

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**“FABRICACIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UN SISTEMA
AUTOMÁTICO DE ALMACENAMIENTO, DOSIFICACIÓN Y
TRANSPORTE DE COMPONENTES INERTES PARA EL
PROCESO DE ELABORACIÓN DE DINAMITA EN LA
EMPRESA EXPLOCEN C.A.”**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN MECATRÓNICA**

REALIZADO POR:

CARLOS ANDRÉS BETANCOURT BACA

DANIEL ALBERTO REYES UQUILLAS

DIRECTOR: ING. RODOLFO GORDILLO O.

CODIRECTOR: ING. JOSÉ PÉREZ R.

Sangolquí, 2013 - 08 - 19

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto “**FABRICACIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO DE ALMACENAMIENTO, DOSIFICACIÓN Y TRANSPORTE DE COMPONENTES INERTES PARA EL PROCESO DE ELABORACIÓN DE DINAMITA EN LA EMPRESA EXPLOCEN C.A.**”, fue realizado en su totalidad por Carlos Andrés Betancourt Baca y Daniel Alberto Reyes Uquillas, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniera en Mecatrónica.

Ing. Rodolfo Xavier

Gordillo Orquera

DIRECTOR

Ing. José Emilio

Pérez Rosales

CODIRECTOR

Sangolquí, 2013-08-19

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

**“FABRICACIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UN SISTEMA
AUTOMÁTICO DE ALMACENAMIENTO, DOSIFICACIÓN Y
TRANSPORTE DE COMPONENTES INERTES PARA EL PROCESO DE
ELABORACIÓN DE DINAMITA EN LA EMPRESA EXPLOCEN C.A.”**

ELABORADO POR:

Carlos Andrés Betancourt Baca

Daniel Alberto Reyes Uquillas

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA.

Director de la Carrera de Ingeniería Mecatrónica.

Ing. Luis Manuel Echeverría Yáñez.

Sangolquí, 2013-08-19

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, Carlos Andrés Betancourt Baca y Daniel Alberto Reyes Uquillas

Autorizamos a la Escuela Politécnica del Ejército la publicación, en la biblioteca virtual de la institución, del proyecto de grado titulado: “FABRICACIÓN DE UN MODELO A ESCALA DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO DE ALMACENAMIENTO, DOSIFICACIÓN Y TRANSPORTE DE COMPONENTES INERTES PARA EL PROCESO DE ELABORACIÓN DE DINAMITA EN LA EMPRESA EXPLOCEN C.A.”, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Carlos Andrés Betancourt Baca

Daniel Alberto Reyes Uquillas

Sangolquí, 2013-08-19

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico a mis hermanos Kevin y Shirley y mi tío Christian. Ahora que están empezando su viaje universitario, pueden ver que es un instante de la vida un poco duro, quiero decirles, que sí, es duro al principio, muy difícil y después se va a volver más duro, pero que no se rindan. Quiero que este esfuerzo, sirva de inspiración para ellos en esos momentos de desaliento, en esas madrugadas llenas de trabajo que pasan como el viento, solo para que vengan más madrugadas de trabajo. Quiero decirles también que lo que más hay en la Universidad son momentos felices, que no sientan pena de festejar sus triunfos con mucha euforia y que la recompensa al final lo supera todo.

Carlos Andrés Betancourt Baca

DEDICATORIA

Dedico este proyecto primeramente a Dios, quien es la luz que guía mi camino. A mis queridos padres Miguel y Lucia, quienes me han dado la fortaleza para lograr todos mis objetivos y metas, y me han enseñado con el ejemplo, a ser un hombre de bien y a luchar para lograr lo que sea que me proponga. A mis hermanos Miguel y Juan Carlos quienes me han brindado su apoyo incondicional durante toda mi vida. A mis abuelos Miguel, Berta y Rubén quienes ya no están con nosotros y a mi abuelita Ana Luisa que está presente y siempre me ha dado buenos consejos y enseñanzas. A mi madrina Fátima y su esposo Miguel Montesdeoca, quienes me acogieron por un corto tiempo en el cual aprendí mucho de ellos y siempre han estado ahí para ayudarme.

Daniel Alberto Reyes Uquillas.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer de todo corazón a mis padres, Carlos y Cecilia que desde siempre me han guiado y enseñado no dejar de luchar. Por todo el amor que me dan siempre, solo quiero decirles que también los amo y les debo todo.

A mis hermanos, que siempre están a mi lado y que han compartido conmigo un mundo de emociones y alegrías desde que tengo uso de razón, los quiero mucho.

A mis abuelitos que han estado siempre conmigo para cuidarme y aconsejarme cuando mis padres no lo han podido hacer, gracias de todo corazón.

A mis tíos que han sido como hermanos para mi, compartiendo grandes triunfos familiares y terribles tragedias también, ellos siempre han estado ahí para darme su apoyo. Quiero agradecer en especial a mi tía Nadia y a mi Primo Andrés, ella que es el mayor ejemplo de sacrificio en la familia, de nunca rendirse y de luchar para unir a una familia con amor, y su hijo que es sin duda la alegría de toda la familia.

A Francia que es una persona increíble, llena de fuerza de voluntad y sobre todo paciencia, que ha estado a mi lado desde hace tres años en los que se ha convertido en una parte indispensable de mi vida.

A Daniel mi compañero de tesis que ha sido un gran apoyo con quien hemos luchado mucho para lograr este sueño, le deseo los mejores éxitos en su vida. También a su familia que ha tenido mucha paciencia y no nos ha dejado de apoyar les estoy muy agradecido.

A todos mis amigos del colegio, universidad y la vida, profesores, el grupo de campamento y nuestra Madre Dolorosa quien nos cuida. Finalmente al más importante de todos, Dios, que me ha protegido y cuidado desde siempre.

Carlos Andrés Betancourt Baca

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, por guiarme con su sabiduría infinita hasta donde he llegado.

A mis queridos padres, Miguel y Lucia quienes con su apoyo y cariño me han permitido tener las mejores oportunidades y se han encargado de que nada me falte.

A mis hermanos, Miguel y Juan Carlos, con quienes he compartido los mejores y los peores momentos de mi vida siempre contando con su apoyo incondicional. Gracias por todos esos recuerdos. A mi hermana Andrea, quien es un ejemplo de una gran persona y una gran profesional, y a mi sobrina Sofy quien es un angelito.

A todos mis familiares, tíos, tías y todos mis primos, que me han enseñado el valor de una familia unida.

A mi compañero de tesis y amigo Carlos Andrés, quien ha estado ahí en las buenas y en las malas. Y con quien tuve el gusto de compartir mi vida universitaria y lograr esta meta.

A mis amigos más cercanos, Carlos, Josue, Sergio, Daniel y Luis. Con quienes he compartido tantos buenos y malos momentos, recuerdos inolvidables durante el tiempo que nos conocemos, gracias muchachos por su valiosa amistad

A mis amigos del colegio y la universidad con quienes comparto una gran amistad que perdura y se mantendrá hasta el final.

A mis maestros y a todas las personas que me han apoyado para lograr este ansiado objetivo.

Daniel Alberto Reyes Uquillas

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO	ii
LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTOs	vii
AGRADECIMIENTOS	viii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	ix
INDICE DE TABLAS	xvii
INDICE DE FIGURAS	xix
INDICE DE ANEXOS	xxiv
RESUMEN	xxv
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.1.1 ESTUDIO DE LA LÍNEA DE ELABORACIÓN DE DINAMITA	1
1.1.1.1 Formulación	2
1.1.1.2 Mezclado	2
1.1.1.3 Encartuchado	3
1.1.1.4 Empaquetado	3
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	4

	x
1.2.1 ESTADO ACTUAL DEL SISTEMA	4
1.2.2 PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO.....	5
1.3 JUSTIFICACIÓN	5
1.4 OBJETIVOS.....	7
1.4.1 OBJETIVO GENERAL	7
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	7
1.5 ALCANCE DEL PROYECTO	8
1.6 METODOLOGÍA	9
1.6.1 MÉTODO CIENTÍFICO DE INVESTIGACIÓN	9
1.6.2 METODOLOGÍA EN PROYECTOS MECATRÓNICOS INDUSTRIALES.....	10
CAPÍTULO 2.....	12
MARCO TEÓRICO	12
2.1 SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE MATERIALES SÓLIDOS A GRANEL.....	12
2.1.1 FACTORES PARA EL DISEÑO DE SILOS	13
2.1.1.1 Material del silo.....	13
2.1.1.1.1 Acero.....	14
2.1.1.1.2 Plástico	14
2.1.1.1.3 Hormigón	15
2.1.1.2 Geometría	16
2.1.1.3 Manufactura	16
2.1.1.4 Materiales a ensilar	17
2.1.1.4.1 Aserrín	18

2.1.1.4.2 Nitrato de Amonio	19
2.1.1.5 Tipos de cargas en silos	20
2.1.2 MÉTODO PARA LA SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS.....	21
2.1.2.1 Selección del material de fabricación de los silos	22
2.1.2.2 Selección de la geometría de los silos	23
2.1.2.3 TABLAS DE RESULTADOS	25
2.2 SISTEMAS DE DOSIFICACIÓN	26
2.2.1 SISTEMAS DE PESAJE	26
2.2.1.1 Celdas de carga	27
2.2.1.1.1 Celdas de carga de compresión	28
2.2.1.1.2 Celdas de carga de tensión y compresión	29
2.2.1.1.3 Celdas de carga con viga en forma de s.....	29
2.2.1.1.4 Celdas de carga de flexión de viga	30
2.2.1.1.5 Celdas de carga de un solo punto	31
2.2.1.1.6 Celdas de carga tipo botella o Canister	31
2.2.1.2 Sensores de deformación de acople rápido.....	32
2.2.1.3 Galgas extensiométricas.....	34
2.2.1.3.2 Medición del potencial generado por galgas extensiométricas	36
2.2.1.4 Selección de alternativas para el sistema de pesaje	39
2.2.1.4.1 Tabla de resultados.....	41
2.2.2 SISTEMAS DE CONTROL DE FLUJO	42
2.2.2.1 Válvulas para materiales a granel	42
2.2.2.1.1 Válvula iris de tela	42
2.2.2.1.2 Válvulas iris mecánica.....	44

2.2.2.2 Compuertas dosificadoras	44
2.2.2.3 Dosificador por pistón neumático.....	46
2.2.2.4 Selección de alternativas para el control de flujo	46
2.2.2.4.1 Tabla de resultados.....	48
2.3 SISTEMAS DE TRANSPORTE DE MOLIENDAS	49
2.3.1 TORNILLO SIN FIN	49
2.3.2 BANDA TRANSPORTADORA.....	50
2.3.2.2 Componentes de una banda transportadora.....	51
2.3.2.2.2 Cinta.....	52
2.3.2.2.3 Rodillos	52
2.3.2.2.4 Motor	53
2.3.2.2.5 Rodillos de tensión.....	54
2.3.3 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS	54
2.3.3.1 Selección del sistema de transporte para el nitrato de amonio	54
2.3.3.2 Selección del sistema de transporte para el aserrín	55
2.3.3.2.1 Tabla de resultados.....	57
CAPÍTULO 3.....	58
DISEÑO DEL SISTEMA	58
3.1 DELIMITACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA.....	58
3.2 DETERMINACIÓN DE VARIABLES DEL SISTEMA	59
3.3 DISEÑO MECÁNICO	60
3.3.1 SISTEMA DE ALMACENAMIENTO.....	60
3.3.1.1 Criterios de diseño	60

3.3.1.2 Normas referenciales	61
3.3.1.3 Cálculo de dimensiones	61
3.3.1.4 Análisis de cargas	63
3.3.1.5 Análisis de esfuerzos	68
3.3.2 SISTEMA DE DOSIFICACIÓN	69
3.3.2.1 Sistema de pesaje	69
3.3.2.2 Sistema de control de flujo.....	71
3.3.2.3 Molino para el nitrato de amonio NH_4NO_3	72
3.3.3 SISTEMAS DE TRANSPORTE	73
3.3.3.1 Tornillo sinfín.....	73
3.4 SELECCIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN	82
3.4.1 SENSORES	82
3.4.1.1 Celdas de carga.....	82
3.4.1.2 Interruptor óptico.....	83
3.4.1.3 Encoder rotatorio óptico	84
3.4.2 ACTUADORES	84
3.4.2.1 Compuertas dosificadoras tipo cuchilla.....	84
3.4.2.2 Motores AC con encoders.....	85
3.4.3 INTERFACES	86
3.4.4 CONTROL	87
3.4.5 DOCUMENTACIÓN P&ID.....	88
3.4.6 SIMULACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO-ELECTRÓNICO.....	88
3.5 DISEÑO DEL CONTROL.....	92
3.5.1 MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL SISTEMA.....	92

3.5.1.1 Diseño y elección del controlador	95
3.5.1.2 Simulación de los controladores	97
3.6 DISEÑO DE INTERFACE HOMBRE MAQUINA.....	99
3.6.1 SELECCIÓN DE ELEMENTOS A VISUALIZARSE	99
3.6.2 DISEÑO DE LA PANTALLA HMI	101
3.6.2.1 Modo automático	101
3.6.2.2 Modo manual y de configuración	102
3.6.2.3 Reportes e históricos	103
CAPÍTULO 4.....	105
MODELO A ESCALA.....	105
4.1 DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA Y ANÁLISIS.....	105
4.2 MONTAJE DEL SISTEMA MECÁNICO	105
4.2.1 DISEÑO DE LOS COMPONENTES DEL MODELO A ESCALA.....	105
4.2.1.1 Sistema de almacenamiento.....	105
4.2.1.1.1 Sistema de fluidificación.....	108
4.2.1.2 Sistema de Dosificación.....	111
4.2.1.2.1 Sistema de pesaje	111
4.2.1.2.2 Sistema de control de flujo.....	113
4.2.1.3 Adaptación del molino para el nitrato de amonio	116
4.2.1.4 Sistema de Transporte.....	118
4.2.1.4.1 Tornillo sinfín.....	118

4.2.2 CONSTRUCCIÓN DE COMPONENTES DEL MODELO A	
ESCALA.....	120
4.2.2.1 Sistema de almacenamiento.....	120
4.2.2.1.1 Silos y soportes.....	120
4.2.2.1.2 Sistema de Fluidificación	122
4.2.2.2 Sistema de dosificación	124
4.2.2.2.1 Sistema de pesaje	124
4.2.2.2.2 Sistema de control de flujo.....	124
4.2.2.2.3 Adaptación del molino para el nitrato de amonio.	129
4.2.2.3 Sistema de transporte.....	131
4.2.2.4 Uniones entre los sistemas.....	134
4.3 MONTAJE DEL SISTEMA ELÉCTRICO/ELECTRÓNICO Y DE	
CONTROL	136
4.3.1 VARIACIONES DEL DISEÑO CON RESPECTO AL	
SISTEMA REAL.....	137
4.3.2 CONEXIÓN Y CABLEADO DE ELEMENTOS.....	138
4.4 PRUEBAS.....	140
4.4.1 ESQUEMA Y METODOLOGÍA PARA LAS PRUEBAS.	141
CAPÍTULO 5.....	150
ANÁLISIS ECONÓMICO	150
5.1 PRESUPUESTO GENERAL.....	150
5.1.1 COSTO REAL DE IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA	151
5.1.2 COSTO DE FABRICACIÓN DEL MODELO A ESCALA.....	152

CAPÍTULO 6.....	154
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	154
6.1 CONCLUSIONES	154
6.2 RECOMENDACIONES.....	156
BIBLIOGRAFÍA.....	158

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Porcentajes de composición de dinamita.....	5
Tabla 1.2 Capacidad requerida para la tolva	6
Tabla 2.1 Propiedades físicas y químicas del aserrín.....	18
Tabla 2.2 Propiedades físicas y químicas del nitrato de amonio	19
Tabla 2.3 Selección de los tipos de material para silos	25
Tabla 2.4 Selección de los tipos de sección transversal para silos.....	25
Tabla 2.5 Selección del tipo de sistema de pesaje	41
Tabla 2.6 Selección del sistema de dosificación.....	48
Tabla 2.7 Selección del sistema de transporte para el aserrín	57
Tabla 3.1 Densidad y masa de los elementos a almacenarse	62
Tabla 3.2 Parámetros para el cálculo de presiones del nitrato de amonio.	65
Tabla 3.3 Presiones horizontales del nitrato de amonio	66
Tabla 3.4 Presiones verticales del nitrato amonio.....	66
Tabla 3.5 Parámetros para el cálculo de presiones del aserrín.	67
Tabla 3.6 Presiones horizontales del aserrín.....	67
Tabla 3.7 Presiones verticales del aserrín.....	67
Tabla 3.8 Propiedades físicas de Nitrato de Amonio y flujo deseado.....	74
Tabla 3.9 Resultados referentes a las propiedades físicas del nitrato de amonio	74
Tabla 3.10 Diámetro y velocidad angular del tornillo	78
Tabla 3.11 Motores seleccionados para las compuertas	85

Tabla 3.12 Motores para los sistemas de transporte	85
Tabla 3.13 Datos obtenidos para realizar la estimación del sistema	93
Tabla 4.1 Masa a almacenar de los modelos a escala	108
Tabla 4.2 Cálculo de la dimensión de los soportes para el silo.	121
Tabla 4.3 Motores seleccionados para las compuertas	137
Tabla 4.4 Motores para los sistemas de transporte	137
Tabla 4.5 Tabulación datos pruebas nitrato de amonio	142
Tabla 4.6 Tabulación datos pruebas aserrín.....	143
Tabla 4.7 Tabulación tiempo de dosificación, proceso y cantidad de polvo en el ambiente para 500 [g] de nitrato de amonio.	144
Tabla 4.8 Tabulación tiempo de dosificación, proceso y cantidad de polvo en el ambiente para 1000 [g] de nitrato de amonio.	144
Tabla 4.9 Tabulación tiempo de dosificación, proceso y cantidad de polvo en el ambiente para 1500 [g] de nitrato de amonio.	145
Tabla 4.10 Tabulación tiempo de dosificación, proceso y cantidad de polvo en el ambiente para 2000 [g] de nitrato de amonio.	145
Tabla 4.11 Tabulación tiempo de dosificación, proceso y cantidad de polvo en el ambiente para 250 [g] de aserrín.....	146
Tabla 4.12 Tabulación tiempo de dosificación, proceso y cantidad de polvo en el ambiente para 2000 [g] de aserrín.....	147
Tabla 4.13 Tabulación tiempo de dosificación, proceso y cantidad de polvo en el ambiente para 2000 [g] de nitrato de amonio.	147
Tabla 4.14 Tabulación tiempo de dosificación, proceso y cantidad de polvo en el ambiente para 2000 [g] de nitrato de amonio.	148

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Celda de carga de compresión.....	28
Figura 2.2 Celda de carga de tensión y compresión.....	29
Figura 2.3 Celda de carga con viga en forma de S.....	30
Figura 2.4 Celda de carga de flexión de viga.....	30
Figura 2.5 Celda de carga de un solo punto.....	31
Figura 2.6 Celda de carga tipo botella	32
Figura 2.7 Sensor de deformación de tres agujeros de AV Technology	33
Figura 2.8 Sensores fácilmente acoplados a los soportes de la estructura del silo.....	34
Figura 2.9 Cuarto de puente con galga pasiva	37
Figura 2.10 Medio puente de galgas extensimétricas.....	38
Figura 2.11 Puente completo de galgas extensiométricas.....	39
Figura 2.12 Válvula iris de tela.....	43
Figura 2.13 Válvula mecánica tipo iris	44
Figura 2.14 Compuerta cuadrada con actuador neumático - Vortex Roller Gate.....	45
Figura 2.15 Compuerta circular con actuador de motor eléctrico o volante manual - Maintenance Gate	45
Figura 2.16 Dosificador por pistón neumático.....	46
Figura 2.17 Tornillo de Arquímedes.....	49
Figura 2.18 Banda Transportadora.....	51

Figura 2.19 Componentes de una banda transportadora	51
Figura 2.20 Banda transportadora con rodillos	52
Figura 2.21 Vista de los rodillos de una banda transportadora.....	53
Figura 2.22 Esquema de los rodillos de tensión de una banda transportadora.....	54
Figura 3.1 Presiones en un silo.....	64
Figura 3.2 Kit de montaje ISOFLEX de la empresa SCAIME	70
Figura 3.3 Celda de carga tipo flexión de viga de 1500 kg.	71
Figura 3.4 Válvula tipo Orifice Gate de la serie Quantum	72
Figura 3.5 Molino de martillos.....	73
Figura 3.6 Carga en el tornillo sin fin	75
Figura 3.7 Celda de carga con capacidad para 10 kg.....	83
Figura 3.8 Interruptor óptico instalado dentro de la compuerta.....	84
Figura 3.9 Arduino MEGA 2560.....	86
Figura 3.10 Envío y recepción de datos entre Visual Basic y Arduino.	89
Figura 3.11 Programación en Visual Basic.....	89
Figura 3.12 Simulación del funcionamiento de las señales de control y potencia en el programa ISIS de Proteus.....	91
Figura 3.13 Señales de PWM y activación del control AC.....	92
Figura 3.14 Estimación de la planta del sistema utilizando la herramienta IDENT.....	94
Figura 3.15 Parámetros escogidos para la obtención de la planta.	94

Figura 3.16 Configuración del controlador elegido para la planta obtenida.....	95
Figura 3.17 Respuesta de la planta al escalón una vez implementado el controlador.....	96
Figura 3.18 Programación en VISUAL BASIC de la función de transferencia del controlador PID.....	97
Figura 3.19 Simulación de la respuesta del sistema a los controladores.....	98
Figura 3.20 Pirámide de Maslow.....	100
Figura 3.21 Pantalla para el modo automático.....	102
Figura 3.22 Pantalla para el control manual y configuración	103
Figura 3.23 Pantalla de reportes.....	104
Figura 4.1 Fluidificador de alto rendimiento de la empresa Montàurea.....	110
Figura 4.2 Símbolo de la válvula 2/2 NC utilizada.....	111
Figura 4.3 Acople entre los soportes y la celda de carga	112
Figura 4.4 Ensamble del soporte diseñado para el modelo a escala	112
Figura 4.5 Simulación celda de carga del modelo a escala.....	113
Figura 4.6 Rango del tornillo de potencia en la compuerta.....	114
Figura 4.7 Mecanismo de tornillo de potencia acoplado al motor.....	115
Figura 4.8 Caja para el mecanismo.	116
Figura 4.9 Molino para grano adaptado al modelo a escala.	118

Figura 4.10 Silos de acero inoxidable acoplado a los soportes por medio de soldadura.	122
Figura 4.11 Implementación del fluidificador en la pared de la tolva.	123
Figura 4.12 Instalación de la válvula STC 2P025	123
Figura 4.13 Base soporte ensamblada con celda de carga.	124
Figura 4.14 Componentes de la caja de la compuerta dosificadora.	125
Figura 4.15 Compuerta ensamblada uniones con pernos.	126
Figura 4.16 División intermedia unida por pernos al acople del motor.....	127
Figura 4.17 División intermedia con el alojamiento del rodamiento soldado.	127
Figura 4.18 Acople del motor fabricado en duralon.	128
Figura 4.19 Interior de la compuerta de dosificación.	129
Figura 4.20 Base para el molino soldada al sistema de transporte.....	130
Figura 4.21 Acople para la entrada del material al molino.	130
Figura 4.22 Molino de grano adaptado para el nitrato de amonio.....	131
Figura 4.23 Elementos del sistema de transporte.....	132
Figura 4.24 Motor DC acoplado al tornillo sin fin.	133
Figura 4.25 Unión del sistema de transporte a la base principal.....	134
Figura 4.26 Unión con rosca interna.	134
Figura 4.27 Unión del silo con la compuerta.....	135
Figura 4.28 Unión de la salida del molino a la entrada del sistema de transporte.....	136

Figura 4.29 Distribución de placas electrónicas dentro del tablero de control y potencia.....	138
Figura 4.30 Panel indicador con pantalla GLCD y botones para el encendido principal del sistema.....	139
Figura 4.31 Foto panorámica del conexionado interno en la base principal.	139
Figura 4.32 Conexionado neumático y eléctrico/electrónico.....	140

INDICE DE ANEXOS

ANEXO A: PLANOS MECÁNICOS

ANEXO B: DIAGRAMAS Y PLANOS ELÉCTRICOS

ANEXO C: TABLAS DEL CATÁLOGO DE MARTIN SPROCKET

ANEXO D: TABLA A1 DE LA NORMA INEN 476

RESUMEN

El presente proyecto se lo realizó en la empresa Explocen C.A., empresa ubicada en el poblado de Poaló, provincia de Cotopaxi desde el mes de Agosto del año 2012 hasta el mes de Agosto del presente. Dada la oportunidad política del crecimiento en el volumen de ventas al estar reformándose las leyes mineras, esta empresa dió apertura a los autores del presente proyecto para la investigación con objetivo de mejora en la línea de producción de dinamita.

La investigación de la línea, ayudó a identificar los puntos en la producción donde no se realizan de manera adecuada o se realizan de manera ineficiente los procesos y presentar una propuesta de mejora para estos problemas, además junto con la propuesta se construyó un modelo a escala que refleja las hipótesis de la propuesta. Finalmente señalar también las conclusiones obtenidas, recomendaciones y un presupuesto de la solución mostrada.

Tres problemas importantes fueron encontrados en el área de formulación de componentes inertes, contaminación del espacio de trabajo, tiempos de proceso innecesariamente elevados y desperdicio de material. Problemas que pueden ser mejorados con la inversión adecuada generando ganancia no solo económica para la empresa sino también para beneficio de los trabajadores.

Para solucionar estos problemas se planteó el diseño de tres etapas en el proceso: almacenamiento, dosificación y transporte de dos de los componentes inertes de la dinamita como son el Nitrato de Amonio y el Aserrín, hacia una tolva de mezclado para estos materiales. Junto con este diseño, se fabricó también las mismas tres etapas para un modelo a escala 1:200, escala aplicada a la masa a almacenar. De esta consideración se partió con el diseño geométrico del prototipo, para su posterior fabricación. Para poder realizar las pruebas, se diseñó adicionalmente un HMI para el control del proyecto con las opciones de modo Manual y Automático.

Finalmente, Los resultados de las pruebas mostraron que el proyecto cumple con los objetivos planteados y de realizarse en un futuro, la línea de producción de dinamita presentará una mejora importante para la empresa.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Explocen C.A. es una empresa ecuatoriana productora de explosivos y accesorios, constituida el 27 de abril de 1977, con el objetivo de fabricar, importar, exportar, almacenar, comercializar y distribuir explosivos industriales y accesorios de voladura, para cumplir la demanda del mercado: hidrocarburífero, minero, obras civiles, exploración sísmica, así como para atender las necesidades de seguridad nacional, Fuerzas Armadas y Policía Nacional.

Explocen C.A. fabrica varios productos en diferentes líneas de procesos. Entre ellas la línea de producción de dinamita en la cual se desarrolló este proyecto.

1.1.1 ESTUDIO DE LA LÍNEA DE ELABORACIÓN DE DINAMITA.

El proceso de elaboración en la línea de dinamita consta de cuatro etapas:

1.1.1.1 Formulación

El proceso de formulación se lo realiza en el edificio 104. Se trae las materias primas inertes: nitrato de amonio y aserrín, los mismos que son almacenados en lugares designados como podemos ver en el ANEXO F.

Para comenzar el proceso, se vierte el nitrato de amonio en un molino. A su vez el aserrín pasa a través de un detector de metales para remover cualquier impureza metálica que haya quedado como posible residuo.

Posteriormente se recolectan las materias primas en sacos para ser pesadas de acuerdo a las cantidades requeridas en los parámetros de formulación para el tipo de dinamita que se esté fabricando.

Acabado el proceso de pesaje se transporta los sacos con los materiales inertes hacia la siguiente habitación en la que se mezclarán los materiales inertes con la gelatina explosiva.

1.1.1.2 Mezclado

En la etapa de mezclado se combinan las materias primas inertes con la gelatina explosiva hecha de nitroglicerina también llamada master mix. El proceso se lo realiza en una mezcladora industrial durante 30 minutos a una velocidad moderada, definida por el tipo de dinamita a fabricar.

El cuarto en donde se encuentra la mezcladora tiene varias normas de seguridad para evitar accidentes, dado que es una zona de alto riesgo al estar trabajando con la gelatina explosiva. Una de las cuales es el no

permitir el ingreso al personal mientras el mezclado esté en proceso. Otra norma de seguridad es el uso de alarmas y avisos al comenzar y terminar el mezclado. También como norma de seguridad la maquina es encendida y apagada desde un cuarto de control cercano al cuarto donde se realiza el mezclado. Terminado el proceso de mezclado se procede a transportar el producto a la siguiente estación.

1.1.1.3 Encartuchado

El producto ya mezclado se vacía en la maquina encartuchadora. La cual se encarga de llenar los tubos de cartón fabricados previamente por otra máquina. La máquina utilizada tiene un sistema mecánico para llenar el tubo de cartón de manera uniforme.

