



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN  
Y CONTROL**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y  
CONTROL**

**TEMA: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA  
AUTOMATIZADO PARA EL PROCESO DE PESAJE Y MOLIENDA DE  
MATERIA PRIMA EN LA PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS  
BALANCEADOS**

**AUTOR: ESMERALDAS HUACHI, YOMARA FERNANDA**

**DIRECTOR: ING. AYALA TACO, JAIME PAÚL, PhD**

**SANGOLQUÍ**

**2019**



# ESPE

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**  
**INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y  
CONTROL

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO PARA EL PROCESO DE PESAJE Y MOLIENDA DE MATERIA PRIMA EN LA PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS BALANCEADOS”, fue realizado por la señorita Esmeraldas Huachi Yomara Fernanda, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 17 de Julio de 2019

A blue ink handwritten signature, appearing to be 'Jaime Paúl', written over a horizontal line.

DIRECTOR

ING. AYALA TACO, JAIME PAÚL, PhD



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y  
CONTROL

## AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, Esmeraldas Huachi Yomara Fernanda, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO PARA EL PROCESO DE PESAJE Y MOLIENDA DE MATERIA PRIMA EN LA PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS BALANCEADOS", es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 17 de Julio de 2019

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Esmeraldas Huachi Yomara Fernanda', written over a horizontal line.

Esmeraldas Huachi Yomara Fernanda  
C.C: 2101189260



# ESPE

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**  
**INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y  
CONTROL

## AUTORIZACIÓN

Yo, Esmeraldas Huachi Yomara Fernanda autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO PARA EL PROCESO DE PESAJE Y MOLIENDA DE MATERIA PRIMA EN LA PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS BALANCEADOS", en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 17 de Julio de 2019

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Esmeraldas Huachi Yomara Fernanda', written over a horizontal line.

Esmeraldas Huachi Yomara Fernanda  
C.C: 2101189260

## *Dedicatoria*

*A mi madre, quien con su esfuerzo  
y dedicación supo guiarme  
por el sendero del éxito.*

*A mi padre quien me impartió  
enseñanzas desde muy pequeña.*

*A mis hermanos Freddy, Stalin y Yahir,  
quienes son mi motivación para  
superarme día a día.*

*A mis amigos por permitirme  
compartir momentos que se  
guardan en el corazón,  
por su cariño brindado  
y por todo el apoyo.*

## *Agradecimiento*

Quiero expresar mi gratitud a mi madre por el apoyo incondicional en el transcurso de mi preparación profesional y personal.

Mi sincero agradecimiento al ingeniero y amigo Xavier Bravo por extenderme la mano para formar parte como pasante y posteriormente como tesista de Aligransuc, por sus consejos y experiencias compartidas. A todo el personal de la empresa quienes permitieron llevar a cabo el proyecto de titulación con excelentes resultados.

También, agradezco de corazón a mi gran amigo Cesar Zúñiga, quien al igual que mi familia me brindó su apoyo en esta etapa universitaria y me sostuvo en momentos difíciles. A todos mis amigos de la universidad especialmente a Dianita Herrera y a su familia, quienes me permitieron compartir en su hogar. A Dianita Camacho, Mishell Bisarrea, Stefany Camino por escucharme, apoyarme, por todo el cariño y amistad sincera.

Agradezco a mi tutor, el Ing. Paúl Ayala, PhD, por el apoyo para el desarrollo de este proyecto, por la orientación y valiosos consejos.

Finalmente, expreso mi gratitud a la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE y a los docentes quienes me impartieron sus conocimientos para desarrollarme como profesional. Aunque el camino no ha sido fácil, puedo decir que he cumplido una de mis más grandes metas de vida.

Yomara Esmeraldas

# ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>CERTIFICADO DEL DIRECTOR</b> .....	<b>i</b>
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD</b> .....	<b>ii</b>
<b>AUTORIZACIÓN</b> .....	<b>iii</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>iv</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>v</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>xvi</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>xviii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xix</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>xx</b>

<b>1</b>	<b>Estado del Arte</b>	<b>1</b>
1.1	Introducción . . . . .	1
1.2	Producción de alimentos balanceados . . . . .	3
1.2.1	Clasificación de alimentos balanceados . . . . .	3
1.2.2	Materia Prima . . . . .	4
1.2.3	Requerimientos de los Alimentos Balanceados . . . . .	5
1.2.4	Proceso de producción de balanceado . . . . .	6
1.2.4.1	Almacenamiento . . . . .	6
1.2.4.2	Dosificación o pesaje . . . . .	7
1.2.4.3	Molienda . . . . .	8
1.2.4.4	Mezclado . . . . .	8
1.2.4.5	Peletización . . . . .	9
1.2.4.6	Extrusión . . . . .	10
1.2.4.7	Enfriamiento . . . . .	10
1.2.4.8	Quebrado . . . . .	11
1.2.4.9	Empaquetado . . . . .	12
1.2.4.10	Almacenamiento de producto terminado . . . . .	13
1.3	Tipos de procesos . . . . .	13
1.3.1	De acuerdo al grado o nivel de automatización . . . . .	13
1.3.2	De acuerdo a la frecuencia de ocurrencia . . . . .	15
1.3.3	De acuerdo a la naturaleza del flujo productivo . . . . .	15

1.4	Sistemas Automatizados . . . . .	16
1.4.1	Niveles de automatización . . . . .	17
1.4.2	Aplicaciones de la automatización . . . . .	17
1.4.3	Pirámide de automatización . . . . .	18
1.4.4	Fases para llevar a cabo un proyecto de automatización . . . . .	19
1.5	Elementos eléctricos y electrónicos . . . . .	22
1.5.1	Sensores y transductores . . . . .	22
1.5.1.1	Sensores de Peso . . . . .	24
1.5.1.2	Sensores de Corriente . . . . .	25
1.5.2	Actuadores . . . . .	25
1.5.2.1	Actuadores neumáticos . . . . .	25
1.5.2.2	Actuadores eléctricos . . . . .	28
1.5.3	Autómatas Programables Industriales . . . . .	28
1.5.3.1	Funciones básicas de un PLC . . . . .	29
1.5.3.2	Estructura externa del PLC . . . . .	29
1.5.3.3	Estructura interna del PLC . . . . .	29
1.5.3.4	Interfaz Hombre - Máquina . . . . .	30
<b>2</b>	<b>Diseño</b>	<b>32</b>
2.1	Situación actual: Planta de Balanceados ALIGRANSUC . . . . .	32
2.1.1	Secuencia de Proceso. . . . .	32

---

2.1.2	Identificación de variables . . . . .	33
2.1.3	Identificación de KPI's . . . . .	34
2.1.4	Elementos del proceso . . . . .	36
2.1.5	Consola de mando manual . . . . .	37
2.1.6	Características Generales . . . . .	41
2.2	Requerimientos del sistema . . . . .	42
2.2.1	Requerimientos de Hardware . . . . .	42
2.2.2	Requerimientos de Software . . . . .	42
2.2.3	Análisis de Nivel de Campo . . . . .	43
2.3	Propuesta de automatización . . . . .	45
2.4	Diseño secuencial a nivel de PLC: Grafcet . . . . .	46
2.5	Ingeniería de detalle . . . . .	49
2.5.1	Dimensionamiento de cilindro neumático . . . . .	50
2.5.1.1	Simulación de funcionamiento de cilindro . . . . .	56
2.5.2	Dimensionamiento de motor DC . . . . .	57
2.5.3	Circuito acondicionador para sensado de corriente . . . . .	59
2.5.4	Diseño de Control para molienda . . . . .	61
2.6	Selección de Hardware . . . . .	69
2.6.1	PLC y HMI . . . . .	69
2.6.1.1	Alternativa 1: Siemens . . . . .	69
2.6.1.2	Alternativa 2: Panasonic . . . . .	71

---

2.6.1.3	Alternativa 3: Renu Electronics . . . . .	72
2.6.1.4	Análisis de Factibilidad . . . . .	73
2.6.2	Módulos de PLC . . . . .	78
2.6.3	Sensores y Actuadores . . . . .	80
2.6.3.1	Sensores . . . . .	80
2.6.3.2	Actuadores . . . . .	83
2.6.4	Fuente DC . . . . .	86
2.7	Diseño de Pantallas HMI . . . . .	88
<b>3</b>	<b>Montaje</b>	<b>92</b>
3.1	Montaje de Hardware . . . . .	92
3.1.1	PLC y HMI . . . . .	93
3.1.2	Módulos de PLC . . . . .	94
3.1.3	Sensores y Actuadores . . . . .	96
3.1.4	Sensores . . . . .	96
3.1.5	Actuadores . . . . .	98
3.2	Programación de Software . . . . .	100
3.2.1	Instalación de FlexiSoft . . . . .	100
3.2.2	Creación de un nuevo programa e instalación de módulos. . . . .	101
3.2.3	Comunicación Balanza - PLC . . . . .	105
3.2.3.1	Configuración puerto Serial RS-232. . . . .	105

3.2.4	Lectura de Sensor de Corriente . . . . .	108
3.2.5	Implementación de control Fuzzy en PLC . . . . .	111
3.2.6	Programación Ladder . . . . .	111
3.2.7	Implementación de pantallas HMI . . . . .	115
<b>4</b>	<b>Pruebas y Resultados</b>	<b>122</b>
4.1	Pruebas FAT y SAT . . . . .	122
4.1.1	Prueba de Hardware . . . . .	122
4.1.2	Pruebas de Software o de funcionamiento SAT . . . . .	124
4.1.3	Evaluación de Control Fuzzy . . . . .	129
4.1.4	Análisis de KPI's . . . . .	129
	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>133</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>136</b>
	Referencias . . . . .	136
<b>A</b>	<b>Anexos</b>	<b>140</b>
A.1	Anexo A. Diagrama de Flujo: Pesaje. . . . .	141
A.2	Anexo B. Diagrama de Flujo: Molienda. . . . .	141
A.3	Anexo C. Compuerta 1 previo al proyecto. . . . .	141
A.4	Anexo D. Compuerta 2 previo al proyecto. . . . .	141

---

A.5	Anexo E. FVBC/FXBC Series Standar Cylinder. . . . .	141
A.6	Anexo F. Diagrama de Conexiones. . . . .	141
A.7	Anexo G. Programación en Ladder (FlexiSoft). . . . .	141
A.8	Anexo H. Compuerta 1 posterior al proyecto. . . . .	141
A.9	Anexo I. Acople entre Compuerta 2 y reductor. . . . .	141
A.10	Anexo J. Acople entre reductor y motor DC. . . . .	141
A.11	Anexo K. Compuerta 2 posterior al proyecto. . . . .	141
A.12	Anexo L. Distribución de elementos en la consola de mando. . . . .	141
A.13	Anexo M. Guía Gemma. . . . .	141

# ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1</i>	Línea de producción de productos balanceados, ALIGRANSUC. . . . .	xxi
<i>Figura 2</i>	Descripción gráfica de pesaje y molienda de materia prima. . . . .	xxiv
<i>Figura 3</i>	Zona de producción de alimentos balanceados de Ecuador . . . . .	2
<i>Figura 4</i>	Uso de materias primas en la industria . . . . .	5
<i>Figura 5</i>	Silos de almacenamiento de materia prima. . . . .	6
<i>Figura 6</i>	Dosificación por pesaje. . . . .	7
<i>Figura 7</i>	Molino de martillos. . . . .	8
<i>Figura 8</i>	Mezcladora de aspas helicoidales. . . . .	9
<i>Figura 9</i>	Peletizadora. . . . .	10
<i>Figura 10</i>	Extrusora. . . . .	11
<i>Figura 11</i>	Enfriador. . . . .	11
<i>Figura 12</i>	Proceso de quebrado. . . . .	12
<i>Figura 13</i>	Proceso de ensacado por peso. . . . .	12
<i>Figura 14</i>	Almacenamientos de producto terminado en pallets. . . . .	13
<i>Figura 15</i>	Sistema Manual . . . . .	14
<i>Figura 16</i>	Sistema básico automatizado. . . . .	15
<i>Figura 17</i>	Modelo estructural de un sistema automatizado. . . . .	16
<i>Figura 18</i>	Pirámide de automatización. . . . .	18
<i>Figura 19</i>	Fases para automatizar un proyecto. . . . .	20
<i>Figura 20</i>	Representación de la Guía GEMMA. . . . .	22
<i>Figura 21</i>	Puente de Wheastone. . . . .	24
<i>Figura 22</i>	Celda de flexión de viga. . . . .	24
<i>Figura 23</i>	Clasificación de los actuadores. . . . .	26
<i>Figura 24</i>	Cilindro de simple efecto. . . . .	27
<i>Figura 25</i>	Cilindro doble efecto. . . . .	27
<i>Figura 26</i>	Estructura interna del PLC. . . . .	30
<i>Figura 27</i>	Componentes del HMI en System 32. . . . .	31
<i>Figura 28</i>	Bloque de sistema de control. . . . .	33

<i>Figura 29</i>	Diagrama de Gantt: tiempos de proceso. . . . .	34
<i>Figura 30</i>	Proceso de pesaje y molienda de materia prima.(cambiar) . . . . .	37
<i>Figura 31</i>	Panel Eléctrico principal. . . . .	39
<i>Figura 32</i>	Consola manual 1. . . . .	39
<i>Figura 33</i>	Circuito de Fuerza de Motores . . . . .	40
<i>Figura 34</i>	Indicador de Peso CISGO X10. . . . .	43
<i>Figura 35</i>	Compuerta Tolva 1. . . . .	44
<i>Figura 36</i>	Compuerta Tolva 2. . . . .	45
<i>Figura 37</i>	Diagrama de flujo de sistema automatizado. . . . .	46
<i>Figura 38</i>	Grafcet de Producción de Nivel 1. . . . .	47
<i>Figura 39</i>	Grafcet de Pesaje de Nivel 1. . . . .	48
<i>Figura 40</i>	Grafcet de Molienda de Nivel 1. . . . .	49
<i>Figura 41</i>	Columna de maíz sobre compuerta. . . . .	50
<i>Figura 42</i>	Área de avance y retroceso de un cilindro. . . . .	54
<i>Figura 43</i>	Simulación (FluidSim FESTO). . . . .	56
<i>Figura 44</i>	Simulación (FluidSim FESTO). . . . .	56
<i>Figura 45</i>	Diagrama de estados (FluidSim FESTO). . . . .	57
<i>Figura 46</i>	Diagrama de estados (FluidSim FESTO). . . . .	57
<i>Figura 47</i>	Circuito Acondicionador de señal (Proteus Proffesional). . . . .	60
<i>Figura 48</i>	Curva de comportamiento de circuito acondicionador de señal AC-DC . . . . .	60
<i>Figura 49</i>	PCB de circuito acondicionador AC-DC (Proteus Professional). . . . .	61
<i>Figura 50</i>	Función complementaria de la función triangular . . . . .	64
<i>Figura 51</i>	Verificación de entrada y salida del control Fuzzy (Matlab). . . . .	66
<i>Figura 52</i>	Curva de respuesta (Fuzzy Logic Designer). . . . .	67
<i>Figura 53</i>	Interpolación (Matlab). . . . .	68
<i>Figura 54</i>	Matriz PAH. Criterio:Precio. . . . .	74
<i>Figura 55</i>	Matriz PAH. Criterio: Tamaño. . . . .	75
<i>Figura 56</i>	Matriz PAH. Criterio: Instalación. . . . .	75
<i>Figura 57</i>	Matriz PAH. Comparación de Criterios. . . . .	76
<i>Figura 58</i>	Matriz PAH. Valoración Final. . . . .	76
<i>Figura 59</i>	FlexiPanel FP4057T-E Renu Electronics. . . . .	77
<i>Figura 60</i>	Módulo FPED-HS-0808RN Renu Electronics. . . . .	79
<i>Figura 61</i>	Módulo FPEA0202L Renu Electronics. . . . .	79
<i>Figura 62</i>	Sensor de Corriente No invasivo SCT-013-100. . . . .	81
<i>Figura 63</i>	Interruptor fin de carrera. . . . .	82
<i>Figura 64</i>	Cilindro neumático FVBC-32X400-S EMC. . . . .	83
<i>Figura 65</i>	Electroválvula V5221-E1-08 . . . . .	84
<i>Figura 66</i>	Fuente de poder SPDM24751 Carlo Gavazzi . . . . .	87

<i>Figura 67</i>	Arquitectura de pantallas HMI. . . . .	88
<i>Figura 68</i>	Distribución de pantalla nivel 1 y 2. . . . .	89
<i>Figura 69</i>	Distribución de pantalla Tendencia. . . . .	89
<i>Figura 70</i>	Distribución de pantalla de Información de equipos. . . . .	90
<i>Figura 71</i>	Distribución de pantalla de Alarmas . . . . .	90
<i>Figura 72</i>	Consola manual 1. . . . .	93
<i>Figura 73</i>	Montaje de controlador en panel frontal. . . . .	94
<i>Figura 74</i>	Montaje de módulos en PLC. . . . .	95
<i>Figura 75</i>	Montaje de elementos en tablero. . . . .	96
<i>Figura 76</i>	Indicador de peso. . . . .	97
<i>Figura 77</i>	Ubicación de sensor SCT-013-100 (azul). . . . .	97
<i>Figura 78</i>	Montaje de cilindro en Tolva 1. . . . .	98
<i>Figura 79</i>	Montaje de motor DC en Tolva 1. . . . .	99
<i>Figura 80</i>	Interfaz gráfica de FlexiSoft. . . . .	101
<i>Figura 81</i>	Selección de dispositivo. . . . .	102
<i>Figura 82</i>	Módulos de expansión. . . . .	103
<i>Figura 83</i>	Selección de Módulo FPED-HS-0808RN. . . . .	104
<i>Figura 84</i>	Selección de Módulo FPEA0202L. . . . .	104
<i>Figura 85</i>	Verificación de módulos instalados. . . . .	105
<i>Figura 86</i>	Configuración comunicación Serial RS - 232. . . . .	106
<i>Figura 87</i>	Configuración de parámetros. . . . .	106
<i>Figura 88</i>	Acceso a “Driver Settings”. . . . .	107
<i>Figura 89</i>	Configuración de recepción de datos. . . . .	108
<i>Figura 90</i>	Lectura de Corriente de motor de molino (FlexiSoft). . . . .	110
<i>Figura 91</i>	Grafcet de Producción Nivel 2. . . . .	112
<i>Figura 92</i>	Grafcet de pesaje Nivel 2. . . . .	113
<i>Figura 93</i>	Grafcet de molienda Nivel 2. . . . .	114
<i>Figura 94</i>	Pantalla de Inicio. . . . .	116
<i>Figura 95</i>	Pantalla de Configuración de Parámetros. . . . .	117
<i>Figura 96</i>	Pantalla de Pesaje. . . . .	118
<i>Figura 97</i>	Pantalla de Molienda. . . . .	119
<i>Figura 98</i>	Pantalla de Tendencias. . . . .	120
<i>Figura 99</i>	Pantalla de Alarmas. . . . .	121

# ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1</i>	<i>Pruebas de pesaje antes de la automatización . . . . .</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 2</i>	<i>Pruebas de molienda antes de la automatización . . . . .</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 3</i>	<i>Elementos que intervienen en el proceso. . . . .</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 4</i>	<i>Condiciones ambientales en la planta de balanceado Aligransuc. . . . .</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 5</i>	<i>Características eléctricas en la planta de balanceado Aligransuc . . . . .</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 6</i>	<i>Báscula de Pesaje series XK315A1X. . . . .</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 7</i>	<i>Datos para dimensionamiento de cilindro . . . . .</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 8</i>	<i>Datos para dimensionamiento de motor . . . . .</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 9</i>	<i>Características Generales Simatic S7-1200 1212C . . . . .</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 10</i>	<i>Características Generales Pantalla KTP700 . . . . .</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 11</i>	<i>Características Generales Panasonic FP0R . . . . .</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 12</i>	<i>Características Generales Pantalla GT32T-E . . . . .</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 13</i>	<i>Características Generales Renu Electronics FP4057T-E . . . . .</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 14</i>	<i>Características FlexiPanel Renu Electronics FP4057T-E . . . . .</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 15</i>	<i>Características Módulo FPED-HS-0808RN Renu Electronics . . . . .</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 16</i>	<i>Características Módulo FPEA0202L Renu Electronics . . . . .</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 17</i>	<i>Especificaciones WX5500004-26001J Marathon Motors. . . . .</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 18</i>	<i>Especificaciones SCT-013-100. . . . .</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 19</i>	<i>Especificaciones Sensor Fin de carrera. . . . .</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 20</i>	<i>Especificaciones FVBC-32X400-S EMC. . . . .</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 21</i>	<i>Especificaciones V5221-E1-08 EMC. . . . .</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 22</i>	<i>Especificaciones reductor mecánico. . . . .</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 23</i>	<i>Especificaciones Motor DC 63ZYT. . . . .</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 24</i>	<i>Especificaciones Relé de Estado Sólido CSS – P13X CSS -N13X. . . . .</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 25</i>	<i>Especificaciones Fuente de poder SPDM24751. . . . .</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 26</i>	<i>Equivalencia de variables . . . . .</i>	<i>109</i>
<i>Tabla 27</i>	<i>Descripción de Etiquetas: Grafcet de Producción . . . . .</i>	<i>112</i>

---

Tabla 28	<i>Descripción de Etiquetas: Graficet de Pesaje</i> . . . . .	113
Tabla 29	<i>Descripción de Etiquetas: Graficet de Molienda</i> . . . . .	114
Tabla 30	<i>Pruebas FAT: Inspección visual</i> . . . . .	123
Tabla 31	<i>Pruebas FAT: Conexiones</i> . . . . .	123
Tabla 32	<i>Pruebas FAT: Diseño</i> . . . . .	124
Tabla 33	<i>Pruebas FAT: Alimentación Eléctricas</i> . . . . .	124
Tabla 34	<i>Pruebas FAT: Señales de entrada y salida</i> . . . . .	124
Tabla 35	<i>Pruebas SAT: Comunicación entre dispositivos</i> . . . . .	125
Tabla 36	<i>Pruebas SAT: Lógica de Control</i> . . . . .	125
Tabla 37	<i>Pruebas SAT: Verificación de HMI</i> . . . . .	125
Tabla 38	<i>Evaluación de HMI mediante Guía Gedis</i> . . . . .	126
Tabla 39	<i>Resultados de evaluación Guía Gedis</i> . . . . .	128
Tabla 40	<i>Comparación de salida PWM</i> . . . . .	129
Tabla 41	<i>Pruebas de pesaje antes de la automatización</i> . . . . .	130
Tabla 42	<i>Comparación KPI's de pesaje</i> . . . . .	130
Tabla 43	<i>Pruebas de tiempo de molienda después de la automatización.</i> . . . . .	131
Tabla 44	<i>Pruebas de molienda después de la automatización.</i> . . . . .	131
Tabla 45	<i>Consumo de potencia (molienda)</i> . . . . .	132

## RESUMEN

El presente proyecto se basa en la automatización de las etapas de pesaje y molienda de la línea de la planta procesadora de alimentos balanceados Aligransuc, ubicada en el cantón Lago Agrio, con la finalidad aprovechar mejor los recursos como materia prima y consumo energético. En el proyecto se analiza la situación actual de la planta para identificar las variables que intervienen en las etapas de interés. El proyecto presenta los dispositivos como sensores y actuadores incluidos en una arquitectura básica de un sistema automatizado donde se tiene un controlador lógico programable (PLC) y adicional se incluye una interfaz humano - máquina (HMI), instalada únicamente en el área de producción, la cual además de integrar las dos etapas permite al operador contar con funciones de control como datos de entrada de peso referencial de *batch*, número de *batches* a procesar, valor de corriente referencial para la etapa de molienda y supervisión de datos de corriente representada en gráfico de tendencias. Además el sistema tiene la capacidad de reportar alarmas que se han definido en conjunto con el personal de la empresa, las cuales deben ser atendidas por un operador. En la implementación de equipos se modificó la estructura mecánica de las tolvas que intervienen en pesaje y molienda. Finalmente se muestra un análisis de índices claves de rendimiento (KPI's) para comparar la situación antes y después de la automatización.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **AUTOMATIZACIÓN**
- **CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE**
- **INTERFAZ HUMANO - MÁQUINA**
- **ÍNDICES CLAVES DE RENDIMIENTO**

## ABSTRACT

This project is based on the automation of the weighing and pounding phases of the Aligransuc feed processing plant line, located in the Lago Agrio town, with the purpose of to use better the resources such as raw material and energy consumption. The project analyzes the current situation of the plant to identify the variables that take part in the phases of interest. The project presents the devices as sensors and actuators included in a basic architecture of an automated system where there is a programmable logic controller (PLC) and an human-machine interface (HMI), installed only in the production area, which in addition to integrating the two phases allows the operator to have control functions such as input data of reference weight of batch, number of batches to be processed, reference current value for the pounding and supervision stage of current data represented in trend chart. In addition, the system has the ability to report alarms that have been defined in conjunction with company personnel, which must be attended by an operator. In the implementation of equipment, the mechanical structure of the hoppers involved in weighing and pounding was modified. Finally, an improvement analysis of key performance indicator (KPI's) is shown to compare the situation before and after automation.

### **KEYWORDS:**

- **AUTOMATION**
- **PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER**
- **HUMAN MACHINE INTERFACE**
- **KEY PERFORMANCE INDICATOR**

# Introducción

## Planteamiento del Problema

La Planta procesadora de Balanceados “ALIGRANSUC” fue inaugurada el 13 de Febrero del 2018, con una visión y voluntad política estratégica del Prefecto de la Provincia de Sucumbíos, el Sr. Guido Vargas Ocaña. Pertenece a la Unidad Adscrita de Desarrollo Productivo, Agropecuario de Industrialización, Comercialización y Empresarial: Corposucumbíos, entidad empeñada en desarrollar el proyecto que se plantea con el objetivo de alcanzar una comercialización de balanceados para peces, aves y porcinos. Esta planta de clasificación industrial cuenta con un total de 14 personas que intervienen de forma directa en la producción de balanceado (Gobierno Provincial de Sucumbíos, 2019).

El objetivo de producir alimentos balanceados es satisfacer los requerimientos nutricionales de los animales, por ello se elabora un producto para cada tipo de animal y etapa de desarrollo. Las empresas productoras deben garantizar la calidad y la disponibilidad de este en el mercado, ya que este último es un problema característico de los alimentos no elaborados (A. M. Tapia, 2008).

Los mayores componentes que se usan para producir balanceado son el maíz amarillo y la soja. El alimento balanceado que se más produce es de tipo avícola, seguido por acuicultura (ProEcuador, 2018).

La elaboración de balanceado en la planta ALIGRANSUC se realiza de manera manual, lo cual significa que operadores activan y desactivan cada una de las máquinas en toda la línea de producción, desde pesaje de materia prima, molino, mezclado, peletizado, enfriado, quebrado y empaquetado, requiriendo así automatizar estos procesos con el fin de optimizar tiempos y aumentar la productividad.

## Objetivo general

Diseñar e implementar un sistema automatizado para el proceso de pesaje y molienda de materia prima en la planta procesadora de balanceados ALIGRANSUC.

## Objetivos específicos

- Definir las variables que intervienen en las etapas de pesaje y molienda de materia prima mediante un análisis previo del proceso.
- Identificar los lazos de control que debe integrar el sistema automatizado para la correcta producción de alimentos balanceados.
- Determinar las características técnicas del controlador a través de una matriz de criterios de selección para la integración de los sensores y actuadores.
- Evaluar indicadores clave de rendimiento de las etapas de pesaje y molienda para el análisis de resultados de la automatización.

## Descripción del proyecto

Se recomienda que la elaboración de alimentos balanceados en una planta procesadora sea equivalente al uso y manejo adecuado de equipos, materia prima y seguimiento en la línea de producción (Chachapoya, 2014).

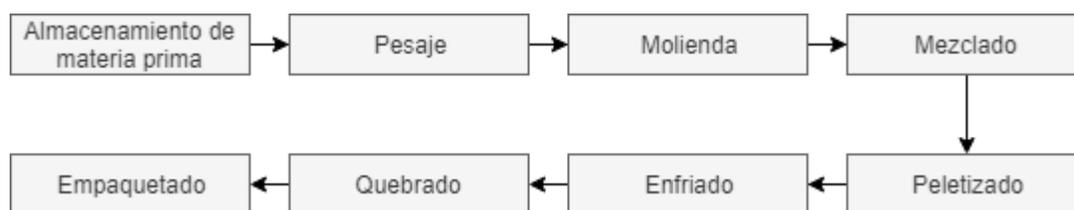


Figura 1. Línea de producción de productos balanceados, ALIGRANSUC.

Con la integración de nuevas tecnologías en el campo industrial es posible aumentar la productividad de la empresa (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, Senplades, 2017). En el presente proyecto se automatizará dos de las etapas en la línea de producción de balanceado, Figura 37, las cuales son el pesaje y molienda de maíz.

En cada orden de producción se utiliza 300 Kg de maíz amarillo, el cual se pesa en una tolva cuyo control es manual, es decir un operador mediante un pulsador enciende un motor acoplado a un tornillo sin fin que transporta el maíz desde los silos hasta la tolva, una vez que la balanza marca los 300 Kg el operador detiene el tornillo sin fin. Como consecuencia el peso fluctúa de acuerdo a la precisión del operador de turno con el cual se tiene un posible error en la composición del balanceado y en el inventario de materia prima.

Posteriormente, el maíz pesado pasa a otra tolva que alimentará de materia prima al molino. El paso de caudal de maíz al molino depende de la lectura de intensidad eléctrica del motor, es decir, un operador mediante la observación intenta mantener el amperaje dentro de un rango específico, generalmente entre 40 y 50 A., al mismo tiempo que cierra o abre paulatinamente la compuerta de la tolva que da paso al maíz para controlar la medida de corriente dentro de los límites especificados.

## **Alcance del proyecto**

La solución presentada en este proyecto es implementar un sistema automatizado, el cual controlará el peso exacto de maíz que se requiere en cada orden de producción pudiendo modificarse la cantidad necesaria si es que el jefe de producción así lo requiere, y también se realizará el control de molienda al hacer la lectura de amperaje del motor de molino, permitiendo el paso gradual del maíz. Ambos controles programados en un PLC que cumplirá con las funciones que actualmente llevan a cabo los operadores en turno.

La información en tiempo real del proceso, históricos, datos, reportes y alarmas que se requieran presentar se visualizarán en una pantalla de Interfaz hombre - máquina (HMI), desde la cual los trabajadores y el jefe de producción podrán operar.

El terminal HMI estará ubicado únicamente en el área de producción desde donde se tiene acceso a la información de orden de producción, registro de ingreso de materia prima, registro de consumo energético promedio del molino por hora y alarmas.

Una vez implementado los equipos y programas correspondiente, se realizarán las pruebas de aceptación de fábrica (FAT, por sus siglas en inglés: Factory Acceptance Test) y pruebas de aceptación de terreno (SAT: Site Acceptance Test) en conjunto con los responsables de la planta procesadora de balanceados ALIGRANSUC para verificar el correcto funcionamiento en las diferentes situaciones que se puedan presentar durante el proceso, además se realizará una guía para el usuario de operación del HMI, con el fin de que los operadores en turno no tengan complicaciones en su manejo.

Las pantallas HMI se diseñarán en base a la normativa GEDIS y se calificará bajo el mismo criterio. La identificación de los indicadores clave de rendimiento (KPI's) se realizarán antes de la implementación del proyecto y se evaluarán luego de la ejecución de este.

## **Justificación**

La tecnología implementada en la Planta procesadora de balanceados ALIGRANSUC es básica, lo cual no permite una óptima elaboración del producto. Actualmente la planta está compuesta únicamente de pulsadores, indicadores luminosos y tecnología a base de relés, es decir, el funcionamiento de la planta es manual.

Las etapas del procesamiento de balanceado en la que se enfoca este proyecto es la de pesaje de maíz amarillo y la molienda de este, en las que se ha identificado algunos problemas consecuencia de lo antes expuesto, tales como:

- Desperdicio de materia prima, debido a que el pesaje del maíz se lo realiza por medio de la observación de un operador y por lo general en cada orden de producción la medida de peso es mayor a la que se requiere.
- La calidad del producto se ve afectada debido a que no se tiene el pesaje correcto de materia prima.

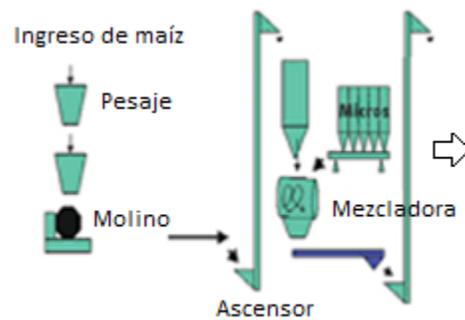


Figura 2. Descripción gráfica de pesaje y molienda de materia prima.

- No se puede visualizar el estado de variables del proceso como el peso del maíz o rendimiento del molino en tiempo real.
- Se tiene tiempos de producción excesivamente altos en la etapa de molienda ya que el control de caudal del maíz que ingresa al molino lo realiza un operador, quien mantiene al molino aproximadamente al 50 % de su capacidad de trabajo.
- Atascamiento del ascensor de maíz molido ubicado luego de la etapa de molienda como se observa en la Figura 2, debido a exceso de materia prima. Como consecuencia se detiene el proceso y se provoca un tiempo muerto de 20 a 30 minutos requeridos para solucionar el error.
- No es posible identificar los fallos del proceso, como por ejemplo en ocasiones no hay lectura de la balanza de la tolva de maíz o el molino deja de trabajar debido a una sobrecarga en el motor.
- La integración y comunicación entre las diferentes etapas de la línea de producción no es posible debido a que los recursos tecnológicos implementados no lo permiten.

Los puntos detallados son las razones por las que es necesario implementar un sistema automatizado, en el que se incluye un PLC en conjunto con un HMI. Este sistema robusto pretende dar solución a los inconvenientes expuestos, de tal manera que exista un correcto manejo de materia

prima y como consecuencia de esto se mejore la calidad del producto, mejora de tiempos de producción, eliminación de tiempos muertos por error humano, acceso a información de variables e históricos, además de incrementar la productividad de la planta.

## **Organización del documento**

El presente trabajo es presentado en cuatro capítulos, que se describen a modo de resumen en esta sección para proporcionar al lector una visión general del mismo.

### **Capítulo 1**

En este capítulo se detalla la descripción de procesamiento de producción de alimentos balanceados, conceptos básicos de sistemas industriales y sistemas automatizados que se usan en las plantas de producción.

### **Capítulo 2**

El capítulo 2 describe el diseño del proyecto partiendo de la identificación de las etapas a automatizar, funcionamiento actual y elementos con los que dispone la planta actual. En este capítulo también se realiza un análisis de acuerdos a los requerimientos para determinar los equipos y dispositivos a utilizar para la implementación.

### **Capítulo 3**

En el capítulo 3 se presenta la implementación del sistema automatizado luego de haber determinado los elementos y diseño de lógica de secuencia y pantallas HMI en el capítulo anterior.

### **Capítulo 4**

En el último capítulo se realizan las pruebas de conexión y funcionamiento de los equipos y sistema en general. También se hacen pruebas para determinar mejoras de las etapas de pesaje y molienda de la planta procesadora de balanceados Aligransuc. Finalmente se exponen las conclusiones y recomendaciones del trabajo de titulación realizado.

# Capítulo 1

## Estado del Arte

### 1.1. Introducción

La transformación de la materia prima para la obtención de alimentos para animales permite aprovechar los productos agrícolas locales, siendo esta industria una de las más importantes en la agroindustria ecuatoriana por el impacto altamente positivo en la economía y nutrición nacional. La industria de alimentos balanceados en el Ecuador nace en los años 1962 y 1963, anteriormente los alimentos preparados para animales y concentrados procedían casi en su totalidad de los Estados Unidos de Norteamérica (Villacrés, 1975).

Según un sondeo sobre producción de Alimento Balanceado, en Ecuador hay cerca de 351 empresas dedicadas a la elaboración de este producto ubicadas principalmente en las provincias de Guayas, Pichincha y El Oro. En la Figura 3 se muestra donde se encuentran situadas las Industrias del Agro, este informe es generado por el sistema de información Sinagap del Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador (ProEcuador, 2018).

