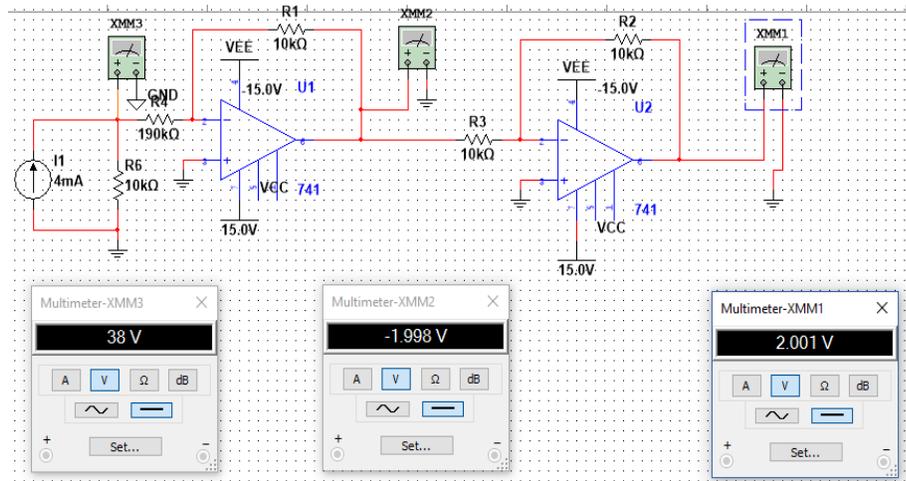


Figura 7.1 Salida de tensión de amplificar la señal del sensor a 4mA

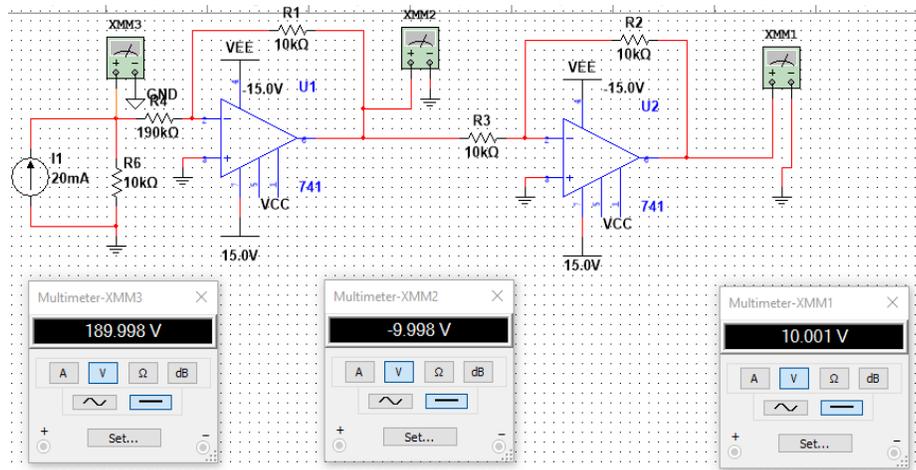


Figura 7.2 Salida de tensión de amplificar la señal del sensor a 20 mA

Recuerde que el Gimbal estará ubicado en la parte central y superior del silo como se indica en la figura 5.5, al menos un metro sobre la altura máxima definida del silo. Por lo cual cuando el sensor dé una señal en el rango mínimo lo que se estará midiendo es la altura máxima de lo que puede alcanzar el café pergamino seco en el silo. Por otro lado, el rango máximo de la salida del sensor es el suelo.

De acuerdo a los circuitos anteriores, en la figura 7.1 la salida de 2 Volts o Voltios (V) es ahora el rango mínimo y la salida de 10V según se observa en la figura 7.2 es el rango máximo proporcional al rango de corriente. Por lo cual, a 2V también se encontrará la medición de en la altura máxima del silo y a 10V la altura mínima.

Con los datos de la tabla 7.1 se graficó la relación entre el rango de tensión y el rango de altura (figura 7.3).

Como se observa la tendencia es una recta con pendiente negativa, es decir, que la tensión y la corriente mantiene una relación lineal con la altura del silo.

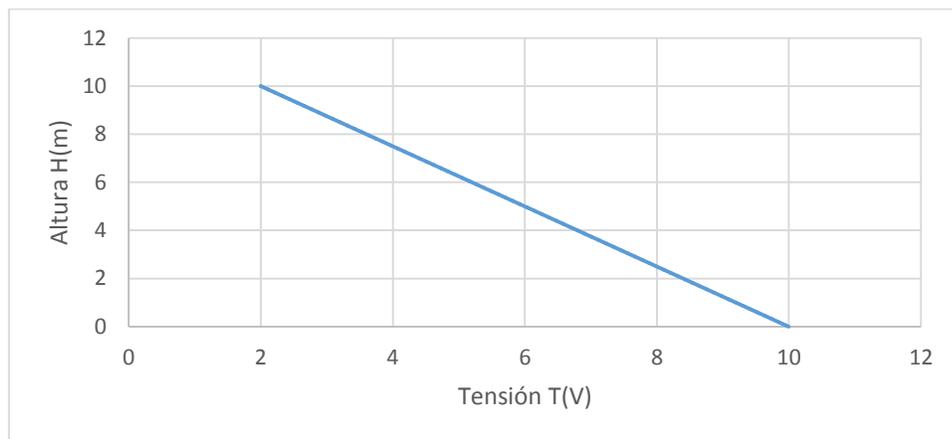


Figura 7.3. Altura vs Tensión

La ecuación lineal que describe dicho comportamiento se muestra en la siguiente expresión donde el eje vertical corresponde a la altura y el horizontal a la tensión de salida de los circuitos cuyos datos se obtiene de la tabla 13:

$$H = -1,25T + 12,5 \quad (7.2)$$

Sustituyendo la ecuación 7.1 en 7.2 se tiene que:

$$H = -0,625I + 12,5 \quad (7.3)$$

Por otra parte se puede reescribir la ecuación 3.5 conociendo los datos del silo y la densidad.