Después de esto se sella el taco de dinamita, proceso que es realizado por operarios en la maquina selladora. Un batch terminado de dinamita es de 250 [kg] y en un turno de 8 horas se produce 2 [ton]. Con esto se fabrican, dependiendo del tamaño del taco previsto, los cartuchos de dinamita.

1.1.1.4 Empaquetado

Los cartuchos terminados y sellados son transportados a la estación de codificación y empaquetado. Estos pasan por una banda transportadora que tiene acoplada una impresora láser para codificación que identifica cada cartucho.

Después son empaquetados y embalados de manera manual en cajas para su distribución por operarios.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1 ESTADO ACTUAL DEL SISTEMA

Actualmente en la empresa el proceso de dosificación de materia prima es realizado de manera manual por operarios que pesan los componentes de forma individual y los depositan en una mezcladora.

La capacidad de producción de dinamita en un turno de 8 horas es de 2000 [kg], de acuerdo a los porcentajes de composición de la tabla 1.1 (Phokion, 1998) se tiene que la producción de materia inerte es de 700 [kg].

Durante el proceso manual el tiempo transcurrido en las etapas de pesaje, descargado del material y mezclado es de 1 hora. Por lo que la producción de dinamita es de 250 [kg/h].

Realizar el proceso de forma manual no tiene un tiempo de ciclo optimizado y la capacidad de producción puede ser mejorada, además genera bastante polvo dentro del lugar por lo que los operarios deben usar mascarillas de protección en todo momento y durante todo el turno de trabajo.

1.2.2 PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO

El proyecto consiste en la fabricación de un modelo a escala de un sistema automático de almacenamiento, dosificación y transporte de materia prima, dentro de la línea de producción de dinamita, en la primera etapa de formulación de componentes inertes. Como se especificó anteriormente las materias primas inertes son el Nitrato de Amonio NH_4NO_3 y el aserrín.

Dados los porcentajes de composición de la dinamita en la tabla 1.1 Se necesita que estos porcentajes se cumplan de manera precisa con una tolerancia de $\pm 0.05\%$.

Tabla 1.1 Porcentajes de composición de dinamita

Composición de la dinamita (ammonia dinamita)	
Elemento	Porcentaje %
Master mix	
Nitroglicerina	63
Algodón de colodión	2
Aserrín	5
Nitrato de amonio NH_4NO_3	30
Total	100

Fuente: Phokion, N. P. (1998). *Nitroglycerine and Nitroglycerine Explosives*. Baltimore: ANGRIF PRESS.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Dadas las características actuales del proceso, el cual es realizado de manera completamente manual, el diseño de un sistema automático de

alimentación ayudará a mejorar la precisión de dosificación de los materiales en los porcentajes requeridos para obtener un producto de mejor calidad.

Al automatizar el proceso con el sistema de alimentación automático se puede tener una mejora de producción de 125 [kg/h] teóricamente, pero teniendo consideraciones de eficiencia del sistema automatizado, se plantea una mejora de 100 [kg/h], es decir del 40% de la producción actual.

Por lo tanto la producción esperada después de la implementación del sistema es de 350 [kg/h]. Lo que en un turno de 8 horas da 2800 [kg] de dinamita. Aplicando los porcentajes de composición de la dinamita de la Tabla 1.1, tenemos la capacidad de tolva requerida para cada material en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2 Capacidad requerida para la tolva

Producción en un turno de 8 horas 980 kg de materiales inertes			
Elemento	Porcentaje [%]	Masa [kg]	Capacidad de silo requerida para tres turnos de 8 horas [kg] ¹
Nitrato de amonio	85	833	2800
Aserrín	15	147	500

Fuente: Elaboración propia

El sistema planteado tiene como beneficio la reducción de los tiempos de ciclo al evitar los tiempos muertos generados por la producción manual,

¹ Se considera un factor del 10% de capacidad extra para que el silo no se vacíe completamente después de los tres turnos.

además que uno de los factores principales para la automatización de este proceso es la necesidad de aumentar la capacidad de producción.

Se podrá también minimizar la exposición de los operarios a este tipo de ambiente nocivo al tener el proceso monitorizado mediante una interfaz HMI que tiene el control y la visualización del sistema de manera remota y da flexibilidad al mismo.

Es importante la realización de pruebas a escala, debido a que éstas arrojan resultados apropiados para una toma de decisiones temprana, sin incurrir en gastos innecesarios, y aplicación rápida de correctivos de ser necesarios, es por eso que la construcción de un adecuado modelo a escala del sistema será parte fundamental del trabajo a realizarse.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Fabricar un modelo a escala de un sistema automático de almacenamiento, dosificación y transporte de componentes inertes para el proceso de elaboración de dinamita en la empresa EXPLOCEN C.A.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar el proceso actual de fabricación de dinamita dentro de la empresa.

- Diseñar un sistema automático de almacenamiento, dosificación y transporte de componentes inertes hacia la tolva mezcladora de la línea de producción de dinamita de la empresa.
- Fabricar un prototipo a escala para verificar el correcto funcionamiento de todo el sistema.
- Realizar pruebas del sistema y analizar los resultados de las mismas.

1.5 ALCANCE DEL PROYECTO

El desarrollo del sistema de almacenamiento, dosificación y transporte está planteado en las siguientes etapas:

- Diseño mecánico detallado del sistema de almacenamiento a escala real.
- Diseño y selección de los elementos de dosificación, acoplados al sistema de almacenamiento a escala real.
- Diseño y selección de los elementos de transporte a escala real.
- Diseño de los componentes eléctricos y electrónicos para la alimentación, control y comunicación del sistema a escala real.
- Desarrollo de la interfaz HMI con los controles e indicadores necesarios.

- Documentación técnica (planos, cálculos, catálogos, manuales, etc.) para la implementación del sistema de almacenamiento, dosificación y transporte que se va a diseñar.
- Construcción del modelo a escala, con el detalle de las consideraciones tomadas para la realización de éste, que se entregará en funcionamiento conjunto con la interfaz HMI.
- Pruebas y análisis de los resultados obtenidos.

1.6 METODOLOGÍA

La etapa investigativa del proyecto, se desarrolló utilizando el Método Científico; en cambio para el diseño y la construcción del sistema, se utilizará la “Metodología en Proyectos Mecatrónicos Industriales” de José Vargas, ambos se describen a continuación.

1.6.1 MÉTODO CIENTÍFICO DE INVESTIGACIÓN

Se considera método científico de investigación a una serie de pasos sistemáticos e instrumentos que nos llevan a un conocimiento científico. Estos pasos nos permiten llevar a cabo una investigación. Es concebido como una receta aplicada a cualquier problema, garantiza su solución, realmente no existe, pero tampoco puede negarse que la mayor parte de los investigadores, trabajan de acuerdo con ciertas reglas generales, que a

través de la experiencia han demostrado ser útiles, la descripción de esto es lo que se conoce como “método científico de investigación”.

El tipo específico de método que se usará, es el “Método de Inducción Científica”, en este método se estudian los caracteres y condiciones necesarios del objeto de investigación, relaciones de causalidad entre otros. Para ello se apoya en métodos empíricos como son la observación y la experimentación.

1.6.2 METODOLOGÍA EN PROYECTOS MECATRÓNICOS INDUSTRIALES

Este método consta de diferentes etapas para el diseño de un sistema o máquina Mecatrónica.

- El primer paso es realizar la modelación cinemática y dinámica del sistema a ser construido, en este caso del sistema de almacenamiento, dosificación y transporte de materiales inertes.
- Como segundo paso tenemos el diseño mecánico del modelo a escala, utilizando herramientas de CAD, CAM y CAE
- Tercer paso el diseño del sistema electrónico.
- Cuarto paso el diseño del sistema de control del sistema.
- Quinto paso es la simulación computacional del sistema, después de esto se debe considerar algún cambio en los pasos de diseño anteriores.

- Sexto paso es la implementación de los cambios analizados en el paso anterior al diseño existente.
- Séptimo paso es la Fabricación del modelo a escala del sistema.
- Octavo paso es el Ensamble y Pruebas de actuación del modelo a escala.
- Noveno paso es el Análisis de los resultados obtenidos en las pruebas realizadas y valoración de la actuación del modelo a escala del sistema.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE MATERIALES SÓLIDOS A GRANEL

Los materiales sólidos a granel, son aquellos materiales del tipo granular o pulverulento, que debido a sus propiedades físicas, pueden fluir libremente en presencia de gravedad. Existen infinidad de sólidos a granel que son utilizados en la mayoría de industrias, cumpliendo diferentes tipos de funciones; por ejemplo:

- **Materiales para la construcción:** Cemento, arena, arcillas entre otros.
- **Alimentos secos:** Trigo, maíz, centeno, leguminosas y harinas, alfalfa, cítricos, azúcar, semillas, alimento para animales, etc.
- **Graneles de mina:** Grava, hierro, sal, cobre, etc.
- **Materia prima:** Polímeros (pellets), materiales sintéticos en polvo, carbono en polvo, material químico emulsionante y muchos más como en nuestro caso aserrín y nitrato de amonio.

Las propiedades de estos materiales, fueron observadas y estudiadas desde hace miles de años por culturas como la griega y la egipcia.

Principalmente para el almacenamiento de cereales, base de su alimentación, y debido a su simplicidad y eficiencia, son muy utilizados hasta nuestros días, por lo que el sistema de almacenamiento que se escogió para llevar a cabo el presente proyecto fue el ensilaje.

El ensilaje no solo permite una capacidad de almacenamiento amplia, sino que la dosificación del material ensilado es de relativa simplicidad controlando la abertura de la boca del silo, esto se verá a detalle en la sección 2.2.

2.1.1 FACTORES PARA EL DISEÑO DE SILOS

2.1.1.1 Material del silo

Un factor importante en el diseño y fabricación es el material del silo, este dependerá principalmente de las propiedades físico-químicas del material, así como también del tiempo de uso, cantidad de material a ensilar, y otras propiedades como el clima y grado de seguridad necesario, finalmente el material del silo, también es un elemento importante en cuanto al presupuesto, no solo por el costo de la materia prima, sino también gastos de tratamiento, maquinado y mantenimiento.

2.1.1.1.1 Acero

Los silos de acero son muy utilizados para almacenar cantidades pequeñas de material, es decir diámetros menores a 6 [m] y capacidades inferiores a 500 [Ton] (Ravenet, 1977), debido a que se pueden montar en muy poco tiempo y son ideales para el almacenamiento a corto plazo de materiales a granel, además las reducidas cargas del fondo requieren trabajos de cimentación de menor envergadura. (Bühler AG, 2012).

Son generalmente fabricados con chapa galvanizada o de acero inoxidable por lo que el silo no se corroe fácilmente. Evitan el contacto con el aire y el agua del ambiente lo que presenta una gran ventaja si el producto a ensilarse, tiene la característica de ser oxidante químico.

La chapa metálica, puede ser ondulada o lisa dependiendo del tipo de material a ensilarse y de la capacidad de carga del silo, según las normas internacionales como el Eurocódigo 1, también ahí se explica si las juntas deben ser unidas por soldadura o pernos. El tiempo de fabricación de los silos de acero inoxidable es reducido con respecto a los silos de hormigón, debido a su fácil manufactura y precios asequibles.

2.1.1.1.2 Plástico

También existen los silos de plásticos, generalmente fabricados con polímeros aptos para contener productos de consumo humano como el PET.

Generalmente se los compra ya fabricados por distintos proveedores en el mercado y están prediseñados para productos como el maíz.

Al estar prefabricados, el diseño está limitado a las características del silo, se tiene una capacidad fija, es decir que se tiene que acomodar a las capacidades estándares del mercado.

Las ubicaciones de los orificios de llenado y vaciado también son fijas. Otro problema es que el silo está prefabricado para un tipo de material con ciertas propiedades como la densidad y si se lo quiere usar con otro material las cargas y esfuerzos que aparecen serán diferentes así como el flujo del material pudiendo ocasionar fallas estructurales.

Las ventajas son: su gran resistencia y su fácil mantenimiento, pero como desventajas está el hecho de que permite el paso del calor, por lo que si el material a almacenarse es propenso a los cambios frente a la subida de temperatura, presentará problemas el producto final.

2.1.1.1.3 Hormigón

Los silos de hormigón, se diseñan para una vida útil prolongada, generalmente para contener materiales que permanecerán sin actividad por períodos de tiempo de meses y hasta años como es el caso de los cereales. Su fabricación implica estructuras altas y voluminosas con capacidades del orden de los cientos de toneladas, con buena resistencia al viento y otros factores.

La desventaja, es que en el almacenamiento de pocas toneladas, implica un elevado costo de fabricación, debido a que requiere un más complejo diseño de obra civil, además que en el contacto de ciertas sustancias químicas puede generar diferentes tipos de reacciones, cambiando sus propiedades.

2.1.1.2 Geometría

Una clasificación muy usada es de acuerdo a la forma de la sección del silo por un plano horizontal, los más comunes son de planta rectangular o cuadrada, y los silos circulares. También se pueden encontrar aislados o conectados entre sí formando silos multicelulares.

El objetivo de diseñar el silo tomando en cuenta su geometría es maximizar la capacidad de almacenamiento del silo minimizando el costo de fabricación y dimensiones que ocupará el silo.

El diseño de la geometría del silo según las teorías establecidas incluye la selección del ángulo óptimo para la tolva y las dimensiones mínimas de la salida dependiendo del material.

2.1.1.3 Manufactura

Elegir la mejor opción de tipo de material y geometría del silo influirá en el costo de manufactura del mismo. Para la selección de la mejor alternativa

analizaremos el proceso de manufactura de un silo de planta rectangular en comparación con el de un silo de planta circular.

El proceso para la construcción de un silo de metal se lo realiza al unir varias capas de láminas de acero para formar la altura total, llamadas virolas, las cuales van disminuyendo en espesor a medida que se aumenta la altura.

En el caso de la planta rectangular o cuadrada, los procesos de manufactura son el doblado de la chapa metálica y la soldadura de la misma, generalmente la fabricación se realiza doblando dos planchas en forma de L y luego uniéndolas con dos cordones de soldadura en los extremos.

Mientras que el proceso de manufactura de un silo cilíndrico consiste en el moldeado de la lámina de acero utilizando una máquina roladora. Una vez hecho este proceso se une la lámina por soldadura, para formar el cuerpo cilíndrico.

Para obtener la altura deseada se unen varias virolas, previa preparación solapada de las láminas, que garantiza la penetración total, una rigidez estructural superior a cualquier otro silo y eliminando así la necesidad de rigidizadores en el cuerpo cilíndrico.

2.1.1.4 Materiales a ensilar

Para la selección del material de construcción del silo, se analizan las propiedades del elemento ensilado, debido a que éste, generalmente reacciona con las paredes del silo, oxidándolas y por lo tanto disminuyendo

el tiempo de vida útil del silo. También otro factor a tomar en cuenta es que el material ensilado puede reaccionar químicamente con el ambiente, especialmente con la humedad y ciertos gases atmosféricos, afectando de esta manera la composición del mismo y por lo tanto alterando la calidad del producto final.

Para poder definir el material de los dos silos a fabricarse, se analizan las principales propiedades físico-químicas de los elementos con los que se va a trabajar en el presente proyecto: Aserrín y Nitrato de Amonio.

2.1.1.4.1 Aserrín

Es el remanente del proceso de serrado de la madera, a pesar de ser un material de desperdicio es usado en la misma industria maderera con diferentes tipos de aglomerado, en la ganadería se lo usa como lecho de ciertos tipos de animales, es aprovechado en la alimentación de calderas de biomasa y también como componente de explosivos.

Las propiedades de esta sustancia son:

Tabla 2.1 Propiedades físicas y químicas del aserrín

Propiedad	Valor	Unidades
Densidad	280 – 360	kg/m ³
Calor específico	0.3 – 0.6	kcal/kg °C
Humedad	50 – 60	%
Índice de rotura	0.93 – 1.19	kpa m ² /g

Fuente: Casey, 1991. "Pulpa y Papel, Química y Tecnología Química", Editorial Limusa, Vol. I, México, D. F., pp. 34.

2.1.1.4.2 Nitrato de Amonio

Es una sal formada por iones de nitrato y de amonio. Su fórmula es NH_4NO_3 . Este compuesto no es inflamable, pero a altas temperaturas sufre descomposición térmica, se obtiene a través de la neutralización química entre el amoníaco y ácido nítrico: $\text{NH}_3 + \text{HNO}_3 \rightarrow \text{NH}_4\text{NO}_3$. El nitrato de amonio es incoloro e higroscópico, además es altamente soluble en agua. Entre sus aplicaciones es usado como fertilizante artificial y componente de productos explosivos como dinamitas.

Sus propiedades son:

Tabla 2.2 Propiedades físicas y químicas del nitrato de amonio

Propiedad	Valor	Unidades
Peso molecular	80	g/mol
Temperatura de fusión	169.6	°C
Densidad	1500 - 1720	kg/m ³
Temperatura de ebullición	210	°C
Temperatura de descomposición	210	°C
Solubilidad en agua	190	g/100 ml de agua (20°C)
Capacidad de retención de fuel oil	11	% mínimo
Materiales insolubles	0.2	% máximo
pH (10% solución a 20°C)	4.5 a 6	

Fuente: Rudolf, M., 1993, "Explosives", Cuarta edición, Alemania, pp., 10, 11, 12.

2.1.1.5 Tipos de cargas en silos

Las conclusiones obtenidas en ensayos por Marcel Reimbert indican que las presiones obtenidas por Janssen son inferiores a las reales. Por lo que podemos decir que:

- El coeficiente K , igual a la relación entre presiones horizontales y verticales, no es constante y varía con la altura del material ensilado y con la geometría de los silos.
- En un silo rectangular, la presión media no es la misma sobre las paredes largas que sobre las cortas.
- Dos silos con idéntico radio hidráulico, pero con distinta forma geométrica, tienen presiones diferentes sobre las paredes.
- El valor de la presión máxima sobre el fondo varía en función de la geometría de la celda y tienen como valor. (Ravenet, 1977)

$K * Q_{max}$

Siendo:

$K=1,00$ Para silo cilíndrico

$K=1,10$ Para silo hexagonal

$K=1,27$ Para silo cuadrado

$K=1,65$ Para silo triangular

2.1.2 MÉTODO PARA LA SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Se utilizó el método cualitativo por puntos. El cual consiste en asignar pesos o ponderaciones a los factores cualitativos que se analizan para la selección. El procedimiento para utilizar este método es el siguiente:

1. Elaborar una lista de factores relevantes.
2. Asignar un peso a cada factor para indicar su importancia relativa (los pesos deben sumar 1.00), y el peso asignado dependerá exclusivamente del criterio del investigador.
3. Asignar una escala común a cada factor (por ejemplo, de 0 a 10) y elegir cualquier mínimo.
4. Calificar a cada alternativa potencial de acuerdo con la escala designada y multiplicar la calificación por el peso.
5. Sumar la puntuación de cada alternativa y elegir el de máxima puntuación.

Para la selección de las alternativas se consideró que cada factor tiene su ponderación de acuerdo a la importancia en el diseño. La calificación para las alternativas está hecha del 1 al 5, teniendo mayor puntaje la alternativa que cumpla con las características de diseño óptimas para nuestro sistema. Para obtener la calificación real se multiplica la calificación por el peso del factor. Posteriormente se realiza la suma de las calificaciones reales para la selección de la mejor alternativa.

2.1.2.1 Selección del material de fabricación de los silos

Los factores que se tomaron en cuenta para la selección son:

Seguridad: Se consideró la resistencia a los cambios de temperatura como principal factor de seguridad, cabe recalcar que el ambiente en el que se implementará el sistema no es de carácter explosivo, ya que los materiales a ser ensilados son inertes, por lo que la generación de energía estática, no es un factor de seguridad crítico. La alternativa que tiene una mayor resistencia a cambios de temperatura, tiene una mayor calificación.

Costo de Manufactura: La calificación de este factor se realizó con un valor de 5 para la alternativa que tenga el menor costo de manufactura.

Capacidad: Se seleccionó como la mejor alternativa, la opción que se acerque más al diseño recomendado para la capacidad requerida en este proyecto.

Resistencia a la Corrosión: El que presente mejor resistencia a las condiciones ambientales llevará la calificación más alta, teniendo en cuenta las propiedades de los materiales a ensilar.

Mantenimiento: La mayor calificación se da a la alternativa que tenga mayor facilidad de mantenimiento.

2.1.2.2 Selección de la geometría de los silos

La segunda tabla se realizó con la finalidad de seleccionar la geometría del silo de acuerdo a la sección transversal de éste, es decir circular o rectangular. Para esto consideramos los factores descritos a continuación con los mismos parámetros de calificación de la tabla anterior.

Los factores que se tomaron en cuenta para la selección son:

Costo de manufactura: Igual que en la selección anterior este es el factor con mayor ponderación 40%. La calificación de este factor se realizó con un valor de cinco para la alternativa que tenga el menor costo de manufactura.

Resistencia mecánica: Este factor se refiere a las presiones generadas en el silo por el material ensilado, como se analizó previamente el silo de planta rectangular sufre de una presión mayor en el fondo debido a su geometría que el silo de planta circular. La calificación mayor se da a la opción en la que se generen valores de presiones menores por el material ensilado.

Mantenimiento: El mantenimiento de los dos tipos de silos es simple y no presenta ventajas el uno con el otro por lo que las dos alternativas tienen el mismo puntaje.

Aprovechamiento del espacio: Se refiere a la cantidad de material que se puede almacenar dados silos de una misma altura pero de diferente planta horizontal. La calificación mayor se da a la alternativa que tenga un mejor aprovechamiento de volumen. El mejor aprovechamiento de volumen se tiene en un silo de planta cuadrada.

2.1.2.3 TABLAS DE RESULTADOS

Tabla 2.3 Selección de los tipos de material para silos

Factores	Peso	Porcentaje	Calificación			Calificación real		
			Metal	Hormigón	Plástico	Metal	Hormigón	Plástico
Seguridad	25	25%	3	5	3	75	125	75
Costo de manufactura	25	25%	5	3	3	125	75	75
Capacidad	25	25%	5	1	3	125	25	75
Resistencia a la corrosión	15	15%	4	3	5	60	45	75
Mantenimiento	10	10%	3	2	5	30	20	50
Total		100%				415	290	350

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 2.4 Selección de los tipos de sección transversal para silos

Factores	Peso	Porcentaje	Calificación		Calificación real	
			Circular	Rectangular	Circular	Rectangular
Costo de manufactura	40	40%	5	4	200	160
Resistencia mecánica	30	30%	5	3	150	90
Mantenimiento	20	20%	5	5	100	100
Aprovechamiento del espacio	10	10%	3	5	30	50
Total		100%			480	400

Fuente: Elaboración Propia.

2.2 SISTEMAS DE DOSIFICACIÓN

Para la dosificación se tiene dos partes importantes que conforman el sistema dentro del proyecto, el sistema de pesaje y el sistema de control de flujo.

2.2.1 SISTEMAS DE PESAJE

Dentro de la aplicación específica de control del peso del material almacenado en un silo podemos definir dos clases de acuerdo al tipo de implementación. El sistema de pesaje del silo en la estructura y el sistema de pesaje por medio de un contenedor a la salida del silo.

Los sistemas de pesaje del silo en la estructura se realizan de dos maneras; con celdas de carga o mediante sensores de deformación de acople rápido. El primero es implementado ubicando las celdas de carga en la base de los soportes de la estructura que sostiene al contenedor. Este sistema tiene gran precisión y es aconsejado para silos de nueva construcción. El segundo, mediante sensores de deformación de acople rápido consiste en colocarlos directamente en los soportes sin realizar obra civil compleja para los silos que ya se encuentran instalados. La precisión de este sistema es menor que el anterior rondando el 3% del total de la capacidad del silo.

El sistema de pesaje por medio de un contenedor a la salida del silo, ocupa una bandeja o espacio determinado para el pesaje del material que sale del silo, es decir trabaja como una balanza.

La ventaja de utilizar el sistema de pesaje del silo en la estructura es que se tiene un mayor control del material que está ensilado al saber cuánto material se encuentra almacenado en tiempo real, pudiendo realizar a más de un control de la cantidad de material que es descargado, un control de nivel del contenedor. La desventaja es que este tipo de sistema se puede ver afectado por vibraciones de de operación del silo.

El sistema de pesaje por medio de un contenedor a la salida del silo puede llegar a tener una mejor precisión en la medida. La desventaja es que se tiene una capacidad de medida restringida al espacio o contenedor en el cual se deposita el material.

2.2.1.1 Celdas de carga

Una celda de carga es un transductor que es utilizado para convertir una fuerza en una señal eléctrica. Esta conversión es indirecta y se realiza en dos etapas. Mediante un dispositivo mecánico, la fuerza que se desea medir deforma una galga extensiométrica. La galga extensiométrica convierte el (desplazamiento) o deformación en señales eléctricas. Una celda de carga por lo general se compone de cuatro galga extensiométricas conectadas en una configuración tipo puente de Wheatstone. Sin embargo es posible adquirir celdas de carga con solo uno o dos galga extensiométricas. La señal

eléctrica de salida es típicamente del orden de unos pocos milivoltios y debe ser amplificada mediante un amplificador de instrumentación antes de que pueda ser utilizada. La salida del transductor se conecta en un algoritmo para calcular la fuerza aplicada al transductor.

2.2.1.1.1 Celdas de carga de compresión

Como lo dice su nombre, son celdas de carga que miden según su compresión con una excelente estabilidad a largo plazo. En su mayoría, son construidas en acero inoxidable para asegurar la fiabilidad en entornos industriales. Están diseñadas para operar montadas a una superficie plana, y tienen un botón de carga mecanizado como parte integrante de la celda de carga básica. La carga máxima soportada está en el rango de: 11 Kg a 23000 Kg. (Omega, 2012)



Figura 2.1 Celda de carga de compresión.

Fuente: OMEGA Engineering inc. Productos. Recuperado de:
<http://www.omega.com/prodinfo/LoadCells.html>. Inglés. 2013.

2.2.1.1.2 Celdas de carga de tensión y compresión

Estas celdas permiten medir tanto la tensión como la compresión de las cargas. Están hechas de acero inoxidable, son de tamaño pequeño y son capaces de ofrecer lecturas de alta precisión. En la Figura 3 se observa el tamaño de una de estas celdas comparada con una moneda, y también una rosca macho que poseen para adjuntarse a la carga. La carga máxima soportada está en el rango de: 1 Kg y 450 Kg. (Omega, 2012)



Figura 2.2 Celda de carga de tensión y compresión.

Fuente: OMEGA Engineering inc. Productos. Recuperado de: <http://www.omega.com/prodinfo/LoadCells.html>. Inglés. 2013.

2.2.1.1.3 Celdas de carga con viga en forma de S

Estas celdas obtienen su nombre de su forma de S. Pueden proporcionar una salida de acuerdo con la tensión o la compresión y ofrecen rechazo de carga lateral superior. Las capacidades máximas de carga van desde los 11 Kg a los 18200 Kg. (Omega, 2012)



Figura 2.3 Celda de carga con viga en forma de S.

Fuente: OMEGA Engineering inc. Productos. Recuperado de: <http://www.omega.com/prodinfo/LoadCells.html>. Inglés. 2013.

2.2.1.1.4 Celdas de carga de flexión de viga

Son utilizadas en múltiples aplicaciones de celdas de carga, tanques de pesaje y control de procesos industriales. Tiene 2 puntos para la fijación a la carga y mide la flexión a la que se somete en el otro extremo. Estas celdas tienen un amplio margen de medida máximo, el cual va desde los 45 Kg a 45500 Kg. (Omega, 2012)



Figura 2.4 Celda de carga de flexión de viga.

Fuente: OMEGA Engineering inc. Productos. Recuperado de: <http://www.omega.com/prodinfo/LoadCells.html>. Inglés. 2013.

2.2.1.1.5 Celdas de carga de un solo punto

Este tipo de celdas se usan en sistemas de pesaje comerciales e industriales. Proporcionan lecturas precisas, independientemente de la posición de la carga en la plataforma. Esta última característica las hace un poco más costosas que las anteriores. La carga máxima de estas celdas se encuentra entre 2.3 Kg hasta 230000 Kg. (Omega, 2012)

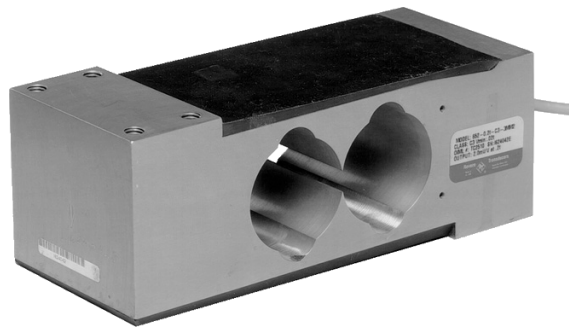


Figura 2.5 Celda de carga de un solo punto.

Fuente: Intertechnology Inc. Productos. Recuperado de: http://www.process-controls.com/intertechnology/Revere_Transducers/Revere_Model_652.html. Inglés. 2013.

2.2.1.1.6 Celdas de carga tipo botella o Canister

Este tipo de celda de carga es usada para cargas de alto porte o balanzas para camiones, trabajan a compresión y son bastante precisas, su carga máxima puede alcanzar las 40 toneladas.