Dentro del marco referencial del Plan Nacional del Buen Vivir 2013 – 2017, y su respectiva continuación en el Plan Nacional de Desarrollo 2017 – 2021 – Toda una Vida, se basan en la

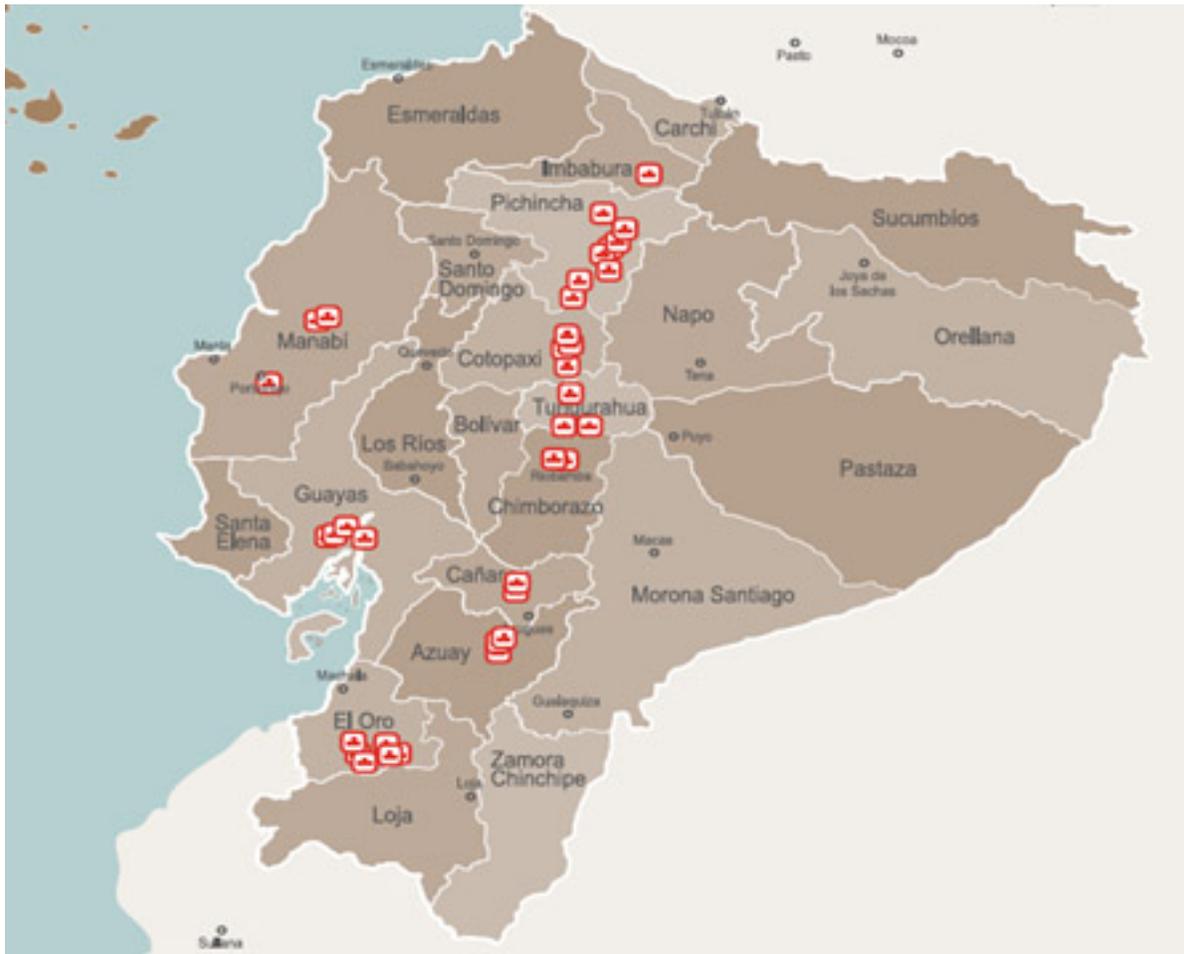


Figura 3. Zona de producción de alimentos balanceados de Ecuador  
Fuente: (ProEcuador, 2018)

inclusión de técnicas y tecnologías de la información con el objetivo de incrementar la productividad, innovar y ser más competitivos (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, Senplades, 2017).

La automatización en la industria mejora la competitividad de elaboración de productos balanceados de las grandes empresas de este sector en Ecuador, como son Pronaca, Afaba, Grupo Anhalzer, entre otros (Orellana, 2015).

La clave es rediseñar la ingeniería implementada en la industria y con esto, disminuir los costos debido a pérdidas en producción, además de mejorar la calidad de productos. Esto ha sido implementado en algunas industrias de este sector como es Balanfeed, otra de las empresas líderes de este mercado (A. M. Tapia, 2008).

El estudio en el proyecto de grado “Diseño e implementación de un sistema de control distribuido para el área de dosificado de macro ingredientes de una planta tipo para la producción de balanceado” se utilizó un controlador lógico programable (PLC), encargado de ejecutar funciones automáticamente basado en información de sensores y condiciones establecidas, de acuerdo a los requerimientos del proceso (Herrera, 2018).

Así mismo en el trabajo expuesto “Automatización del proceso de dosificación, ensacado y control de peso en lazo cerrado para la máquina mezcladora de balanceado de la estación experimental Tunshi ESPOCH”, la combinación de los sistemas diseñados y la adecuada implementación de los mismos tienen como resultado un proceso robusto que cumple con las necesidades de la planta y presenta un mejor entorno de trabajo para los operadores al cumplir con las condiciones de inicio, seguridad y seguimiento en cada etapa de producción (Carrillo y Calero, 2016).

## 1.2. Producción de alimentos balanceados

Los alimentos balanceados son suministrados para suplir las necesidades nutricionales de los animales, siendo este producto su única fuente de alimento.

### 1.2.1. Clasificación de alimentos balanceados

De acuerdo a la composición del balanceado, se puede clasificar en tres tipos de alimentos (Chachapoya, 2014):

- **Purificados:** Preparados con aminoácidos sintéticos, ácidos grasos, carbohidratos de composición conocida, vitaminas y minerales químicamente puros; son empleados con fines de investigación para mejora de composición de alimentos.

- **Semi-purificados:** Contienen ingredientes naturales y son utilizados para determinar la eficiencia de los componentes alimenticios en términos de conversión alimenticia, peso y talla.
- **Prácticos:** Preparados con alimentos disponibles en ese momento que al igual que los anteriores satisfacen las necesidades nutricionales; la ventaja es que su costo es menor.

También se puede clasificarlos de acuerdo al tipo de mezcla que se utilice (Chachapoya, 2014):

- **Mezcla en polvo o en seco:** Se caracteriza por ser una mezcla homogénea de ciertas sustancias sin que se produzca un cambio químico entre ellas; la composición de cada producto depende de la especie y las necesidades nutricionales que demanda.
- **Mezcla Peletizada:** Es caracterizada por añadir vapor de agua a la mezcla de materias primas con la finalidad de hidratar la masa a una temperatura entre los 60 y 80 °C, como producto se obtiene la mezcla homogénea comprimida en pellets que son estructuras cilíndricas alargadas.
- **Mezcla extruída:** Para obtener esta mezcla se la hace pasar por un troquel a diferentes temperaturas, ya sean altas o bajas para obtener diferentes formas del producto; el proceso de extrusión tiene como objetivo mejorar las propiedades de una sustancia o mezcla como la digestibilidad de las proteínas y fibras.

### 1.2.2. Materia Prima

Actualmente en la planta Aligransuc se producen dos tipos de balanceado, alimento para pollos y cerdos. Ambos cumplen con la formulación básica de balanceados, en la que las materias primas más utilizadas por su alto contenido nutricional son: cereales como maíz, sorgo, harinas, torta de soja, aceite de palma y otros aditivos de acuerdo a su finalidad.

Para la elaboración de balanceado, se debe tomar en cuenta diversos factores físicos de la materia prima e insumos que ingresan al proceso y los cuales influyen altamente en la calidad del producto final como son la humedad, textura, el color, olor, contenido de impurezas y peso (Morales y Vera, 2018).

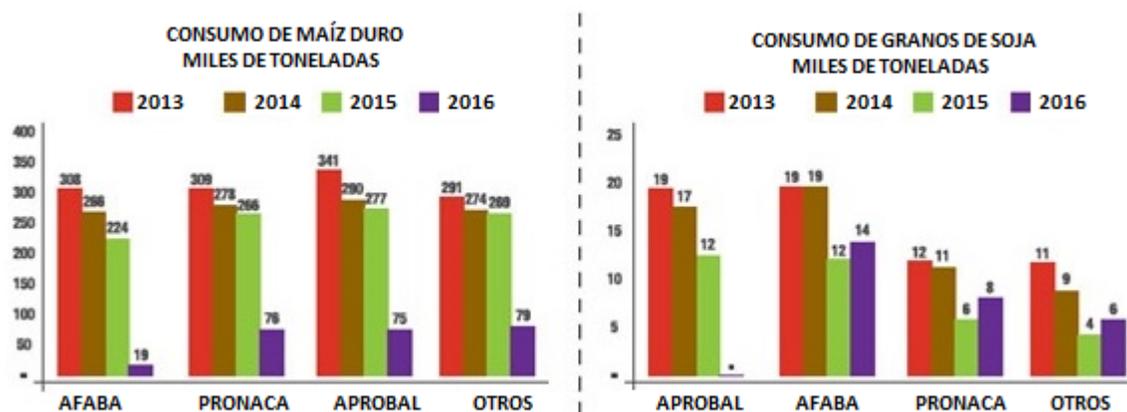


Figura 4. Uso de materias primas en la industria  
Fuente: (ProEcuador, 2018)

En la producción de alimentos balanceados el maíz duro y los granos de soja son los dos insumos más consumidos como materia prima, los números de consumo registrados de algunas empresas de Ecuador se observa en la Figura 4.

- **Maíz:** Es el único cereal originario del Nuevo Mundo . Los granos de maíz están constituidos principalmente de tres partes: la cascarilla, el endospermo y el germen. La cascarilla es la piel externa que sirve como capa protectora. El endospermo, es la reserva energética del grano y ocupa hasta el 80 % del peso del grano. Contiene aproximadamente el 90 % de almidón y el 9 % de proteína, y pequeñas cantidades de aceites, minerales y elementos traza(Bañuelos, Gómez, López, Aguirre, y Sánchez, 2003).
- **Soja:** Bautizado como carne vegetal por su alto valor nutritivo. Este cereal está compuesto por interesantes contenidos de minerales como magnesio, fósforo, hierro y calcio, vitaminas del complejo B, grasas insaturadas y fibra(Bañuelos et al., 2003).

### 1.2.3. Requerimientos de los Alimentos Balanceados

Dentro de las condiciones de producción de alimentos balanceados se dan a conocer tres puntos importantes:

- **Atractabilidad:** El alimento debe ser llamativo para los sentidos.
- **Palatabilidad:** El balanceado debe ser agradable para el animal, es decir, este debe ser capaz de promover un consumo sostenido a largo plazo.
- **Digestibilidad:** Al consumirlo, el animal debe absorber los nutrientes necesarios que implica una buena alimentación.

## 1.2.4. Proceso de producción de balanceado

El procesamiento de la materia prima para obtener el balanceado como producto final se lleva a cabo mediante diferentes etapas descritas a continuación:

### 1.2.4.1. Almacenamiento

En esta etapa se trata de preservar la materia prima de acuerdo a la durabilidad de cada producto. El almacenamiento en sacos es el sistema tradicionalmente usado, el manejo interno y descarga se realiza de forma manual o mecánica. Otra forma de almacenar es a granel y para ello se requiere de silos, Figura 5, o tolvas de gran tamaño, pero el manejo posterior del maíz requiere de más tecnología y por lo tanto una mayor inversión (Carrillo y Calero, 2016).



Figura 5. Silos de almacenamiento de materia prima.

### 1.2.4.2. Dosificación o pesaje

Los dosificadores de sólidos se clasifican en tres tipos (Carrillo y Calero, 2016):

- **Dosificador por pistón:** Se transporta el producto despachado de la tolva de almacenamiento directamente hacia el pistón dosificador de carrera, el mismo que se activa abriendo espacio dentro de la boquilla de descarga y cuando está desactivado, se cierra el paso de producto.
- **Dosificador por peso:** Se utiliza sensores de celdas de carga que permiten determinar el peso de la materia contenida en las tolvas de pesaje, generalmente es intervenido por la acción de un lazo de control.
- **Dosificador por tornillo:** Se controla el transporte interno de producto obteniendo un peso semejante pero no exacto de lo que ha requerido el usuario.



Figura 6. Dosificación por pesaje.

### 1.2.4.3. Molienda

Una vez que se haya pesado la cantidad apropiada de maíz, este ingresa por una compuerta al molino de martillos para ser triturado al tamaño requerido, a medida que se tritura avanza por un elevador vertical hasta llegar a una cámara de almacenamiento (R. A. Tapia, 2010).

El molino de martillos horizontal como el de la Figura 14 es el que generalmente se ve en las industrias, por razones de granulometría y funcionalidad. Sin embargo en los últimos años se ha introducido el molino vertical que parece tener ventaja de rendimiento con respecto al horizontal, se lo usa en fábricas de premolienda (Mann, 2010).



Figura 7. Molino de martillos.

### 1.2.4.4. Mezclado

Se realiza a través de movimiento de la materia prima ejercida por una mezcladora de aspas helicoidales como se muestra en la Figura 8, la cual permite una mezcla total del producto en un tiempo de aproximadamente 7 minutos. Durante este proceso se combina las premezclas, aminoácidos

o medicamentos para obtener una mezcla homogénea. Posteriormente se añaden componentes que prestan humedad a la mezcla como el aceite y la melaza (Maya, 2016).



*Figura 8.* Mezcladora de aspas helicoidales.

#### **1.2.4.5. Peletización**

Luego del proceso de mezclado, la harina pasa al acondicionador donde es sometida a presión de vapor enviada desde una caldera que trabaja desde 70 hasta 100 PSI. En el acondicionador se produce la gelatinización de la harina, es decir se forma una masa creando un polímero de algodón para luego pasar por unos orificios en forma de pellet. Estas formas cilíndricas tienen aproximadamente un diámetro de 0,4 a 1,9cm y una longitud de 1 a 3 cm variando de acuerdo al animal y la edad del mismo, este proceso presenta ventajas como (Maya, 2016):

- Mejor conversión por el animal.
- Mayor palatabilidad.
- Aumenta la vida útil del balanceado.
- Menor desperdicio en la porción de consumo.



*Figura 9. Peletizadora.*

#### **1.2.4.6. Extrusión**

La mezcla acondicionada ingresa a la extrusora y se somete a un proceso de cocción termo-plástica de alta temperatura y presión dando forma a una masa visco elástica. Las ventajas que se ha destacado de este proceso son (Chachapoya, 2014):

- Mejora la digestibilidad.
- Disminuye factores anti-nutritivos.
- Permite elaborar dietas que flotan en el agua.

#### **1.2.4.7. Enfriamiento**

Consiste en reducir la temperatura y humedad, como resultado la temperatura del producto debe estar entre 1 y 3 grados sobre la temperatura ambiente (Arias y León, 2016) efectuada por



*Figura 10.* Extrusora.

rotatorios o por flujo de aire mientras que la humedad disminuye hasta llegar entre 10 y 13, Figura 11 (Maya, 2016).

#### **1.2.4.8. Quebrado**

En esta etapa las píldoras de balanceado son quebradas de acuerdo al tamaño que se desea, principalmente se realiza este proceso cuando se produce alimentos para aves y otros que requieren ciertas especificaciones alimenticias, Figura 12 (Alvarez, Hernández, y Nerio, 2006).



*Figura 11.* Enfriador.



*Figura 12.* Proceso de quebrado.

#### **1.2.4.9. Empaquetado**

El producto se empaca en sacos de diferentes tamaños de acuerdo a la cantidad de producto requerido por medio de una báscula que garantiza el peso adecuado, generalmente son de 15, 20 o 40Kg, posteriormente se cosen los bultos para su respectivo almacenamiento (Maya, 2016).



*Figura 13.* Proceso de ensacado por peso.

#### 1.2.4.10. Almacenamiento de producto terminado

Finalmente se almacena el producto terminado en lugares y condiciones de humedad y temperatura previamente determinadas con el fin de asegurar la integridad física y calidad nutricional del balanceado para su posterior venta.(Bonessi, 2012)



Figura 14. Almacenamientos de producto terminado en pallets.

### 1.3. Tipos de procesos

Los procesos productivos se clasifican de acuerdo a diversos criterios como son:

#### 1.3.1. De acuerdo al grado o nivel de automatización

- **Manuales:** Estos sistemas se caracterizan por la intervención directa de uno o varios operadores encargados de accionar maquinaria o regular el comportamiento de un sistema (Herrera, 2018).

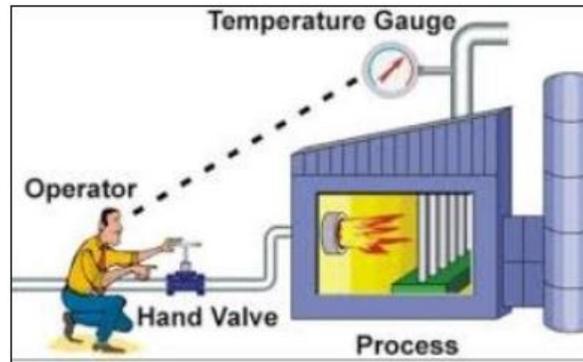


Figura 15. Sistema Manual

Fuente: (Herrera, 2018)

En la Figura 15, se aprecia la intervención humana en un proceso, donde el operador visualiza el estado actual del sistema y según las condiciones planteadas, toma decisiones y actúa de forma directa (Herrera, 2018).

- **Semiautomáticos:** Las operaciones manuales realizadas por el personal son ayudadas por tecnologías electromecánicas, contadores, temporizadores o hasta micro PLC (Sanchez y Pizarro, s.f.).
- **Automáticos:** Estos sistemas son capaces de actuar de forma autónoma, en base a especificaciones de comportamiento del sistema, con supresión total o parcial de la intervención humana. Se ejecutan a través de secuencias y tiempos determinados por un PLC o un computador que ha sido programado para controlar el proceso (Sanchez y Pizarro, s.f.).

Los sistemas automáticos tienen como objetivo mejorar la eficiencia del proceso y calidad de los productos, además de reducir los riesgos que atentan con la integridad del personal (Herrera, 2018).

Los elementos que intervienen en un sistema automático son:

- Transductores y sensores.
- Preaccionadores.
- Actuadores.
- Controladores.

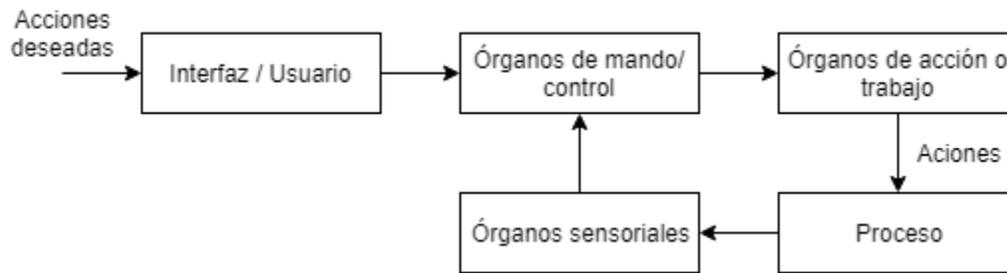


Figura 16. Sistema básico automatizado.

### 1.3.2. De acuerdo a la frecuencia de ocurrencia

- **Cíclicos:** La obtención de un producto final ocurre cada cierto intervalo de tiempo.
- **Continuos:** La obtención de un producto final ocurre de forma continua en el tiempo.
- **Semicontinuos:** Se genera un producto final unitario, sin embargo el proceso es de forma continua en el tiempo (Suñé, Gil, y Arcusa, 2004).