$$S = \pi * 3,5^2 = 12,25\pi \quad (7.4)$$

$$\rho * S = 395,7 * 12,25\pi = 4847,325\pi \text{ [kg/m]} \quad (7.5)$$

Sustituyendo 7.4 y 7.5 en 3.5 se tiene que la relación entre masa y corriente es la siguiente:

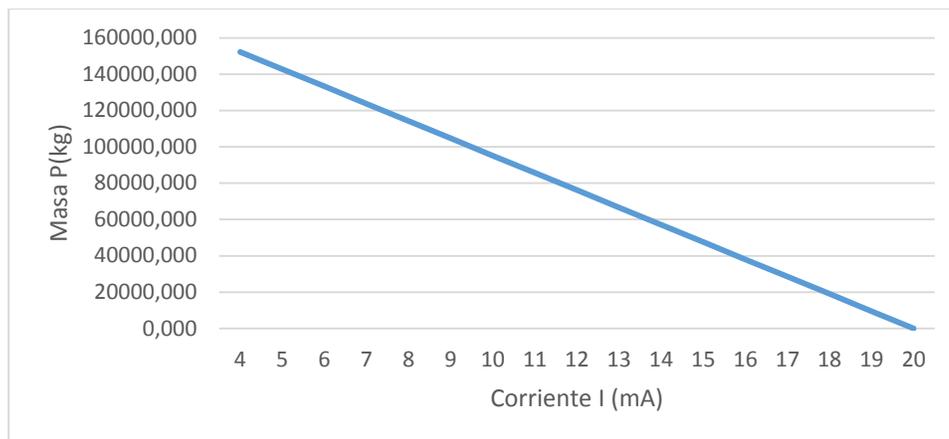
$$P = \rho * S * H = 4847,325\pi * (-0.625I + 12,5) \quad (7.6)$$

Por tanto, a 20 mA el valor de masa (P) es de 0 kg y a 4 mA es de 152 283,20 kg aproximados, que es cercano al valor estimado de CoopeVictoria. Tomando un valor en medio en lugar de los valores críticos se tiene que a 10 mA la masa es de 91 369,92 kg de café pergamino seco.

Si la masa del café oro disminuye en un 20% de la masa del café pergamino seco, según CoopeVictoria, 91 369,92 kg equivale a 73 095.936 kg de café oro. Este valor en libras es equivalente a 161 148,94 lb, es decir, 1611,49 quintales. CoopeVictoria promedia que el precio de un quintal de café es aproximadamente de ciento ochenta y seis dólares (\$186) para la temporada 2016-2017. Por tanto, cambiando los quintales obtenidos por el valor monetario ronda una suma por cercana a los trecientos mil dólares (\$300 000). Esto quiere decir que estimar la masa del café pergamino seco dentro del silo genera estabilidad en el inventario y por ende en las ventas del producto. Cabe destacar que, CoopeVictoria cuenta no uno sino dieciséis silos. Lo cual tendría mucha utilidad el proyecto diseñado en la empresa por el hecho de que aporta al inventario del café pergamino seco.

En la tabla 7.2 aparecen algunos de los casos más importantes entre el rango de corriente, la tensión salida, la altura alcanzada (nivel promedio), el volumen, y la masa a partir de la salida del sensor como entrada al sistema. El gráfico de las figura 7.4 muestra la relación entre masa y corriente, gracias a que la altura mantiene una relación lineal con la salida del sensor LM80. La pendiente tiene tendencia negativa y a pesar de ser matemáticamente proporcionales entre sí, en realidad no lo es. Cuando aumenta la señal del sensor la masa disminuye. Esto significa que cuando va aumentando en corriente el haz se va acercando al suelo, por lo que el valor de la masa se vuelve pequeño. Note que entre 19 mA y 20 mA hay un cambio muy brusco, eso es porque

entre esos valores la caída de la pendiente es más pronunciada y tiene a caer con más rapidez, pero son valores muy pequeños que no afectan la tendencia lineal de la ecuación 7.6.



*Figura 7.4 Masa del café en el silo vs señal del sensor*

**Tabla 7.2. Altura y masa según la corriente de entrada**

I (mA)	T (V)	H (m)	v (m3)	P(kg)
4	2,00	10,00	384,840	152281,188
5	2,50	9,38	360,788	142763,614
6	3,00	8,75	336,735	133246,040
7	3,50	8,13	312,683	123728,465
8	4,00	7,50	288,630	114210,891
9	4,50	6,88	264,578	104693,317
10	5,00	6,25	240,525	95175,743
11	5,50	5,63	216,473	85658,168
12	6,00	5,00	192,420	76140,594
13	6,50	4,38	168,368	66623,020
14	7,00	3,75	144,315	57105,446
15	7,50	3,13	120,263	47587,871
16	8,00	2,50	96,210	38070,297

17	8,50	1,88	72,158	28552,723
18	9,00	1,25	48,105	19035,149
19	9,50	0,63	24,053	9517,574
20	10,00	0,00	0,000	0,000

## 8. Análisis de objetivos realizados y resultados obtenidos

Los resultados obtenidos fueron básicamente para conocer de manera teórica el efecto del sensor LM80 que provoca en la entrada al sistema.