Figura 2.6 Celda de carga tipo botella

Fuente: BALANZAS.US. Productos. Recuperado de: <http://www.balanzas.us/ANYLOAD-106CS-CS20-CELDAS-DE-CARGA-TIPO-BOTELLA-ACERO-INOXIDABLE-25-to-200K-lb-p-1517.html>. Inglés. 2013

Todas las celdas de carga mostradas anteriormente funcionan con voltajes de alimentación continuos de entre 5 [Vdc] y 15 [Vdc], y proporcionan a la salida unos pocos milivoltios (alrededor de 3 [mV]). (Omega, 2012)

2.2.1.2 Sensores de deformación de acople rápido

Este tipo de sensores están diseñados para ser acoplados directamente a la estructura del silo, pudiendo así medir los esfuerzos de tensión, compresión y flexión para posteriormente convertirlos en señales eléctricas.

Estos sensores consisten de un elemento con galgas extensiométricas encapsulado en un compuesto a prueba de agua. Es de fácil instalación por medio de pernos directamente a los soportes de la estructura por lo que al cambiar las condiciones de peso dentro del silo, proporciona una salida eléctrica proporcional a la carga aplicada.



Figura 2.7 Sensor de deformación de tres agujeros de AV Technology

Fuente: AV Technology Ltd. [Hoja Técnica]. Recuperado de: <http://www.silo-weigh.com/userfiles/pdfs/easy-weigh%20kit%20brochure%20v1.pdf>. Inglés. 2013.

Estos sistemas de acople rápido son adecuados para soluciones de pesaje de contenedores en las que la precisión del orden del 2% - 4% es aceptable. Una de las ventajas de este sistema para empresas que necesitan pesar o controlar la cantidad de material en un contenedor, es que a diferencia de sistemas ultrasónicos o por radar los sensores de deformación no entran en contacto con el producto.

Los sensores de deformación de acople rápido funcionan mejor cuando el esfuerzo generado por la carga están entre 3000 [psi] y 10000 [psi], es decir que tiene mayor precisión para contenedores o silos de gran tamaño ya que hay mayor esfuerzo para ser medido.



Figura 2.8 Sensores fácilmente acoplados a los soportes de la estructura del silo.

Fuente: Automation.com. Productos. Recuperado de:
<http://www.automation.com/content/applied-measurements-bolt-on-force-sensors-for-reliable-retrofit-weighing>. Inglés 2013.

2.2.1.3 Galgas extensiométricas

Una galga extensiométrica es básicamente un alambre resistivo adherido de manera firme en el cuerpo de un objeto metálico resistente que es quien recibe la fuerza. Este objeto resistente se deforma ligeramente provocando que el alambre altere su forma física de modo que se estire (aumenta su longitud) o que se encoja (disminuye su longitud) según el sentido de dicha deformación.

Las galgas están construidas a partir de alambres de pequeños diámetros con el objeto de que puedan aumentar o disminuir su longitud a través de las pequeñas fuerzas que actúan sobre ella. El material del alambre puede ser de aleaciones resistivas como por ejemplo el constantán

(aleación de Cobre y Níquel en un 60% y 40%, respectivamente) o de materiales semiconductores.

La resistencia eléctrica de la galga cambia a medida que se deforma de acuerdo a la propiedad física de la resistividad:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

O bien:

$$\frac{\Delta R}{R} = FE \times \frac{\Delta l}{l} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Donde:

R = Resistencia (Ω)

P = Constante de resistividad según el material ($\Omega \cdot m$)

L = Longitud (m)

A = Área de sección (m^2)

FE = Factor extensiométrico o Factor "Gauge"

Cuando la galga se deforma, varía la longitud y el área de su sección, con lo cual la resistencia también varía. Si se comprime, aumenta el diámetro, disminuye la longitud y la resistencia disminuye; si se somete a tensión, el diámetro disminuye, la longitud aumenta y la resistencia también aumenta.

La tensión o compresión del alambre representa la fuerza aplicada, lo que a su vez, puede convertirse a una señal eléctrica si medimos la variación de la resistencia de la galga.

Los tipos de galgas extensiométricas más usadas en celdas de carga son:

- Elementos elásticos.
- Galgas extensiométricas de resistencia eléctrica.
- Galgas extensiométricas de hoja.
- Galgas extensiométricas semiconductoras de capa delgada.
- Galgas extensiométricas de cable. (UDLAP, 2012)

2.2.1.3.2 Medición del potencial generado por galgas extensiométricas

Al deformarse una galga extensiométrica, se origina una variación de resistencia en sus terminales que puede ser medido con el circuito adecuado en forma de voltaje, pero se debe considerar que la temperatura hace que se generen deformaciones adicionales que afectan la medición, para esto, la solución más simple es colocar galgas adjuntas en espacios en la misma condición térmica, cuyo trabajo únicamente es compensar el error producido por la temperatura, éstas galgas no sufren deformación mecánica, por esta razón se las conoce como galgas pasivas, también se puede colocar galgas que se deforman pero al mismo corrigen el error de temperatura, es decir galgas activas, que por lo general se colocan a carga inversa es decir una galga a tracción y para compensar otra a compresión.

Existen varios tipos de configuraciones para poder leer la diferencia de potencial generado por un circuito con galgas extensiométricas, los más usados se describen a continuación:

Cuarto de Puente con Galga Pasiva

Este circuito utiliza una sola galga activa y nos proporciona un voltaje igual a 0 [V], cuando el sistema no está deformado, es decir no tiene Offset esto es una característica positiva debido a que facilita la amplificación de la señal, pero la sensibilidad no es constante, lo que significa que la función de salida, no será lineal. Otro aspecto negativo es que la función de salida dependerá de la temperatura, por lo que es recomendable usar una galga pasiva como se muestra en la figura a continuación.

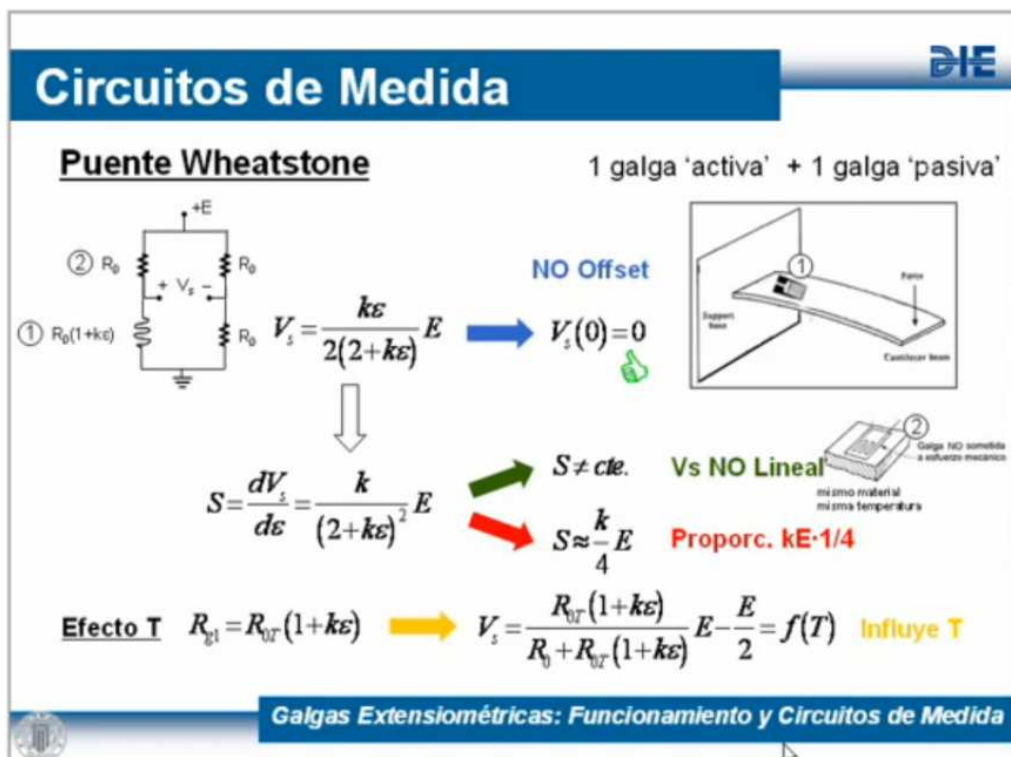


Figura 2.9 Cuarto de puente con galga pasiva

Fuente: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA. Fco. Javier García Casado. Galgas Extensiométricas: Funcionamiento y Circuitos de Medida. [Presentación]. Recuperado de: <http://www.youtube.com/watch?v=duD06ex8CpA>. 2011.

Medio Puento de Galgas Extensiométricas

Utiliza dos galgas activas, una a tracción y otra a compresión, este circuito, tiene una sensibilidad mayor que el cuarto de puente, además de ser constante, generando una salida lineal y al usar galgas a cargas opuestas, corrige automáticamente la influencia de la temperatura, por lo que es una configuración muy usada y con muchos aspectos ventajosos.

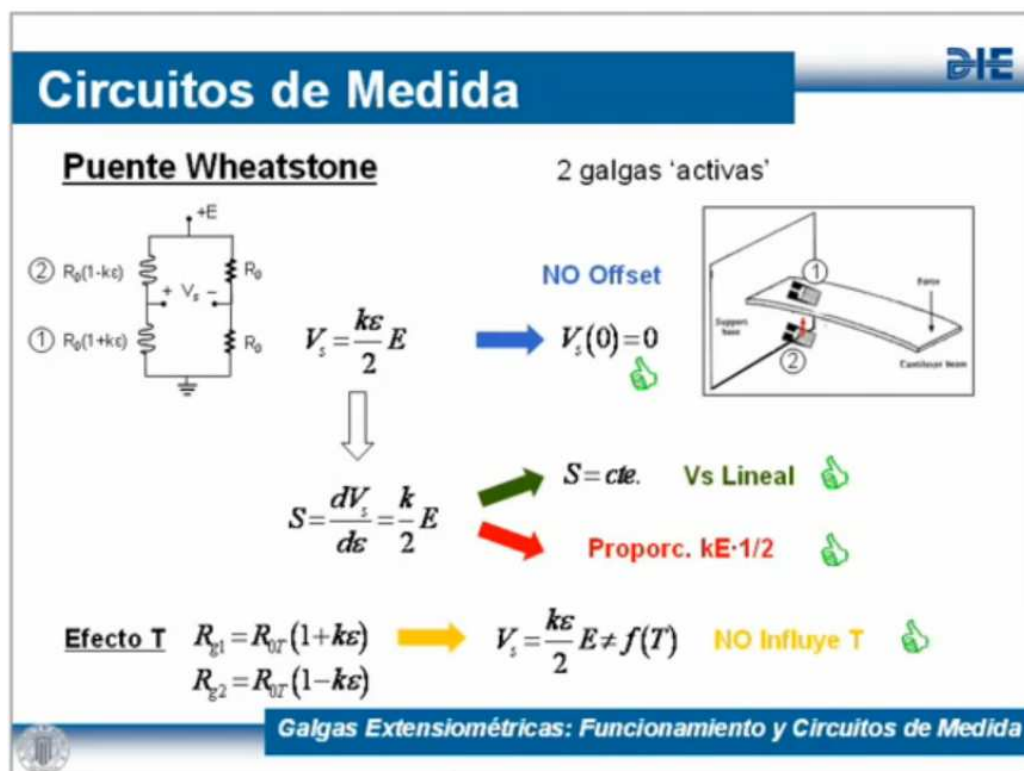


Figura 2.10 Medio puente de galgas extensiométricas

Fuente: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA. Fco. Javier García Casado. Galgas Extensiométricas: Funcionamiento y Circuitos de Medida. [Presentación]. Recuperado de: <http://www.youtube.com/watch?v=duD06ex8CpA>. 2011.

Puente Completo de Galgas Extensiométricas

Es la solución más adecuada de medición de galgas debido a que tiene todas las ventajas del medio puente pero al tener el doble de galgas activas,

también es doblemente sensible, utiliza dos galgas a tracción y dos a compresión, la única desventaja que tiene con respecto al medio puente es que este circuito es de mayor costo.

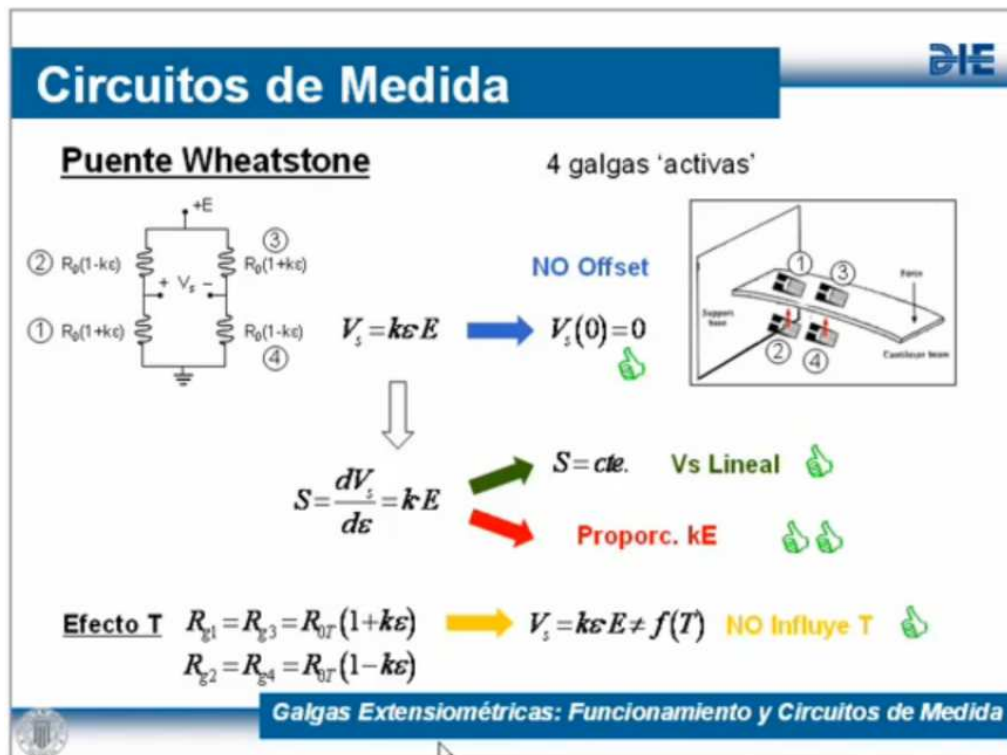


Figura 2.11 Puente completo de galgas extensiométricas

Fuente: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA. Fco. Javier García Casado. Galgas Extensiométricas: Funcionamiento y Circuitos de Medida. [Presentación]. Recuperado de: <http://www.youtube.com/watch?v=duD06ex8CpA>. 2011.

2.2.1.4 Selección de alternativas para el sistema de pesaje

Se realizó la comparación de las alternativas de implementación para el sistema de pesaje las cuales son: Contenedor a la salida del silo, sensores de deformación de acople rápido y celdas de carga.

Los factores que se tomaron en cuenta para la selección son:

Precisión de la medida: Tiene una ponderación del 25% debido a las especificaciones de diseño que necesitamos cumplir, la calificación más alta se da a la alternativa con mayor precisión en la medida.

Costo de implementación: Este factor también tiene una ponderación del 25%, la alternativa que tenga un costo de implementación menor tiene la calificación de 5 puntos.

Capacidad de pesaje: Se tomo en cuenta este factor ya que una de las alternativas tiene la capacidad de pesaje limitada. Además con las otras alternativas se tiene un control de peso total del material ensilado. Se da mejor calificación a la alternativa que se acerque más a las consideraciones de diseño.

Aislamiento a vibraciones: Los sistemas de pesaje se verán afectados por las vibraciones que se generen el silo y/o la estructura del mismo, dependiendo de su implementación. La alternativa que se vea menos afectada por las vibraciones tiene la mejor calificación.

Mantenimiento: La facilidad de realizar el mantenimiento es la característica que tiene la alternativa con mayor puntaje.

2.2.1.4.1 Tabla de resultados

Tabla 2.5 Selección del tipo de sistema de pesaje

Factores	Peso	Porcentaje	Calificación			Calificación real		
			Contenedor a la salida del silo	Sensores de deformación de acople rápido	Celdas de carga	Contenedor a la salida del silo	Sensores de deformación de acople rápido	Celdas de carga
Precisión en la medida	25	25%	5	2	4	125	50	100
Costo de implementación	25	25%	3	3	5	75	75	125
Capacidad de pesaje	20	20%	1	5	5	20	100	100
Aislamiento a vibraciones	15	15%	5	3	3	75	45	45
Mantenimiento	15	15%	3	5	5	45	75	75
Total		100%				340	345	445

Fuente: Elaboración propia

2.2.2 SISTEMAS DE CONTROL DE FLUJO

Para cerrar el lazo de control, en el silo, se necesita manejar adecuadamente la cantidad de materia que sale del mismo; existen dos alternativas sencillas muy usadas en la industria con este fin, las válvulas para materiales a granel y compuertas.

2.2.2.1 Válvulas para materiales a granel

El diseño más usado, es el diseño tipo iris, que lleva este nombre por su parecido al iris del ojo humano. Consiste en un mecanismo o dispositivo que se abre y se cierra en el centro del mismo siguiendo una forma espiral. Existen dos tipos de válvula iris, las mecánicas y las fabricadas con telas.

2.2.2.1.1 Válvula iris de tela

Es una válvula fiable para el control del caudal por gravedad de materiales secos en caída libre desde recipientes, bolsas a granel, canales y tolvas. (Vortex, 2012) Estas válvulas, se fabrican con una sección de tela cilíndrica en forma de manga, que al girarse se ajusta y cierra, ofrece sellado contra el polvo y una barrera para el producto, de modo que no hay fugas de material hacia la atmósfera ni entra en contacto con las piezas de accionamiento de la válvula. Se trata de una válvula excelente para manejar productos delicados o "desmenuzables".



Figura 2.12 Válvula iris de tela

Fuente: Tecbelt Industrial Ltda. VALVULA IRIS MOTORIZADA TECBELT. [Presentación].
Recuperado de: <http://www.youtube.com/watch?v=eLLtjocv1U0>. 2009.

2.2.2.1.2 Válvulas iris mecánica

Este tipo de válvula está compuesta por piezas mecánicas, que se cierran y se abren como el obturador de una cámara fotográfica, existen varios diseños, de válvula iris mecánica, uno de ellos se puede apreciar en la figura 2.14; este tipo de válvula, requiere un mayor mantenimiento que las válvulas de tela debido a su mecanismo, pero tiene mayor rango de apertura.



Figura 2.13 Válvula mecánica tipo iris

Fuente: Egger Iris®. Diaphragm Control Valve (English) - www.eggerpumps.com. [Presentación]. Recuperado de: <http://www.youtube.com/watch?v=3w7SSUFHjWE>. Inglés. 2011.

2.2.2.2 Compuertas dosificadoras

Trabajan por principio de gravedad, al abrir la compuerta el material almacenado sale del silo. Al tener una regulación de la apertura de la compuerta permiten una dosificación exacta del material almacenado. Existen dos opciones para el actuador. La una por medio de cilindro neumático y la otra por medio de un motor eléctrico o volante manual.

Pueden adaptarse a formas rectangulares o circulares dependiendo de la salida del silo.



**Figura 2.14 Compuerta cuadrada con actuador neumático - Vortex
Roller Gate**

Fuente: Salina Vortex Corporation. [Hoja Técnica].
http://www.vortexvalvesamericas.com/pdf/LA_Roller%20Gate_product%20page.pdf. Inglés.
2013



**Figura 2.15 Compuerta circular con actuador de motor eléctrico o
volante manual - Maintenance Gate**

Fuente: Salina Vortex Corporation. [Hoja Técnica].
http://www.vortexvalvesamericas.com/pdf/LA_Maintenance%20Gate_product%20page.pdf.
Inglés. 2013.

2.2.2.3 Dosificador por pistón neumático

Es utilizado para trabajar con productos líquidos, semilíquidos, cremas, mermeladas, grasas, etc. El sistema está compuesto por un pistón de cámara regulable en su capacidad, que son impulsadas por movimiento de un cilindro neumático, una válvula y una boquilla. Cada ciclo de llenado consiste en un cilindro de carga, en la carrera de alimentación el producto es succionado desde una tolva superior, en la carrera de descarga el producto se entrega al contenedor. Se fabrican en acero inoxidable o con recubrimiento acabados de plásticos y epóxicos. (Tecnoembalaje Ltda, 2009)

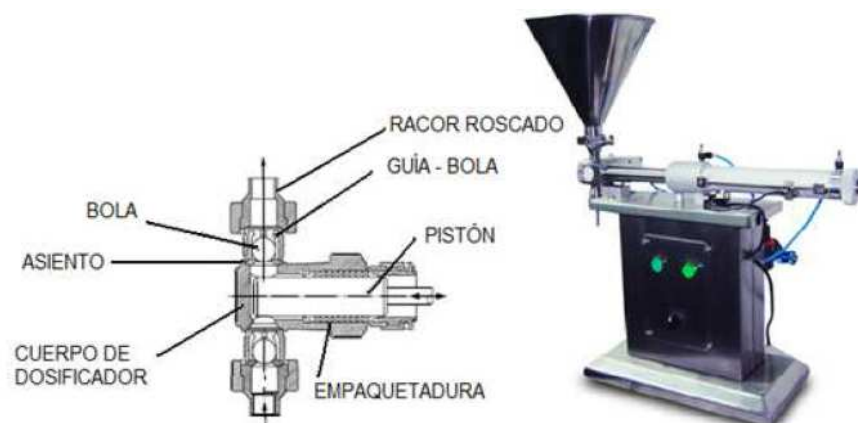


Figura 2.16 Dosificador por pistón neumático

Fuente: ORTEGA, CARRILLO; "Diseño y construcción de una máquina dosificadora de masa para la elaboración de humitas para la empresa – Del Valle Lojano"; Quito; 2011

2.2.2.4 Selección de alternativas para el control de flujo

Para la selección del material se consideró, que cada factor tiene su ponderación de acuerdo a la importancia en el diseño. La calificación para las alternativas está hecha del 1 al 5, teniendo mayor puntaje la alternativa

que cumpla con las características de diseño óptimas para nuestro sistema. Para obtener la calificación real se multiplica la calificación por el peso del factor. Posteriormente se realiza la suma de las calificaciones reales para la selección de la mejor alternativa.

Los factores que se tomaron en cuenta para la selección son:

Costo de manufactura: Se consideró esta característica como la más significativa en la selección, con una ponderación del 50 %, teniendo una calificación de 5 puntos la alternativa de menor precio.

Facilidad de control: Se analizó la facilidad de implementación del control, dependiendo del tipo de motor que se necesita para regular la apertura y cierre de la válvula. El motor de la compuerta es un motor DC, mientras que en las válvulas iris se usan servomotores, dándole un mayor puntaje a la alternativa de mayor facilidad.

Mantenimiento: Para el mantenimiento se tomo en cuenta la cantidad de pizas mecánicas de la alternativa. La calificación mayor, se dio a la opción con mayor facilidad para realizar el mantenimiento.

2.2.2.4.1 Tabla de resultados

Tabla 2.6 Selección del sistema de dosificación

Factores	Peso	Porcentaje	Calificación			Calificación real		
			Compuerta	V. Iris de tela	V. Iris mecánica	Compuerta	V. Iris de tela	V. Iris mecánica
Costo de manufactura	50	50%	5	4	3	250	200	150
Facilidad de control	30	30%	5	4	4	150	120	120
Mantenimiento	20	20%	4	5	3	80	100	60
Total		100%				480	420	330

Fuente: Elaboración propia

2.3 SISTEMAS DE TRANSPORTE DE MOLIENDAS

2.3.1 TORNILLO SIN FIN

El tornillo de Arquímedes, al que también se lo conoce como tornillo sin fin, debido a su circuito infinito, es una máquina gravimétrica helicoidal utilizada para elevación de agua, harina, cereal o material excavado. Fue inventado en el siglo III a. C. por Arquímedes, del que recibe su nombre.

Se basa en un tornillo que se hace girar dentro de un cilindro hueco, situado sobre un plano inclinado, y que permite elevar el cuerpo o fluido situado por debajo del eje de giro. (Wikipedia, 2012)



Figura 2.17 Tornillo de Arquímedes

Fuente: UNED. Dra. Ana María Vázquez Hoys. ARQUÍMEDES. [Artículo]. Recuperado de: http://www.ucm.es/info/diciex/proyectos/pie_2002-42/img/ct.edu.0034.jpg. 2005.

Empresas que se dedican al transporte de materiales a granel, tienen gran variedad de mecanismos de este tipo y se los puede encontrar en catálogos dependiendo de la velocidad, capacidad, longitud, etc.

Es muy usado en el manejo de materiales a granel en la industria, debido a que el material transportado evita el contacto con sustancias que están en el ambiente como la humedad, además que se reduce la cantidad de material que se disemina en el lugar de trabajo creando un lugar menos pulverulento, en nuestro caso, el nitrato de amonio es higroscópico y se apelmaza fácilmente, por lo que el mecanismo de tornillo sin fin es ideal para este compuesto.

2.3.2 BANDA TRANSPORTADORA

Los primeros materiales que se transportaron por banda fueron los cereales y las harinas, el otro producto más transportado fue el carbón.

Son muy utilizadas en los procesos industriales ya que ofrecen grandes beneficios. Permiten el transporte de materiales a largas distancia, son muy fáciles de adaptar a varios tipos de terreno, tienen una gran capacidad de transporte y la posibilidad de transportar distintos materiales (minerales, vegetales, combustibles, fertilizantes, materiales empleados en la construcción, etc.). (Santillán, 2008)

Las bandas transportadoras generalmente son operadas de forma horizontal, aunque se puede realizar la instalación con un cierto grado de inclinación, limitado por ángulos de 15 a 20 grados. El límite del ángulo de inclinación se define para evitar el movimiento del material durante el transporte. Si se requieren cambios de pendiente de mayor magnitud, el

diseño debe incluir laterales corrugados que eviten la pérdida de material o bultos. (Universidad Nacional del Sur "Bahía Blanca", 2012)



Figura 2.18 Banda Transportadora

Fuente: Leiza SL. Productos. Recuperado de: <http://www.leizasl.com/Transportadores-bandas.html>. 2003.

2.3.2.2 Componentes de una banda transportadora

La figura 2.19 muestra varios componentes de una banda transportadora se detalla a continuación los más importantes.

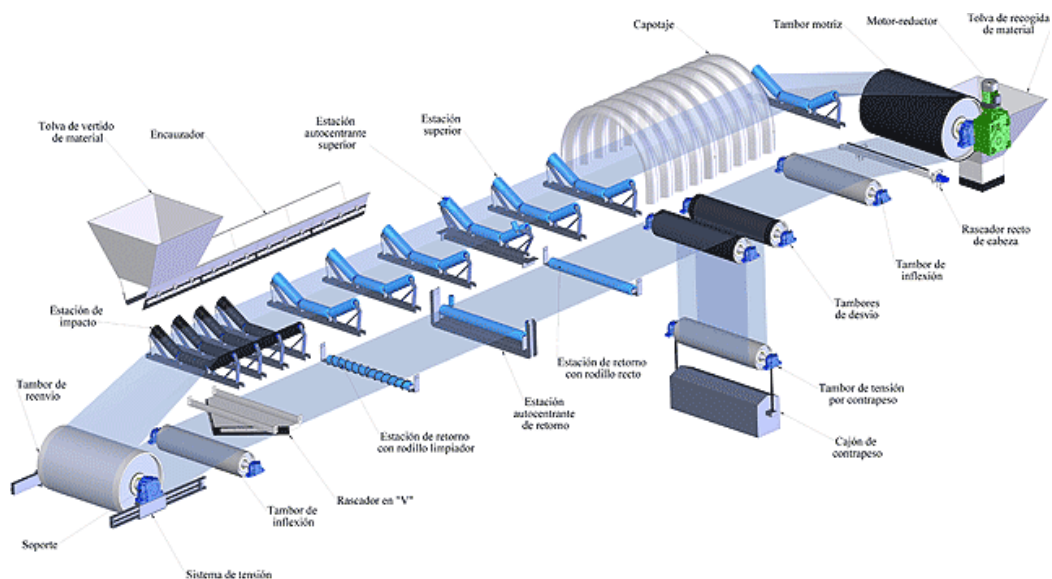


Figura 2.19 Componentes de una banda transportadora

Fuente: ROTRANS S. A. Productos. Recuperado de: <http://rotranssa.com/cintas-transportadoras>. 2013.

2.3.2.2.2 Cinta

La función principal de la cinta es soportar directamente el material a transportar y desplazarlo desde el punto de carga al de descarga, por lo que es el componente principal de las bandas transportadoras, también generalmente es el componente de mayor precio. Pueden ser de goma o de tela, también existen transportadoras que no poseen cintas sino directamente rodillos o canaletas de transporte



Figura 2.20 Banda transportadora con rodillos

Fuente: OMT BIELLA S.R.L. Productos. Recuperado de:
http://www.abatech.it/trrf_transportador_rodillos_locos.html. 2013.