### 1.3.3. De acuerdo a la naturaleza del flujo productivo

- **Procesos unidad por unidad:** El flujo de producción es cíclico y genera un producto de forma continua cada cierto intervalo de tiempo. Estos se adaptan a diversos ritmos de producción.
- **Procesos por lotes:** Cada cierto tiempo se genera un lote de productos. Entre cada lote producido hay un tiempo improductivo ya sea por manipulación o reajuste y mantenimiento de maquinaria.
- **Procesos a velocidad constante:** Estos procesos son controlados de forma automática ya que son continuos en el tiempo y con una velocidad fija.

## 1.4. Sistemas Automatizados

La automatización de los procesos industriales se ha convertido en uno de los objetivos de las empresas que buscan ser más competitivas en un entorno que con el pasar del tiempo se ha tornado cambiante gracias al acelerado avance de la tecnología (García, 2001).

Un sistema automatizado tiene una estructura compuesta de dos partes, como se observa en la Figura 17:

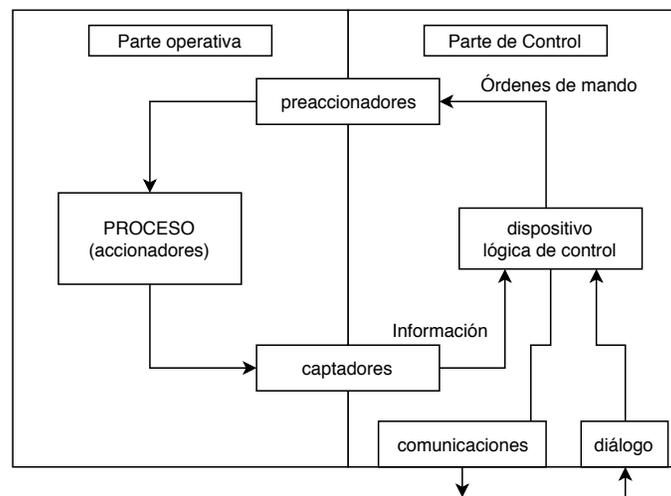


Figura 17. Modelo estructural de un sistema automatizado.

Fuente: (García, 2001)

- **Parte Operativa:** Se refiere al conjunto de dispositivos, maquinaria o subprocesos que se usan en la realización de operaciones mecánicas en sistemas de fabricación discreta y continua.
- **Parte de Control o Mando:** Esta puede ser implementada con diversos tipos de tecnología ya sea electrónica, neumática, hidráulica, etc. El Control o mando a menudo se encarga de (García, 2001):
  - Gestión de entradas/salidas.
  - Secuencias.

- Funciones de regulación.
- Cálculos de optimización.
- Control de calidad.
- Gestión de mantenimiento.
- Supervisión: monitorización y diagnóstico de fallos.
- Seguimiento del proceso de producción.

### 1.4.1. Niveles de automatización

Los distintos niveles de automatización dependen de factores como la inversión económica, tecnológica y talento humano que demandan los procesos industriales (Carrillo y Calero, 2016).

El nivel de automatización puede cambiar gracias a la innovación tecnológica, sin embargo, se puede dividir en ciertas áreas de interés de acuerdo a la empresa (Sanchez y Pizarro, s.f.):

- Automatización de equipos y maquinarias de producción.
- Adopción de innovaciones desarrolladas por otras organizaciones.
- Modificación de productos o procesos existentes.
- Continua línea de Investigación y Desarrollo.

### 1.4.2. Aplicaciones de la automatización

La automatización es aplicada a la manufactura de productos de distintos sectores como textil, de alimentos, agrícola, entre otros. Se puede implementar en pequeños talleres así como también en las grandes industrias. Para automatizar un proceso o una máquina se debe tomar en cuenta los siguientes items:

- Tipo de producto manufacturado.

- Requerimientos de cantidad y velocidad de producción.
- La fase de la línea de producción que se va a automatizar.
- Costo que requiere la automatización.

La automatización requiere de altos costos en equipos y adecuación de los mismos además de personal con conocimientos de operación y mantenimiento por lo que se debe realizar un estudio previo de las necesidades de la empresa y si la automatización es la opción adecuada (Guerrero, 2014).

### 1.4.3. Pirámide de automatización

La pirámide de automatización integra distintas tecnologías como la mecánica, electricidad, electrónica, telecomunicaciones y otras más modernas expuestas en cinco niveles que detallan el entorno de la industria. Todos los niveles, Figura 18, se relacionan entre sí a través de diferentes estándares de comunicación industrial (SMC, 2019).

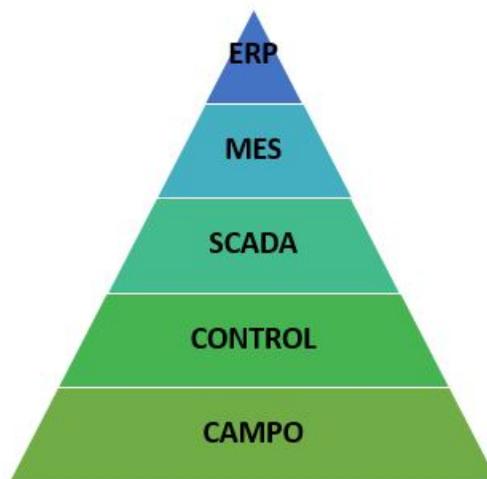


Figura 18. Pirámide de automatización.

Fuente: (SMC, 2019)

- **Nivel de Campo:** En este primer nivel se encuentran los elementos físicos como sensores, actuadores, equipos y maquinarias que intervienen directamente con el proceso.
- **Nivel de Control:** Incluye dispositivos de control como PLC (Controlador Lógico Programable) y computadores industriales con el fin de controlar procesos lógicos y secuenciales.
- **SCADA:** *Supervisory Control And Data Acquisition*, es el nivel de representación gráfica de los dos primeros niveles a través de HMI (Interfaz Humano- Máquina) de manera que facilite la interacción y supervisión del proceso en tiempo real o mediante históricos (SEIKA , 2017).
- **MES:** *Manufacturing Execution System*, en este nivel es posible dirigir y supervisar los procesos totales de una planta de producción (Herrera, 2018).
- **ERP:** *Enterprise Resource Planning*, este nivel integral o de gestión controla los recursos para una adecuada planificación de la empresa.  
Recopila información de áreas operativas y administrativas para posteriormente interpretarla y analizarla para facilitar la toma de decisiones (SEIKA , 2017).

#### 1.4.4. Fases para llevar a cabo un proyecto de automatización

Desarrollar un proyecto de automatización industrial requiere del conocimiento y entendimiento de ciertas fases o etapas para obtener los resultados deseados. La Figura 19 indica la secuencia de las etapas que se deben seguir durante el proceso.

- **Automatización:** En esta primera etapa se desarrollan los siguientes pasos a nivel de PLC:
  - Contemplación y análisis del proceso.
  - Elaboración del GRAFCET de primer nivel.
  - Análisis y selección del tipo de automatismo a utilizar.

- Selección de equipos físicos como sensores, actuadores tomando en cuenta entradas y salidas.
- Elaboración del GRAFCET de segundo nivel.

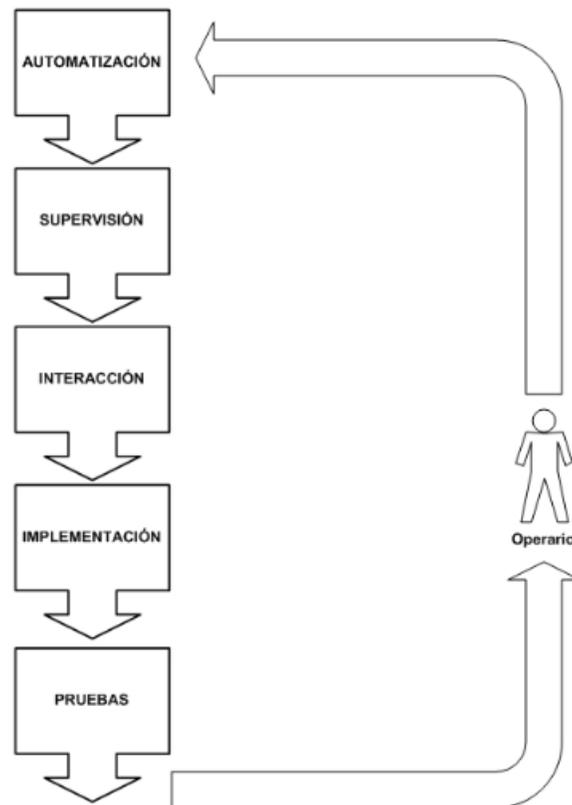


Figura 19. Fases para automatizar un proyecto.

Fuente: (Carrillo y Calero, 2016)

El GRAFCET o Grafo de Estados y Transiciones, representa la secuencia del proceso a automatizar (Ponsa y Granollers, 2010).

En la fase de automatización se debe desarrollar dos tipos de grafcet, el de nivel uno se refiere a una descripción general de las etapas y están escritas en un lenguaje natural, a diferencia del segundo nivel, en el que se detalla todas las operaciones con un lenguaje técnico (San Segundo Carrillo, 2010).

- **Supervisión:** Los pasos que se deben tomar en cuenta en esta fase son:

- Especificar todos los estados posibles en las que se puede encontrar una máquina o proceso según la experiencia de los operadores o jefe de área.
- Representar la guía GEMMA del proceso (Guía de estudios del proceso) como se observa en la Figura 20.
- Se debe separar los Graficet de producción por módulos si es que se tiene secuencias cíclicas, para luego integrarlos en un solo Graficet general de todo el proceso.
- El supervisor debe estar pendiente en caso de que se presenten fallos o posibles imprevistos (Ponsa y Granollers, 2010).

La Guía GEMMA muestra las acciones del operador en diferentes situaciones representados en tres módulos: Módulo de Seguridad, de Modos de Marcha y de Producción (Ponsa y Vilanova, 2005).

- **Interacción:** Se refiere a la interacción entre el automatismo y la supervisión humana para la comprobación de las acciones físicas de los dispositivos así como también la captación de señales de información ya sean visuales o acústicas. La interacción permite determinar si los dispositivos que se han utilizado son suficientes o se requiere hacer mejoras (Ponsa y Granollers, 2010).
- **Implementación:** Consiste específicamente de dos simples pasos :
  - Elección del lenguaje de programación.
  - Transcripción del GRAFCET a lenguaje de programación (Ponsa y Granollers, 2010).
- **Pruebas:** Posterior a la implementación se realizan las pruebas necesarias vigilando la secuencia automática desde un panel de mando o HMI (*Human Machine Interface*) con el fin de interactuar directamente con el proceso, además es necesario emular los fallos o situaciones que se puedan presentar (Ponsa y Granollers, 2010).

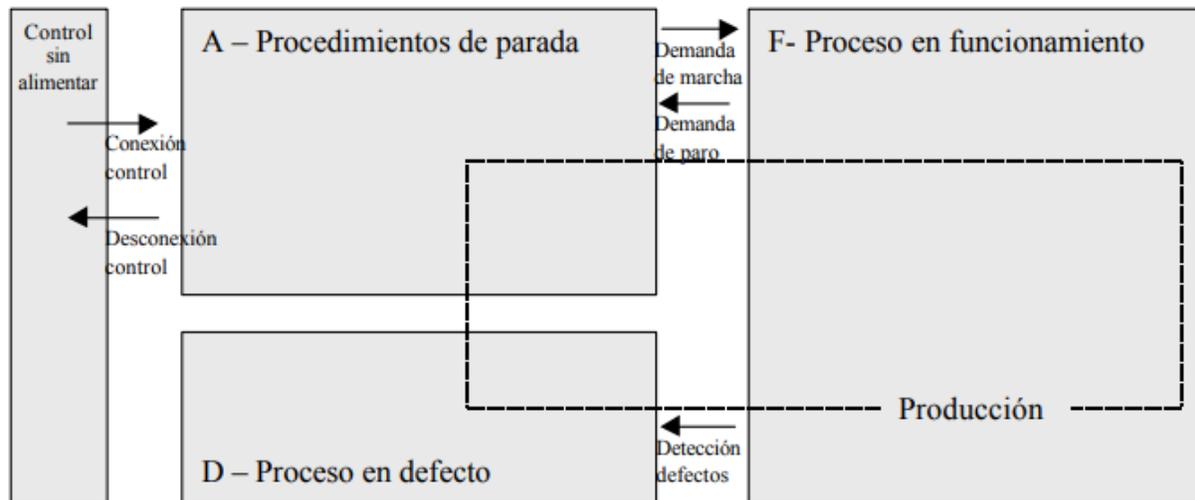


Figura 20. Representación de la Guía GEMMA.

Fuente: (Ponsa y Granollers, 2010)

## 1.5. Elementos eléctricos y electrónicos

Los sistemas compuestos por elementos eléctricos y electrónicos son muy comunes en la industria. Estos sistemas cuentan con diferentes elementos y dispositivos como :

### 1.5.1. Sensores y transductores

Dada la importancia de la captación de señales que son parte de un proceso controlado, se hace uso de los transductores cuya función es medir las variables que intervienen directamente en el sistema (García, 2001), convirtiendo una señal ya sea de tipo mecánica, térmica, magnética, óptica, química y eléctrica en otra señal de diferente tipo (Carrillo y Calero, 2016).

El sensor es el dispositivo que se encuentra en contacto directo con la variable, transforma sus propiedades y el transductor convierte estos cambios en una señal física que sea interpretada por el

sistema, como es el caso de las señales eléctricas, es por ello que en la actualidad se los encuentra de manera conjunta en un solo dispositivo (Rodríguez, 2015).

Las señales obtenidas de un proceso generalmente deben ser acondicionadas para utilizarlas con cierto propósito. Estos acondicionadores son circuitos electrónicos clasificados de la siguiente manera (Carrillo y Calero, 2016):

- Cambios en niveles de señal
  - Amplificador
  - Atenuador
  - Eliminación de offset
- Linealización
- Ajuste de impedancia y filtrado de señales
- Conversión de señales
  - Puente de Wheatstone
- Transmisión
  - Tensión / corriente
  - Tensión / frecuencia
  - Corriente / tensión
  - Modulación
- Interface Digital
  - Muestreo
  - Conversión análoga / digital
  - Conversión digital / análoga

### 1.5.1.1. Sensores de Peso

Estos dispositivos compuestos por galgas extensiométricas convierten una fuerza en una señal de tipo eléctrica. La deformación de las galgas es proporcional a la fuerza que en este caso se produce por efecto del peso de la carga, para luego traducirse a un cambio de resistencia que forma parte de un puente de Wheastone equilibrado como se muestra en la Figura 21(Carrillo y Calero, 2016).

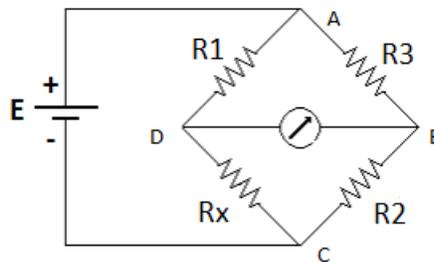


Figura 21. Puente de Wheastone.

Fuente:(Carrillo y Calero, 2016)

Las galgas más utilizadas en el entorno industrial son las células de carga de flexión de viga, Figura 22, pues permite la adaptación a básculas industriales en la medición de tolvas y silos, pesaje en vehículos, entre otras aplicaciones (Flintec, 2019).



Figura 22. Celda de flexión de viga.

Fuente: (Carrillo y Calero, 2016)

### 1.5.1.2. Sensores de Corriente

Los sensores de corriente son utilizados para monitoreo constante de dispositivos DC o AC y según la aplicación pueden ser usados para encender alarmas, arranque o paro de motores, entre otras aplicaciones (Caiza, Torres, Suárez, y León, 2018).

Existen dos tipos de sensores según la geometría del circuito magnético:

- **Transductor de geometría fija:** La exactitud de estos transductores no dependen tanto de la instalación, ya que tienen una estructura no manipulable y no varía su medida, como los transformadores de intensidad de núcleo cerrado y los shunts.  
La conexión de estos dispositivos se caracteriza por ser "in situ", es decir se debe interrumpir el circuito para la instalación.
- **Transductor de geometría variable:** Estos dispositivos son más usados que los anteriores ya que reducen el riesgo operativo y son instalados sin necesidad de interrumpir el circuito eléctrico, como los transductores tipo pinza de núcleo ferroso y transductores flexibles de núcleo de aire (ECAMEC, 2009).

## 1.5.2. Actuadores

En la industria se aplica una gran variedad de actuadores para lograr el funcionamiento de un proceso. Un actuador es capaz de generar una fuerza que da paso a cambio de posición, velocidad o estado de un elemento mecánico (Corona, Abarca, y Carreño, 2014).

Los actuadores se clasifican de acuerdo al tipo de energía que utiliza, Figura 23, o por el movimiento que genera el cual puede ser lineal o rotatorio.

### 1.5.2.1. Actuadores neumáticos

Este tipo de actuadores se caracterizan por transformar la energía acumulada de aire comprimido en trabajo mecánico ya sea lineal como en la utilización de cilindros o rotativos en motores.

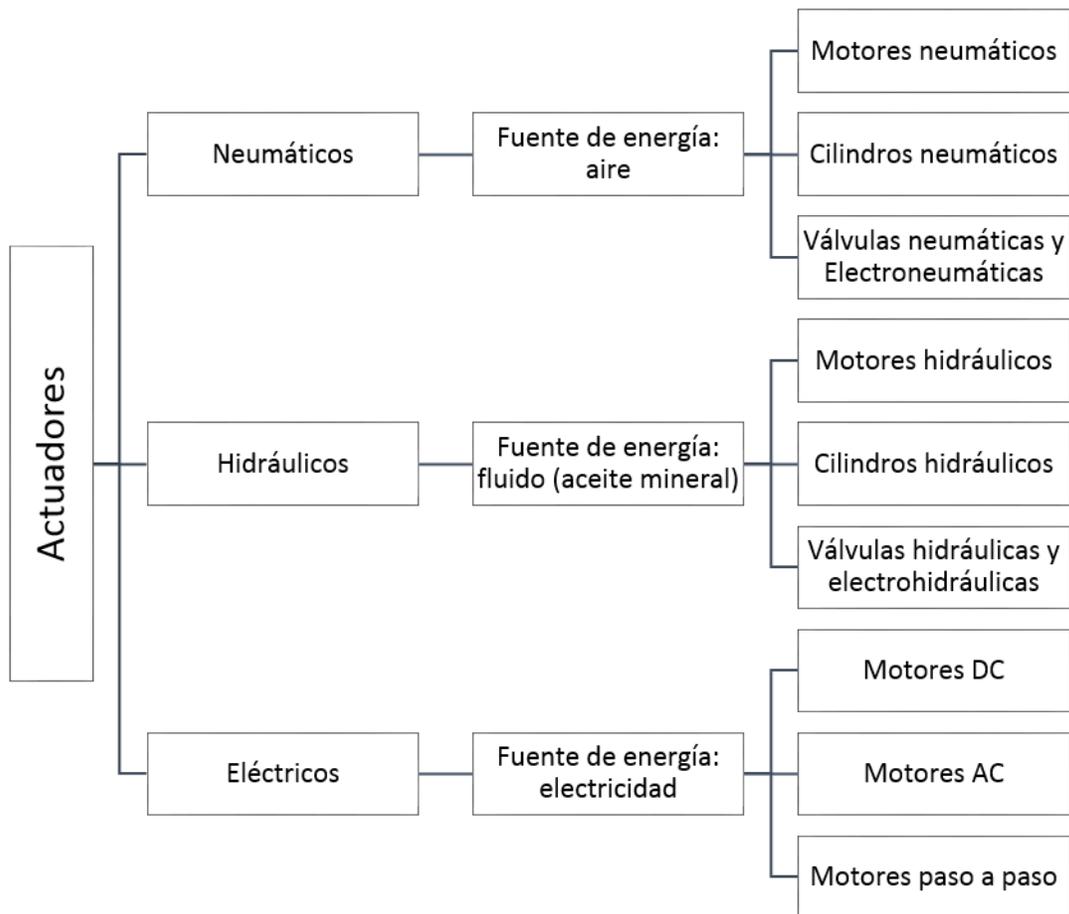


Figura 23. Clasificación de los actuadores.  
Fuente: (Corona et al., 2014)

### Cilindros neumáticos

Estos dispositivos son utilizados en la automatización de procesos industriales cuando se requiere generar un movimiento lineal.