El primer paso fue sentarse y estudiar el problema conversando con el gerente del beneficio de CoopeVictoria y consultando con ingenieros expertos la forma más eficiente desde el punto de vista económico y técnico que permitiera elaborar la solución que se fuera a escoger. Se plantearon tres propuestas de las cuales a todas se les dedicó tiempo para estudiar los pros y contras, con el fin de escoger la que mejor se adaptaba a las necesidades de la empresa. Para cada solución planteada se buscaron los posibles componentes con los que se diseñaría, cada equipo también fue estudiado por medio de la ficha técnica se eliminaron algunos de la lista de posibilidades y con los que se encontraron se compraron en eficiencia en mediciones de masa y el presupuesto de cada uno. Con esto se llegó a tener la solución escogida que fue medir el peso a través del nivel de la superficie en el interior del silo.

El siguiente paso fue desarrollar la solución escogida y se planteó el primer objetivo, que consistió en investigar todas las formas de medir nivel en un silo. Se encontraron equipos de precios bastante elevados que inmediatamente fueron descartados. Se encontró uno de menor costo pero moderno y alta calidad, diseñado con tecnología de punta por medio de la página de la empresa ABB ubicada en los Estados Unidos que se dedica cierta parte a ofrecer dispositivos de medición de nivel dentro de silos. Es así como se encontraron equipos de escaneo de última tecnología cuyo funcionamiento se basa en realizar curvas de nivel, que es casi como capturar una foto pero en 3D que por medio de un programa se obtiene el nivel promedio. El inconveniente es el precio para una compañía que bien no es una pymes tampoco es una de las

grandes, pero va en crecimiento. La misma compañía ha diseñado un producto que también mide nivel pero de menor costo que aunque no hace un escaneo no le quita puntos para ser las necesidades del proyecto. Este dispositivo es el sensor LM80 que mide distancia de forma puntual por medio de un haz al que se le programa la altura máxima del recipiente e internamente sustrae el nivel. Sin embargo, como mide un punto a la vez y se trabaja con sólidos granulados una forma eficiente es abarcar múltiples puntos en todo el silo, pero para esto se necesita, de acuerdo a lo que se investigó, un aparato que realice un movimiento controlado y mueva al sensor. El aparato que se pensó y se diseñó es conocido como Gimbal con aplicación de dos ejes. Este mismo se buscó en internet pero resultaron ser sumamente costosos y además pudieran ser problemáticos puesto que se tenía que adaptar el sensor y resultar inútil la adquisición de este tipo de equipos. Para solucionar esto, se construyó uno que permita adaptar el sensor desde la fabricación.

El siguiente objetivo fue diseñar el Gimbal bidireccional: azimut y elevación. El primero para dar giros en forma de barrido por toda la circunferencia del silo y el segundo es para realizar giros de la altura máxima al centro del silo. Se necesitó de un motor y un servomotor que son los responsables de cada giro. El material: aluminio de forma que sea liviano y no comprometa al motor con más de su capacidad. Fue basado de la figura 5.4 para obtener el diseño apropiado. En el Apéndice 2 se muestran las vistas y el isométrico de la figura final.

El paso siguiente fue encontrar un modelo de control para el dispositivo que se mueve en dos ejes siendo este la planta a construir y a controlar. Se entendió que comprendía de un lazo de realimentación negativa que se proporciona por medio del sensor LM80. Las entradas al modelo son torques y las salidas son ángulos.

Además de tener un lazo de realimentación necesita de un controlador que acoja la señal de entrada del sistema y la del sensor y sean manipuladas para efectuar el control del Gimbal. El controlador es un PLC también de la empresa ABB de la familia AC500 como se observó en la figura 5.9. El PLC recibe tres entradas, una digital y dos analógicas y da como salida dos señales analógicas y una digital. Se programó exitosamente la lógica del programa siguiendo el diagrama de flujo de la figura 5.7.

De acuerdo a los resultados obtenidos la solución escogida permanecerá en el diseño hasta que la empresa lo quiera implementar, que pudiera ser el año entrante por ahora están valorando de acuerdo a sus objetivos la posibilidad de llevarlo a cabo.

En los resultados se puede comprobar que el rango de capacidad a silo lleno está dentro de lo que estima la empresa a prueba de error humano con porcentaje de error de 1,23%. Como se ve en la tabla 7.2. Como el sistema se debe ubicar en la parte más alta del centro del silo la mínima corriente representa la altura máxima del mismo. Se demostró además que por medio de la relación lineal entre altura y señal de salida del sensor, esta salida se relaciona también con el peso del café.

**Tabla 8.1 Porcentaje de error entre pesos**

Pmax (Empresa)	Pmax (con el sensor)	%Error
154200	152281,188	1.23

La relación aunque es lineal no quiere decir que son proporcionales, porque cuando la señal del sensor aumenta significa que la altura es menor a la máxima del silo y por ende la masa disminuye.

En general el proyecto logró reunir toda la información encontrada, se analizó y a partir de ahí se diseñó el modelo de control así como el elemento físico de acuerdo a las n

El trabajo realizado quedará abierto para otros proyectos ya que la solución puede variar, buscando una manera más eficiente para medir nivel. Puede reemplazarse el sensor de nivel por uno menos costoso pero que no pierda eficiencia en la medida. Se puede mejorar el Gimbal o utilizar un sistema similar como los mencionados en el capítulo 6. Por ejemplo el equipo vm3d (figura 6.6) que no realiza la medición en un punto sino en forma de escaneo, cuenta con brazo flexible y un equipo propio para analizar la información recuperada es una versión mejorada del LM80. Como se puede entender es un equipo más preciso pero a la vez de un costo mucho mayor. Puede buscarse equipos de otras empresas de menor rentabilidad. Pero se eligió el LM80 por ser el más simple pero preciso sistema de medición de nivel.