2.3.2.2.3 Rodillos

Son los que conforman la canaleta de transporte. Entre sus funciones están, soportar la banda a lo largo de la línea para evitar que se deforme y entre en contacto con la base de la estructura de transporte, ayudar a mantener centrada la banda, esto se logra a la correcta disposición de los rodillos, tanto portantes como de retorno, y en ciertos casos cuando el

material es pegajoso se emplean rodillos autolimpiadores para evitar que el contacto con los residuos desvíen la banda.

Su calidad es muy importante para el buen funcionamiento de la banda, ya que puede existir problemas al no tener un giro adecuado de los mismos, lo que aumenta la fricción y el consumo de energía. También si ocurren estos problemas la banda tendrá un desgaste y reducción de su vida útil.

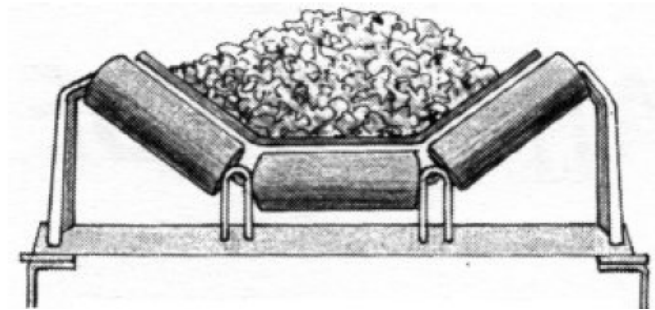


Figura 2.21 Vista de los rodillos de una banda transportadora

Fuente: Cinética [Artículo] Recuperado de:
<http://www.criba.edu.ar/cinetica/solidos/Capitulo12.pdf>

2.3.2.2.4 Motor

Generalmente se lo utiliza en acople con un reductor de velocidad. Es el encargado de generar la fuerza para mover la banda con el material a transportar. Este mueve a un rodillo en particular llamado tambor motriz, que está ubicado en la parte final de la banda es decir en la zona de descarga. El número de motores utilizados depende de la longitud de la banda.

2.3.2.2.5 Rodillos de tensión

Son utilizados para mantener la tensión de la banda, es decir para que la cinta se mantenga estirada. Una función fundamental que cumplen estos rodillos de tensión es asegurar el contacto adecuado entre el la cinta y el tambor motriz, para mantener la potencia y no perder tracción del motor.

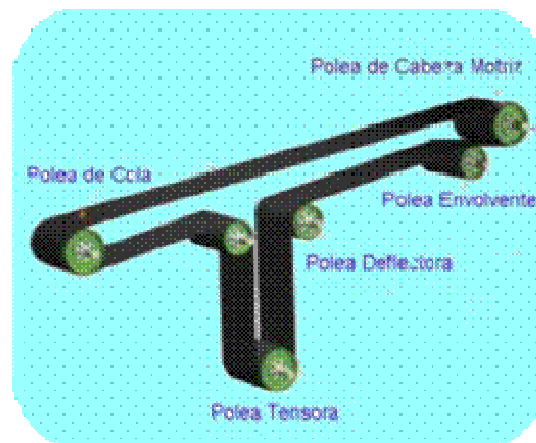


Figura 2.22 Esquema de los rodillos de tensión de una banda transportadora

Fuente: Juan Carlos Santillán Mestanza. Criterios para el diseño de una cinta transportadora. Recuperado de: <http://www.monografias.com/trabajos58/disen0-cintas-transportadoras/disen0-cintas-transportadoras2.shtml>. Perú. 2008.

2.3.3 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

2.3.3.1 Selección del sistema de transporte para el nitrato de amonio

Para el transporte del nitrato de amonio, se escogió tornillo sin fin, de acuerdo a los requerimientos de la empresa. EXPLOCEN C.A. ya usa este

método de transporte en una de sus líneas de producción, con resultados excelentes para este compuesto.

Como se mencionó antes, el nitrato de amonio es higroscópico, es decir absorbe agua fácilmente del ambiente, cambiando sus propiedades físicas y generando apelmazamiento, es decir que las partículas de nitrato de amonio, se juntan y se solidifican, lo cual dificulta el proceso, por ello una banda transportadora, no sería una buena opción.

El movimiento de nitrato de amonio molido, origina el levantamiento de cantidades considerables de este químico en el ambiente, creando un espacio de trabajo pulverulento, si bien el nitrato de amonio, puede llegar a causar problemas de salud, los trabajadores cuentan con el equipo de protección adecuado, sin embargo el nitrato de amonio esparcido, genera pérdidas por lo que es un factor a tener en consideración si se quiere mejorar el costo de producción.

2.3.3.2 Selección del sistema de transporte para el aserrín

El manejo del aserrín, es más sencillo, comparado con el nitrato de amonio, porque no tiene propiedades higroscópicas y apelmazantes, por lo que para éste se podría utilizar tornillo sin fin, pero también banda transportadora, y son precisamente estas dos alternativas las que se analizaron.

Los factores que se tomaron en cuenta para la selección son:

Costo de implementación: Este factor tiene la mayor ponderación en la selección de alternativas con un 50%. La calificación más alta se dio a la opción que tenga menor costo.

Mantenimiento: Para el mantenimiento se tomó en cuenta el número de componentes mecánicos que conforman la alternativa, teniendo la mejor calificación la opción de más fácil mantenimiento.

Facilidad de instalación: La instalación de las alternativas es distinta, para la banda transportadora se tiene una instalación más flexible en cuanto al espacio de trabajo que con el tornillo sin fin. El puntaje mayor se dio a la alternativa con mayor facilidad de instalación.

2.3.3.2.1 Tabla de resultados

Tabla 2.7 Selección del sistema de transporte para el aserrín

Factores	Peso	Porcentaje	Calificación		Calificación real	
			Tornillo Sin fin	Banda Transportadora	Tornillo sin fin	Banda Transportadora
Costo de implementación	50	50%	5	3	250	150
Mantenimiento	30	30%	4	5	120	150
Facilidad de instalación	20	20%	4	5	80	100
Total		100%			450	400

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 3

DISEÑO DEL SISTEMA

En este capítulo se realiza el diseño y la selección de los componentes que conforman el sistema real. Al no tener la etapa de implementación se realiza únicamente el diseño CAD del sistema.

Como primer paso para empezar el diseño se describe la lista de componentes que tiene cada uno de los sistemas.

3.1 DELIMITACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA

Almacenamiento:

- Silo de sección circular hechos de acero inoxidable 304 para el nitrato de amonio y de acero A36 para el aserrín.
- Estructura de soporte para direccionar la carga hacia las celdas de carga, formada por cuatro elementos.

Dosificación:

- Compuertas tipo cuchilla, de posición continua, con motor eléctrico DC como actuador. Las compuertas seleccionadas vienen con finales de carrera electrónicos para indicar máxima y mínima apertura.

- Celdas de carga, ubicadas en cada uno de los cuatro soportes de cada silo.
- Acondicionamiento de las celdas de carga y conversión A/D, para la lectura en el microcontrolador.
- Elementos de potencia, aislamientos y protecciones eléctrico/electrónicos necesarios para el control de los motores de las compuertas.
- En el caso del nitrato de amonio, un molino industrial pequeño que se acoplará inmediatamente después de la compuerta, previo al transporte de este elemento.

Transporte:

- Tornillos sin fin, controlados con motor eléctrico AC, para el transporte de los materiales.
- Elementos de potencia, aislamientos y protecciones eléctrico/electrónicos necesarios para el control de los motores de los tornillos sin fin.

3.2 DETERMINACIÓN DE VARIABLES DEL SISTEMA

Masa: Esta variable es la más importante, porque dentro de los objetivos planteados, uno de ellos es lograr un buen nivel de precisión en la

formulación de los componentes, por lo que se necesita un riguroso control de masa. A esta variable se la simboliza con la letra “m”.

Flujo másico: Esta variable es importante porque los elementos de transporte tienen límites en cuanto a la cantidad de masa que pueden manejar. Por lo que es importante que el flujo a la salida de los silos sea acorde a la velocidad de avance de los sistemas de transporte, los tornillos sinfín. Para representar esta variable se utilizará la letra “F”, la cual es equivalente a dm/dt , la derivada de la masa con respecto al tiempo.

Velocidad y Velocidad Angular: En el caso de los motores de los tornillos sin fin, es importante el manejo de sus velocidades angulares, lo que permite mover el material de manera constante y sincronizar el flujo a la salida de los silos con la velocidad de avance de los mismos.

La velocidad angular es representada por la letra griega “ ω ”, y la velocidad lineal de transporte representada por la letra “v”.

3.3 DISEÑO MECÁNICO

3.3.1 SISTEMA DE ALMACENAMIENTO

3.3.1.1 Criterios de diseño

Para realizar el análisis de cargas y esfuerzos en los silos, se utilizaron las conclusiones de los ensayos experimentales del libro “Silos” de Ravenet.

Para el análisis de ciertos esfuerzos como juntas, se utilizó la bibliografía de diseño de elementos de máquinas que se muestra al final del libro.

3.3.1.2 Normas referenciales

Existen normas en cuanto al diseño de silos, como por ejemplo el Eurocódigo o la norma DIN, sin embargo la capacidad de nuestro sistema de almacenamiento no está dentro de los rangos en los que trabajan dichas normas, por lo que éstas no son aplicables a éste proyecto.

3.3.1.3 Cálculo de dimensiones

El sistema de almacenamiento está conformado por dos silos, el uno para nitrato de amonio y el otro para aserrín. Considerando las densidades diferentes de los materiales a almacenar y las capacidades requeridas descritas en la Tabla 1.2, se realizó el cálculo para poder construir los dos silos con las mismas dimensiones.

En el Capítulo 1, se analizó la masa necesaria que los silos deben almacenar, tomando en cuenta la producción actual, y la producción deseada, los resultados de este análisis, junto con la densidad de los materiales a almacenarse se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Densidad y masa de los elementos a almacenarse

Densidad [kg/m ³]	Masa [kg]
$\rho_{NH_3} = 1540$	$m_{NH_3} = 2800$
$\rho_{aserrín} = 320$	$m_{aserrín} \geq 500$

Fuente: Elaboración propia

El volumen de los dos silos es constante para lograr que sean de las mismas dimensiones como se ve en la Ecuación 3.1.

$$V_{NH_3} = V_{aserrín} = V \quad \text{Ecuación 3.1}$$

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{m_{NH_3}}{\rho_{NH_3}} = \frac{m_{aserrín}}{\rho_{aserrín}} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Para el cálculo de las dimensiones, el volumen que se toma en cuenta es solamente de la parte cilíndrica, y se desprecia el volumen que ocupa la tolva.

$$V = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot h}{4} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Se ha planteado que la altura del cilindro tenga el doble del diámetro de su sección para que este sea esbelto, tomando en cuenta las consideraciones geométricas de diseño como el aprovechamiento del sitio de implementación y el aprovechamiento de su volumen. Este criterio se muestra en la Ecuación 3.4, que al ser reemplazado en la ecuación 3.3, se obtiene el volumen total en función solamente del diámetro como se muestra en la Ecuación 3.5.

$$h = 2. d \quad \text{Ecuación 3.4}$$

$$V = \frac{\pi. d^3}{2} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Al igualar las Ecuaciones 3.2 y 3.5 y luego despejando, se obtiene el valor de diámetro mínimo para cumplir con el requerimiento de la masa de NH_4NO_3 .

$$\frac{m_{\text{NH}_3}}{\rho_{\text{NH}_3}} = \frac{\pi. d^3}{2} \quad \text{Ecuación 3.6}$$

$$d = 1.05 [m] \quad \text{Ecuación 3.7}$$

$$h = 2.10 [m] \quad \text{Ecuación 3.8}$$

Con este diámetro se puede comprobar la capacidad de aserrín que se podrá almacenar en un contenedor de las mismas dimensiones, verificando que cumple con la masa requerida.

$$m_{\text{aserrín}} = 581.89 [kg] \quad \text{Ecuación 3.9}$$

3.3.1.4 Análisis de cargas

Para el cálculo de las presiones originadas dentro del silo debido al llenado y vaciado del material. Se toma en cuenta las ecuaciones descritas por Janssen. Aplicando los coeficientes obtenidos experimentalmente por Ravenet para las sobrepresiones de vaciado dependiendo de la relación altura-diámetro.

Las distintas normas de fabricación de silos, se basan en las ecuaciones que Janssen publicó en 1985 que se detallan a continuación.

$$K = \frac{1 - \text{sen}(\Phi_i)}{1 + \text{sen}(\Phi_i)}$$

Ecuación 3.10

Siendo Φ_i el ángulo de rozamiento interno, en radianes.

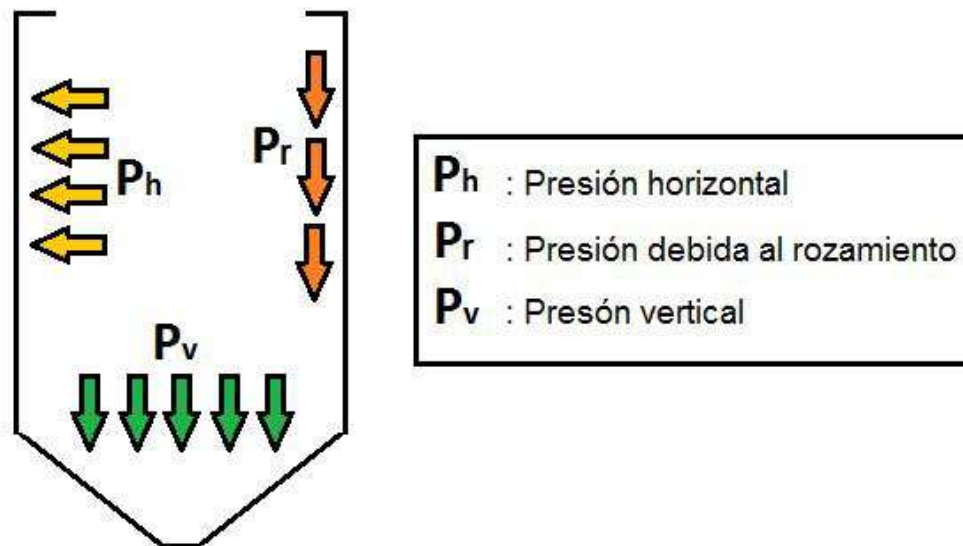


Figura 3.1 Presiones en un silo

Fuente: Elaboración propia.

$$P_v(z) = \frac{\gamma A}{K_s \mu U} C_z(z) \quad \text{Ecuación 3.11}$$

$$P_r(z) = \gamma \frac{A}{U} C_z(z) \quad \text{Ecuación 3.12}$$

$$P_h(z) = \frac{\gamma A}{\mu U} C_z(z) \quad \text{Ecuación 3.13}$$

$$C_z(z) = 1 - e^{\left(-\frac{z}{z_0}\right)} \quad \text{Ecuación 3.14}$$

$$z_0 = \frac{A}{K_s \mu U} \quad \text{Ecuación 3.15}$$

$$\mu = \text{tg}(\Phi_1) \quad \text{Ecuación 3.16}$$

C_z = Coeficiente de Janssen

A = Área de la sección transversal del silo

U = perímetro del silo

γ = peso específico del producto

μ = coeficiente de rozamiento de la pared

Φ_1 = ángulo de rozamiento del producto con la pared

K_s = relación de presiones horizontal y vertical

Z = profundidad

El diseño del silo comienza con calcular las presiones horizontales y posteriormente las presiones verticales, por medio de las ecuaciones listadas anteriormente. La Tabla 3.2 contiene los parámetros para el diseño del silo de nitrato de amonio.

Se calculó el coeficiente de rozamiento μ con la ecuación 3.16 y el valor de K con la ecuación 3.10.

Tabla 3.2 Parámetros para el cálculo de presiones del nitrato de amonio.

Parámetro	Valor	Unidades
Diámetro	1	[m]
Densidad del material	1540	Fuente: [kg/m ³]
Peso específico del material	15092	[N/m ³]
Ángulo de talud (Φ)	30	[°]
Ángulo de rozamiento pared - material (Φ_1)	45	[°]
Radio Hidráulico	0.25	[m]
Coeficiente de rozamiento (μ)	1	
K	0.33	

Fuente: Elaboración propia

Teniendo estos parámetros se reemplaza los valores en las ecuaciones de Janssen y obtenemos las presiones horizontales.

Se calcula la presión horizontal máxima teórica utilizando la ecuación, y la presión máxima real utilizando la ecuación 3.11 y reemplazando $z = 2$ [m], ya que esta es la altura del silo.

Tabla 3.3 Presiones horizontales del nitrato de amonio

Parámetro	Valor	Unidades
Presión horizontal máx. teórica	385	[kgf/m ²]
Presión horizontal máx. real	3.51	[kPa]

Fuente: Elaboración propia.

Para calcular las presiones verticales máximas teórica y real, se dividió los valores de las presiones horizontales para la constante K.

Tabla 3.4 Presiones verticales del nitrato amonio

Parámetro	Valor	Unidades
Presión vertical máx. teórica	1155	[kgf/m ²]
Presión vertical máx. real	10.53	[kPa]

Fuente: Elaboración propia.

Para el aserrín se sigue el mismo procedimiento y se obtiene las presiones máximas horizontales y verticales.

Tabla 3.5 Parámetros para el cálculo de presiones del aserrín.

Parámetro	Valor	Unidades
Altura	2	[m]
Diámetro	1.5	[m]
Densidad	320	[kg/m ³]
Ángulo de talud (Φ)	45	[°]
Ángulo de rozamiento pared - material (Φ_1)	43	[°]
Radio Hidráulico	0.375	[m]
Coefficiente de rozamiento (μ)	0.933	
K	0.172	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.6 Presiones horizontales del aserrín.

Parámetro	Valor	Unidades
Presión horizontal máx. teórica	128.684	[kgf/m ²]
Presión horizontal máx. real	0.724	[kPa]

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.7 Presiones verticales del aserrín.

Parámetro	Valor	Unidades
Presión vertical máx. teórica	750.027	[kgf/m ²]
Presión vertical máx. real	4.219	[kPa]

Fuente: Elaboración propia.

3.3.1.5 Análisis de esfuerzos

Los resultados de los análisis de cargas mostraron que las fuerzas generadas por el llenado y vaciado del material son bastante pequeñas. Se calculó el espesor mínimo requerido tomando en consideración las ecuaciones del libro "Silos" de Ravenet.

Cálculos para el espesor del silo de nitrato de amonio

$$T = \frac{PD}{2} \quad \text{Ecuación 3.17}$$

$$T = 192.5 \left[\frac{kg}{m^2} \right] \quad \text{Ecuación 3.18}$$

$$e = \frac{T}{10 * \sigma_{adm}} \quad \text{Ecuación 3.19}$$

$$e = 0.01375 [mm] \quad \text{Ecuación 3.20}$$

Para el aserrín se realizan los mismos cálculos y se obtiene

$$T = 96.5 \left[\frac{kg}{m^2} \right] \quad \text{Ecuación 3.21}$$

$$e = 0.007 [mm] \quad \text{Ecuación 3.22}$$

Donde:

T = Tracción por metro lineal

e = espesor

D = diámetro del cilindro

P = Presión lateral

σ_{adm} = esfuerzo admisible del acero 1400 [kg/cm²]

Los valores obtenidos de espesor son bastante pequeños para los esfuerzos calculados. Esto es comprensible porque las normas de diseño de silos están realizadas para masas mayores a 10 [ton], entonces el material utilizado por su estructura mecánica, en sus mínimas dimensiones, es suficiente para soportar las cargas generales en silos pequeños, quedando solamente limitado el diseñador a los espesores mínimos dependiendo de la soldadura, y el tipo de chapa que se encuentre en el mercado.

3.3.2 SISTEMA DE DOSIFICACIÓN

Como se definió en el capítulo 2, este sistema está compuesto por el sistema de pesaje y el sistema de control de flujo, además se toma en consideración el diseño y selección del molino para la parte del nitrato de amonio.

3.3.2.1 Sistema de pesaje

Para este sistema se seleccionó el Kit de montaje ISOFLEX de la empresa SCAIME, el cual podemos ver en la figura 3.2 y cuyos planos y características principales están en el ANEXO A. Este kit de montaje cumple

la función de acople entre los soportes y la celda de carga, y permite la transmisión del peso para que pueda ser medido por la misma. Cada uno de los silos consta de 4 soportes que terminan en el acople mencionado, por lo que la carga se divide entre las 4 celdas de carga.



Figura 3.2 Kit de montaje ISOFLEX de la empresa SCAIME

Fuente: SCAIME (2013) 567-en-FT-ISOFLEX-FE-0912 [Hoja técnica] Recuperado de: <http://www.scaime.com/upload/telechargements/567-en-FT-ISOFLEX-FE-0912.pdf>

El modelo de la celda de carga SK30X de la empresa SCAIME se eligió debido a que cumple con los requerimientos de carga y precisión especificados en el capítulo 2. Esta celda de carga es de tipo flexión de viga y tiene una capacidad de hasta 1500 [kg], como podemos ver en la Figura 3.3 y cuyos planos y características principales están en el ANEXO A.



Figura 3.3 Celda de carga tipo flexión de viga de 1500 kg.

Fuente: SCAIME (2013) 25-en-FT-SK30X-FE-0310 [Hoja técnica] Recuperado de: <http://www.scaime.com/upload/telechargements/25-en-FT-SK30X-FE-0310.pdf>

3.3.2.2 Sistema de control de flujo

Para este sistema se optó por la solución de la empresa Vortex, cuyo distribuidor en el país es la empresa Reprinter. La cual es fabricante de todo tipo de válvulas y compuertas para la dosificación de diversos materiales. La válvula seleccionada es la tipo Roller Gate de la serie Quantum, de 10 [pulg.] con actuador eléctrico como se observa en la figura 3.4. Mediante la cual se puede realizar el control de apertura y cierre fácilmente. Esta válvula está diseñada específicamente para trabajar con materiales sólidos. El material de la compuerta es acero inoxidable 304 para soportar las características del nitrato de amonio.

Para el aserrín se seleccionó la misma válvula con las mismas características, teniendo en cuenta que las dimensiones de los dos silos fueron diseñadas para que sean iguales. Esta compuerta de dosificación es

de forma rectangular por lo que requiere de acoples de conversión de cilíndrico a rectangular.



Figura 3.4 Válvula tipo Orifice Gate de la serie Quantum

Fuente: Salina Vortex Corporation (2013). Recuperado de:
<http://www.vortexvalves.com/roller-gate/>

3.3.2.3 Molino para el nitrato de amonio NH_4NO_3

Dentro del proceso de fabricación de la dinamita, como se especificó en el capítulo 1, se necesita moler el nitrato de amonio previo a la mezcla con los demás materiales. Para esto se sugiere la adaptación de un molino industrial simple para completar el proceso.

Las características principales para la selección del molino son el material de construcción y el tipo de molino. Para el nitrato de amonio se recomienda utilizar un molino construido de acero inoxidable. El tipo de molino óptimo para el nitrato de amonio debido a sus propiedades físicas y químicas, es un molino de martillos.

Esto dado que se debe controlar el calor generado por la fricción al ser molido el material y con otro tipo de molinos esta temperatura llega a ser mayor.

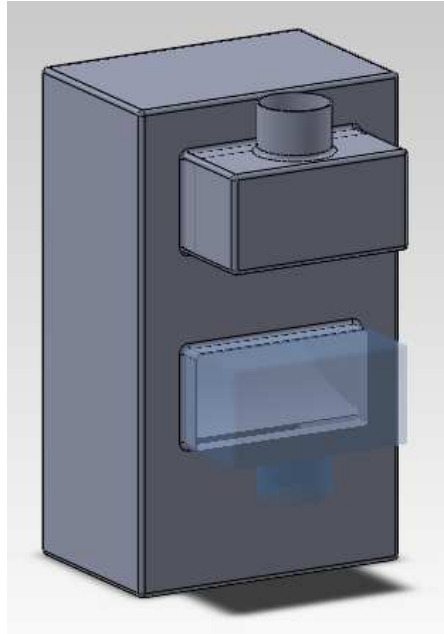


Figura 3.5 Molino de martillos.

Fuente: Elaboración propia.

3.3.3 SISTEMAS DE TRANSPORTE

3.3.3.1 Tornillo sinfín

La selección del tornillo sin fin, se llevó a cabo siguiendo el método indicado en el catálogo de Martin Sprocket para tornillos sin fin, este utiliza un conjunto de tablas y ecuaciones cuyo fin es obtener la geometría del sistema, así como también la potencia necesaria para la selección del motor más adecuado.

Para el diseño, lo primero fue tabular las principales propiedades físicas relacionadas con el transporte del Nitrato de Amonio como: tipo de material, densidad, tamaño de grano, higroscopía, etc. También se debe definir el flujo que se desea obtener, es decir la cantidad de masa que se espera movilizar en cierto tiempo determinado

Tabla 3.8 Propiedades físicas de Nitrato de Amonio y flujo deseado

Propiedad	Valor
Densidad (ρ)	1 540 [kg/m ³]
Tamaño de grano (medio)	1.5 [mm]
Otras propiedades	Higroscópico, medianamente abrasivo

Fuente: Elaboración propia.

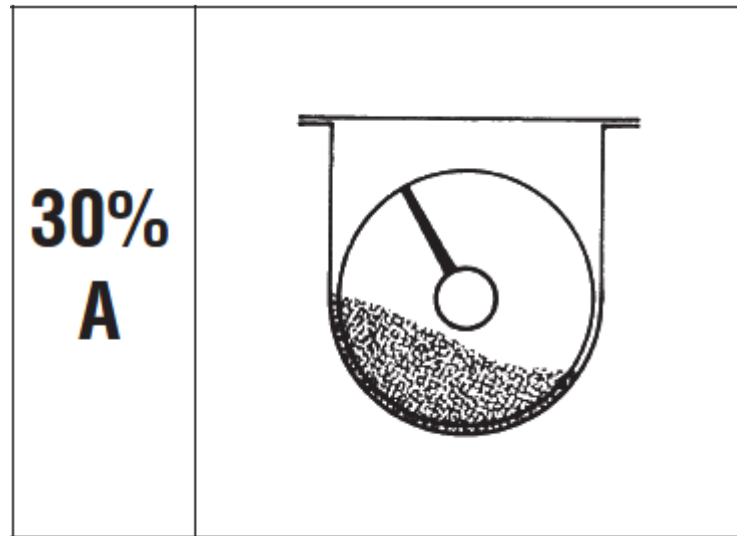
Con estos datos se ubicó al Nitrato de Amonio en las tablas mostradas en el ANEXO C arrojando los siguientes valores:

Tabla 3.9 Resultados referentes a las propiedades físicas del nitrato de amonio

Material	Densidad [lb/ft ³]	Código del Material	Factor de velocidad del material (Fm)	Tipo de rozamiento	Cantidad de carga en el tornillo
Nitrato de Amonio	45 – 62	A40-35NTU	1.3	H	30 ^a

Fuente: Martin Sprocket Catalogue for screw Conveyors

Figura 3.6 Carga en el tornillo sin fin



Fuente: Martin Sprocket Catalogue for screw Conveyors

Una vez obtenido el tipo de carga del tornillo, se calculó la velocidad de flujo de transporte del material, para lo cual se tomo en cuenta el flujo de material calculado en los objetivos que es igual a 350[kg/h] de dinamita. Del total de la formulación de la dinamita, el 35 [%] es material inerte, y de éste, el 85 [%] pertenece al Nitrato de Amonio, necesitándose una cantidad igual o mayor a 104.125 [kg] de Nitrato de Amonio en cada hora.

$$F_{mNH_4NO_3} = 104.125 \left[\frac{kg}{h} \right] \quad \text{Ecuación 3.23}$$

El proceso que se lleva a cabo en el área de inertes en la línea de dinamita consta de una etapa de llenado, una de mezclado y una de vaciado, repitiéndose de la misma manera durante un tiempo determinado, con lo que se puede obtener la ecuación del tiempo del proceso mostrada en la Ecuación 3.17, donde N es el número de ocasiones que se repetirá el proceso.

$$Nx(t_{llenado} + t_{mezclado} + t_{vaciado}) = t_{proceso} \quad \text{Ecuación 3.24}$$

El tiempo de mezclado calculado en la tesis: “Premezclado de sólidos inertes para la producción de dinamita, mediante el diseño y construcción de un mezclador cónico vertical piloto” del Ing. Chico F., es menor a 10 [min], por lo que se seleccionó este período como valor fijo del tiempo de llenado, además se tomó como consideración un tiempo de vaciado de 5 [min], pensado esto en base a la observación de varios procesos, en los que siempre la descarga requiere un menor tiempo que el proceso que se llevó a cabo en el recipiente. Al igualar esta ecuación a un tiempo de proceso de 60 [min], se calcula la cantidad máxima de ocasiones que se puede llevar a cabo este proceso en una hora, reemplazando estos valores en la Ecuación 3.18 resulta:

$$Nx(t_{llenado} + 10 + 5) = 60 \quad [min] \quad \text{Ecuación 3.25}$$

Como resultado se obtuvo un número igual a 3 repeticiones del proceso en una hora. También se obtuvo que con este valor el tiempo de llenado máximo debe ser igual a 5 [min], pero se escogió un tiempo de 1 [min], por ser un tiempo de llenado apropiado, tomando en cuenta que la distancia es de 3 [m] entre los silos y la tolva mezcladora.

$$N = \frac{3}{h} \quad \text{Ecuación 3.26}$$

$$t_{llenado} = 1 \text{ [min]} \quad \text{Ecuación 3.27}$$

La masa de Nitrato de Amonio que necesita ser transportada en cada una de las repeticiones, se calculó dividiendo la masa de este material necesaria en una hora de proceso para el número de repeticiones calculadas.

$$m_{NH_4NO_3 (1 \text{ ocasión})} = \frac{Fm_{NH_4NO_3}}{N} \quad \text{Ecuación 3.28}$$

$$m_{NH_4NO_3 (1 \text{ ocasión})} = 34.71 \text{ [kg]} \quad \text{Ecuación 3.29}$$

Dividiendo la masa que debe ser transportada en cada oportunidad por el tornillo, para el tiempo de llenado seleccionado, se obtuvo el flujo másico que deberá ser transportado por el tornillo sin fin. Este valor de flujo másico al dividirse para la densidad del nitrato de amonio, se convierte en el flujo volumétrico. Los flujos másico y volumétrico se muestran en las Ecuaciones 3.24 y 3.26.

$$F_m = \frac{m_{NH_4NO_3 (1 \text{ ocasión})}}{t_{llenado}} \quad \text{Ecuación 3.30}$$

$$F_m = 34.71 \left[\frac{\text{kg}}{\text{min}} \right] \quad \text{Ecuación 3.31}$$

$$F_v = \frac{F_m}{\rho_{NH_4NO_3}} = \frac{34.71}{1540} \left[\frac{m^3}{min} \right] \quad \text{Ecuación 3.32}$$

$$F_v = 0.02254 \left[\frac{m^3}{min} \right] = 47.76 \left[\frac{pie^3}{hora} \right] \quad \text{Ecuación 3.33}$$

El flujo volumétrico junto a la cantidad de carga, son necesarios para seleccionar el diámetro del tornillo sin fin en la tabla mostrada en el ANEXO C, que a su vez arroja el valor de velocidad angular máxima de éste. Se escogió un diámetro de 6 [pulg] debido a que es el mínimo diámetro que cumple con los requisitos calculados como se muestra a continuación en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10 Diámetro y velocidad angular del tornillo

Capacidad de carga	Diámetro [pulg.]	Flujo volumétrico [ft ³ /hora]		máx RPM
		A 1	A máx	
		RPM	RPM	
30% A	4	0.41	53	130
30% A	6	1.49	180	120

Fuente: Elaboración propia.