Los cilindros neumáticos pueden ser de simple efecto o doble efecto de acuerdo a su construcción (Corona et al., 2014).

- **Cilindro de simple efecto:** El movimiento del vástago o elemento móvil se produce en un solo sentido y es de forma rectilínea, Figura 24.

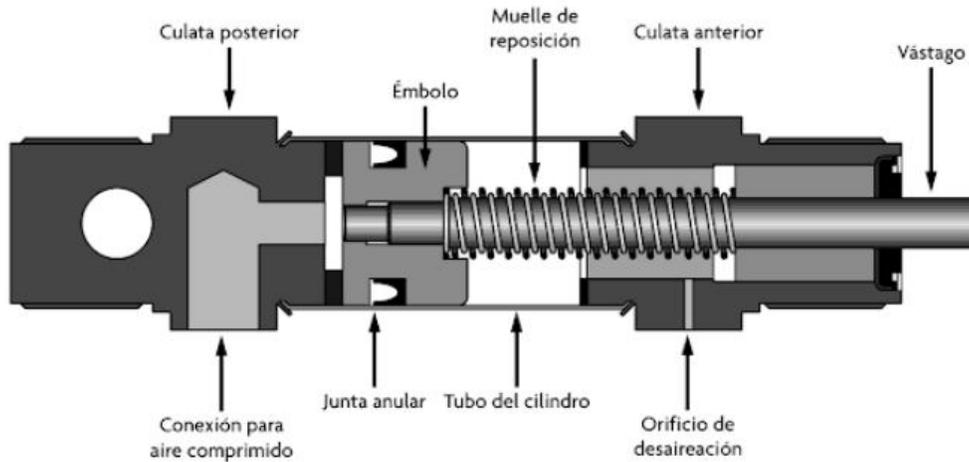


Figura 24. Cilindro de simple efecto.

Fuente: (Corona et al., 2014)

- **Cilindro de doble efecto:** Este cilindro es capaz de producir trabajo en ambos sentidos ya que está compuesto por dos tomas de aire como se observa en la Figura 25, es por ello que siempre se encuentra en conexión de aire comprimido.

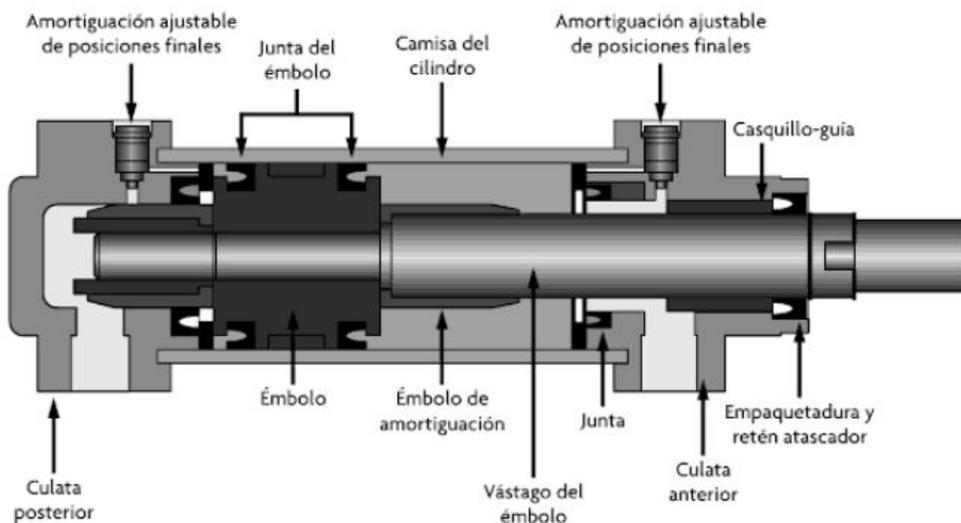


Figura 25. Cilindro doble efecto.

Fuente: (Corona et al., 2014)

### **1.5.2.2. Actuadores eléctricos**

El movimiento ya sea lineal o rotacional se produce a raíz de la transformación de la energía eléctrica en energía mecánica, por ello son los dispositivos más utilizados en las aplicaciones industriales ya que con actuadores neumáticos o hidráulicos se requiere el uso de compresores (Corona et al., 2014).

#### **Motor DC**

Para el funcionamiento de estos motores se requiere alimentación de corriente directa, es decir corriente que fluye en un solo sentido. Estos motores son muy frecuentes cuando se requiere el control de velocidad, pues se puede variar simplemente con la variación del voltaje de alimentación.

#### **Motor AC**

Los motores AC requieren corriente alterna que se obtiene de la red de distribución de energía eléctrica.

Para controlar la velocidad de estos motores se debe variar la frecuencia de operación de voltaje (Corona et al., 2014). En las aplicaciones de control se hace uso de variadores de frecuencia por lo que el costo de implementación es mayor.

### **1.5.3. Autómatas Programables Industriales**

El término autómata programable (API) nace gracias al proyecto de General Motors en la década de los 60. El objetivo del proyecto era dar solución a la falta de flexibilidad y adaptación de procesos a los nuevos modelos de automóviles además de que se requería evitar los altos costos en las reparaciones y consecuencias de paradas por averías de los dispositivos en la lógica cableada

(García, 2001).

Como definición un autómatas programable o también conocido como PLC (*Programmable Logic Controller*) es un aparato electrónico diseñado para controlar una gran variedad de procesos industriales en tiempo real (Aguilera, 2002).

### 1.5.3.1. Funciones básicas de un PLC

- Detección de señales de los captadores.
- Control de mando.
- Diálogo entre operadores y el proceso.

### 1.5.3.2. Estructura externa del PLC

La estructura externa de un PLC puede ser:

- **Compacta:** Los elementos se encuentran en un único bloque.
- **Modular:** Los diferentes tipos de entradas y salidas vienen en distintos módulos, estos módulos se fijan en rieles en conjunto con el CPU y fuente de alimentación para hacerlo compacto (Aguilera, 2002).

### 1.5.3.3. Estructura interna del PLC

Los componentes de la estructura interna del PLC se encuentran descritos en la Figura 26.

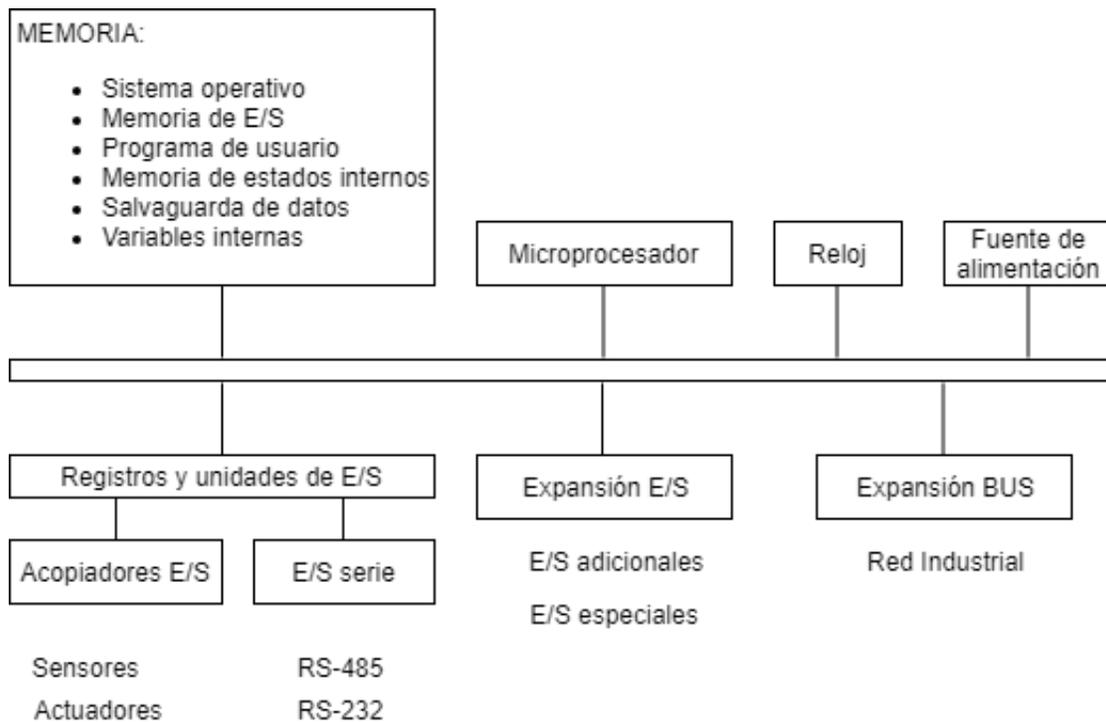


Figura 26. Estructura interna del PLC.

Fuente: (Aguilera, 2002)

### 1.5.3.4. Interfaz Hombre - Máquina

El HMI es un medio que permite la interacción entre un operador y un hardware o máquina. En los procesos industriales su uso es muy frecuente, pues permite visualizar datos del sistema como variables del proceso en tiempo real mediante componentes numéricos y estado de máquinas mediante componentes gráficos (Ruiz, Inche, y Chung, 2008).

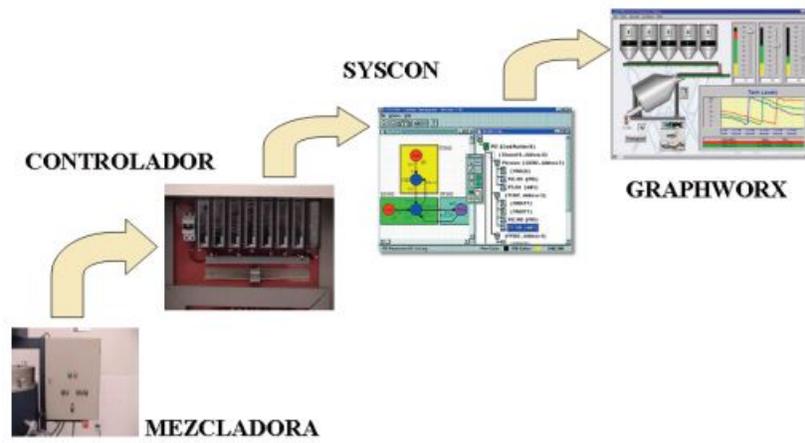


Figura 27. Componentes del HMI en System 32.

Fuente: (Ruiz et al., 2008)

# Capítulo 2

## Diseño

### 2.1. Situación actual: Planta de Balanceados ALIGRANSUC

La planta de balanceados ALIGRANSUC cuenta con sistemas de mando manual, es decir, la puesta en marcha de las máquinas es por medio de pulsadores e intervención directa de los operadores.

#### 2.1.1. Secuencia de Proceso.

Las etapas de interés a automatizar en este proyecto son pesaje y molienda de materia prima, en el Anexo A.1 y A.2 se desglosa las actividades que realiza el operador en las dos etapas respectivamente.

El operador acciona manualmente los pulsadores que encienden los motores elevador y de transporte acoplados a los tornillos sin fin que conducen el maíz desde los silos contenedores ubicados en la parte exterior hacia la tolva 1, el peso actual de la tolva se observa en un indicador de peso y se detiene los motores cuando se llega al peso deseado.

La materia prima contenida en la tolva 1 pasa a la tolva 2, aquí se controla la apertura de la compuerta de forma manual, permitiendo el paso de maíz de manera progresiva de acuerdo a la

lectura del amperaje del molino de martillos ubicado en el tablero principal que por lo general se intenta mantener entre 40A y 50A, hasta que se vacía la tolva 2 por completo.

### 2.1.2. Identificación de variables

Una vez que se ha entendido el proceso y el accionar de los operadores en las etapas de pesaje y molienda se determina que la arquitectura del sistema de control es la misma para las dos etapas como se ilustra en la Figura 28, sin embargo las variables se diferencian a continuación:

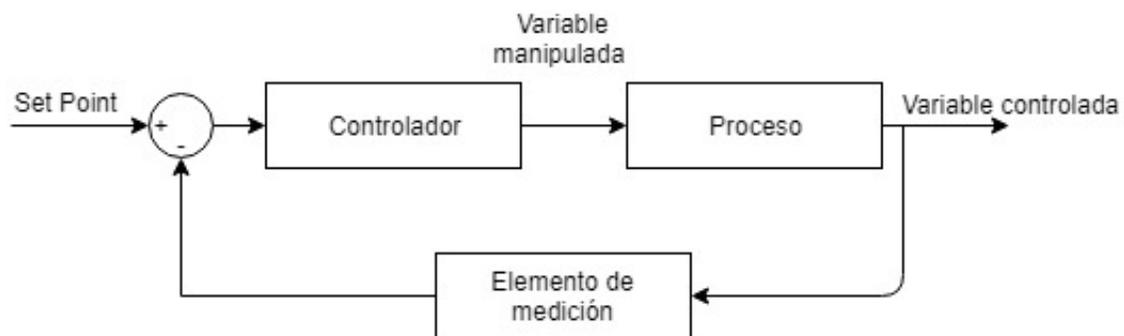


Figura 28. Bloque de sistema de control.

#### Pesaje

- Set Point: Peso referencial definido por el usuario
- Variable controlada: Peso actual
- Variable manipulada: Encendido o apagado de transportador de materia prima

#### Molienda

- Set Point: Valor de corriente referencial de molino definido por el usuario
- Variable controlada: Valor de corriente actual
- Variable manipulada: Apertura o cierre de compuerta de tolva 2

### 2.1.3. Identificación de KPI's

Posterior a la medición de tiempos de las etapas de la línea de producción de balanceados en la planta con lotes de 300Kg, se determinó un promedio de 102 minutos para el primer lote de producción, como se observa en el Diagrama de Gantt de la Figura 29.

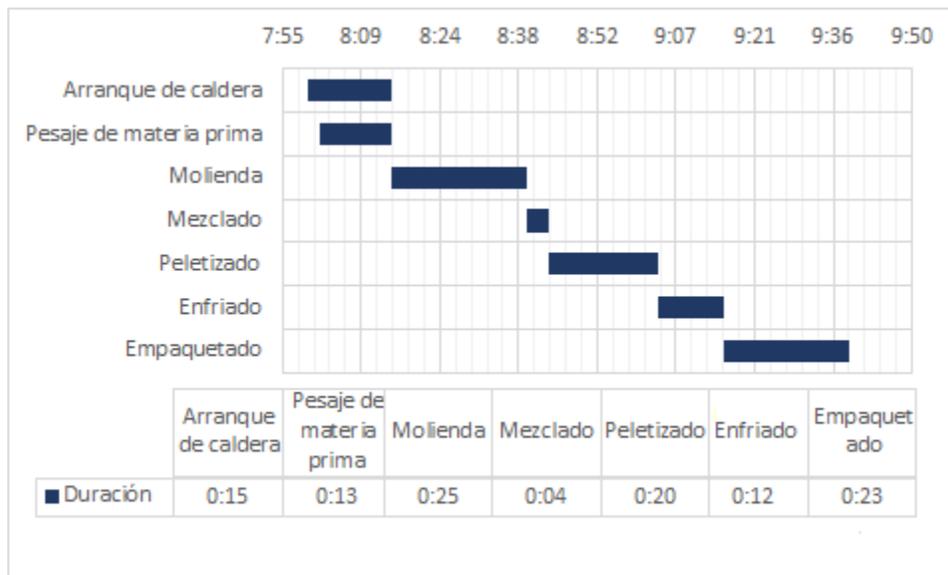


Figura 29. Diagrama de Gantt: tiempos de proceso.

Los KPI's que se ha considerado importantes en las etapas son:

#### Pesaje

- Tiempo de pesaje: 13 minutos
- Variación de cantidad de materia prima: Luego de realizar 5 pruebas se obtuvo los siguientes resultados:

**Tabla 1***Pruebas de pesaje antes de la automatización*

<b>Descripción</b>	<b>Peso[Kg]</b>	<b>Error[Kg]</b>
Prueba 1	301	1
Prueba 2	305	5
Prueba 3	300	0
Prueba 4	303	3
Prueba 5	301	1
	Error promedio	2

El error promedio luego de realizar las pruebas es 2 Kg, cabe recalcar que este valor varía de acuerdo a la disponibilidad de personal y la experticia de operador de turno.

### **Molienda**

- Tiempo de molienda: 25 minutos
- Porcentaje de corriente de molino respecto a nominal: La corriente nominal del motor AC del molino es 70 A. Por lo general los operadores tratan de mantener el amperaje del motor cerca de 50 A, lo cual equivale a 71.43 % de su valor nominal.

Hay que tomar en cuenta que no es posible mantener trabajando al motor al 100 % debido a las constantes perturbaciones no controladas del sistema.

**Tabla 2***Pruebas de molienda antes de la automatización*

<b>Descripción</b>	<b>Corriente</b>	<b>Porcentaje respecto a corriente nominal [ %]</b>
Prueba 1	42,4	60,57
Prueba 2	43,4	62
Prueba 3	41,65	59,5
Prueba 4	44,8	64
Prueba 5	44,24	63,2
<b>Promedio</b>	43,3	62,05

En la Tabla 2 se muestra los resultados para 5 pruebas de molienda los cuales fueron tomados por medición de tiempo y lectura de corriente durante el mismo.

### 2.1.4. Elementos del proceso

Los elementos que se encuentran en funcionamiento en las etapas de pesaje y molienda se detallan en la Tabla 3.