Después de realizar el proyecto se conoció que hay distintas formas de medir masa de un objeto cuando se trata de café o sólidos granulados. Puede sustituirse todo el diseño por una solución diferente como la de las celdas de carga. Además no es solo para la empresa sino que es posible implementarse en otras empresas que utilicen silos de café, maíz, arroz, etcétera.

El proyecto cumplió todos los objetivos planteados, desde la investigación de cada una de las formas de medir e incluso las investigaciones para determinar la forma más viable de medir masa en un silo. Se analizó el sistema de medición de altura exitosamente estudiando cada una de sus pros y contras para utilizarlo como parte del equipo del proyecto.

Posterior a ello se diseñó el Gimbal, logrando conocer el modelo matemático que hay detrás así como los componentes que necesita. Se conoció que hay dos ejes para controlar el equipo. Además se diseñó la estructura en la que va montado el sensor LM80, cuyas dimensiones se observan en el apéndice A.1.

Se diseñó la lógica del controlador exitosamente, la cual se presentó por medio de un diagrama flujo y tablas, que se explicaron detalladamente. La lógica del programa podría ser utilizada en cualquier otro tipo de controlador. El diseñador del proyecto eligió el de la empresa ABB por la facilidad de acople que maneja.

La empresa destinó que el proyecto no fuera implementado ni en prototipo debido a que en la temporada entre octubre y enero CoopeVictoria se encuentra recibiendo grandes cantidades de café lo que provoca que los silos empiecen a ocuparse por lo que no se podría trabajar en el silo; además a eso, la empresa administrativamente desea invertir en el proyecto pasada la recibida de café fruta.

Por esta razón se descartó como parte de los objetivos. Sin embargo, no realizar la implementación no opaca el trabajo del casi ingeniero electrónico quien está a cargo del proyecto. Lo que se haría como ingeniero de la CoopeVictoria es: ser implementado por el mismo ejecutor o contratar a un técnico al cual se le brindaría toda la asesoría así como las condiciones de la empresa y del proyecto o también se podría negociar con un ingeniero electromecánico y trabajar en equipo para implementar la parte física y electrónica del sistema.

Por otra parte el proyecto queda abierto para mejores aún más. Además CoopeVictoria no solo cuenta con un silo sino con 16 de las dimensiones citadas a lo largo del desarrollo de la solución. Por tanto el trabajo no se ampliaría a los demás silos. Sin embargo, no solo es compatible para café, podría usarse para cualquier otro tipo de granulado, lo que varía en la densidad y las dimensiones del depósito. La figura 8.1 muestra cómo se vería el Gimbal en el silo

## 9. Presupuesto

En este capítulo se muestra un análisis financiero por medio de cuadros comparativos donde se valorarán las tres propuestas, de esta forma conocer porqué, económicamente, se optó por la solución planteada y diseñada y no por la otras dos propuestas.

Analizando la propuesta 1, denominada *Presión de Café*, se encuentra que los requerimientos básicamente son: múltiples sensores de presión industriales, para abarcar el mayor perímetro posible interno del silo, si son menos puede suceder que queden espacios importantes dentro del contenedor que genera medidas erróneas, se deben utilizar alrededor de mil sensores de presión. Luego se debe escoger el PLC AC500 que recibe todas las señales de los sensores y procesa el cálculo.

La segunda propuesta, *Celdas de carga*, es necesario utilizar cuatro células por silo para establecer la configuración Wheastone, además de un PLC para recibir la información y controlar esa medida. Por otra parte se debe realizar un trabajo extra en la empresa para poder montar las células.

Entre los recursos más importantes que se utilizaron para diseñar el proyecto *Nivel de café en el silo* son: el sensor de láser de nivel LM80, el sensor de codificador óptico, el PLC AC500 y el software Automation Builder, el motor para eje azimut y servomotor para eje de elevación así como la planta para el Gimbal.

**Tabla 9.1. Presupuesto del proyecto**

Presión del café		Celdas de carga		Nivel de café en el silo	
Descripción	Presupuesto (\$)	Descripción	Presupuesto (\$)	Descripción	Presupuesto (\$)
1000 sensores de presión a \$400	400000	4 células a (413 euros)	1763	Sensor LM80	2400
		PLC	500	PLC	500
		Trabajo extra (modificar el silo)	1830	Sensor codificador óptico	15
				Motor eje azimut	31.85
				MG996R Metal Gear Servo	19.76
				Planta Gimbal en aluminio	228
Subtotal	400000	Subtotal	4084	Subtotal	3194.61
Mano de obra (21 horas)	13952		13952		13952

semanales)					
Total	413952		18000		17146.61

Se puede observar en los totales donde se incluye la mano de obra que el presupuesto del Nivel del café en el silo es menor a las otras dos, por ende esta fue económicamente la escogida.

## 10. Conclusiones

Se concluye después de una ardua investigación que existen múltiples formas, con diferentes diseños posibles de medir masa en un silo sin importar el tipo de sólido granulado e incluso donde se empleen líquidos. Se puede lograr no solo con las tres propuestas planteadas, si se indaga de forma correcta se encontrarán distintas soluciones. Estudiando las posibilidades se tuvieron en lista hasta cinco candidatas de las cuales se optaron por las menos difíciles desde el punto de vista de un ingeniero tanto para diseñarse como para implementarse de acuerdo a los trabajos adicionales se tendría que hacer.