Con el flujo volumétrico calculado dividido para el flujo a una RPM, se obtiene la velocidad angular del tornillo; esta velocidad calculada se deberá corregir por factores debidos al material a transportar, forma de la hélice del tornillo y otros. En la Ecuación 3.28 se puede apreciar éste cálculo.

$$N = \frac{F_v}{F_{1RPM}}$$
Ecuación 3.34

$$N_0 = 32.05 [RPM]$$
Ecuación 3.35

En el ANEXO C se muestran las tablas con los factores para la corrección de la velocidad angular, el primero se refiere al paso del tornillo, que en el caso de transportadores no-horizontales se recomienda un valor de 2/3 del diámetro, y el factor asociado a esta longitud de paso es igual a 1.5, el segundo valor depende del tipo de hélice, que en nuestro es de tipo estándar, porque el Nitrato de Amonio no requiere un tipo especial de hélice, similar al tercer factor que se refiere a paletas mezcladoras, que tampoco las necesita, por lo tanto estos dos factores serán igual a 1.

$$CF_1=1.5$$
Ecuación 3.36

$$CF_2=1$$
Ecuación 3.37

$$CF_3=1$$
Ecuación 3.38

$$N = N_0 \times CF_1 \times CF_2 \times CF_3$$
Ecuación 3.39

$$N = 48.08 [RPM]$$
Ecuación 3.40

Como se puede observar la velocidad angular calculada, es menor que la velocidad máxima requerida para 6 [pulg.], caso que no sucede con 4 [pulg.] después de multiplicar el valor base por los factores.

Para el caso de la selección de la potencia del motor, se deben sumar dos potencias generadas, que son: Potencia en vacío y potencia debida a la carga, la potencia en vacío que se simbolizará con “HP_f”, se calcula con la fórmula mostrada en la ecuación 3.34:

$$HP_f = \frac{L \cdot N \cdot F_d \cdot f_b}{1\,000\,000} \quad \text{Ecuación 3.41}$$

Donde L es la longitud del tornillo, “F_d” un factor debido al diámetro y “f_b” un factor debido al tipo de rodamiento, que para el caso del nitrato de amonio como se puede ver en la Tabla 3.9 es “H”. Con estos valores se toma de las tablas que están en el ANEXO C, los valores mostrados en las Ecuaciones 3.35, 3.36 y 3.37. Se dividió la distancia entre el silo y la tolva mezcladora que es de 3 [m], para el coseno de 30° debido a la elevación que se lleva a cabo, quedando L = 3.46 [m] = 11.37 [ft].

$$F_d = 18.0 \quad \text{Ecuación 3.42}$$

$$f_b = 4.4 \quad \text{Ecuación 3.43}$$

$$HP_f = 0.0433 \quad \text{Ecuación 3.44}$$

Para la potencia debida a la carga cuya fórmula se muestra en la Ecuación 3.38, "C" es el flujo volumétrico en [ft³ / h], W es la densidad en [lb / ft³], "Ff" y "Fp" se refieren al tipo de la hélice y paletas que en nuestro caso es estándar sin paletas, "Fm" depende del tipo de material que será transportado, en este caso Nitrato de Amonio, este valor se puede apreciar en la Tabla 3.9, los demás valores se muestran a partir de la Ecuación 3.39 y fueron seleccionados con las tablas mostradas en el ANEXO C.

$$HP_m = \frac{C \cdot L \cdot W \cdot F_f \cdot F_m \cdot F_p}{1\,000\,000} \quad \text{Ecuación 3.45}$$

$$C = F_v = 47.76 \left[\frac{ft^3}{h} \right] \quad \text{Ecuación 3.46}$$

$$F_f = 1 \quad \text{Ecuación 3.47}$$

$$F_p = 1 \quad \text{Ecuación 3.48}$$

$$W = \rho = 97.39 \left[\frac{lb}{ft^3} \right] \quad \text{Ecuación 3.49}$$

El resultado de la potencia debido a la carga se muestra a continuación en la Ecuación 3.43.

$$HP_m = 0.0683 \quad \text{Ecuación 3.50}$$

Después de calcular estas dos potencias, se realiza la adición de las mismas y con este valor se ubica un factor de sobrecarga “Fo” en la tabla mostrada en el ANEXO C, con este valor y un último factor “e” debido al tipo de transmisión de potencia, que en nuestro caso se escogió sistema de poleas y bandas en V debido a la facilidad de construcción y precio, este valor es también mostrado en el ANEXO C.

La fórmula, factores y resultados para la potencia total se muestran a partir de la Ecuación 3.44.

$$HP_{TOTAL} = \frac{(HP_f + HP_m) \cdot F_o}{e} \quad \text{Ecuación 3.51}$$

$$F_o = 3 \quad \text{Ecuación 3.52}$$

$$e = 0.88 \quad \text{Ecuación 3.53}$$

$$HP_{TOTAL} = 0.38 \text{ [HP]} \quad \text{Ecuación 3.54}$$

3.4 SELECCIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN

3.4.1 SENSORES

3.4.1.1 Celdas de carga

Es un tipo de transductor que aprovecha la variación de la resistencia eléctrica en galgas extensiométricas colocadas en una estructura que soporta cargas como fuerzas o momentos, de esta forma la masa del sistema es transmitida de forma vertical a la celda de carga que se deforma elásticamente, y esta deformación es detectada por las galgas y

transformada en señal eléctrica, esta señal eléctrica a su vez es amplificada y filtrada antes de ser leída.



Figura 3.7 Celda de carga con capacidad para 10 kg.

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.2 Interruptor óptico

Es un sensor ON/OFF que utiliza un fototransistor emisor y uno receptor alertando la presencia de un objeto sólido de características no-translúcidas; la posición de los fototransistores es paralela por lo que reacciona cuando la luz es reflejada por un objeto cercano. El modelo es el QRD 1114. Se utilizó 2 de ellos en cada compuerta dosificadora para detectar el principio y final de carrera de la cuchilla.

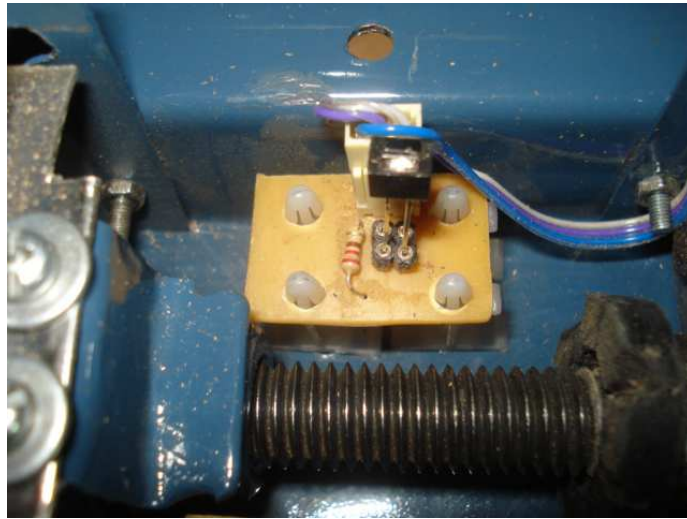


Figura 3.8 Interruptor óptico instalado dentro de la compuerta.

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.3 Encoder rotatorio óptico

Es un sensor de funcionamiento idéntico al interruptor óptico, pero la posición de los transistores es uno frente al otro, esto hace que el circuito este normalmente cerrado y se abre al colocar un objeto entre estos dos fototransistores; se lo utilizo este tipo de sensor para medir la velocidad angular de los tornillos sin fin.

3.4.2 ACTUADORES

3.4.2.1 Compuertas dosificadoras tipo cuchilla

Estas compuertas regulan la dosificación del material. Están conformadas por un motor eléctrico que al girar el tornillo de potencia

permite la apertura o cierre de la compuerta. Las características de los motores seleccionados para las compuertas están en la tabla 3.11.

Tabla 3.11 Motores seleccionados para las compuertas

	Compuerta NH₄NO₃	Compuerta Aserrín
Potencia [W]	240	240
Velocidad [RPM]	300	300
Torque [kg * cm]	3	3

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.2 Motores AC con encoder

Para los sistemas de transporte se eligió utilizar motores AC con encoder para implementar un indicador de la velocidad de los mismos. Lo que permite mantener un control del funcionamiento correcto de los sistemas. Dados los factores de diseño considerados anteriormente los motores AC seleccionados son de bajas RPM y alto torque, por lo que se requiere de una caja de reducción. En la tabla 3.12 tenemos las características para el sistema real.

Tabla 3.12 Motores para los sistemas de transporte

	Tornillo sin fin NH₄NO₃	Tornillo sin fin Aserrín
Potencia [HP]	½	½
Velocidad [RPM]	50	50

Fuente: Elaboración propia.

3.4.3 INTERFACES

Como interfaz de control de los elementos se utilizó el Arduino Mega 2560 mostrado en la figura 3.6. Arduino es una plataforma de hardware y software de código abierto, basada en una sencilla placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo con entradas y salidas, analógicas y digitales, fáciles de usar. El lenguaje de programación está basado en el lenguaje Processing. Dado que es una plataforma de código abierto tanto su diseño como su distribución, puede usarse libremente para el desarrollo de cualquier tipo de proyecto sin necesidad de una licencia.²

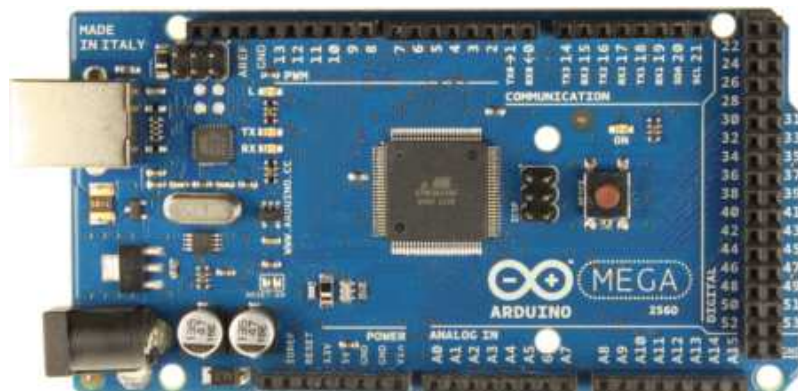


Figura 3.9 Arduino MEGA 2560

Fuente: arduino (2011) Arduino Mega 2560 [Artículo] Recuperado de: <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>

Esta plataforma es la encargada de comunicar el software con el hardware de nuestro sistema. Para esto, se requirió diseñar algunas placas para la adquisición de datos de los sensores. Se diseñó una placa en forma

² Traducido de la pagina web Arduino.cc

de arduino shield para poder ubicar las entradas y salidas con sus distintos elementos de procesamiento por encima del arduino Mega 2560. Desde esta placa se da la entrada y salida de señales por medio de buses hacia las placas de adquisición analógicas, además contiene una pantalla GLCD monocromática como indicador para poder visualizar ciertos parámetros de control directamente en la maquina. En el ANEXO B, se muestra el diagrama del circuito y el layout de la placa.

Adicionalmente se diseñó dos placas para la adquisición de la señal analógica enviada por las celdas de carga de cada uno de los silos. Estas placas envían su señal mediante comunicación serial SPI a la placa mencionada anteriormente de arduino shield. Contienen un integrado para la conversión analógica digital que internamente posee filtros pasa bajos y amplificadores de instrumentación incluido, para contrarrestar la influencia del ruido y amplificar la señal recibida de las celdas de carga. En el ANEXO B, se muestra el diagrama del circuito y el layout de la placa.

Se puede ver el esquema de conexión de los elementos en el diagrama de bloques de la parte electrónica en el ANEXO B.

3.4.4 CONTROL

Para la realización del control se utilizó el programa Microsoft Visual Basic. Como su nombre lo indica éste software utiliza lenguaje Basic, con ciertas modificaciones propias que lo hacen una plataforma de programación rápida, versátil y fácil, además cabe recalcar que en comparación con otros

lenguajes tiene ciertas ventajas como la del costo de la licencia de este software.

Arduino es la plataforma encargada de llevar las señales desde el computador hacia los actuadores e interpretar la información de los sensores; esta información es procesada por Visual Basic que intercambia información con arduino por medio de comunicación RS232. El control se realiza de forma matemática en el computador. Los datos capturados por los sensores son leídos por arduino, el mismo que codifica estos datos en forma de String y los envía a Basic. Luego del procesamiento de los datos, Basic envía las instrucciones que los actuadores deben seguir en el mismo formato. Este enlace es iniciado por el computador y se repite periódicamente habiendo varios ciclos en un segundo.

3.4.5 DOCUMENTACIÓN P&ID

Se realizó el diagrama de instrumentación para reflejar el proceso del sistema. El mismo está en el ANEXO B.

3.4.6 SIMULACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO-ELECTRÓNICO

Se realizó la simulación de la parte electrónica en dos partes. Para simular la comunicación se programó en el software Microsoft Visual Basic y a su vez en el módulo arduino. Con esto se puede comprobar el envío y recepción de datos entre la computadora y el módulo arduino. Se puede ver en las figuras 3.7 y 3.8.

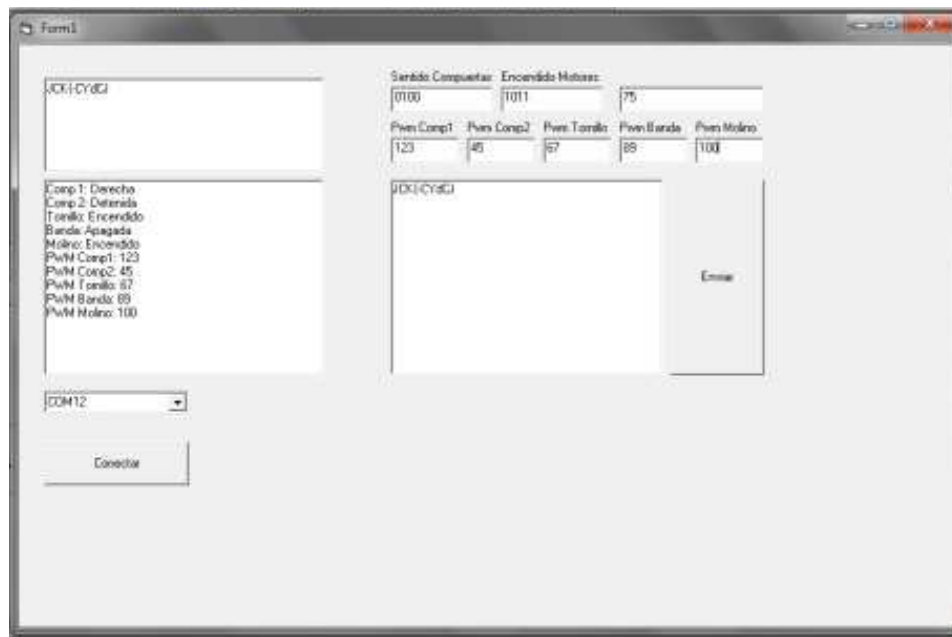


Figura 3.10 Envío y recepción de datos entre Visual Basic y Arduino.

Fuente: Elaboración propia.

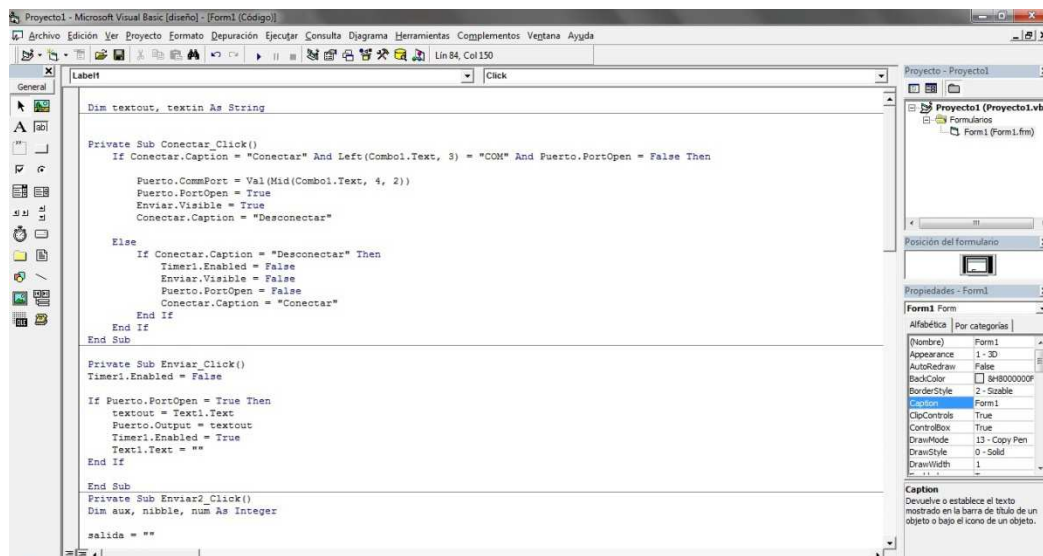


Figura 3.11 Programación en Visual Basic.

Fuente: Elaboración propia.

El diagrama de bloques completo del programa final está en el ANEXO B
Para simular las señales de control se utilizó el programa ISIS de Proteus.

El sistema eléctrico-electrónico está formado principalmente por un módulo Arduino Mega 2560, éste se encarga de link entre el computador que es el elemento donde se encuentran los controles y se realizan los cálculos.

El módulo Arduino está acoplado directamente con una placa especialmente diseñada para Arduino. Los elementos que se encuentran sobre ésta, son principalmente opto-acopladores, que son el link entre Arduino y la etapa de potencia, la cual consta de: 4 motores y un solenoide que trabajan con una alimentación de 12 [VDC]. Otro motor es controlado también con estos, ese es el caso de un motor AC, elemento principal de un molino de grano acoplado en la parte de Nitrato de Amonio. Pero para lograr esto se utiliza una etapa de cambio de DC a AC con un circuito de OPTO-TRIAC controlando un TRIAC.

Los opto-acopladores se usan para aislar a la placa Arduino de la carga de los motores, pero para controlar el cambio de giro otra etapa es necesaria, este es el caso de 2 circuitos puente H completos que tienen como circuito principal al integrado L298, como se puede ver en la simulación.

En la siguiente figura se puede observar como los puentes H se conectan a Arduino y también el circuito de activación del molino. En esta simulación se omitió la parte del conexionado de los optoacopladores que unen la etapa de control con la de potencia para poder simular todas las señales. El único optoacoplador que se puede apreciar es el optotriac que controla el circuito AC del molino.

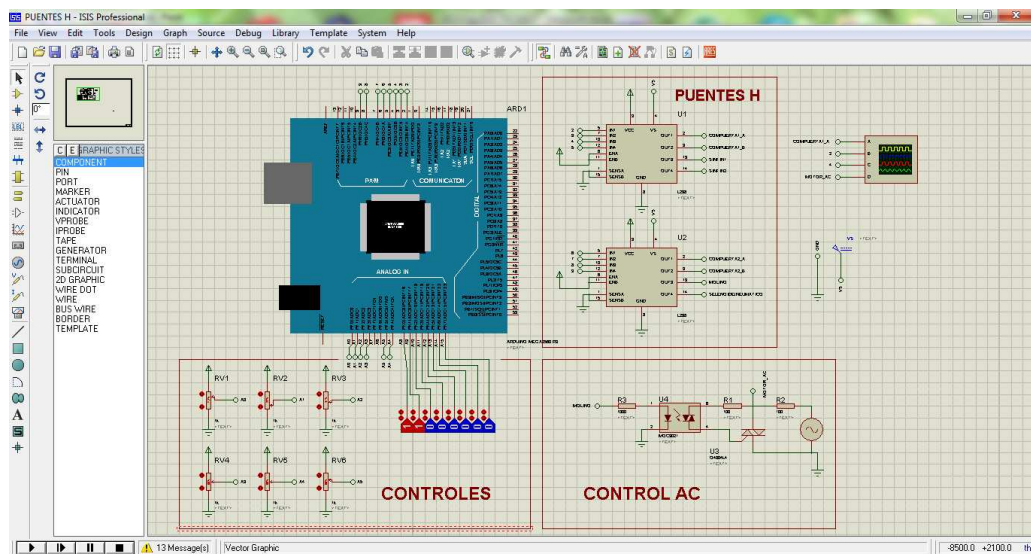


Figura 3.12 Simulación del funcionamiento de las señales de control y potencia en el programa ISIS de Proteus.

Fuente: Elaboración propia.

La lectura del peso también se la realiza con circuitos auxiliares, estos utilizan conversores ADC CS5534, que se conectan por medio cable del tipo BUS con conectores MOLEX a la placa de arduino.

En la figura 3.12, se pueden observar 4 señales, la primera es un control PWM de frecuencia idéntica a la segunda, pero de mayor amplitud, siendo la segunda la entrada del puente H y la primera la salida, la tercera señal es una señal de 0V necesaria en el terminal del motor que no esté conectado a la señal de PWM, finalmente la cuarta señal es una señal de AC que representa la activación del motor del molino después de pasar por la etapa de puente H y la de cambio de DC a AC.

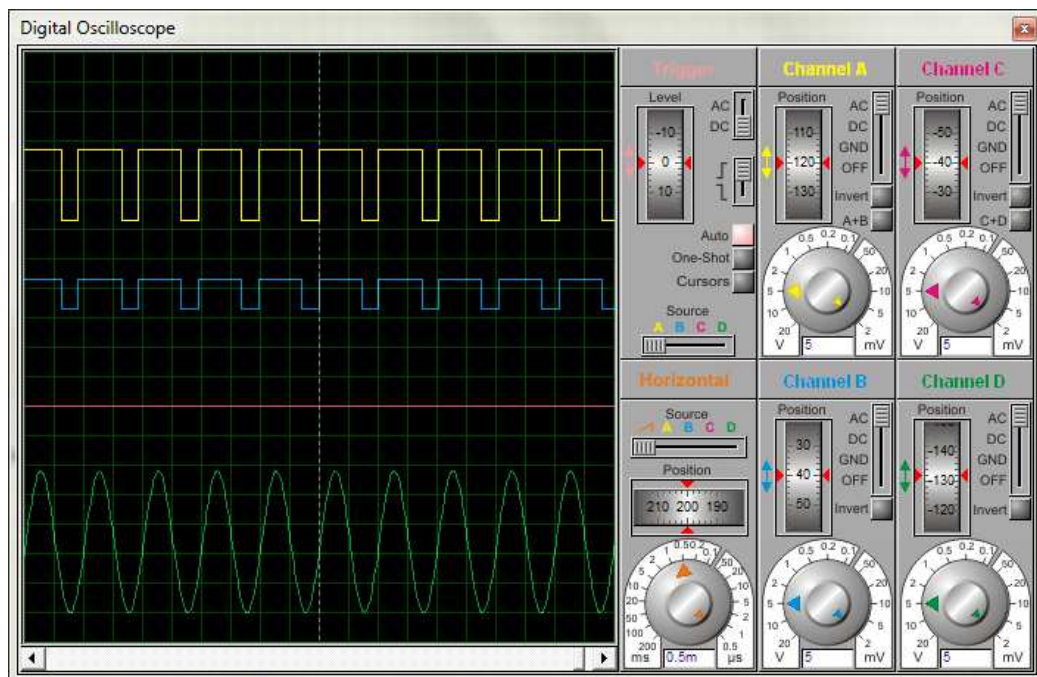


Figura 3.13 Señales de PWM y activación del control AC.

Fuente: Elaboración Propia.

3.5 DISEÑO DEL CONTROL

3.5.1 MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL SISTEMA.

Para programar los controladores, se aproximó la planta del sistema Silo-Compuerta tomando datos de prueba realizada colocando 10 [kg] de Nitrato de Amonio en el silo correspondiente y luego abriendo completamente la compuerta, es decir con un “step” del 100 [%], los datos obtenidos de la prueba, se muestran a continuación:

Tabla 3.13 Datos obtenidos para realizar la estimación del sistema

Tiempo [s]	Masa [g]
0	0
1	76.432
2	1173.64
3	2138.65
4	2994.02
5	3757.36
6	4442.82
7	5061.72
8	5623.30
9	6135.18
10	6603.66
11	7034.05
12	7430.80
13	7797.71
14	8138.02
15	8454.53
16	8749.64
17	9025.45
18	9283.79
19	9526.28
20	9754.32
21	9969.17

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se utilizó la herramienta IDENT del programa MATLAB para obtener la planta del sistema. Indicando que la planta es de primer orden con un cero y un polo mostrándose en azul en la figura con una aproximación del 98.43%.

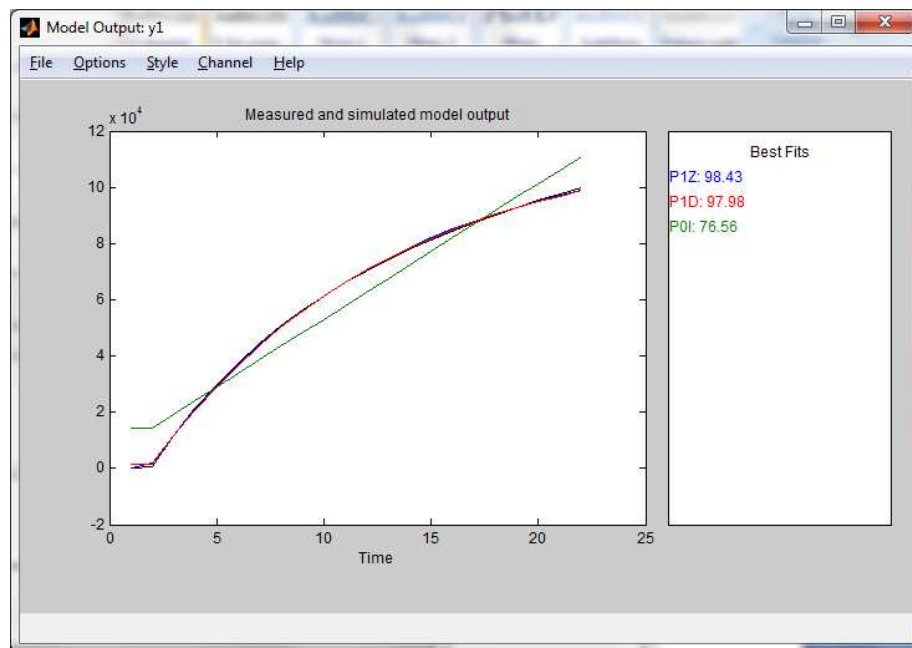


Figura 3.14 Estimación de la planta del sistema utilizando la herramienta IDENT.

Fuente: Elaboración propia.

Los datos obtenidos del estudio se presentan a continuación mostrándose también el modelo de planta.