**Tabla 3**

*Elementos que intervienen en el proceso.*

Componente	Descripción	Área	Cantidad
Silo	Contenedor de materia prima	Pesaje	1
Tornillo sin fin	Tornillo ubicados a la salida del silo	Pesaje	2
Motores	Motor elevador y de transporte	Pesaje	2
Balanza digital	Balanza para el pesaje de materia prima	Pesaje	1
Tolva	Tolva contenedora de materia prima pesada	Pesaje	1
Tolva	Tolva contenedora de materia prima para molienda	Molienda	1
Motor	Motor de molino de martillos	Molienda	1

En la Figura 30 se puede identificar los siguientes elementos:

- A: Línea 1 transporte de materia prima.
- B: Tolva 1.
- C: Tolva 2.
- D: Indicador de peso digital.
- E: Panel de control eléctrico secundario.
- F: Panel de control eléctrico principal.
- G: Molino de martillos



Figura 30. Proceso de pesaje y molienda de materia prima.(cambiar)

Fuente: Autor.

### 2.1.5. Consola de mando manual

En la Figura 31 se observan los accionamientos manuales de todo el proceso de producción de balanceado.

- A: Indicador de voltaje de alimentación del tablero.

- B: Indicador de corriente de molino de martillos (molienda).
- C: Paro de emergencia.
- D: Encendido y apagado de molino de martillos.
- E: Encendido y apagado de ventilador 1.
- F: Encendido y apagado de válvula rotativa 1.
- G: Apertura de compuerta tolva 3.
- H: Encendido y apagado de mezcladora.
- I: Encendido y apagado de elevador.
- J: Indicadores de funcionamiento de peletizadora.
- K: Encendido y apagado de Enfriador.
- L: Encendido y apagado de ventilador 2.
- M: Encendido y apagado de válvula rotativa 2.
- N: Encendido y apagado de quebrador.
- O: Encendido y apagado de elevador 2.
- P: Encendido y apagado de cernidor.

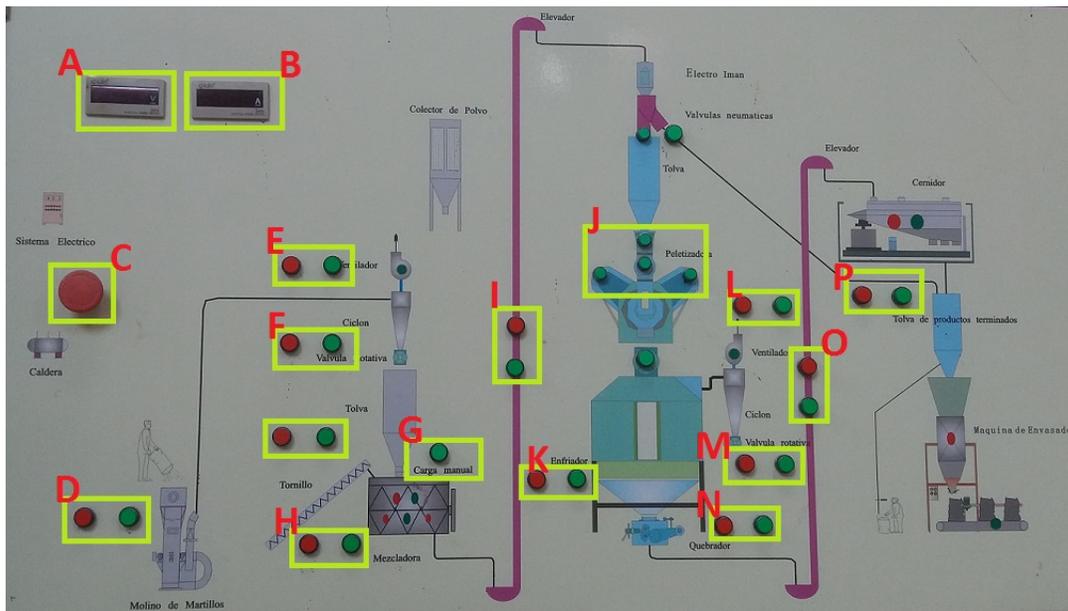


Figura 31. Panel Eléctrico principal.

En la Figura 32 se observan los accionamientos manuales del panel de control secundario, de los cuales dos se encuentran en funcionamiento.

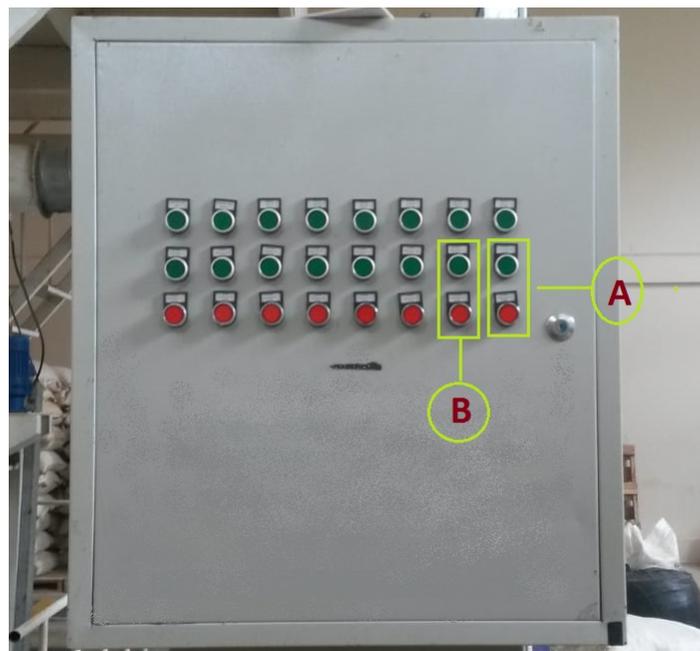


Figura 32. Consola manual 1.

- A: Encendido y apagado de motor elevador de la línea 1 de traslado de materia prima.
- B: Encendido y apagado de motor de transporte de la línea 1 de traslado de materia prima.

**Nota:** Los accionadores que se encuentran en los tableros y no han sido mencionados en los items no tienen funcionamiento alguno en el proceso de producción de la planta.

En el tablero principal se encuentran las conexiones de fuerza, es decir de los motores, donde cada uno de ellos están conectados de la siguiente manera:

Breaker Principal > Disyuntor > Contactor > Relé térmico > Motor.

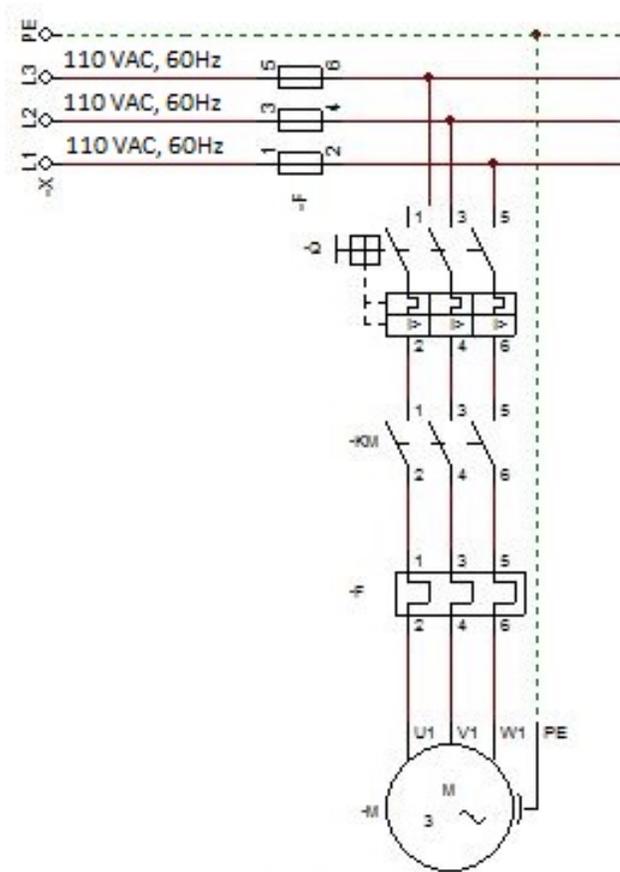


Figura 33. Circuito de Fuerza de Motores .

### 2.1.6. Características Generales

En la Tabla 4 se detallan las condiciones ambientales en las que se encuentra la planta de balanceado Aligransuc y en la Tabla 5, las características eléctricas con las que se cuenta para la implementación de nuevos equipos.

#### ■ Condiciones Ambientales

Las condiciones ambientales en las que se encuentra la planta de balanceado son:

**Tabla 4**

*Condiciones ambientales en la planta de balanceado Aligransuc.*

<b>Características</b>	<b>Valores</b>
Altitud sobre el nivel del mar (m)	297
Temperatura máxima (°C)	40
Temperatura mínima (°C)	19
Temperatura media (°C)	24.7
Nivel de humedad (%)	94

#### ■ Características Eléctricas

Las características eléctricas con las que cuenta los tableros electricos de la planta son:

**Tabla 5**

*Características eléctricas en la planta de balanceado Aligransuc*

<b>Características</b>	<b>Valores</b>
Frecuencia (Hz)	60
N° de fases	3
Conexión del neutro	Aterrizado
Tensión AC (Vac)	220 / 120

## 2.2. Requerimientos del sistema

Para que los procesos funcionen de manera correcta se debe tomar en cuenta las características actuales de los tableros eléctricos, para con ello determinar los equipos a utilizar de manera que el acoplamiento entre hardware y software sea el adecuado.

Los equipos a adquirir en la automatización de las etapas de pesaje y molienda son complementos de los elementos ya existentes en los tableros eléctricos. A continuación se identifica los requerimientos que implica automatizar estas dos etapas:

### 2.2.1. Requerimientos de Hardware

- Se debe contar con un tablero de control adecuado para la implementación de los nuevos equipos.
- Distribución de voltajes de alimentación de 220Vac y 24 Vdc.
- Controlador robusto apto para ambiente industrial y capacidad de expansión.
- Módulo de adquisición de datos del indicador de peso.
- Módulo de lectura de amperaje de motor de molino de martillos.
- Actuador que permita la apertura y cierre total de la compuerta de la Tolva 1.
- Actuador que permita la apertura progresiva de la compuerta de la Tolva 2.
- Pantalla HMI que permita la interacción del usuario con el proceso.

### 2.2.2. Requerimientos de Software

- Monitoreo del proceso en tiempo real.
- Reportes diarios de producción.
- Modos de operación manual y automático de las etapas de pesaje y molienda.

- Facilidad de Operación
- Compatibilidad entre controlador, balanza, HMI.

### 2.2.3. Análisis de Nivel de Campo

- Pesaje

En esta etapa la variable a analizar es el peso de la Tolva 1, donde se mide la cantidad de maíz que ingresa al proceso.

Actualmente se tiene un indicador de peso de la serie X10 (Figura 34) conectada a una celda de carga de 4 galgas que proveen las señal de peso hacia la balanza. El valor de peso se visualiza en la pantalla LCD del indicador, además incluye puerto RS232 para envío de datos, de esta manera esta comunicación es un requisito que debe poseer el controlador a utilizar.



Figura 34. Indicador de Peso CISGO X10.

**Tabla 6**

*Báscula de Pesaje series XK315A1X.*

Características	Valores
Alimentación	110 V AC
Tipo de Visualización	LED
Dimensiones	256 x 165 x 170 mm
Comunicación	RS-232

Para abrir y cerrar la compuerta de la Tolva 1 (Figura 35) se hala y se empuja manualmente, en el proyecto esta acción se sustituye por un cilindro neumático comandado desde el controlador, razón por la que este debe contar con salidas digitales a relé.

La estructura mecánica de la compuerta de la Tolva 1 previo a la automatización se puede observar más a detalle en el Anexo A.3.



*Figura 35.* Compuerta Tolva 1.

#### ■ Molienda

En la etapa de molienda la señal a estudiar es la corriente de consumo del motor del molino de martillos. Generalmente este tipo de señales se leen con un sensor de corriente no invasivo para evitar la intervención de conexionado. Por las características que presentan estos sensores se requiere que el controlador sea capaz de leer señales de tipo analógicas.

La apertura de la compuerta de la Tolva 2 se realiza paulatinamente controlando el caudal de maíz hacia el molino como se observa en la Figura 36. Por el limitado presupuesto se ha determinado utilizar un motor DC controlado por voltaje mediante una señal modulada por

ancho de pulso (PWM), es decir, el controlador debe soportar salida PWM.

La estructura mecánica de la compuerta de la Tolva 2 previo a la automatización se puede observar más a detalle en el Anexo A.4.



*Figura 36.* Compuerta Tolva 2.

### **2.3. Propuesta de automatización**

En la Figura 37 se ilustra el diagrama de flujo correspondiente a la propuesta del sistema automatizado. Como dispositivo controlador se tiene un PLC, al cual ingresan las señales de sensores, las procesa y como resultado envía señales hacia los actuadores, de esta forma se presenta el funcionamiento básico de un sistema automatizado. Además, este esquema presenta la conexión a un HMI con el fin de comunicar al operador con el proceso.

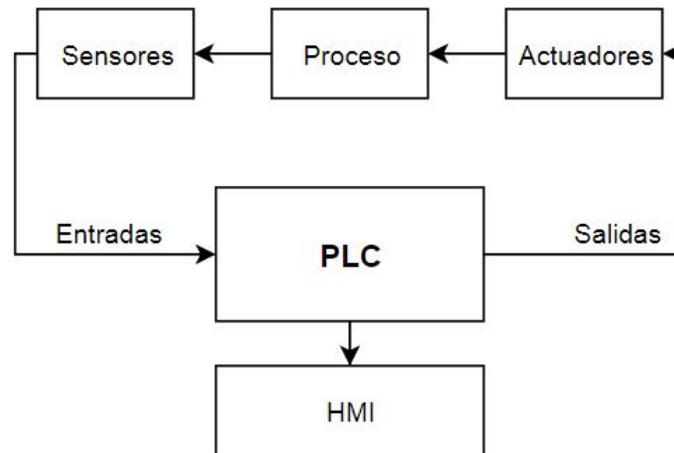


Figura 37. Diagrama de flujo de sistema automatizado.

## 2.4. Diseño secuencial a nivel de PLC: Grafcet

En este apartado se diseña el Grafcet de Producción que representa la secuencia del proceso. En la Figura 38 se tiene la secuencia de estados de la integración de las dos etapas: pesaje y molienda. Con una señal de Inicio y la compuerta de la Tolva 1 cerrada se inicia el proceso de pesaje de materia prima, luego se abre la compuerta para vaciar el maíz en la Tolva 2 y se inicia la molienda, al mismo tiempo que se compara si el número de de batches pesados es menor al número de lotes (*batches*) que se va a procesar para volver a pesar el siguiente batch. Luego de la molienda se compara si el número de *batches* molidos es igual al número de *batches* de referencia, si es así, el proceso termina, caso contrario, se da paso a la molienda del nuevo *batch* que ya ha sido pesado.

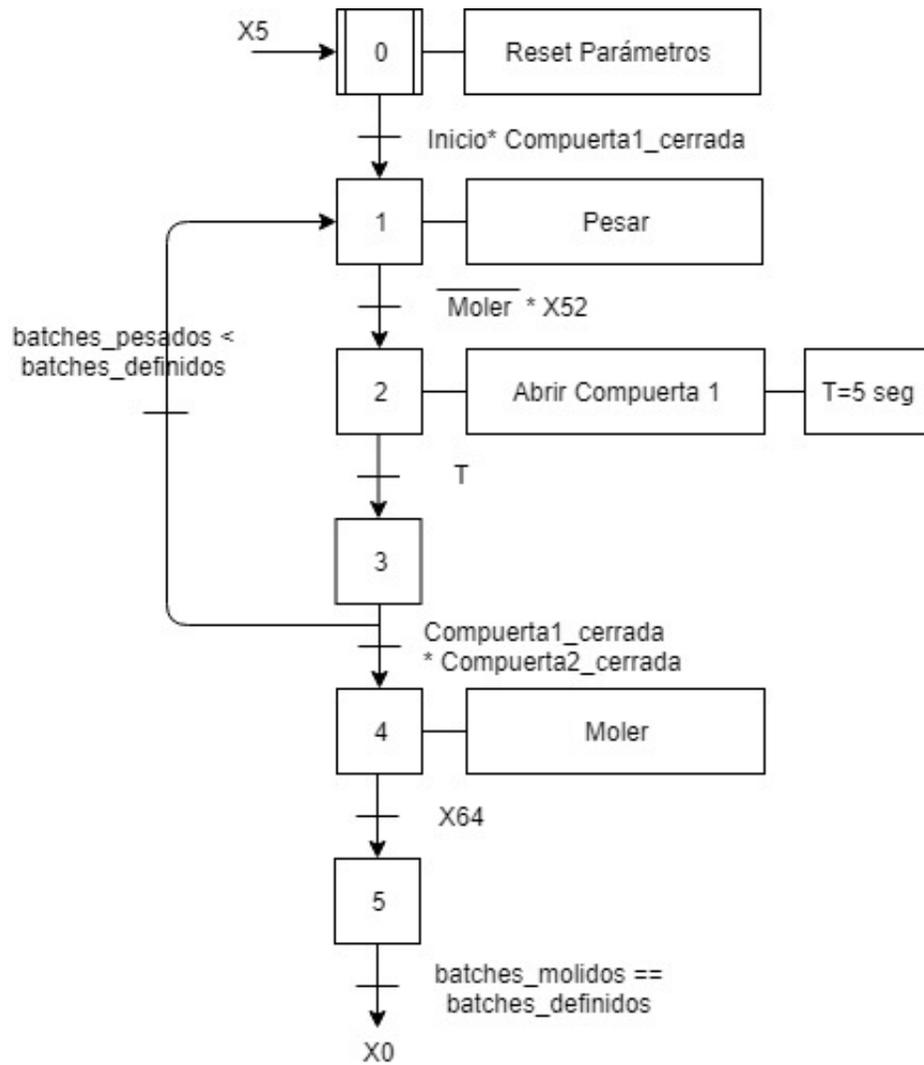


Figura 38. Grafcet de Producción de Nivel 1.

La subrutina de Pesaje se muestra en la Figura 39, donde la compuerta de la tolva 1 debe estar cerrada para dar paso al encendido del transportador de materia prima hasta que el peso de la tolva sea igual al requerido, cuando termina se suma un batch pesado.

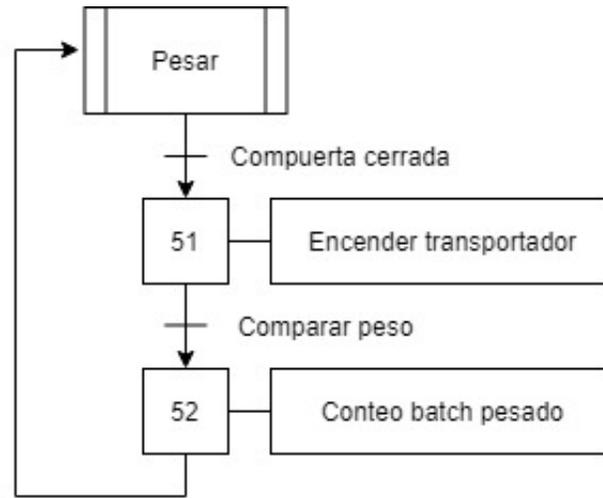


Figura 39. Grafcet de Pesaje de Nivel 1.