Además se investigó que no existe una sino muchas otras maneras de medir nivel en sólidos granulados. Si bien medir este tipo de sólidos es más incómodo que cualquier líquido por la irregularidad de niveles, es ahora con los avances de la tecnología que ese problema tiene sus múltiples soluciones. Es de encontrar la opción más rentable y más precisa si es eso lo que se busca.

Se encontró que para diseñar un Gimbal de dos direcciones se debe conocer de principios físicos como torques, masas, momentos angulares, momentos de inercia, velocidades angulares y ángulos de movimiento. Donde entrada a modelo son torques y la salida son ángulos que dependen de las otras cantidades.

Es necesario e importante adecuar el nivel de la salida del sensor LM80 a la altura del silo. El sensor por su naturaleza puede alcanzar 100 metros en un espacio libre lo cual hace

constar que la salida es de 20 mA, pero se establece una relación entre altura del silo y la señal del sensor donde el máximo alcanzable es la mayor altura del contenedor. Solo que para este caso el rango es invertido. El menor rango de corriente indica la máxima altura y el valor más crítico es la mínima altura que se refiere al suelo del silo.

El controlador fue un Programmable Logic Controller (PLC) con dos entradas digitales y una analógica, y una salida digital y dos analógicas. El equipo recibe las señales del sensor y promedia el nivel para obtener volumen y por último la masa conociendo el valor de la densidad del pergamino seco.

Se concluye por medio de la prueba a silo lleno que el proyecto tiene un buen horizonte para una posible implementación.

## **11. Recomendaciones**

Una forma de modificar el diseño realizado es utilizar un tipo de eje de rodamiento donde debe ir colocado el motor del eje azimut con carbones de grafito para dar energía al sensor y servomotor. El carbón es alimentado por el torque que da el motor ubicado en un lugar donde estratégico que haga girar el rodamiento. Esto es un trabajo para algún ingeniero electromecánico o afín para considerar como un proyecto de graduación a futuro.

Se puede variar el sensor láser por uno ultrasónico o uno de los que se nombraron en el capítulo 6.

Colocar una protección para proteger el equipo de partículas o capaz de polvo que se generan por ser un lugar cerrado y de poco aire atmosférico, también protegerlo de agua y de todo material que pueda dañar el sistema. Se deber ser meticuloso para escoger el material o realizar un trabajo para que el haz no incide sobre el material y se refleje o refracte, pues esto podría ser problemático al ejercer las mediciones.

## Bibliografía

*10 beneficios de llevar inventario* (2012, septiembre 12). Recuperado el 11 de octubre del 2016, de: <http://www.buenosnegocios.com/notas/541-10-beneficios-llevar-inventarios>

ABB (2015). LM80 Laser level transmitter. Data sheet (pdf).

<http://www.abb.com/product/seitp330/5b44f69217e6e8a48525792500689a7d.aspx%3FproductLanguage%3Dus%26country%3D00>

Abdo, M., Reza, M., Reza, A. & Reza, M. (2013, septiembre 09). *Cascade Control System for two Axis Gimbal System with Mass Unbalance*. Recuperado el 26 de octubre de: <http://www.ijser.org/researchpaper%5CCascade-Control-System-for-Two-Axes-Gimbal-System-with-Mass-Unbalance.pdf>

Anacafé (s. f.). El beneficio húmedo. Recuperado e 12 de octubre de 2016 de: [https://www.anacafe.org/glifos/index.php/Caficultura\\_BeneficiadoHumedo#Lavado\\_manual](https://www.anacafe.org/glifos/index.php/Caficultura_BeneficiadoHumedo#Lavado_manual)

Beal, R. M. (2003). Derivation of the Equations of Gyroscopic Motion. Recuperado de: <http://www.gyroscopes.org/math2.asp>

Café Colombia (2016). *Clasificación de Calidad*. Recuperado el 7 de octubre de 2016 de: [http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/sobre\\_el\\_cafe/el\\_cafe/clasificaciones\\_de\\_calidad](http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/sobre_el_cafe/el_cafe/clasificaciones_de_calidad)

/

Centro de Comercio Exterior (s. f.). *Densidad del grano*. Calidad del café-Densidad del grano. Recuperado de: <http://www.intracen.org/guia-del-cafe/calidad-del-cafe/Densidad-del-grano/>

CoopeVictoria (2010-2016). *Productos/Café*. Recuperado de: <http://www.coopevictoria.com/cafe.html>

Crcibernética (2016). *MG996R Metal Gear Servo*. Recuperado de: <http://www.crcibernetica.com/mg996r-metal-gear-servo/>

Electrónica Unicrom. (2016). Puente Wheatstone. Historia y funcionamiento. *Puente Wheatstone – Medidor de resistencias de presión*. Recuperado de: <http://unicrom.com/puente-de-wheatstone-medidor-resistencias-precision/>

Emerson Process Managenet (2010). Medidor de nivel y volumen en silos y bodegas con sensores 3D. Recuperado el 12 de octubre, 2016 de: [https://www.youtube.com/watch?v=5o\\_oxKSDeTY](https://www.youtube.com/watch?v=5o_oxKSDeTY)

Endress and Hauser (2014). *Soluciones para aplicaciones con líquidos y sólidos granulados*. Mediciones de Nivel. Recuperado de: <http://www.vigaflow.com/wp-content/uploads/2014/08/E+H-Medici%C3%B3n-de-nivel.pdf>

Gyroscope Physics (2009-2016). Real World Physics Problems. Recuperado de: <http://www.real-world-physics-problems.com/gyroscope-physics.html>

Hernández, D. (2013, noviembre 23). Ventajas y Desventajas de los inventarios. Recuperado el 12 de octubre de 2016 de: <https://prezi.com/zagoc1zjz4lm/ventajas-y-desventajas-de-los-inventarios/>

Hibbeler, R. C. (2003). Cinemática tridimensional de un cuerpo rígido. *Ingeniería Mecánica* (7a ed.) (pp. 511-547). México: PRENTICE-HALL HISPANOAMERICANA S.A.