The figure shows the 'Process Models' configuration window. The 'Model Transfer Function' is set to $\frac{K(1 + Tz s)}{(1 + Tp1 s)}$. The 'Poles' are set to 1 and 'All real'. The 'Disturbance Model' is 'None', 'Focus' is 'Simulation', and 'Initial state' is 'Auto'. The 'Covariance' is 'Estimate'. The 'Iteration 1' status shows 'Fit: 0.001' and 'Improvement 0 %'. The 'Name' field contains 'P1Z'. The 'Estimate' button is highlighted.

Parameter Known	Value	Initial Guess	Bounds
K	1182.1347	Auto	[-Inf Inf]
Tp1	11.1598	Auto	[0.001 Inf]
Tp2	0	0	[0.001 Inf]
Tp3	0	0	[0.001 Inf]
Tz	0.1753	Auto	[-Inf Inf]
Td	0	0	[0 30]

Figura 3.15 Parámetros escogidos para la obtención de la planta.

Fuente: Elaboración propia.

3.5.1.1 Diseño y elección del controlador

De forma similar, con ayuda de una herramienta de MATLAB, en este caso SISOTOOL, se obtuvo un controlador adecuado para la planta, el controlador se muestra a continuación.

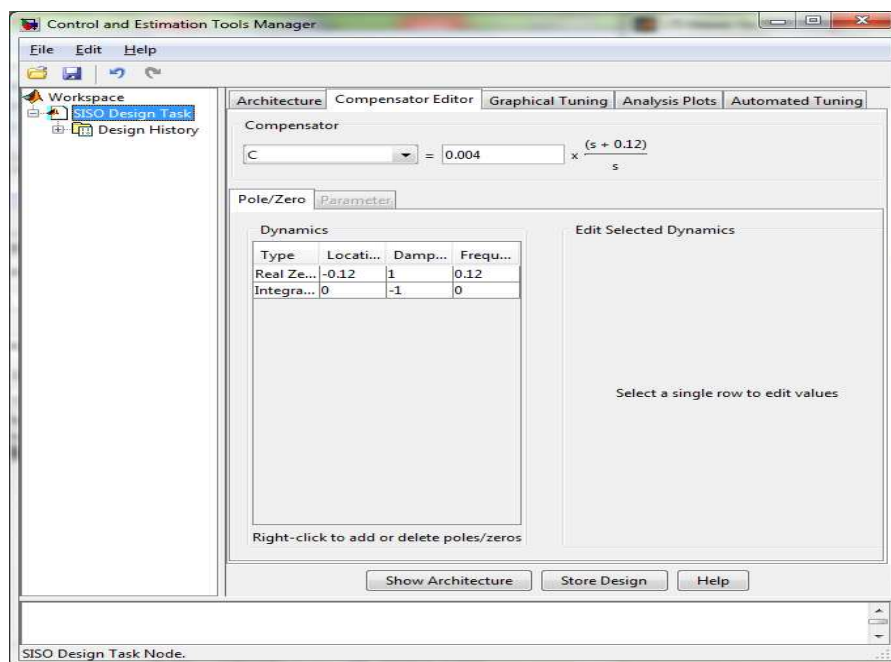


Figura 3.16 Configuración del controlador elegido para la planta obtenida.

Fuente: Elaboración propia.

Donde $k_p=0.004$, $k_i=0.0048$ y $k_d=0$. Se puede ver como SISOTOOL muestra que solamente un control PI es necesario.

Para probar el desempeño de este sistema de control, se ejecutó la función escalón unitario mostrando lo siguiente:

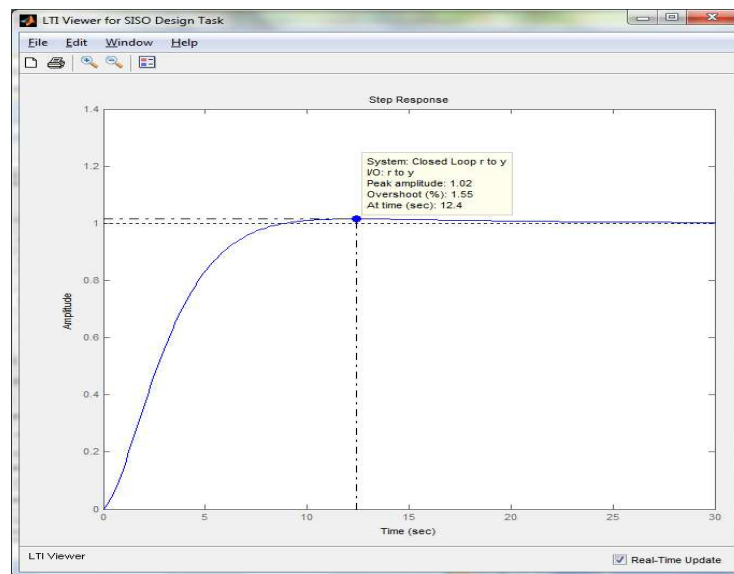


Figura 3.17 Respuesta de la planta al escalón una vez implementado el controlador.

Fuente: Elaboración propia.

El máximo pico de la gráfica es del 1.02% y el tiempo de asentamiento es de 12[s] que son valores adecuados para el proyecto.

La implementación se la programó partir de la función de transferencia del controlador PID (Bolton, 2005) mostrada en la Ecuación 3.55.

$$x_n = K_p e_n + K_i \left(\frac{(e_n + e_{n-1})T_s}{2} + Int_{prev} \right) + K_d \cdot \frac{e_n - e_{n-1}}{T_s} \quad \text{Ecuación 3.55}$$

El código en VISUAL BASIC de esta ecuación se muestra en la siguiente figura:

```
Private Function PIDNittrato()  
  
    ErrN = SPmasaN - masaN  
    DerrN = (ErrN - Err0N) / Tmuestreo  
    IerrN = IerrN + ErrN * Tmuestreo  
  
    AperturaN = kp * ErrN + ki * IerrN + kd * DerrN  
  
    Err0N = ErrN  
  
    Return AperturaN  
End Function
```

Figura 3.18 Programación en VISUAL BASIC de la función de transferencia del controlador PID.

Fuente: Elaboración propia.

3.5.1.2 Simulación de los controladores

Se programó esta planta con la herramienta SIMULINK de MATLAB para observar el comportamiento, el ejemplo que se muestra a continuación es para una masa igual a 300 [g]:

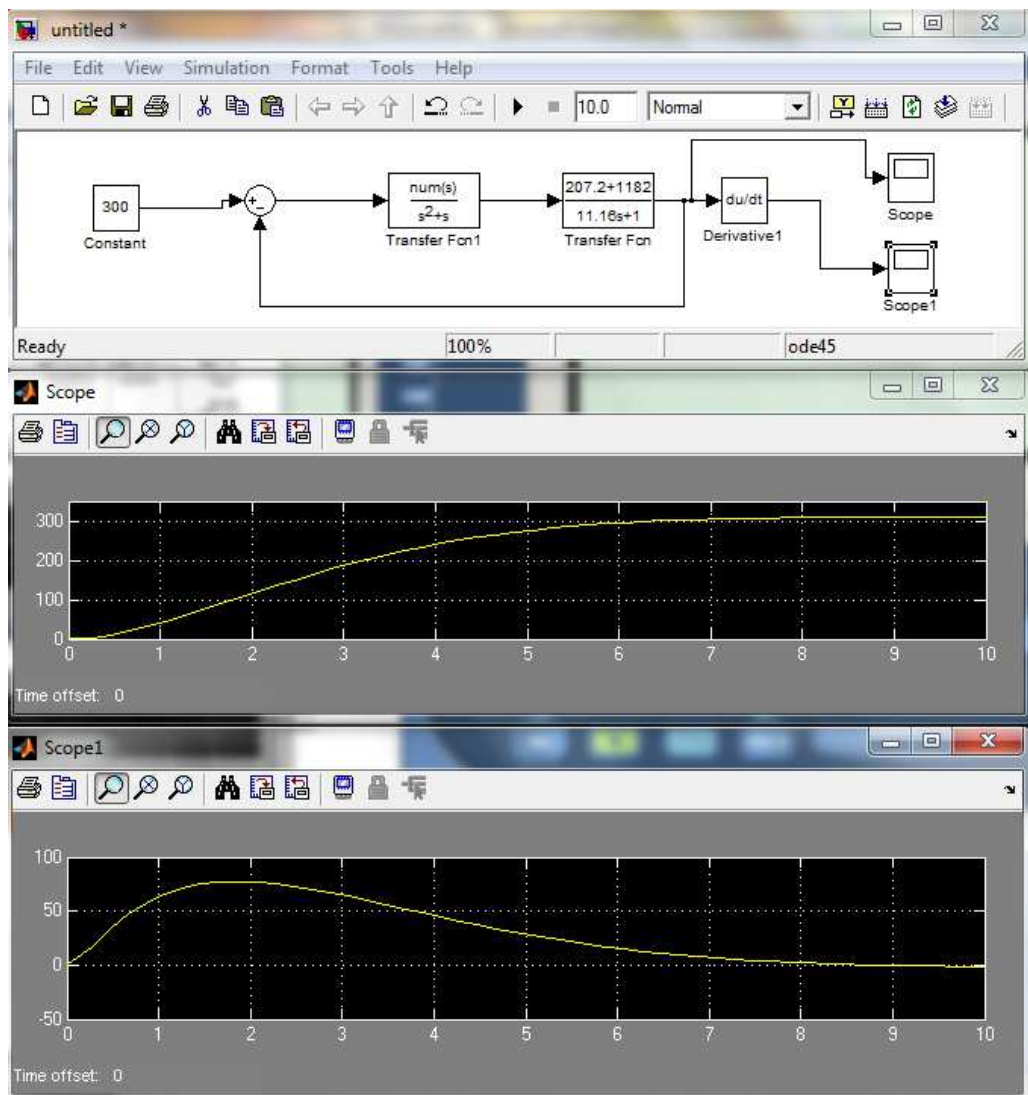


Figura 3.19 Simulación de la respuesta del sistema a los controladores.

Fuente: Elaboración propia.

Al observar la segunda gráfica, podemos ver como efectivamente existe un máximo pico pero es muy bajo y está dentro de los límites, y que el tiempo total es aproximadamente 10 [s], siendo adecuado para esa cantidad. En la tercera gráfica, que es la derivada de la masa, es decir el flujo másico, se puede ver que el flujo sube hasta aproximadamente 80 [g/s], esto es correcto, tomando en cuenta que aproximadamente el máximo flujo es de 215 [g/s], esto se puede calcular derivando los datos tomados para la

aproximación de la planta; este flujo es proporcional a la apertura de la compuerta, por lo que se puede decir que la máxima apertura para este ejemplo fue aproximadamente del 40[%].

Fue diferente para el caso del aserrín, porque debido a sus propiedades físicas, como ya se explicó, se requirió de una etapa de fluidificación, por lo que el flujo de éste dependía de la presión en la línea de aire, lo que dio lugar a un flujo no constante; para solucionar esto, Se decidió utilizar las mismas variables de control para la compuerta de Nitrato de Amonio, y revisar los resultados para tomar una decisión, la misma que fue dejar estos valores ya que brindaban también un buen control en el sistema de aserrín, los resultados de las pruebas, se pueden observar en el capítulo 4.

3.6 DISEÑO DE INTERFACE HOMBRE MAQUINA

3.6.1 SELECCIÓN DE ELEMENTOS A VISUALIZARSE

Para comenzar el diseño de la interfaz HMI empezamos por definir la jerarquía de necesidades. Este concepto proviene de la pirámide de necesidades de Maslow. El principio de la jerarquía de las necesidades especifica que un diseño debe satisfacer un conjunto de necesidades de forma ordenada. (Pere Ponsa, 2010).

La jerarquía de necesidades se expresa en forma de pirámide de 5 niveles. La idea es que un diseño debe satisfacer las necesidades básicas o

inferiores antes de intentar conseguir necesidades más elevadas o superiores.

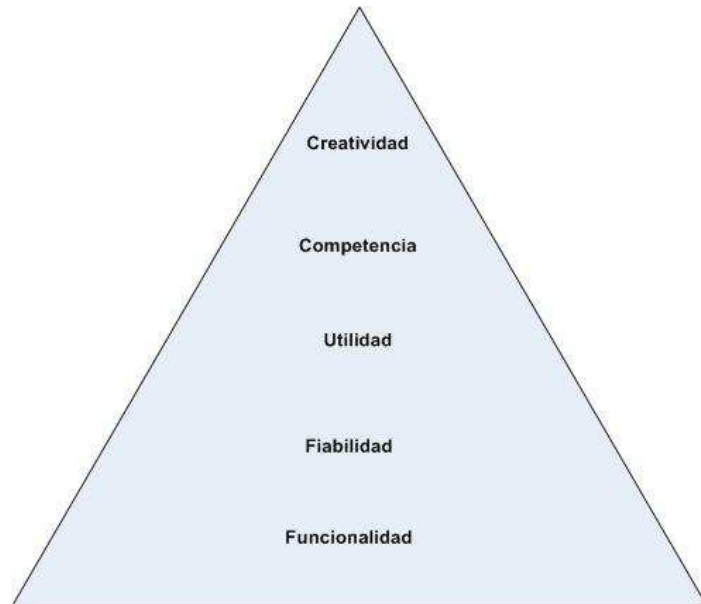


Figura 3.20 Pirámide de Maslow

Funcionalidad: Visualizar la cantidad de material en el silo y la cantidad de material que sale del tornillo sin fin. Verificar el funcionamiento de los procesos como dosificar la cantidad correcta de material., moler en el caso del NH_4NO_3 . Transportar el material 30^a a través del tornillo sin fin.

Fiabilidad: Medidas del peso consistentes y estables, partículas molidas del tamaño adecuado. Transporte con mínimas pérdidas.

Utilidad: Flexibilidad de configuración del peso requerido, velocidad de transporte, control manual de actuadores. Gráficos históricos de uso del material. Opción de reportes

Competencia: Capacidad de modificación de los programas para mejorar la interfaz y el control.

Creatividad: Implementación de las mejoras.

Con estas necesidades planteadas podemos guiarnos para saber qué elementos debe tener la interfaz para que vaya cumpliendo con los niveles básicos y posteriormente los niveles superiores de la jerarquía.

Por lo tanto se plantea 3 pantallas para la interfaz.

- Modo automático.
- Modo manual y de configuración.
- Reportes e históricos.

3.6.2 DISEÑO DE LA PANTALLA HMI

3.6.2.1 Modo automático

En esta pantalla están los controles de arranque del sistema en este modo así como también la opción de pasar directamente a modo manual y de configuración. Se muestra el esquema básico del proceso en el centro de la pantalla por medio de animaciones. En la parte inferior se tiene los controles a la izquierda e indicadores principales a la derecha agrupados por el tipo de material. El funcionamiento de esta pantalla es simple el operario selecciona la cantidad requerida de cada material para la formulación y

luego da inicio al sistema verificando que todos los indicadores de los sistemas estén funcionando correctamente.



Figura 3.21 Pantalla para el modo automático.

Fuente: Elaboración propia.

3.6.2.2 Modo manual y de configuración

La pantalla posee los controles que permiten manejar cada uno de los actuadores por separado. Esto nos permite identificar y corregir algún error que se esté dando en el funcionamiento de alguno de los elementos. También permite al usuario realizar la calibración del sistema y el mantenimiento del mismo. En esta pantalla se muestra únicamente controles e indicadores para todos los actuadores de manera que sea sencilla la

activación de cada uno de ellos. El acceso a esta pantalla es restringido para el operador dado que se podría realizar cambios no deseados en parámetros en la configuración del sistema.

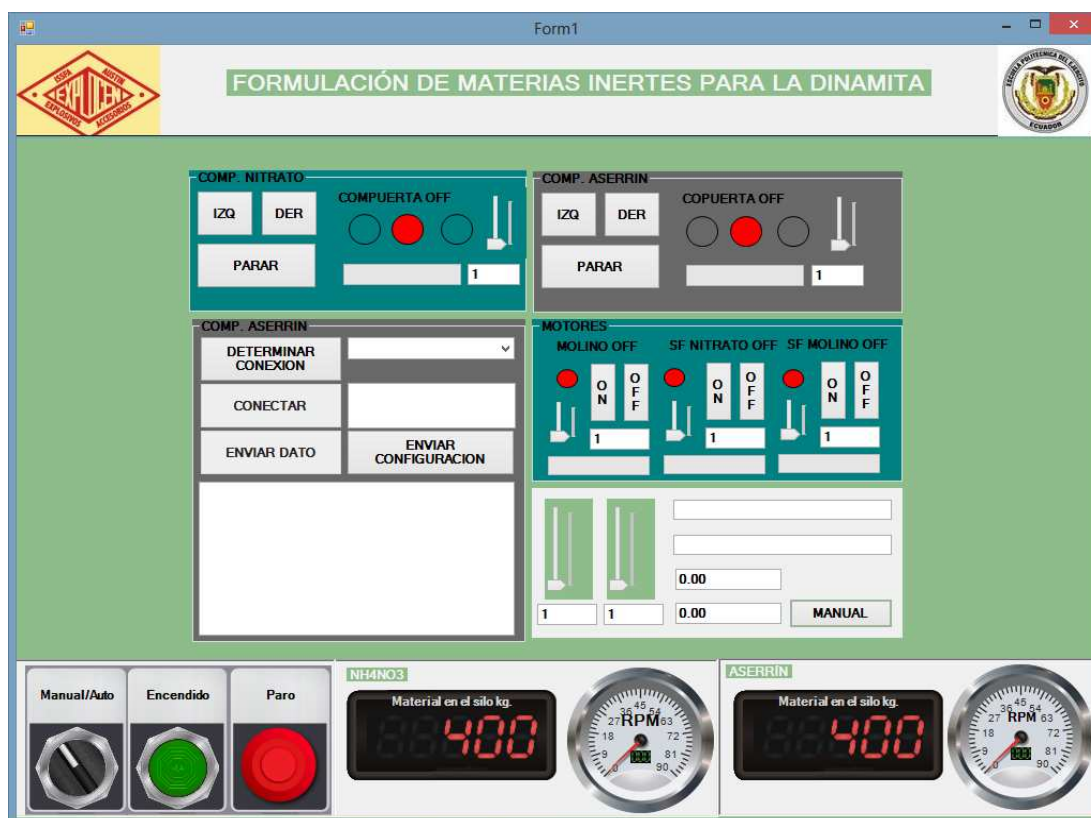


Figura 3.22 Pantalla para el control manual y configuración

Fuente: Elaboración propia

3.6.2.3 Reportes e históricos

En esta pantalla se tiene una grafica de la variación del nivel desde que empezó a ejecutarse el programa. Esta pantalla nos permite visualizar una tabla de cantidad de material requerido por el usuario y el número de veces que se ha realizado el proceso.

CAPÍTULO 4

MODELO A ESCALA

4.1 DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA Y ANÁLISIS

El modelo a escala permite la visualización del funcionamiento del sistema real. Además al realizar las pruebas de funcionamiento se puede visualizar y corregir cualquier error que se presente, antes de incurrir en la inversión del sistema real. Esta es la mayor ventaja de realizar un modelo a escala.

Este modelo refleja las mismas etapas de funcionamiento que el sistema real: Almacenamiento, dosificación y transporte de los materiales. Se realizó un diseño de los distintos componentes para que simulen el funcionamiento de los elementos seleccionados en el capítulo 3 para el sistema real.

4.2 MONTAJE DEL SISTEMA MECÁNICO

4.2.1 DISEÑO DE LOS COMPONENTES DEL MODELO A ESCALA

4.2.1.1 Sistema de almacenamiento

Para que las pruebas de funcionamiento permitan obtener resultados representativos, se definió la capacidad de material que deben contener los silos, siguiendo el procedimiento expuesto en la Norma INEN 476. Esta norma determina el método de muestreo aleatorio o al azar para productos empaquetados o envasados. Mediante el cual podemos obtener la cantidad de la muestra necesaria para que los resultados sean representativos.

Para obtener el tamaño mínimo de la muestra se consideró el flujo calculado:

$$f_{total} = 350 \text{ [kg/h]} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Con el flujo másico, se obtuvo la cantidad estimada de tacos de dinamita que se producirían teniendo en cuenta que el peso medio de un taco es de 0.119 [kg].

$$f_{dinamitas} = \frac{f_{requerido}}{m_{dinamita}} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

$$f_{dinamitas} \approx 2\,941 \text{ [dinamitas/h]} \quad \text{Ecuación 4.3}$$

Con este valor se recurrió a la norma INEN 476 (Método de muestreo aleatorio o al azar para productos empaquetados o envasados) esta norma indica el mínimo número de unidades de un producto, en este caso de dinamitas que deben ser utilizados como muestra, sabiendo el flujo de unidades por hora, la tabla se muestra en el ANEXO D y señala lo siguiente:

$$Unidades_{muestra} = 80 \quad \text{Ecuación 4.4}$$

$$m_{muestra} = m_{dinamita} * Unidades_{muestra} \quad \text{Ecuación 4.5}$$

$$m_{muestra} = 9.52 [kg] \quad \text{Ecuación 4.6}$$

Considerando que los componentes inertes conforman un 35 [%] de la composición de la dinamita, se multiplica por este valor a la masa calculada de muestra, adicionalmente, tomando en cuenta que el nitrato de amonio y el aserrín aportan con porcentajes de 85 [%] y 15 [%] respectivamente a la mezcla de componentes inertes, se deberá multiplicar estos porcentajes para obtener la cantidad mínima de nitrato de amonio y aserrín que deberán almacenar los silos a escala.

$$m_{muestra NH_4} = 2.83 [kg] \quad \text{Ecuación 4.7}$$

$$m_{muestra aserrín} = 0.50 [kg] \quad \text{Ecuación 4.8}$$

Con la finalidad de que el funcionamiento del sistema a fabricar, sea apreciable, se decidió usar una masa de 10 [kg] en el silo de nitrato de amonio y el equivalente proporcional para el aserrín con un valor 1.76 [kg] como mínimo.

Tabla 4.1 Masa a almacenar de los modelos a escala

Masa [kg]
$m_{NH_3} = 10 [kg]$
$m_{aserrín} \geq 1.76 [kg]$

Fuente: Elaboración propia

Con estos valores se procedió a realizar el mismo procedimiento para diseñar los dos silos de iguales dimensiones, detallado entre las Ecuaciones 3.1 hasta 3.8 obteniendo:

$$d_{modelo} = 0.17 [m] \quad \text{Ecuación 4.9}$$

$$h_{modelo} = 0.34 [m] \quad \text{Ecuación 4.10}$$

También se volvió a comprobar que la masa del aserrín sea mayor o igual que 1.76 [kg], obteniendo un resultado muy favorable como se muestra en la Ecuación 4.10.

$$m_{aserrín} = 2.46 [kg] \quad \text{Ecuación 4.11}$$

4.2.1.1.1 Sistema de fluidificación

El ensilaje presenta ciertos problemas en el flujo a la salida de la tolva con algunos materiales debido a diferentes causas como: baja densidad, alta cohesión entre las partículas de material, alto rozamiento con las paredes entre otras.

En el presente proyecto, el aserrín precisamente por ser un material de densidad baja y sus partículas al poseer la capacidad de adherirse unas con otras para formar grumos o agrupaciones, no permite un flujo normal y se atasca a la salida del silo, si bien es cierto el ángulo de la tolva fue calculado en laboratorio midiendo el ángulo de talud natural y el de rozamiento con el metal del silo, otras propiedades físicas que no se toman en cuenta en estos procedimientos ocasionan esta falta de flujo continuo.

Los diseñadores de silos han estudiado este problema en materiales como los ya descritos, y en consecuencia el mercado ofrece dispositivos conocidos como fluidificadores, que brindan una eficaz solución, existen varios tipos de estos mecanismos, los más usados son: sistemas de vibración magnética o neumática, o sistemas de ventilación.

En el caso del silo a escala de aserrín, se escogió la última de las opciones, ya que presenta una elevada sencillez, esto llevado a la práctica implica bajo coste y facilidad de montaje.

Pese a que los fluidificadores neumáticos de ventilación son una buena alternativa, como se puede observar en la información que los fabricantes de estos dispositivos muestran, en este caso específico se debe considerar un punto importante, el aserrín para dinamita debe tener una humedad menor al 3 [%], por lo que es necesario un sistema de secado de aire previo a la exposición del material.

Tomando esto en cuenta, se debe analizar otros factores de las demás alternativas de fluidificación. En el caso de vibradores magnéticos o los

mismos neumáticos, no presentan contacto con el aserrín, pero afectan al sistema principal de pesaje al añadir vibración por lo que se descarta la solución del uso de vibradores.

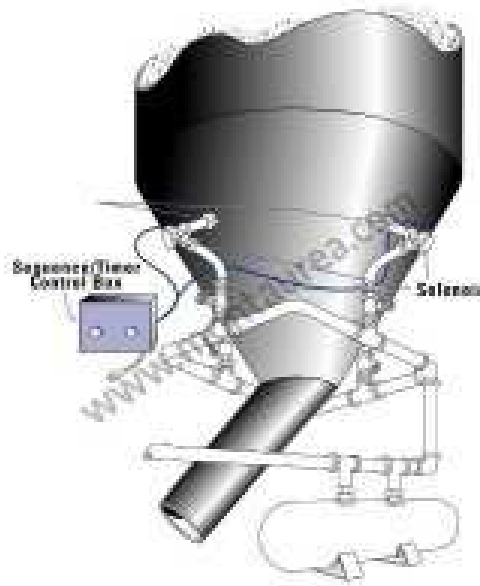


Figura 4.1 Fluidificador de alto rendimiento de la empresa Montàurea.

Fuente: Montàurea S.L. 2013. Recuperado de:
<http://montaurea.com/productos/fluidificadores-de-alto-rendimiento/>

Para el diseño de este sistema se necesita añadir una parte neumática simple. El consumo de aire requerido para esta aplicación es bajo. Dado que en la empresa se tiene una línea de aire comprimido en el edificio de formulación de dinamita, no es necesario calcular el compresor.

Es necesario controlar la activación del fluidificador, esto se lo realiza de forma fácil con una electroválvula 2/2, normalmente cerrada, activada por solenoide de 12 VDC y con retorno por muelle. La cual es muy recomendable para utilizar con aplicaciones de control que utilizan arduino por el voltaje de activación.

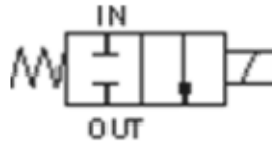


Figura 4.2 Símbolo de la válvula 2/2 NC utilizada.

Fuente: Sizto Tech Corporation 2013. STC 2P025 Series Solenoid Valve [Hoja técnica]. Recuperado de: www.StcValve.com

4.2.1.2 Sistema de Dosificación

4.2.1.2.1 Sistema de pesaje

Para este sistema se diseñaron los acoples entre los soportes de los silos y las celdas de carga. Los cuales permiten la deformación de la celda de carga debido al peso del material ensilado.

Se diseñó una base al piso como bastidor para colocar las celdas de carga mediante pernos. También el acople para transmitir la carga hacia el punto óptimo donde la celda de carga mide la deformación.

Para esto se dibujó mediante el software Solidworks las partes como se muestra en las figuras 4.1 y 4.2.

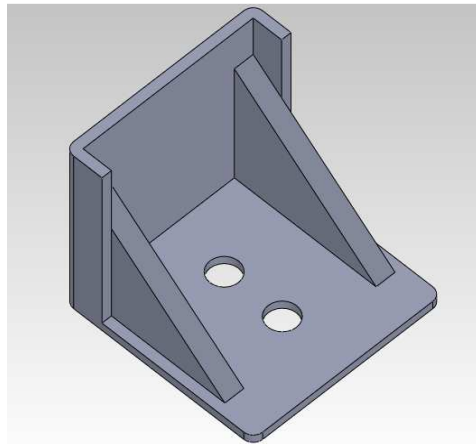


Figura 4.3 Acople entre los soportes y la celda de carga

Fuente: Elaboración Propia

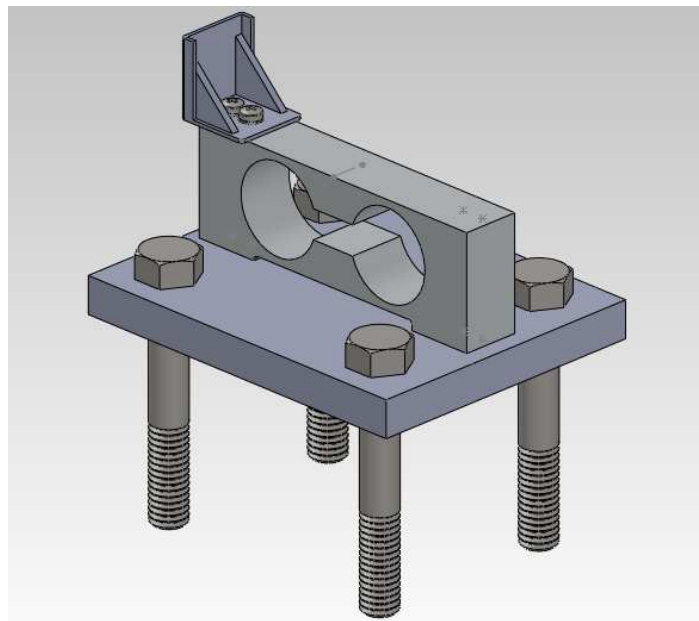


Figura 4.4 Ensamble del soporte diseñado para el modelo a escala

Fuente: Elaboración Propia

Se realizó un análisis aplicando la carga para poder evidenciar la deformación como se observa en la figura 4.3.