La subrutina de Molienda se muestra en la Figura 40, donde la compuerta 1 y la 2 deben estar cerradas para dar paso a moler el maíz, cuando se haya abierto completamente la compuerta 2, esta se cierra y se suma la cuenta de batch molidos.

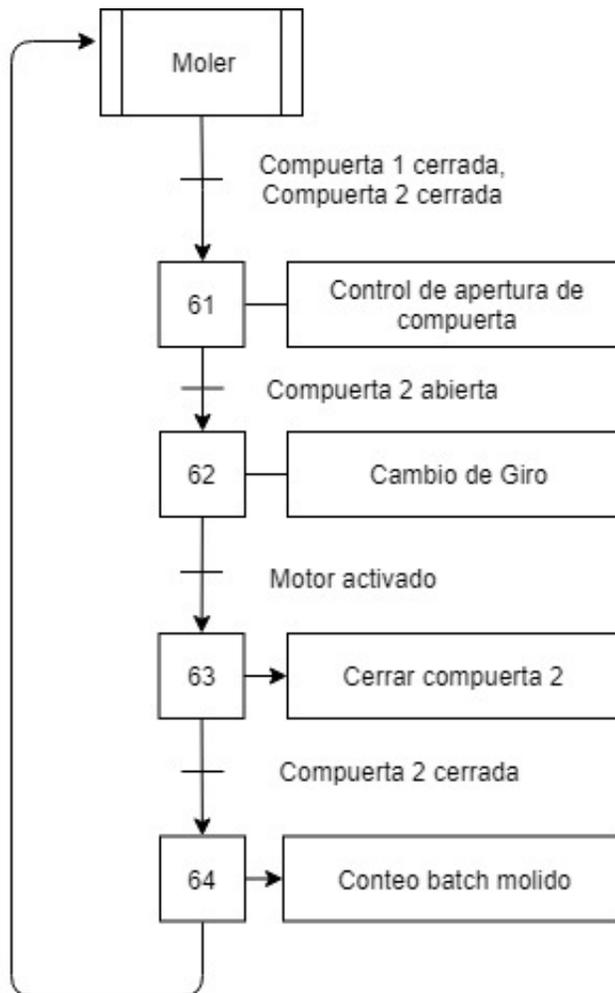


Figura 40. Grafcet de Molienda de Nivel 1.

## 2.5. Ingeniería de detalle

En esta sección se presentan los cálculos necesarios para el dimensionamiento de actuadores así como también las especificaciones técnicas de los dispositivos como controlador, sensores y actuadores que intervienen en el proyecto de automatización.

### 2.5.1. Dimensionamiento de cilindro neumático

Para dimensionar el cilindro de la compuerta de la Tolva 1 se toma en cuenta los siguientes datos:

**Tabla 7**

*Datos para dimensionamiento de cilindro*

Características	
Peso max. para Tolva 1	400 [Kg]
Densidad (maíz)	700 - 820 [ $Kg/m^3$ ]
Densidad (soja)	720 - 800 [ $Kg/m^3$ ]
Coef. fricción (acero-acero)	0.18
Presión (aire comprimido)	6 [bar]

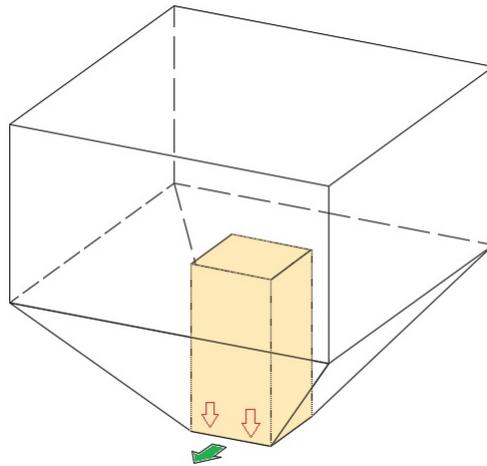


Figura 41. Columna de maíz sobre compuerta.

La máxima cantidad de maíz con la que se trabaja de acuerdo a las recetas definidas por el departamento de producción es 350 Kg, sin embargo se ajusta a 400 Kg para considerar el peor de los casos.

Para determinar el peso que soporta la compuerta se procede a calcular la columna de maíz que cae sobre ella.

Como se observa en la Figura 41 la tolva 1 es formada por una parte piramidal cuyo volumen es  $0,9216 m^3$  y una parte cúbica con un volumen de  $0,4860 m^3$ , para mayor detalle de las medidas puede observarse en el Anexo A.4.

$$V_1 = 0,9216m^3$$

$$V_2 = 0,4860m^3$$

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (2.1)$$

donde:

V= Volumen

m= Masa

$\rho$ = Densidad

Reemplazando datos, se tiene:

$$\rho = 700[Kg/m] \Rightarrow m_1 = 340,2[Kg]$$

$$\rho = 820[Kg/m] \Rightarrow m_1 = 398,5[Kg]$$

Se trabaja con  $m = 340,2Kg$  para determinar la masa faltante que se requiere para completar la carga máxima de maíz.

$$m = m_T - m_1 \quad (2.2)$$

donde:

$m_T$ = Masa total

$M_1$ = Masa contenida en la parte piramidal de la tolva

$$m = (400 - 340,2)[Kg]$$

$$m = 59,8[Kg]$$

Aplicando (2.1), se tiene:

$$V = \frac{59,8[Kg]}{700[Kg/m^3]} = 0,0854m^3$$

Con el volumen faltante, se puede calcular la altura hasta donde se llena de materia en la parte cúbica de la tolva.

$$V = (largo) \times (altura) \times (profundidad) \quad (2.3)$$

$$altura = \frac{0,0854m^3}{(1,2m) \times (1,2m)} = 0,0593[m]$$

Con el dato de la altura obtenida se puede calcular el volumen de la columna de maíz que reposa sobre la compuerta.

$$V_C = (0,3) \times (0,0593 + 0,54) \times (0,3)[m^3]$$

$$V_C = 0,0539[m^3]$$

Reemplazando  $V_C$  en (2.1), la masa es igual a:

$$m = 0,0539[m^3] \times 700[Kg/m^3]$$

$$m = 37,76[Kg]$$

Una vez obtenida la masa que reposa sobre la compuerta, se procede a calcular la fuerza mínima necesaria para abrir la compuerta, cabe recalcar que una vez que la compuerta empieza a abrirse, la columna de maíz sobre la compuerta disminuye poco a poco.

Sumatoria de fuerzas en eje y:

$$\Sigma F_y = 0 \quad (2.4)$$

$$N - W = 0$$

$$N = mg$$

donde:

N= Fuerza normal

W= Peso

g= Aceleración gravitatoria

Sumatoria de fuerzas en eje x:

$$\Sigma F_x = m \times a \quad (2.5)$$

$$F - F_{fr} = m \times a$$

$$F = m \times a + \mu \times N$$

donde:

F= Fuerza mínima requerida para mover la masa

$F_{fr}$ = Fuerza de fricción

$\mu$ = Coeficiente de fricción

Reemplazando (2.4) por N, se tiene:

$$F = m \times a + \mu \times m \times g$$

$$a = 0$$

$$F = \mu \times m \times g$$

$$F = (0,18) \times (37,76) \times (9,8)[N]$$

$$F = 66,61[N] \quad (2.6)$$

Con la fuerza mínima necesaria para abrir la compuerta se calcula el diámetro interno del cilindro y diámetro del vástago.

La fuerza de un cilindro viene dada por el área y la presión del aire comprimido, como se describe en la siguiente ecuación:

$$F \leq A \times P \quad (2.7)$$

donde:

A= Área sobre la cual actúa la fuerza

P= Presión

El área que interviene en el accionamiento del cilindro depende si es de avance o retroceso, para ambas se consideran las siguientes fórmulas:

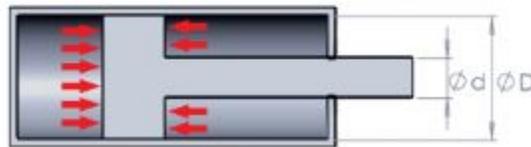


Figura 42. Área de avance y retroceso de un cilindro.

Fuente: (Intor, 2013)

$$A_{avance} = \pi \times \frac{D^2}{4} \quad (2.8)$$

$$A_{retroceso} = \pi \times \frac{D^2 - d^2}{4} \quad (2.9)$$

donde:

D=Diámetro del émbolo del cilindro

d= Diámetro del vástago del cilindro

La fuerza calculada en (2.6) es la necesaria para abrir la compuerta, es decir es la fuerza de retroceso del vástago del cilindro, por lo tanto se reemplaza (2.9) en (2.7) y se tiene que:

$$F_{retroceso} \leq \pi \frac{D^2 - d^2}{4} [mm^2] \times \frac{P}{10} [N/mm^2] \quad (2.10)$$

Nótese que se ha echo la conversión de [bar] a [N/mm<sup>2</sup>],

$$1[bar] = 0,1[N/mm^2]$$

Despejando, (2.10),

$$(D^2 - d^2) = \frac{F_{retroceso} \times 4 \times 10}{\pi \times P}$$

Se acude a una tabla de medidas estándar, Anexo A.5 de la marca (EMC, 2019) y se escoge el diámetro menor del vástago para luego calcular el diámetro interno del cilindro.

$$d = 17mm$$

$$D^2 \geq \frac{F_{retroceso} \times 4 \times 10}{\pi \times P} + d^2$$

$$D^2 \geq \frac{66,61[N] \times 4 \times 10}{\pi \times 6} [mm^2/N] + (17)^2 [mm^2]$$

$$D \geq 20,75 [mm^2]$$

Como  $D \geq 20,75 [mm^2]$ , se procede a escoger el cilindro tomando en cuenta que:

- La compuerta debe permanecer normalmente cerrada, es decir el vástago debe estar fuera del cilindro, es por ello que se determinó utilizar un cilindro de doble efecto.
- El recorrido de la compuerta es de 300mm por lo que el recorrido del vástago del cilindro debe ser de 300mm o mayor.

Por lo tanto, se escoge un cilindro de doble efecto FVBC-32X400-S EMC de diámetro del émbolo de 30mm y diámetro del vástago de 17mm, como se observa en el Anexo A.5.

**2.5.1.1. Simulación de funcionamiento de cilindro**

Para comprobar que se requiere un cilindro de doble efecto y determinar la válvula para su accionamiento, se procede a simular con el software FluidSIM de FESTO.

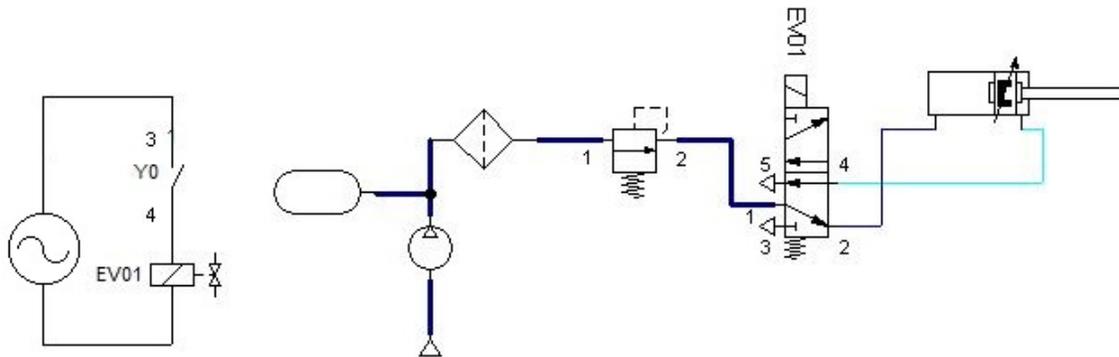


Figura 43. Simulación (FluidSim FESTO).

Tomando en cuenta que Y0 es la salida a relé del controlador, en la Figura 43 se puede observar que mientras la bobina no esté excitada el vástago del cilindro se encuentra desplazado hacia la derecha, es decir la compuerta de la tolva 1 está cerrada.

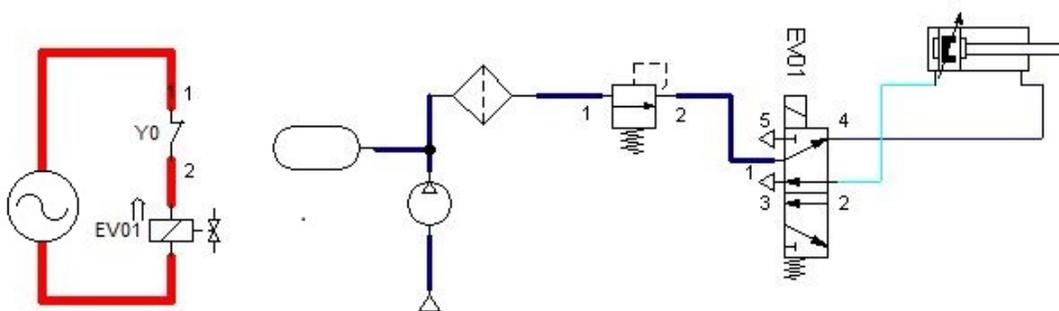


Figura 44. Simulación (FluidSim FESTO).

Cuando se excita la bobina por orden del controlador, el cilindro recorre el vástago hacia adentro como se ilustra en la Figura 44 de forma que se abrirá la compuerta de la tolva 1. El diagrama de estados de la simulación se muestra a continuación:

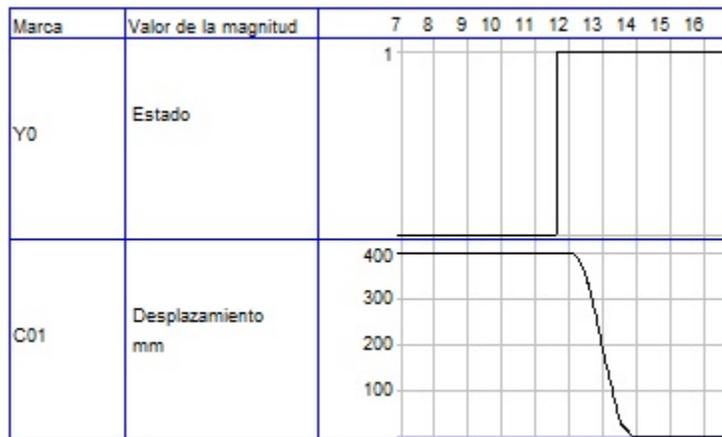


Figura 45. Diagrama de estados (FluidSim FESTO).

### 2.5.2. Dimensionamiento de motor DC

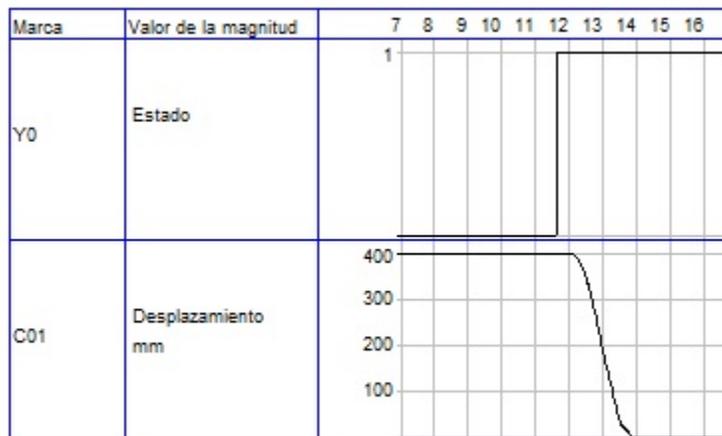


Figura 46. Diagrama de estados (FluidSim FESTO).

Para el dimensionamiento del motor a utilizar para la apertura y cierre de la compuerta 2, se tiene los siguientes datos:

**Tabla 8***Datos para dimensionamiento de motor*

<b>Características</b>	
Masa a desplazar	37,76 ≈ 40 [Kg]
Coef. fricción (acero-acero)	0,18
Diámetro del tornillo	22 [mm]
Paso del tornillo	5 [mm]
Longitud del tornillo	400 [mm]
Fuerza de corte	0
Eficiencia de rodamiento	0,9

Para calcular la Fuerza de movimiento necesaria abrir la compuerta se aplica la siguiente ecuación:

$$F_m = F_c + m \times g \times (\text{sen}(\theta) + \mu \times \text{cos}(\theta)) \quad (2.11)$$

donde,

$F_m$ =Fuerza mínima necesaria para abrir la compuerta 2

$F_c$ = Fuerza de corte en caso de fresado , en este caso es cero

$\theta$ = Ángulo de inclinación

Reemplazando datos en (2.11), se tiene que:

$$F_m = 0 + (40Kg) \times (9,8m/s^2) \times (\text{sen}(0) + 0,18 \times \text{cos}(0))$$

$$F_m = 70,63[N]$$

El torque mínimo para desplazar la carga es igual a:

$$\tau = F_m \times \frac{P_t}{2\pi e_r} + \frac{\mu \times F_m \times P_t}{6 \times 2\pi} \quad (2.12)$$

donde,

$P_t$  = Paso del tornillo

$e_r$  = Eficiencia de rodamiento

Por lo tanto, según (2.12) el par necesario para mover la carga es:

$$\tau = 0,6586 \text{ [N/m]}$$

El torque requerido para abrir la compuerta es 0,6586 [N/m].

Según los datos de fabricantes el torque de un motor DC no es suficiente para abrir la compuerta por lo tanto se debe usar un reductor mecánico de velocidad, pues al disminuir la velocidad se aumenta el torque.

Dado que no se necesita alta velocidad para abrir la compuerta de la Tolva 2, se determina usar una caja de reducción reciclada de la planta, cuyo torque de salida es:

$$\tau = 100[\text{lb in}] = 11,31[\text{Nm}]$$

11,31 [N m] es suficiente para mover la compuerta del molino.

Los datos del motor escogido se encuentran en la Sección 2.6.3.

### 2.5.3. Circuito acondicionador para sensado de corriente

Para la lectura de corriente del motor del molino de martillos se utiliza un transductor de geometría variable para no interrumpir el conexionado del motor.

El sensor SCT-013-100 permite lectura de hasta 100 [A] de corriente alterna y entrega de 0 a 50 [mA] así mismo en alterna, por ello se necesita implementar un circuito acondicionador de señal entre el sensor y el controlador.