Kulakowski, N., Gardner, J. & Shearer, J. (2013). *Dynamic Modeling And Control of Engineering systems* (3 ed). New York: Cambrige University Press.

Lefcovich, M. (2004, septiembre 21). *Las pequeñas empresas y las causas de sus fracasos.*

PYME. Recuperado 17 de octubre de 2016 de:

[http://www.degerencia.com/articulo/las\\_pequeñas\\_empresas\\_y\\_las\\_causas\\_de\\_sus\\_fracasos](http://www.degerencia.com/articulo/las_pequeñas_empresas_y_las_causas_de_sus_fracasos)

*Marchando curiosidades sobre nuestro querido café.* (2015). Vivo y Coleando. Recuperado de:

<https://vivoycoleando.com/2015/02/22/marchando-curiosidades-sobre-nuestro-querido-cafe/>

Marie, M. L. (2012). *El secado del café.* Recuperado de:

[http://shuquush.com/joomla1.5/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=36&Itemid=61](http://shuquush.com/joomla1.5/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=36&Itemid=61)

Mercado libre (1999-2016). *Mini Motor C/ Redutor 12v Dc 13 Rpm Alto Torque Até 15kilos.*

Recuperado de: [http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-774001889-mini-motor-c-redutor-12v-dc-3-rpm-alto-torque-ate-15kilos-\\_JM](http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-774001889-mini-motor-c-redutor-12v-dc-3-rpm-alto-torque-ate-15kilos-_JM)

Montilla, J., Arcilla, J., Aristizábal, M., Montoya, E., Puerta, G., Oliveros, C. (2008).

*Propiedades Físicas y Factores de Conversión de Café en el Proceso de Beneficio.* Recuperado el 5 de octubre de 2016, de: <http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/358/1/avt0370.pdf>

Pons, R. (2016). *Understanding Azimuth and Elevation.* PhotoPills. Recuperado de:

<http://www.photopills.com/articles/understanding-azimuth-and-elevation>

Sears, F., Zemansky, M., Young, H. (2004). Presión en un fluido. Mecánica de fluidos. Física Universitaria (11 ed). México: PEARSON EDUCACIÓN.

Scheffler, J. C. (2010). *Café pergamino seco.* Recupero de:

<https://www.flickr.com/photos/jucasch/4292074142/in/photostream/>

Vida y Estilo (2010, julio 26). Proceso de elaboración del café, del grano a la taza. Recuperado el

15 de octubre de 2016 de: [https://vidayestilo.terra.com.mx/gastronomia/proceso-de-](https://vidayestilo.terra.com.mx/gastronomia/proceso-de-elaboracion-del-cafe-del-grano-a-la-taza,183818b2c7a3f310VgnCLD200000bbcceb0aRCRD.html)

[elaboracion-del-cafe-del-grano-a-la-](https://vidayestilo.terra.com.mx/gastronomia/proceso-de-elaboracion-del-cafe-del-grano-a-la-taza,183818b2c7a3f310VgnCLD200000bbcceb0aRCRD.html)

[taza,183818b2c7a3f310VgnCLD200000bbcceb0aRCRD.html](https://vidayestilo.terra.com.mx/gastronomia/proceso-de-elaboracion-del-cafe-del-grano-a-la-taza,183818b2c7a3f310VgnCLD200000bbcceb0aRCRD.html)

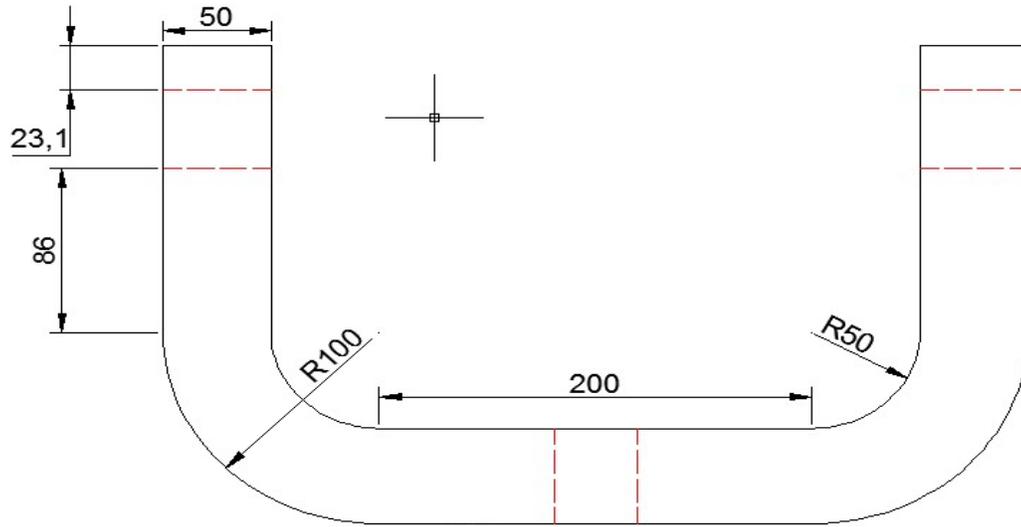
## Apéndice A.1 Vistas e Isométrico del Gimbal

La figura 5.8 es un ejemplo del que se ha basado para construir la figura real. Las medidas del objeto, así como el material de que se compone, fueron diseñadas de tal forma que el motor pueda girar el peso de todo el equipo. Todas las medidas se calibraron en milímetros.