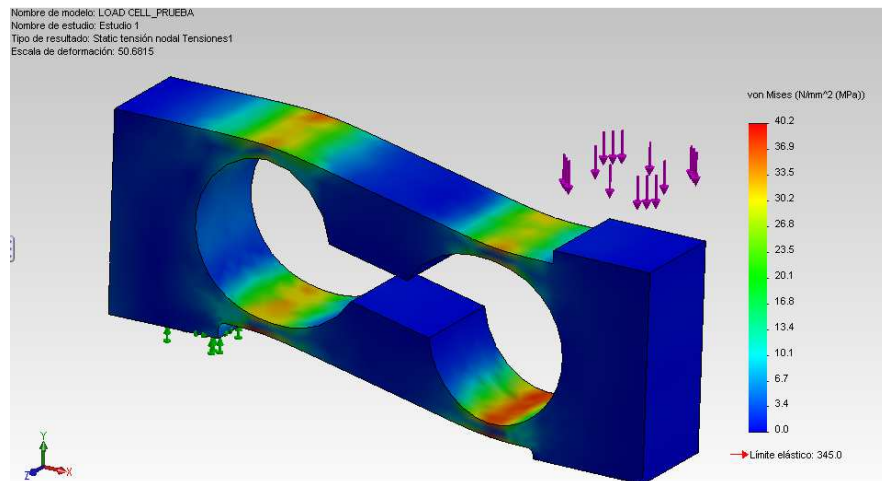


Figura 4.5 Simulación celda de carga del modelo a escala

Fuente: Elaboración propia

Se observa en la simulación claramente las zonas donde vienen colocadas las galgas extensiométricas en las celdas de carga adquiridas, debido a que son las que más se deformaron, el mayor esfuerzo indicado es de 40.2 [MPa]

4.2.1.2.2 Sistema de control de flujo

Se diseñó la compuerta de dosificación a escala para demostrar el funcionamiento de la compuerta seleccionada en el capítulo 3.

La apertura y cierre de la compuerta es controlada por un motor eléctrico a través de un tornillo de potencia. El diseño consta de un análisis de la velocidad requerida y el avance necesario para seleccionar el motor adecuado.

Considerando el tamaño de la compuerta a escala se eligió un perno de $\frac{1}{2}$ [pulg.] de diámetro por 3 [pulg.] de largo y rosca basta, para que trabaje como tornillo de potencia. Debido a que se necesita mover la compuerta en un rango de 4 [cm] para abrirla y cerrarla completamente el perno de 3 [pulg.] ó 7.62 [cm] de largo es el adecuado. Se modificó para que quede de 6.8 [cm] de largo, tomando en cuenta el espesor del rodamiento seleccionado que está ubicado en el extremo nos deja una carrera de 6 cm. Suficiente para el rango de apertura y cierre y dejando 1 cm a cada lado para evitar colisiones. Como se puede ver en la Figura 4.4

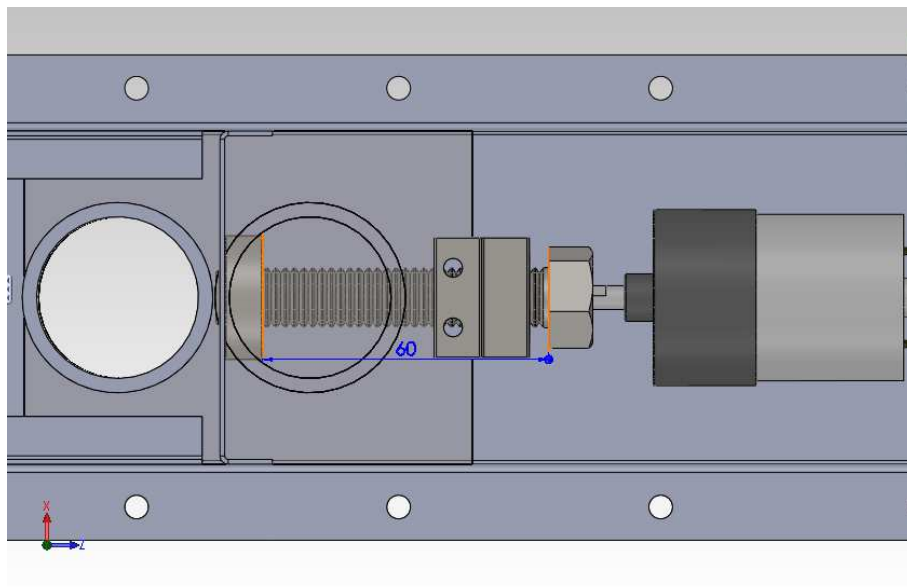


Figura 4.6 Rango del tornillo de potencia en la compuerta.

Fuente: Elaboración propia

Teniendo el alcance requerido y el tipo de rosca basta, que nos da 13 hilos por pulgada, calculamos la velocidad que debe tener el motor para lograr esta distancia en un tiempo planteado de 1 segundo.

Con esto seleccionamos el motor que alcance la velocidad requerida y tenga el torque necesario para mover la compuerta.

Para la construcción de la compuerta se dibujó las partes con el software Solidworks, como se puede ver en la figura 15, y figura 16. Las partes están unidas por medio de pernos y tornillos para que sean desmontables y tengan un fácil mantenimiento.

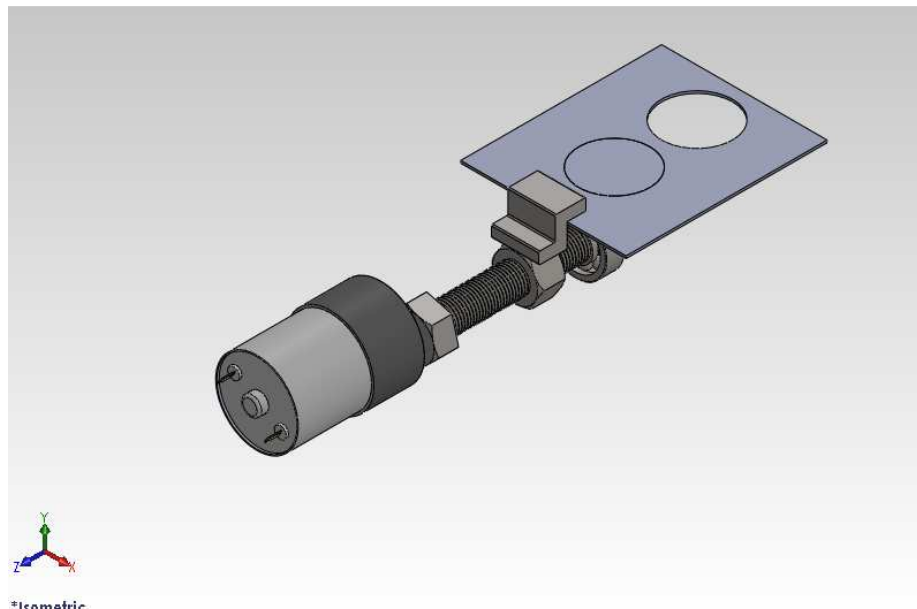


Figura 4.7 Mecanismo de tornillo de potencia acoplado al motor

Fuente: Elaboración propia

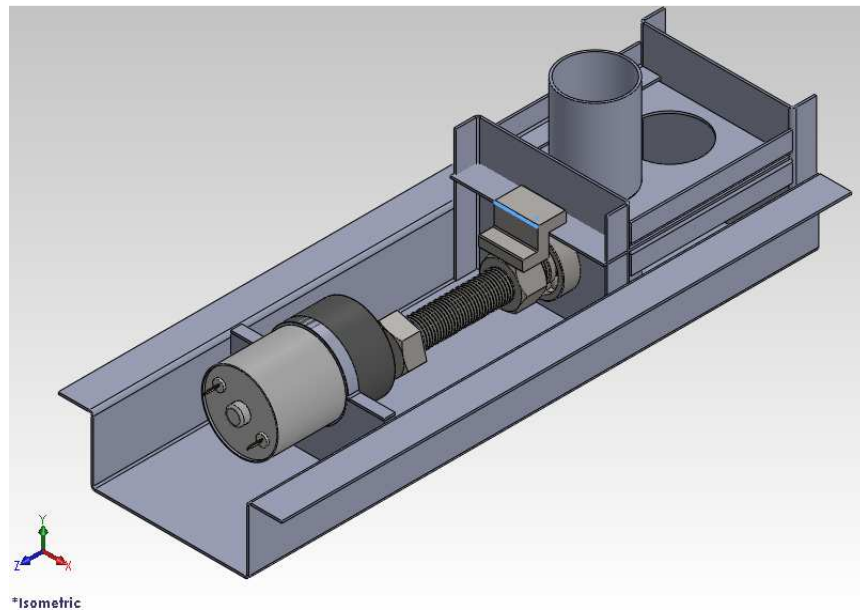


Figura 4.8 Caja para el mecanismo.

Fuente: Elaboración propia.

4.2.1.3 Adaptación del molino para el nitrato de amonio

El nitrato de amonio para ser utilizado en la formulación de la dinamita debe estar molido. La materia prima es distribuida y almacenada en forma de pequeñas esferas de 1 a 2 [mm] de diámetro, por lo que es imprescindible la etapa de molienda.

Para el caso del sistema a escala no se realizó el escalamiento de un mecanismo especializado, esto por la excesiva dificultad de construcción que representa en comparación a alternativas más viables y que cumplen con el objetivo de simular eficazmente la velocidad de flujo planteado, además de tener una ventaja significativa en cuanto al costo.

Para pequeñas cantidades los más comercializados son los molinos de platos, muy utilizados a nivel casero por ser capaces de procesar en poco tiempo diferentes tipos de granos, algunos incluso de dureza alta como es el caso del maíz seco, otra característica es su fácil automatización al ser factible la adaptación de motores eléctricos que oscilan entre el 1/2 y 1 [HP], finalmente son los molinos de menor costo que se puede encontrar en el mercado volviéndolos muy atractivos ante los consumidores.

No obstante, la adaptación de un motor, sumado a las características físicas del molino presenta ciertas desventajas para el proceso en desarrollo como son: elevado peso, mayor consumo de espacio y mayor consumo de energía. Por lo que se optó por una alternativa que no tiene estas desventajas, como es un molino para grano de café de escala pequeña.

El molino escogido al ser fabricado para el consumo humano, respeta ciertas características necesarias para el manejo de nitrato de amonio como son la resistencia a la oxidación y corrosión. Esto por ser fabricado de un polímero plástico no reactivo, el Polipropileno (PP). Además, en las características técnicas de este artefacto se indica que la velocidad de procesamiento es de 60 [kg/h], valor suficiente para el flujo requerido en el sistema a escala que es de 50 [kg/h]. Una característica importante es que el molino no está diseñado para uso continuo, pero el proceso en desarrollo tampoco es continuo, por lo que no se perjudican los tiempos de dosificación.



Figura 4.9 Molino para grano adaptado al modelo a escala.

Fuente: Coffeageek [Artículo] Recuperado de:
http://coffeageek.com/reviews/grinders/gaggia_mm

Son notables las ventajas de este molino hablando de consumo eléctrico, espacio y peso, pero el hecho de que el molino haya sido para café y no para nitrato de amonio, es un factor fundamental. El café presenta una dureza y resistencia a ser triturado mucho mayor que el nitrato de amonio, por lo que el molino trituraría este químico; esta hipótesis, fue puesta a prueba obteniéndose los resultados esperados, por lo que se procedió a la adaptación del mismo.

4.2.1.4 Sistema de Transporte

4.2.1.4.1 Tornillo sinfín

Para diseñar el tornillo sin fin a escala, la geometría se seleccionó de manera similar, pero varios de los factores de diseño, se obtuvieron por extrapolación debido a que las tablas, solamente dictan valores para el

diseño de mecanismos industriales reales y no transportadores de muestra pequeños.

El primer paso fue seleccionar el diámetro, para lo cual se necesita conocer el flujo volumétrico que pasará a través del tornillo. Para calcular esto, se tomo el volumen del material almacenado en el silo, y se dividió para 72, ya que es un modelo a escala de un silo que abastecerá a la planta durante tres turnos de ocho horas cada uno, además anteriormente se calculo que por hora se debería realizar el proceso en tres ocasiones; realizándose este ciclo 72 veces en 24 horas.

Una vez obtenido el volumen a transportar, se escogió el tiempo en el que debía hacerse esto con el criterio de la necesidad de observación del proceso, 10 [s] fue el valor tomado, para observar el control sobre las variables del sistema; el valor del flujo másico para el modelo a escala se muestra en la Ecuación 4.12.

$$F_m = 50.4 \text{ [kg/h]} \quad \text{Ecuación 4.12}$$

Finalmente se diseñó siguiendo los mismos pasos del Capítulo 3, pero varias de las tablas al no tener valores para modelos de pequeña escala fueron linealizadas obteniendo los valores por extrapolación; en el ANEXO C se muestran las ecuaciones linealizadas, mientras que los resultados se muestran a partir de la Ecuación 4.13.

$$D = 0.05[m] = 5 \text{ [cm]} \quad \text{Ecuación 4.13}$$

$$L = 0.5[m] \quad \text{Ecuación 4.14}$$

$$Paso = \frac{2}{3}D = 0.0333 [m] = 3.33 [cm] \quad \text{Ecuación 4.15}$$

$$N = 34.35[RPM] \quad \text{Ecuación 4.16}$$

$$Torque = 6.67[kg.cm] \quad \text{Ecuación 4.17}$$

$$Potencia_{TOTAL} = 2.4[W] \quad \text{Ecuación 4.18}$$

4.2.2 CONSTRUCCIÓN DE COMPONENTES DEL MODELO A ESCALA

A continuación se detalla la fabricación de los distintos elementos que conforman cada uno de los sistemas del modelo a escala. Se indican las características principales de los elementos como dimensiones y material utilizado.

4.2.2.1 Sistema de almacenamiento

4.2.2.1.1 Silos y soportes

Se realizó la construcción de los silos tomando todas las consideraciones realizadas en el diseño para el material, geometría y dimensiones

calculadas. El proceso de construcción es mediante las operaciones de rolado del metal y posteriormente soldadura del mismo.

- Material: acero inoxidable 304
- Geometría: silo de sección transversal circular, con los ángulos definidos para las tolvas de 45°.
- Dimensiones: Altura total del cilindro de 34 [cm] y diámetro de 17 [cm]

Los soportes que transmiten el peso hacia las celdas de carga se los fabricó utilizando platina de 1 1/4 x 3/16 [pulg.], con una longitud total de 784 [mm]. Esta longitud se calculó sumando las dimensiones de todos los componentes intermedios como se puede ver en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Cálculo de la dimensión de los soportes para el silo.

Dimensión soporte silo	
Descripción distancia	mm.
Hasta el silo	170
Acople boca silo a compuerta	90
Compuerta	68
Acople compuerta a entrada molino	82
Molino	250
Acople salida molino hasta sin fin	72
Espacio hasta celda de carga	52
Total	784

Fuente: Elaboración propia

La unión de estos soportes a las celdas de carga está hecha por 2 pernos M3 x 10 a los agujeros roscados propios de las celdas de carga.



Figura 4.10 Silos de acero inoxidable acoplado a los soportes por medio de soldadura.

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2.1.2 Sistema de Fluidificación

Para implementar la solución analizada en la etapa de diseño de un fluidificador por sistema de ventilación. Se perforó un orificio en la parte de la tolva del silo del diámetro de un racor tipo codo de $\frac{1}{4}$ de [pulg.]. El mismo que va sujetado por una tuerca un empaque O-Ring. A este racor va conectado la manguera de salida de la válvula seleccionada.



Figura 4.11 Implementación del fluidificador en la pared de la tolva.

Fuente: Elaboración propia.

Se realizó la instalación de la válvula dentro del proceso para que pueda ser controlada por la interfaz de arduino a través de uno de los puente H, con lo que se puede activar o desactivar de manera automática en el momento requerido por el proceso de dosificación..

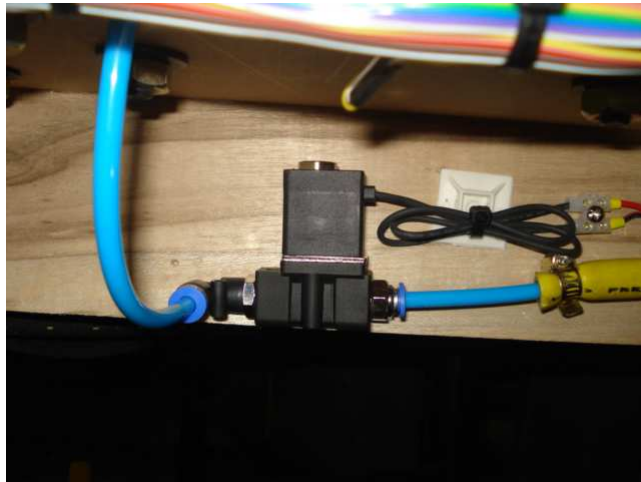


Figura 4.12 Instalación de la válvula STC 2P025

Fuente: Elaboración propia

4.2.2.2 Sistema de dosificación

4.2.2.2.1 Sistema de pesaje

Para este sistema se fabricó la base soporte donde descansa la celda de carga. Las dimensiones se tomaron de acuerdo a la celda de carga, la sujeción a la base principal de madera es por medio de 4 pernos M10 x 30.

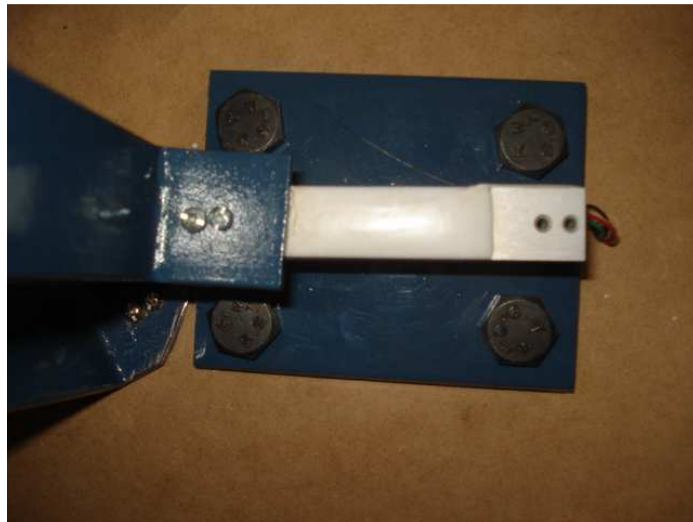


Figura 4.13 Base soporte ensamblada con celda de carga.

4.2.2.2.2 Sistema de control de flujo

Se fabricaron las partes de la compuerta de dosificación a escala para simular el funcionamiento de la compuerta real seleccionada en el capítulo 3.

Esta consta de 2 partes principales:

- La caja para los componentes la cual se realizó en lamina de tol negro (acero A36) de 0.9 [mm] de espesor. Está conformada por tapa superior e inferior las cuales conforman el bastidor a donde todo va

unido, tapas laterales, divisiones intermedias y guías para la cuchilla en forma de L.

Las tapas laterales, una vez ensamblada la compuerta, están selladas con silicona para evitar cualquier fuga del material.



Figura 4.14 Componentes de la caja de la compuerta dosificadora.

Fuente: Elaboración propia

- El mecanismo interno de la compuerta contiene los siguientes elementos:
 - Motor DC de 12V, 300 R.P.M. y 3 [kg-cm] de torque.
 - Acople del motor fabricado en duralon por proceso de torneado con los respectivos agujeros para la sujeción del motor.
 - Tornillo de $\frac{1}{2}$ [pulg.] de acero bajo en carbono de 3 [pulg.] de largo.

- Tuerca para el tornillo descrito, soldada con una platina doblada en forma de S para sostener la cuchilla.
- Rodamiento 6000 2RSC3.
- Alojamiento para el rodamiento fabricado en acero A36.
- Cuchilla o placa cuadrada de acero inoxidable 304 con orificio para el control de flujo.

La unión de la tapa superior e inferior está hecha con pernos M5 x 15. La unión de las tapas laterales a las tapas superior e inferior está hecha con tornillo autorroscante M3 x 15 de cabeza redondeada.

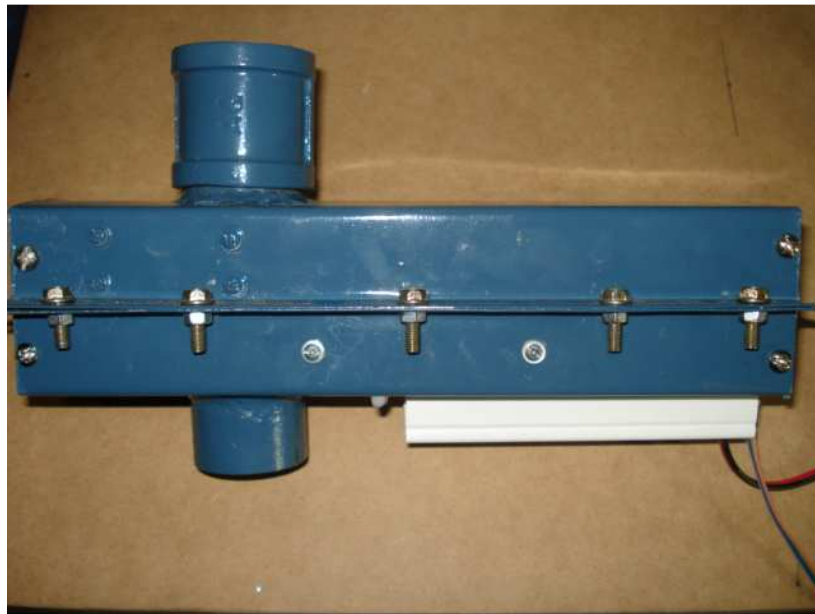


Figura 4.15 Compuerta ensamblada uniones con pernos.

Fuente: Elaboración propia.

Las divisiones intermedias son dos. La una sirve para sujetar el acople del motor a las tapas superior e inferior. La otra tiene soldado el alojamiento

del rodamiento, junto con el cual sirve de apoyo para el tornillo de potencia, además tiene una ranura que permite pasar a la cuchilla para el control de flujo. La unión de estas divisiones intermedias al bastidor, está hecha con perno, arandela plana y rosca M3 x 15. Además con el mismo tipo de perno se realizó la unión de las guías en forma de L a la tapa superior.



Figura 4.16 División intermedia unida por pernos al acople del motor.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 4.17 División intermedia col el alojamiento del rodamiento soldado.

Fuente: Elaboración propia.

La unión del acople de duralon con el motor está hecha con 6 pernos M3 x 15, los cuales van roscados en los agujeros propios que trae el motor para sujeción. Este acople de duralon también está unido a una de las divisiones intermedias con 2 pernos y arandelas planas M4 x 20 roscados en el duralon.



Figura 4.18 Acople del motor fabricado en duralon.

Fuente: Elaboración propia.

El tornillo de potencia está unido directamente al eje del motor mediante un prisionero colocado en la cabeza hexagonal del perno.

La unión de la cuchilla de acero inoxidable a la tuerca soldada con la platina en S, está hecha con perno, arandela plana y tuerca M4 x 15.

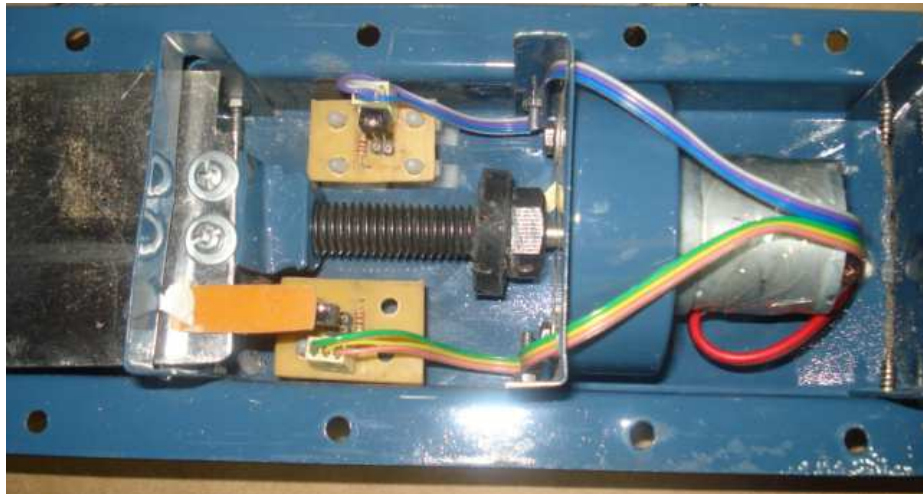


Figura 4.19 Interior de la compuerta de dosificación.

Fuente: Elaboración propia

4.2.2.2.3 Adaptación del molino para el nitrato de amonio.

Para ubicar el molino dentro del proceso fue necesario añadir ciertos elementos mecánicos. Detallados a continuación.

- Base para el molino.
- Acople para la entrada del material al molino.
- Tubo con rosca loca a la salida del molino.

Se diseñó una base de acuerdo a las dimensiones del molino, hecha de una placa de acero A36 de espesor 4 [mm]. La cual va soldada a dos soportes verticales hechos de platina de $1 \frac{1}{4} \times \frac{3}{16}$ [pulg.], que a su vez van soldados al tubo del tornillo sin fin del sistema de transporte detallado en el sistema de transporte. La unión de esta base al molino es mediante 2 pernos de presión y tuerca M5 x 30.



Figura 4.20 Base para el molino soldada al sistema de transporte.

Fuente: Elaboración propia.

Se fabricó el acople para la entrada del material al molino en duralon por proceso de torneado. La unión de esta pieza al molino está hecha con 2 pernos M3 x 40 a los agujeros roscados que posee el molino en la entrada.



Figura 4.21 Acople para la entrada del material al molino.

Fuente: Elaboración propia.

Se instaló un tubo de caucho a la salida para dirigir el material molido hacia abajo directamente al sistema de transporte. La unión de este tubo a la entrada del sistema de transporte está hecha por medio de una rosca de plástico. El sello a la salida del molino está hecho con silicona para evitar fugas del material molido.



Figura 4.22 Molino de grano adaptado para el nitrato de amonio.

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2.3 Sistema de transporte

Este sistema consta de los siguientes elementos:

- Tornillo sin fin.
- Tubo para el tornillo sin fin.
- Motor DC de 12 V, 80 R.P.M. y 12 kg-cm.de torque

- Acople para el motor hecho en duralon por proceso de torneado.
- Rodamiento 6001 2RSC3
- Alojamiento para el rodamiento, fabricado en acero A36 en donde entra a presión el rodamiento que sirve de apoyo al tornillo sin fin.
- Soportes verticales para sostener al tubo en la inclinación requerida de 30. Fabricados de platina de $1 \frac{1}{4} \times \frac{3}{16}$.

Se fabricaron los tornillos sin fin de acuerdo a las especificaciones de diseño descritas en la sección anterior. El material de los tornillos sin fin y el tubo es acero A36. El proceso de fabricación del tornillo sin fin es mediante la soldadura de arandelas cortadas y extendidas alrededor de un eje. Teniendo en cuenta el diámetro y paso indicado en el diseño. ´



Figura 4.23 Elementos del sistema de transporte.

Fuente: Elaboración propia.

El tubo del tornillo sin fin está soldado a un tubo roscado en la entrada y a un tubo liso en la salida. Además consta de dos placas pequeñas soldadas al tubo con agujeros roscados para la unión del acople del motor. También está soldado a 4 soportes verticales que lo sostienen.

La unión del acople del motor al motor está hecha con pernos M3 x 15 roscados directamente a los agujeros propios que tiene el motor para sujeción. El acople del motor también está unido al tubo del tornillo sin fin en las placas con agujeros roscados con pernos M6 x 30.



Figura 4.24 Motor DC acoplado al tornillo sin fin.

Fuente: Elaboración propia.

El eje del motor está unido directamente al tornillo sin fin por medio de un prisionero M6.

El alojamiento con su respectivo rodamiento están unidos al tubo del tornillo sin fin con 2 prisioneros M6.

Los soportes verticales están unidos a la base principal de madera con tornillos M3 autorroscantes.



Figura 4.25 Unión del sistema de transporte a la base principal.

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2.4 Uniones entre los sistemas

Para la unión de los tres sistemas se optó por utilizar tubos roscados y uniones con rosca interna de diámetro 1 ¼ [pulg.].



Figura 4.26 Unión con rosca interna.

Fuente: Elaboración propia.

Para la parte de unión del silo y la compuerta de dosificación, se soldó tubo roscado en la boca del silo y tubo roscado en la tapa superior de la compuerta de dosificación, los cuales se ensamblan con la unión de rosca interna.



Figura 4.27 Unión del silo con la compuerta.

Fuente: Elaboración propia.