Las líneas en rayas en las columnas se ubican el servomotor y el motor.

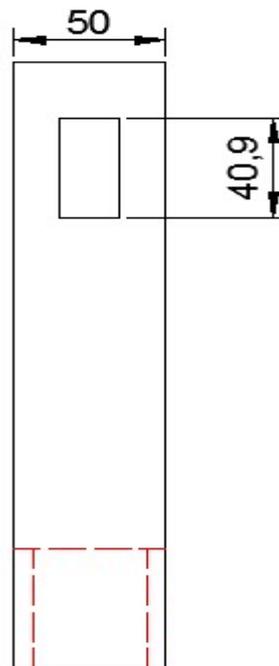
*Tabla A 1.1 Parámetros de la planta del Gimbal.*

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>
Material	Aluminio
Peso del motor	156g
Peso servomotor	55g
Peso del sensor LM80	1.6 kg
Peso del sensor codificador óptico	45g



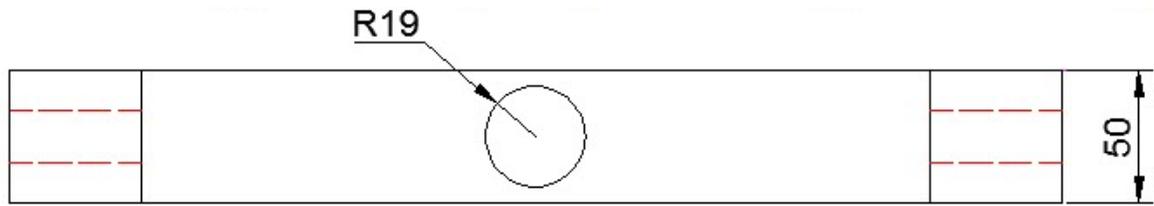
AutoCAD

Figura A 1.1 Vista frontal de la vista del Gimbal



AutoCAD

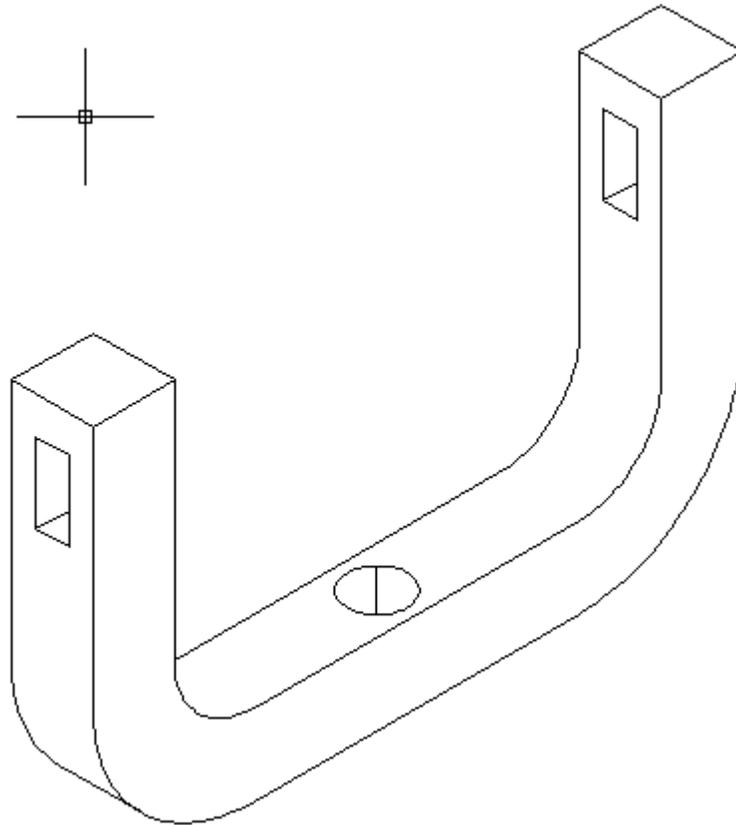
Figura A 1.2 Vista lateral izquierda del Gimbal



AutoCAD

Figura A 1.3 Vista superior del Gimbal

A partir de las vistas se dibujó el isométrico de las vistas anteriores que se observa en la figura A.2.4



AutoCAD

Figura A 1.4 Isométrico del Gimbal

Se diseñó una plataforma como en la figura 9 como base de la estructura y pieza importante para sostenerla de caídas que debe fijarse en el techo.

## **Apéndice A.2      Lógica del programa del PLC**

Se muestra a continuación una parte del código del software con su comentario respectivo. Se genera un patrón de la línea 23 en adelante, repitiéndose desde la línea 07 hasta la 22 catorce veces.

02	WHILE Inicio=TRUE DO	{Condición estable que cuando el inicio está activo ejecute la lógica siguiente}
03	RADIO :=3.5;	{Radio del silo}
04	RO:=395.7;	{Densidad volumétrica del café pergamino seco}
05	DIS:=Sensor;	{Señal otorgada por el sensor láser}
06	M1:= 90;	{Salida del eje de elevación con posición inicial en 90° con respecto a la vertical imaginaria}
07	i:=0;	{Contador con inicio en 0}
08	SUMA:=0;	{Variable para guardar la suma con inicio en 0}
09	FOR (M2:=0:4:360)DO	{Ciclo cuya variable es la salida del motor para el eje azimuth, varia cada cuatro grados hasta completar 360°, Se repite sucesivamente hasta cumplir con las condiciones del ciclo}
10		
11	GEN:=DIS*SIN(M1);	{Distancia corregida, equivale a la señal del sensor multiplicada por el seno de ángulo de elevación}
12	IF (GEN<>RADIO) THEN	{Comparación de la desigualdad entre la distancia corregida y el radio del silo}
13	A(i):=DIS*COS(M1);	{Si la condición resulta verdadera se corrige el valor ahora con el coseno del ángulo de elevación, como si se estuviera midiendo verticalmente}
14		
15	SUMA=SUMA+A(i);	{Guarda el valor anterior en la variable suma tomando como nuevo valor el que se obtiene de sumar la suma anterior y el dato calculado anteriormente}
16		
17	i=i+1;	{Incrementador del contador}
18	END_IF	
19	END_FOR	
20	P1:=(SUMA)/i;	{Promedio calculado entre la última suma y la último valor del contador}
21		
22	M1:=M1-6;{84}	{Disminuye en 6 grados el angulo de elevación}
23	DIS:=Sensor;	
24	i:=0;	
25	SUMA:=0;	

*Automation Builder*

*Figura A 2.1 Código del Controlador*

## **Anexo B.1 Especificaciones del Motor**

Se observa en la figura B.1.1 las dimensiones del motor utilizado, así como las especificaciones más importantes del mismo mostradas en la tabla B.1.1 (Mercado libre, 1999-2016)

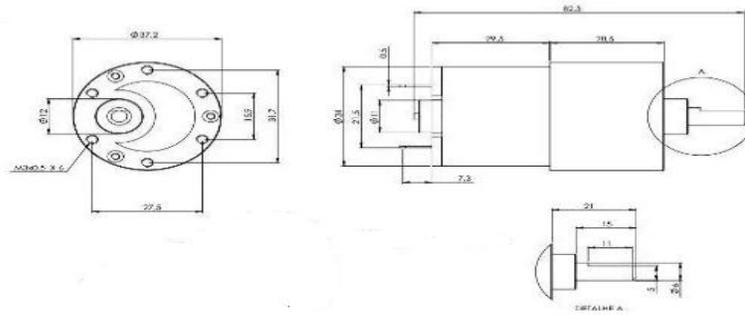


Figura B. 1.1 Dimensiones del Motor

Realizar giros de 360° en eje azimut con pasos cada 4 grados para que el sensor realice 90 mediciones en una vuelta. La señal de inicio la activa el usuario dando prioridad al motor de moverse 4 grados. Al momento entra la segunda señal: la del sensor LM80 para realizar la medida. Luego se mueve el motor otros cuatro grados y vuelve el sensor a medir, así se va haciendo un ciclo durante una vuelta en cada rotación azimutal. Terminado los 360° se activa el codificador óptico y detiene el giro. Se mantiene la dinámica catorce veces pero con ángulos de elevación distintos.

Tabla B. 1.1 Parámetros del motor

Parámetro	Descripción
Peso	15 kg
Tensión	12 Vdc
RPM	3 RPM
Torque a 12 V	15 kg-cm
Potencia	3.7 W

## Anexo B.2 Especificaciones del Servomotor

La tabla A.4.1 son las especificaciones más importantes del servomotor utilizado para dar movimiento en el eje de elevación, mientras que la figura A.4.1 son las dimensiones del componente (Crcibernética, 2016).

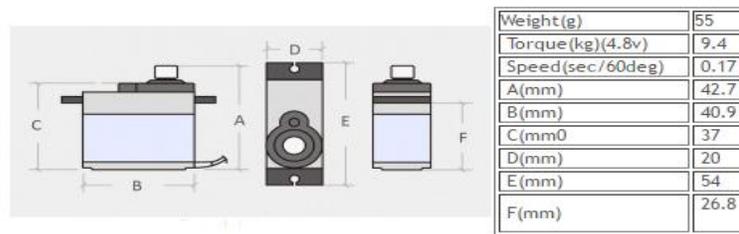


Figura B. 2.1 Dimensiones del Servomotor

Tiene como función aportar torque al eje de elevación que se calibra para que gire 90 grados tomando como referencia la línea imaginaria en el centro del silo. De esta forma el servo debe rotar de 180° a 270° o bien de 0° a -90°. Esta rotación se hace cada 6 grados una vez que se active el codificador óptico, siendo la primera justo después de la vuelta inicial del eje azimut. Durante la rotación en elevación la medida del sensor no se guarda en el PLC.

Tabla B. 2.1 Parámetros del Servomotor

Parámetro	Descripción
Peso	55g
Torque a 4.8 V	130.54 oz-in (9.40 kg-cm)
Torque a 6.0 V	152.76 Oz-in (11.00 kg-cm)
Velocidad a 4.8 V	0.19 s/60°
Velocidad a 6.0 V	0.15 s/60°
Dimensiones	
Largo	1.6 in (40.7 mm)
Ancho	0.78 in (19.7)
Altura	1.69 in (42.9 mm)
Pulsos por ciclo	1 ms
Tensión de operación	4.8 – 6.6 V