Para poder realizar el pesaje del material dosificado correctamente necesitamos realizar una unión que no transmita el peso hacia los soportes del sistema de transporte y solamente distribuya el peso del material ensilado hacia los soportes que están acoplados a las celdas de carga. Por esto utilizamos manguera de caucho de 1 ½ [pulg.] con abrazadera de metal para unir la parte de la tapa inferior de la compuerta, en la cual se soldó un tubo liso, con el acople de duralon en la entrada del molino para el sistema de nitrato de amonio.

A la salida del molino tenemos la unión de la manguera con rosca de plástico a la entrada del sistema de transporte.



Figura 4.28 Unión de la salida del molino a la entrada del sistema de transporte.

Fuente: Elaboración propia.

Para el sistema de aserrín la unión con manguera de caucho va desde el tubo liso soldado en la compuerta hasta un tubo roscado, el cual a su vez está unido al tubo roscado de la entrada del sistema de transporte por medio de la unión con rosca interna.

Como bastidor para todo el sistema se fabricó una base de madera con dimensiones 1 [m] x 0.9 [m] x 0,20 [m]. Similar a una caja sin tapa con refuerzos laterales. Esto permite ocultar todo el cableado por debajo hasta la caja de control y potencia.

4.3 MONTAJE DEL SISTEMA ELÉCTRICO/ELECTRÓNICO Y DE CONTROL

La parte de electrónica y la de control se mantienen como la del sistema real utilizando los mismos elementos y software, esto dado que los

componentes utilizados permiten la facilidad de ser adaptados a los dos sistemas.

4.3.1 VARIACIONES DEL DISEÑO CON RESPECTO AL SISTEMA REAL

Para el sistema a escala, se calculó la potencia de los motores al realizar el diseño de los componentes a escala. En las compuertas se siguió el mismo procedimiento para el sistema real como para el sistema escala.

Tabla 4.3 Motores seleccionados para las compuertas

	Compuerta NH₄NO₃	Compuerta Aserrín
Potencia [W]	3.6	3.6
Velocidad [RPM]	300	300
Torque [kg * cm]	3	3

Fuente: Elaboración propia.

Para los sistemas de transporte se eligió utilizar motores DC con encoder para implementar un indicador de la velocidad de los mismos. Lo que permite mantener un control del funcionamiento correcto de los sistemas. Dados los factores de diseño considerados anteriormente los motores DC seleccionados son de bajas RPM y alto torque. En la tabla 4.4 tenemos las características para el sistema escala.

Tabla 4.4 Motores para los sistemas de transporte

	Tornillo sin fin NH₄NO₃	Tornillo sin fin Aserrín
Potencia [W]	6	6
Velocidad [RPM]	80	80
Torque [kg * cm]	8	8

Fuente: Elaboración propia.

4.3.2 CONEXIÓN Y CABLEADO DE ELEMENTOS

Para facilitar la ubicación y conexionado de los distintos elementos y placas electrónicas, se utilizó una caja de metal que sirve como panel o tablero de control. En esta se encuentran distribuidos todos los elementos y placas electrónicas descritas en el capítulo 3.

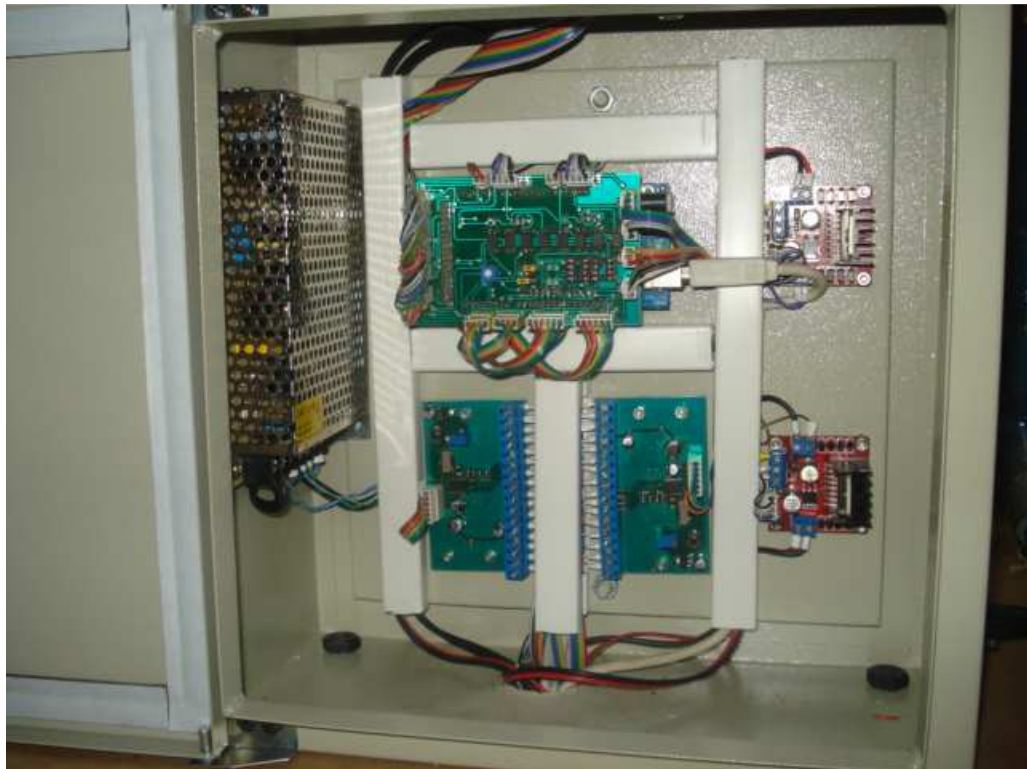


Figura 4.29 Distribución de placas electrónicas dentro del tablero de control y potencia.

Fuente: Elaboración propia.

También se utilizó una caja de menor tamaño unida a la caja principal de control y potencia, por medio de un tubo con dos placas soldadas de acero A36 con cuatro pernos de $\frac{1}{4}$ de [pulg.] para la sujeción entre ellas. Esta caja

sirve como panel indicador y contiene el display GLCD y los botones principales de arranque del sistema.



Figura 4.30 Panel indicador con pantalla GLCD y botones para el encendido principal del sistema.

Fuente: Elaboración propia.

El conexionado y cableado de todos los elementos se realizó mediante canaleta en las partes visibles del sistema de forma que sea dirigido hacia la base principal de madera y pase por debajo de la base hacia el tablero de control y potencia.

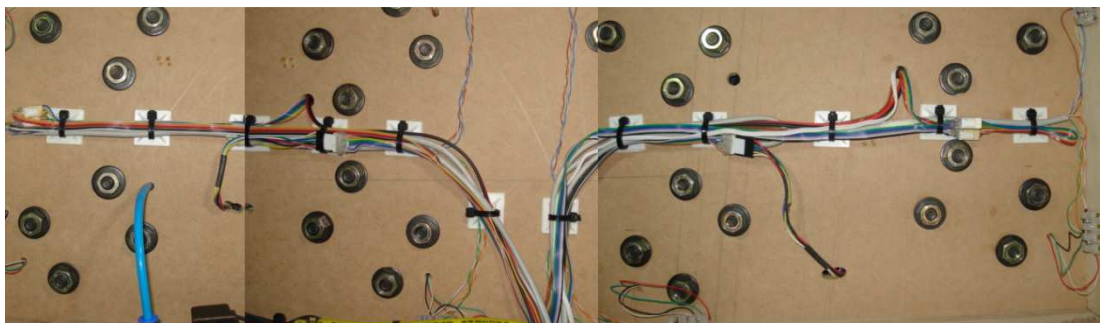


Figura 4.31 Foto panorámica del conexionado interno en la base principal.

Fuente: Elaboración propia.

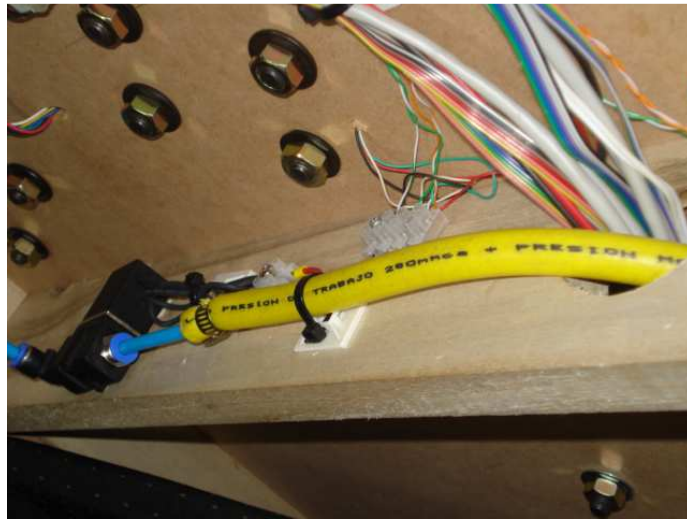


Figura 4.32 Conexión neumática y eléctrico/electrónico.

Fuente: Elaboración propia.

4.4 PRUEBAS

Una vez terminada la construcción y ensamblado del modelo a escala se procede a realizar las pruebas para verificar el correcto funcionamiento del sistema según los objetivos planteados.

- Porcentaje de error en la dosificación menor al 3%.
- Reducción del tiempo de proceso en la etapa de formulación previo a la mezcla de materiales inertes.
- Reducción de la cantidad de polvo durante la formulación.

Las variables que sirven de indicadores para evaluar el funcionamiento del sistema son:

- Peso dosificado.
- Tiempo de dosificación.

Mediante estos indicadores se puede realizar una evaluación cuantitativa, así como cualitativa del modelo a escala.

4.4.1 ESQUEMA Y METODOLOGÍA PARA LAS PRUEBAS.

Se realizarán 5 pruebas para 4 distintas cantidades de material. Tanto en el silo de nitrato de amonio como en el silo de aserrín. Los materiales a utilizarse son los que utiliza la empresa para la producción de dinamita. Aserrín molido y secado a menos del 3% de humedad y nitrato de amonio en forma de esferas como se utiliza previo a la etapa de molienda, los cuales nos facilitó la empresa.

Cabe recalcar que el material utilizado en las pruebas no puede ser reutilizado para la producción y debe ser desechado.

Para verificar el funcionamiento del sistema se debe comparar la cantidad requerida por el operario con la cantidad de material a la salida del sistema. Para esto se utilizó una balanza electrónica de precisión que permite medir la cantidad de material después del proceso.

El procedimiento a seguir para las pruebas es el siguiente:

1. Llenar el silo del material (aserrín o nitrato de amonio según sea el caso).
2. Seleccionar el modo automático de funcionamiento.
3. Asignar el peso a dosificar en la interfaz HMI.

4. Registrar el tiempo hasta que el material llegue a la salida del sistema de transporte.
5. Registrar el tiempo que tarda en salir el material.
6. Recolectar el material en el recipiente de control.
7. Verificar la cantidad de material después del proceso mediante la balanza electrónica de control.
8. Evaluar la cantidad de polvo en el ambiente después de la prueba cualitativamente.

Una vez terminadas las pruebas se procede a tabular los datos y realizar los cálculos de error para obtener los resultados y el análisis de los mismos.

Tabla 4.5 Tabulación datos pruebas nitrato de amonio

Cantidad de material dosificado[g]								
Cant. de material requerido [g]	P1	P2	P3	P4	P5	Promedio Pruebas	Desviación Estándar Pruebas	Error [%]
500	503	502	494	497	502	500	4	0.83
1000	1010	994	986	1010	983	997	13	1.31
1500	1492	1516	1480	1496	1515	1500	16	1.04
2000	1962	2029	2033	2034	2037	2019	32	1.61

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.6 Tabulación datos pruebas aserrín

Cantidad de material dosificado[g]								
Cant. de material requerido [g]	P1	P2	P3	P4	P5	Promedio Pruebas	Desviación Estándar Pruebas	Error Porcent. [%]
250	244	258	254	245	251	251	6	2.33
500	493	484	484	498	507	493	10	1.96
750	758	769	722	767	743	752	20	2.60
1000	1003	1022	1033	971	998	1005	24	2.40

Fuente: Elaboración propia.

Las tablas de medición de masa de los dos materiales, reflejan tanto similitudes como diferencias, entre las similitudes, podemos apreciar que en ningún caso las mediciones presentan error del 0 [%], una de las razones por las que sucede esto es que ambos materiales despiden polvo a la salida y al receptor el material en un recipiente abierto éste se levanta al aire perdiéndose una cantidad de material, otra razón es la vibración que generan los motores, si bien el filtrado en las celdas de carga es bueno, son muy susceptibles a la vibración, y debido a que las estructuras son altas y de patas delgadas, este problema se transmite directamente a las celdas.

Entre las diferencias, podemos ver que el error porcentual el Aserrín es mayor, esto debido a que las pruebas con Aserrín están hechas con masas menores que las de Nitrato y también debido a la compactación natural debido a las propiedades físicas de éste.

Tabla 4.7 Tabulación tiempo de dosificación, proceso y cantidad de polvo en el ambiente para 500 [g] de nitrato de amonio.

Nitrato 500 [g]	Tiempo de Proceso [s]	Tiempo de dosif. [s]	Promedio y Desviación Tiempo de Proceso [s]	Promedio y Desviación Tiempo de Dosificación [s]	Cantidad de polvo en el ambiente
Prueba 1	28.75	11.46	27 ± 2	11 ± 1	0
Prueba 2	24.18	11.11	Error Porcentual [%]	Error Porcentual [%]	0
Prueba 3	28.07	12.49			0
Prueba 4	28.36	10.39			1
Prueba 5	25.10	10.33	7.79	7.96	1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.8 Tabulación tiempo de dosificación, proceso y cantidad de polvo en el ambiente para 1000 [g] de nitrato de amonio.

Nitrato 1000 [g]	Tiempo de Proceso	Tiempo de dosif. [s]	Promedio y Desviación Tiempo de Proceso [s]	Promedio y Desviación Tiempo de Dosificación [s]	Cantidad de polvo en el ambiente
Prueba 1	26.33	22.29	26 ± 1	22 ± 1	1
Prueba 2	26.95	21.06	Error Porcentual [%]	Error Porcentual [%]	0
Prueba 3	24.43	22.33			0
Prueba 4	25.84	22.43			0
Prueba 5	27.22	21.75	4.22	2.62	0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.9 Tabulación tiempo de dosificación, proceso y cantidad de polvo en el ambiente para 1500 [g] de nitrato de amonio.

Nitrato 1500 [g]	Tiempo de Proceso [s]	Tiempo de dosif. [s]	Promedio y Desviación Tiempo de Proceso [s]	Promedio y Desviación Tiempo de Dosificación [s]	Cantidad de polvo en el ambiente
Prueba 1	28.36	31.49	25 ± 2	31 ± 1	1
Prueba 2	24.90	30.21	Error Porcentual [%]	Error Porcentual [%]	1
Prueba 3	24.39	30.80			1
Prueba 4	25.69	31.61			1
Prueba 5	24.14	32.39	6.70	2.66	1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.10 Tabulación tiempo de dosificación, proceso y cantidad de polvo en el ambiente para 2000 [g] de nitrato de amonio.

Nitrato 2000 [g]	Tiempo de Proceso [s]	Tiempo de dosif. [s]	Promedio y Desviación Tiempo de Proceso [s]	Promedio y Desviación Tiempo de Dosificación [s]	Cantidad de polvo en el ambiente
Prueba 1	25.70	42.08	26 ± 1	41 ± 1	0
Prueba 2	25.60	40.49	Error Porcentual [%]	Error Porcentual [%]	1
Prueba 3	24.71	41.55			1
Prueba 4	27.38	40.87			0
Prueba 5	27.54	41.17	4.69	1.50	0

Fuente: Elaboración propia.

Del paso desde la salida de la compuerta hasta que empieza a salir del transportador de Nitrato se puede decir que se realiza al mismo tiempo para cualquier masa que se seleccione, esto se debe a que el tiempo que retarda

el Molino aunque apreciable, es mínimo porque el nitrato de amonio es un material blando y se puede triturar rápidamente, adicional a esto, el flujo a través del molino es constante; la variación existe en el tiempo desde que los primeros gramos de nitrato de amonio llegan a la salida del transportador hasta que éste acaba de dosificar, esto es precisamente lo que se esperaba, porque no solamente aumenta el tiempo de dosificación al aumentar la masa, sino que es proporcional a ésta.

Tabla 4.11 Tabulación tiempo de dosificación, proceso y cantidad de polvo en el ambiente para 250 [g] de aserrín.

Aserrín 250 [g]	Tiempo de proceso [s]	Tiempo de dosif. [s]	Promedio y Desviación Tiempo de Proceso [s]	Promedio y Desviación Tiempo de Dosificación [s]	Cantidad de polvo en el ambiente
Prueba 1	24.32	21.82	24 ± 1	18 ± 3	1
Prueba 2	23.11	16.48	Error Porcentual [%]	Error Porcentual [%]	1
Prueba 3	25.48	20.00			1
Prueba 4	23.79	15.18			2
Prueba 5	22.35	16.45	5.00	15.55	1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.12 Tabulación tiempo de dosificación, proceso y cantidad de polvo en el ambiente para 2000 [g] de aserrín.

Aserrín 500 [g]	Tiempo de Proceso [s]	Tiempo de dosif. [s]	Promedio y Desviación Tiempo de Proceso [s]	Promedio y Desviación Tiempo de Dosificación [s]	Cantidad de polvo en el ambiente
Prueba 1	25.70	38.95	25 ± 3	33 ± 4	2
Prueba 2	26.72	30.96	Error Porcentual [%]	Error Porcentual [%]	1
Prueba 3	21.38	30.52			2
Prueba 4	26.84	31.83	10.86	11.06	1
Prueba 5	21.90	30.60			2

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.13 Tabulación tiempo de dosificación, proceso y cantidad de polvo en el ambiente para 2000 [g] de nitrato de amonio.

Aserrín 750 [g]	Tiempo de Proceso [s]	Tiempo de dosificación [s]	Promedio y Desviación Tiempo de Proceso [s]	Promedio y Desviación Tiempo de Dosificación [s]	Cantidad de polvo en el ambiente
Prueba 1	22.25	46.64	25 ± 3	47 ± 2	2
Prueba 2	26.23	47.88	Error Porcentual [%]	Error Porcentual [%]	1
Prueba 3	21.71	49.77			2
Prueba 4	27.46	45.65	10.30	3.43	2
Prueba 5	25.68	46.35			1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.14 Tabulación tiempo de dosificación, proceso y cantidad de polvo en el ambiente para 2000 [g] de nitrato de amonio.

Aserrín 1000 [g]	Tiempo de Proceso [s]	Tiempo de dosificación [s]	Promedio y Desviación Tiempo de Proceso [s]	Promedio y Desviación Tiempo de Dosificación [s]	Cantidad de polvo en el ambiente
Prueba 1	22.84	60.19	22 ± 3	61 ± 5	2
Prueba 2	24.43	58.34	Error Porcentual [%]	Error Porcentual [%]	2
Prueba 3	18.35	55.22			2
Prueba 4	19.44	68.14			1
Prueba 5	25.46	63.07	14.02	8.03	3

Fuente: Elaboración propia.

En el aserrín se puede apreciar algo similar al Nitrato de Amonio, el tiempo desde la compuerta hasta la salida del sistema de los primeros gramos es constante, sin embargo es menor al aserrín, esto es debido a que la densidad del aserrín es menor que la del nitrato, y además como se dijo el molino no afecta en demasía, sin embargo al compararlo con el aserrín si existe una diferencia.

La principal diferencia está en el tiempo de dosificación. El tiempo de dosificación en el sistema de Aserrín también es proporcional a la masa que se ordena extraer, la diferencia está en que el flujo másico es menor al del Nitrato, esto es por la diferencia de densidad, y porque el flujo de aserrín no es constante a la salida de la tolva por necesitar un fluidificador, esto también se puede apreciar en la desviación estándar de las mediciones del

tiempo de dosificación, ya que llega a los ± 5 [s] con un error del 8 [%] con respecto al promedio.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS ECONÓMICO

5.1 PRESUPUESTO GENERAL

El objetivo del proyecto es que la empresa verifique el funcionamiento y analice la factibilidad de implementar el proyecto a escala real. Para esto es necesario realizar un presupuesto estimado del costo que requiere la implementación del sistema. Así como también es necesario realizar el resumen del costo que requirió la fabricación de este modelo a escala.

Para realizar el presupuesto estimado del costo se contacto con las empresas de los elementos seleccionados en la parte real y se realizó el requerimiento de proformas. Para los elementos que necesiten fabricarse se realiza un estimado basado en los precios del mercado.

En la tabla a continuación podemos ver el detalle de los costos para el sistema real.

5.1.1 COSTO REAL DE IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

Detalle del presupuesto para la implementación del sistema real			
Descripción	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Fabricación de silo de almacenamiento para el nitrato de amonio para 3 [Ton.] en acero inoxidable 304	1	2500	2500
Fabricación de silo de almacenamiento para aserrín en acero A36	1	1000	1000
Estructura y soportes para los silos en acero A36	2	400	800
Compuerta de dosificación tipo Roller Gate de la serie Quantum, con actuador eléctrico motor DC y finales de carrera	2	5000	10000
Acoples para instalar la compuerta con cambio de sección de circular a rectangular	4	100	400
Molino industrial de martillos adaptado al sistema para la parte del nitrato de amonio en acero inoxidable 304	1	5000	5000
Kit de montaje ISOFLEX de la empresa SCAIME para la celda de carga	8	1000	8000
Celda de carga SK30X con capacidad de 1500 [kg] de la empresa SCAIME	8	400	3200
Tornillo sin fin y cubierta con los parámetros de diseño en acero inoxidable para el nitrato de amonio	1	1000	1000
Tornillo sin fin y cubierta con los parámetros de diseño en acero A36 para el aserrín	1	300	300
Motores AC de 0.5 HP diseñados con caja de reducción para los tornillos sin fin	2	300	600
Estructura de soporte para los tornillos sin fin.	2	200	400
Manguera Acople rápido para la unión de la compuerta con el molino	2	50	100

Cableado, conexionado y armado de tablero de control con los elementos necesarios	1	1000	1000
Placas electrónicas para la adquisición de señales de las celdas de carga.	5	80	400
Módulo arduino para el procesamiento de señales	2	100	200
Obra civil para el adecuamiento de todo el sistema en el edificio de formulación	1	15000	15000
Instalación de etapa neumática para el sistema de fluidificación, conexionado, válvulas y elementos de acople.	1	800	800
Licencia de software Microsoft Visual Basic para industria	1	2000	2000
Diseño e implementación de interfaz HMI	1	800	800
Accesorios y pintura	1	2000	2000
Mano de obra, programación calibración y puesta a punto del sistema	1	30000	30000
		Total	85500

Fuente: Elaboración propia.

5.1.2 COSTO DE FABRICACIÓN DEL MODELO A ESCALA

Detalle del presupuesto para la implementación del sistema real			
Descripción	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Fabricación de silo de almacenamiento para el nitrato de amonio y para el aserrín en acero inoxidable 304	2	90	180
Estructura y soportes para los silos en acero A36	2	40	80
Compuerta dosificadora, caja, accesorios, motores y sensores	2	100	200
Molino de grano	1	280	280
Celda de carga de aluminio de 50 [kg]	8	15	120

Tornillo sin fin y cubierta con los parámetros de diseño	2	60	120
Motores DC Encoder de efecto Hall	2	160	320
Estructura de soporte para los tornillos sin fin.	2	10	20
Manguera de caucho con abrazaderas	1	5	5
Cableado, conexión y armado de tablero de control con los elementos necesarios	1	280	280
Placas electrónicas	3	30	90
Módulo arduino para el procesamiento de señales	1	60	60
Base principal de madera para el proyecto	1	25	25
Instalación de etapa neumática para el sistema de fluidificación, conexión, válvulas y elementos de acople.	1	40	40
Accesorios, mecanizado de piezas y pintura	1	280	280
Gastos varios	1	100	100
		Total	2200

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- La automatización de un proceso industrial, siempre conlleva cambios positivos para la empresa, en nuestro caso no se puede apreciar esto en la planta real, pero el modelo a escala nos brinda expectativas muy alentadoras y consideraciones importantes obtenidas a través del proceso de experimentación y construcción.
- Con respecto a la precisión en la formulación es clara la diferencia, en el proceso real, la diferencia puede llegar a ser de 1 [kg], mientras que en el proyecto realizado es de 20 [g] cuando es mayor, esto nos permite decir que al construir este sistema a escala real, la diferencia será bastante menor al 1[kg], pero va a depender de la calidad de las celdas y de la instrumentación implementada para la medición.
- La calidad de la medición de las celdas es crucial. Ésta es la principal razón de los errores en el presente proyecto; el sistema debe ser inmune a la vibración ya que esta afecta la lectura de la masa, además debe tener un filtrado adecuado de señales para lograr lecturas confiables.

- Debido a que se escaló geoméricamente el transportador y se extrapoló las tablas del procedimiento para diseñar tornillos sin-fin del catálogo de Martin Sprocket, los resultados no son 100 [%] iguales a los que se calculó, sin embargo tienen una muy buena aproximación por lo que las consideraciones tomadas previas a los cálculos fueron acertadas.
- Utilizar el módulo de Arduino como parte central en el control dio excelentes resultados. La simplicidad en la programación y en la implementación de las conexiones facilitó mucho el desarrollo de la parte electrónica en la cual no hubo mayores problemas.
- El sello en los dosificadores es importante, sobre todo en el aserrín, ya que es el único elemento del sistema por el que podría fugar material y contaminar el ambiente de trabajo.
- En este proyecto, la medición de la apertura de de las compuertas se realizó indirectamente a través del flujo del material, pero se podría obtener un mejor control en la compuerta si se dispusiera de un preciso sistema de medida con sensores de tipo óptico o ultrasónico proporcionales a la distancia.
- El ambiente de trabajo mejora notablemente al realizarse el proceso de manera cerrada, porque evita que se volatilicen el aserrín y el

nitrate molido, las pérdidas también son reducidas notablemente de esta manera.

- Las proyecciones de tiempos de proceso en caso de realizarse a escala real, sí se cumplirían totalmente, El modelo a escala, muestra que el sistema automático diseñado es bastante ventajoso comparado con el proceso actual de fabricación.

6.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda que el sistema de pesaje sea implementado con elementos de la mejor calidad, tanto sensores como instrumentos de medición y comunicación para que las lecturas sean clara y libres de ruido, ya que la formulación de estos compuestos es importantes para mantener una buena calidad y repetitividad en las propiedades explosivas del producto final.
- El sistema de Nitrato de Amonio, debe ser construido en su totalidad de Acero Inoxidable, ya que este compuesto químico es bastante corrosivo, abrasivo y apelmazante.
- Se debe utilizar aire seco para fluidificar la tolva de aserrín, ya que el aire normal al contener un porcentaje de agua en forma de vapor, eleva la humedad del aserrín antes de salir del silo, cambiando sus

propiedades y dejando de ser óptimas para la fabricación de explosivos. Existen fluidificadores que no requieren contacto de aire con el material, como son los de vibración magnética.

- Es importante mantener la temperatura de molienda del Nitrato de Amonio lo más baja que se pueda, debido a que a altas temperaturas es inflamable y tiene un pequeño grado explosivo, por ésta razón se recomienda usar un molino de martillos que es el que mejor se ajusta a esta consideración.
- Debido a las condiciones climatológicas de la ubicación de la fábrica, de ser necesario, la planta real, deberá tener un control para regular la temperatura de los silos.
- Debido a la altura de los silos, se pueden utilizar bombas neumáticas para material a granel, para el llenado de estos, ya que es una solución económica para este tipo de problema.

BIBLIOGRAFÍA

Bolton, W. (2005). *Mecatrónica* (2da ed.).

Bühler AG. (2012). Recuperado el Noviembre de 2012, de <http://www.buhlergroup.com/europe/es/productos/silos-de-acero.htm>

Omega. (Diciembre de 2012). *Engineering technical reference: Omega*. Recuperado el Diciembre de 2012, de <http://www.omega.com/prodinfo/LoadCells.html>

Phokion, N. P. (1998). *Nitroglycerine and Nitroglycerine Explosives*. Baltimore: ANGRIF PRESS.

Ravenet. (1977). *Silos*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados.

Santillán, J. C. (2008). *Criterios para el diseño de una cinta transportadora*. Obtenido de <http://www.monografias.com/trabajos58/disenocintas-transportadoras/disenocintas-transportadoras2.shtml>

Tecnoembalaje Ltda. (2009). Recuperado el Diciembre de 2012, de http://www.tecnoembalaje.com/newsite/index.php?option=com_k2&view=item&layout=item&id=48&Itemid=25

UDLAP. (Junio de 2012). Recuperado el Diciembre de 2012, de http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/tron_p_b/capitulo_2.pdf

Universidad Nacional del Sur "Bahía Blanca". (2012). Recuperado el Diciembre de 2012, de <http://www.criba.edu.ar/cinetica/solidos/Capitulo12.pdf>

Vortex. (Diciembre de 2012). *Valves: Vortex*. Recuperado el Diciembre de 2012, de <http://www.vortexvalves.es/iris/iris.php>

Wikipedia. (Diciembre de 2012). *Tornillo de Arquímedes: Wikipedia*. Recuperado el Diciembre de 2012, de http://es.wikipedia.org/wiki/Tornillo_de_Arqu%C3%ADmedes