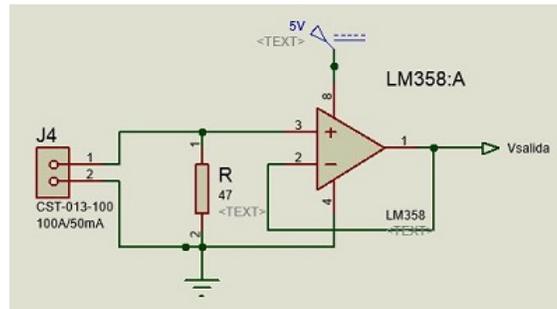


Figura 47. Circuito Acondicionador de señal (Proteus Professional).

En el circuito de la Figura 47 se muestra la conexión de los elementos del circuito donde se usa un LM358 como amplificador operacional en función de seguidor para lo cual utilizamos la entrada positiva del integrado.

El integrado LM358 se satura con 3,5V y se alimenta con 5V, sin embargo el voltaje máximo que se obtiene a la salida es:

$$V = I \times R$$

$$V = 50[mA] \times 47[\Omega]$$

$$V = 2,35[V]$$

La curva de comportamiento del circuito acondicionador se muestra en la Figura 48.

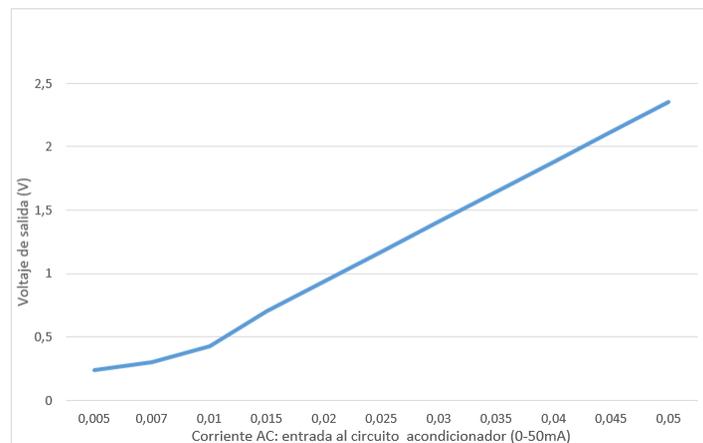


Figura 48. Curva de comportamiento de circuito acondicionador de señal AC-DC

Se realiza el PCB mostrado en la Figura 49 utilizando el Software Proteus Professional de tal manera que se plasma el circuito en una placa de 3 x 4 cm.

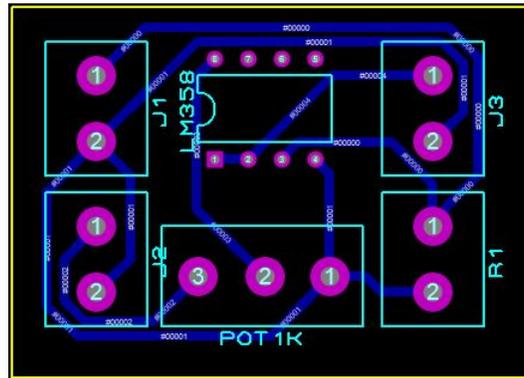


Figura 49. PCB de circuito acondicionador AC-DC (Proteus Professional).

#### 2.5.4. Diseño de Control para molienda

Dado que no se tiene un sistema determinístico donde las mismas entradas den como respuesta una misma salida, no es posible obtener el modelo matemático de la planta, por ello se recurre al controlador de lógica difusa (Fuzzy) que emula de mejor manera el comportamiento humano que en este proceso de molienda es la experticia que tiene el operador para controlar la compuerta de la Tolva 2 en base a la corriente del motor del molino.

En esta aplicación se va a tomar en cuenta las siguientes variables:

- Variable de entrada: error
- Variable de salida: ciclo de trabajo (*dutty*)

El “*error*” es igual al valor de referencia de corriente menos el valor medido de la misma, y “*dutty*” es el valor de la señal PWM necesario para variar la velocidad del motor DC acoplado a la compuerta de la tolva 2.

**Características de la variable de entrada:**

- Variable lingüística: Error
- Rango: 0 a 10, debido a las constantes perturbaciones que presenta el sistema. La estructura de la tolva permite que el maíz se acumule en las paredes y repentinamente pasan hacia el molino, además, la calidad de la materia prima también influye en el trabajo del motor, de manera que se tiene picos altos de corriente en un instante mínimo de tiempo.
- Términos lingüísticos:
  - error bajo
  - error medio
  - error alto

Se utiliza 3 términos lingüísticos debido a que el rango de error no es amplio, además, en la aplicación los cambios bajos de amperaje no influyen y lo que se requiere es evitar picos altos de corriente.

- Función de pertenencia:
  - bajo: trapezoidal
  - medio: triangular
  - alto: trapezoidal

**Características de la variable de salida:**

- Variable lingüística: *dutty*
- Rango: 80 a 100, dado que se ha tomado valores positivos para ciclo de trabajo y se requiere que el motor trabaje en dicho rango.

Con un motor DC con velocidad sin carga de 3600 rpm, se tiene:

Para  $dutty = 100 \rightarrow 3600rpm$

Para  $dutty = 80 \rightarrow 2880rpm$

Hay que tomar en cuenta que los valores de velocidad del motor varía respecto a la carga, y en este proyecto en particular no se requiere un control de velocidad.

■ Términos lingüísticos:

- $dutty$  bajo
- $dutty$  medio
- $dutty$  alto

Se utiliza 3 términos lingüísticos al igual que la entrada, ya que es suficiente para abarcar los valores de  $dutty$  de 80 a 100.

■ Función de pertenencia:

- bajo: trapezoidal
- medio: triangular
- alto: trapezoidal

Para la entrada como para la salida se ha definido una función triangular para la variable lingüística “medio” por su simplicidad matemática. Los conjuntos complementarios de “medio”, están formados por los elementos del universo que no pertenecen a este.

En el diseño de control difuso, este conjunto viene dado por:

$$\mu_{\bar{medio}}(x) = c(\mu_{medio}(x)) \quad (2.13)$$

siendo  $c : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ , podemos definir las funciones de pertenencia de los conjuntos complementarios (Ortiz, Ordoñez, y Morales, 2016), tomando en cuenta las siguientes cualidades:

■ Concordancia con el caso

$$c(1) = 0, y, c(0) = 1 \quad (2.14)$$

■ Estrictamente decreciente

$$\forall \alpha, \beta \in [0, 1] \alpha > \beta \Rightarrow c(\alpha) < c(\beta) \quad (2.15)$$

■ **Involución**

$$\forall \alpha \in [0, 1] c(c(\alpha)) = \alpha \quad (2.16)$$

Entonces, se tiene como función del complementario:

$$c(\alpha) = 1 - \alpha \quad (2.17)$$

Por lo tanto, la función trapezoidal que cumple con las características expuestas es la función más simple como complementario de la función triangular, como se observa en la Figura 50.

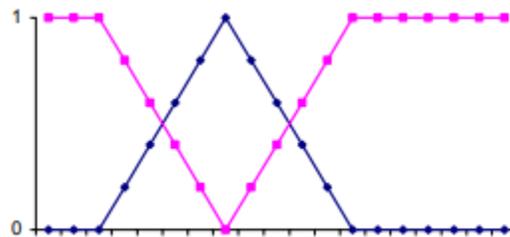


Figura 50. Función complementaria de la función triangular

Fuente: (Ortiz et al., 2016)

**Inferencia difusa**

Para determinar el valor de salida “duty” respecto al valor de entrada “error” se determinan los siguientes ítems:

- **Fuzzificación:** El método de fuzzificación empleado es Mamdani ya que permite que un valor numérico, en este caso “error”, se convierta en un valor difuso, es decir define el nivel de pertenencia para cada valor de entrada.

- **Definición de Reglas:** En esta aplicación se define tres reglas, las cuales son suficientes por el nivel de complejidad del sistema a controlar y por la demanda de bajo costo computacional, pues el control Fuzzy será implementado en el PLC.

Para el sistema de tipo Mamdani el antecedente y consecuente de las reglas son expresiones lingüísticas, por lo tanto :

- Si (error es bajo) entonces (duty es bajo)
- Si (error es medio) entonces (duty es medio)
- Si (error es alto) entonces (duty es alto)

- **Defuzzificación:** Como se requiere que la salida sea un valor numérico y no un término lingüístico, de tal manera que pueda programarse en el plc, se recurre a defuzzificar por el método del centroide ya que es el centro de equilibrio entre la distribución de los valores de salida:

$$Z_{(COA)} = \frac{\int_Z \mu_A(z)zdz}{\int_Z \mu_A(z)dz} \quad (2.18)$$

Donde:

$\mu_{A(z)}$ : grado de pertenencia de z en A

A: área resultante luego de agregar los consecuentes de las reglas

Para el diseño del control Fuzzy se hace uso del software Matlab con la herramienta “*Fuzzy Logic Designer*”.

En la ventana de visualización de reglas se puede verificar la salida de acuerdo a un valor de entrada. En la imagen 51 se observa que para un valor de error de 2, se tiene un valor de duty de 83,9.

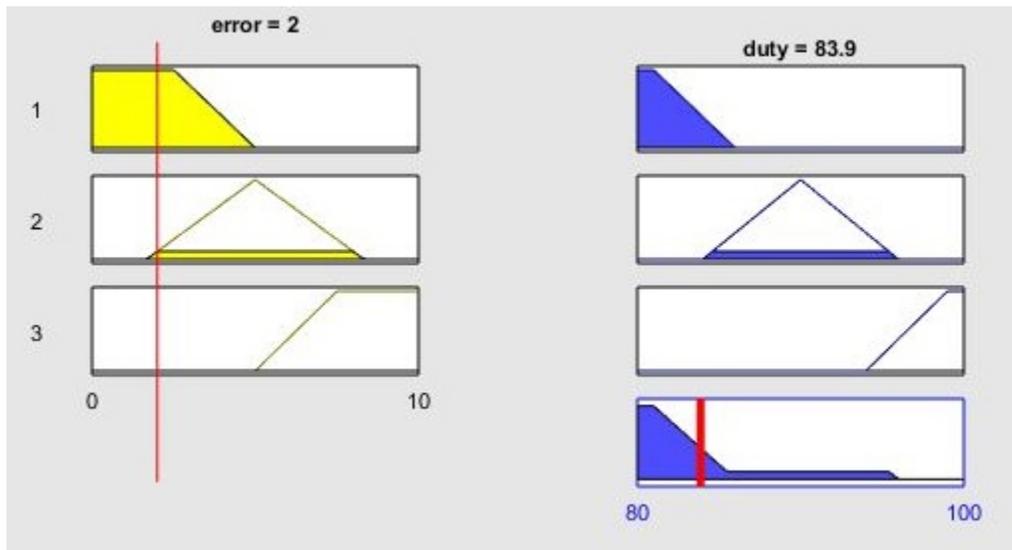


Figura 51. Verificación de entrada y salida del control Fuzzy (Matlab).

Con el diseño en Matlab, se ajusta los rangos para cada una de las funciones de pertenencia, dado los análisis de prueba de la entrada y salida del control Fuzzy, se define los siguientes rangos:

#### Variable de entrada: error

- bajo: trapezoidal [1 1 2,5 5]
- medio: triangular [1,5 5 8,5]
- alto: trapezoidal [5 7,5 10 10]

#### Variable de salida: dutty

- bajo: trapezoidal [80 80 81 86]
- medio: triangular [84 90 96]
- alto: trapezoidal [94 99 100 100]

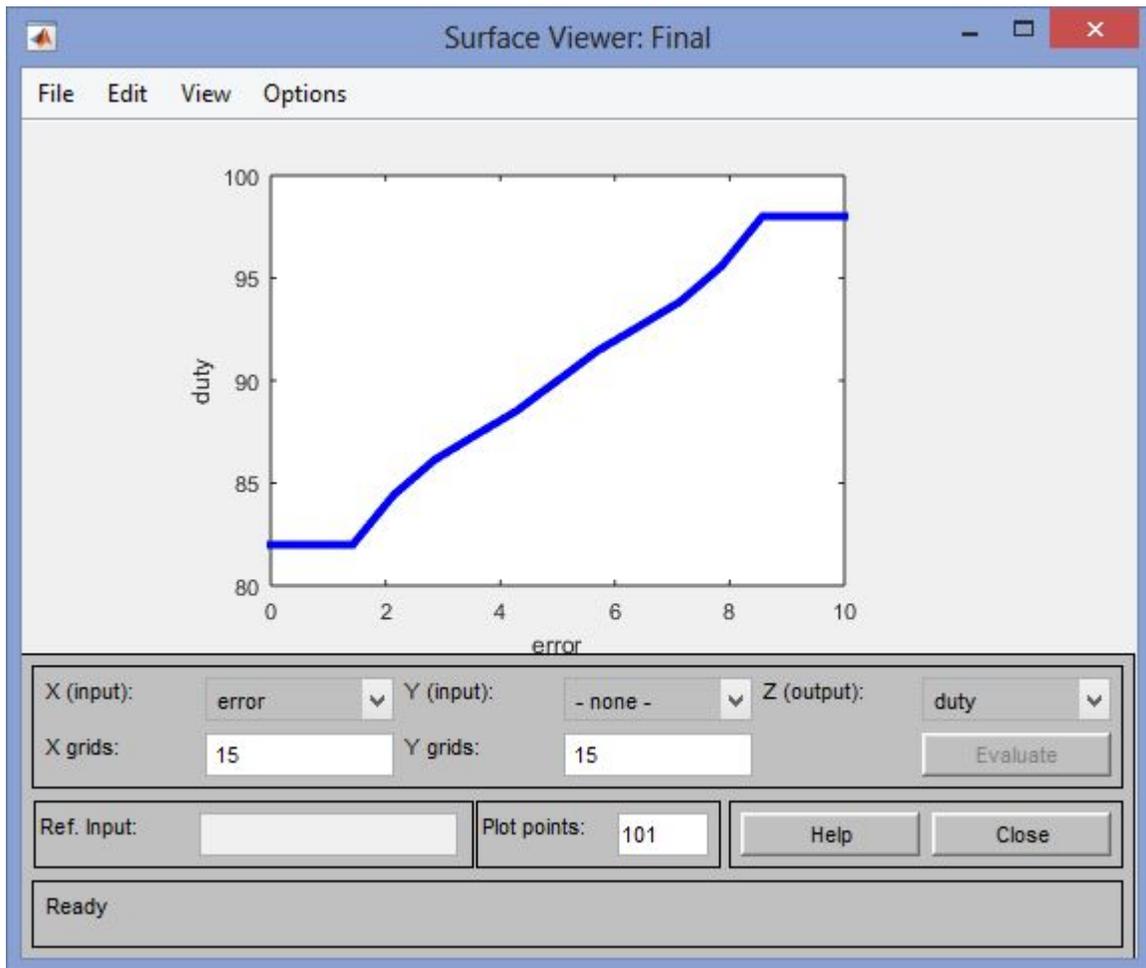


Figura 52. Curva de respuesta (Fuzzy Logic Designer).

La superficie de respuesta se accede en la pestaña “View → “Surface” de la herramienta de Matlab. La curva de respuesta del sistema se observa en la Figura 52 cuya característica principal es una gráfica 2D debido a que se tiene una entrada y una salida.

Para programar la curva de respuesta en el PLC se debe ajustar la curva de respuesta del control Fuzzy mediante la herramienta “Basic Fitting” de Matlab, ya que el PLC no cuenta con bloque de control Fuzzy predefinido.

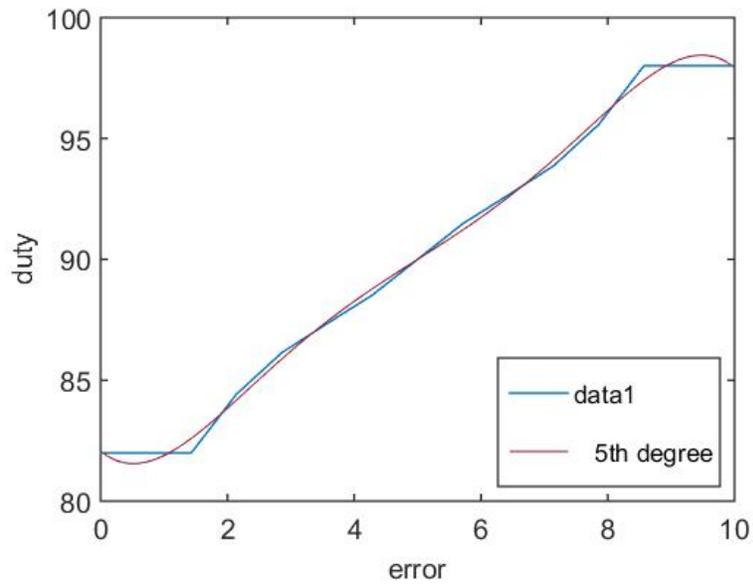


Figura 53. Interpolación (Matlab).

En la Figura 53 se ilustra en azul la curva de respuesta del archivo.fis y en rojo la aproximación con un polinomio de quinto grado, que fue el mejor ajuste luego de realizar las pruebas con diversos métodos de interpolación.

El polinomio de quinto orden a programar en el plc es el siguiente:

$$y = p_1x^5 + p_2x^4 + p_3x^3 + p_4x^2 + p_5x + p_6$$

donde,

$$p_1 = -0,0028569$$

$$p_2 = 0,071422$$

$$p_3 = -0,64625$$

$$p_4 = 2,5515$$

$$p_5 = -2,1574$$

$$p_6 = 82,069$$

## 2.6. Selección de Hardware

### 2.6.1. PLC y HMI

A continuación se da a conocer las propuestas tanto de controlador como de paneles HMI, los cuales cumplen con las características para la implementación del proyecto, tomando en cuenta que estos equipos han sido ofertados por distintas empresas del país.

#### 2.6.1.1. Alternativa 1: Siemens

Se ha tomado en cuenta esta marca por el previo manejo con este tipo de controladores por parte del personal técnico de Aligransuc.

#### PLC

El PLC Simatic S7-1200 1212C cuenta con las siguientes características:

**Tabla 9**

*Características Generales Simatic S7-1200 1212C*

<b>Características</b>	
Alimentación	24 V DC
Dimensiones (mm)	90 x 100 x 75
Entradas Digitales	24VDC a 4mA
Salidas Digitales	5 a 30 VDC o 5 a 250 VAC a 2A
Integrated Digital I/O	8 entradas / 6 salidas
Integrated Analog I/O	2 entradas
Modular	Si
Max. Local I/O Digital	82
Max. Local I/O Analog	19
PWM output	100 kHz

**CONTINÚA** 

Comunicación Industrial	PROFIBUS
	PROFINET
	Punto a punto
	Universal Serie Interface
	Modbus RTU
	Comunicación Telecontrol

Fuente: (Siemens, 2019).

### Pantalla HMI

Por requerimientos del personal el panel HMI debe ser igual o mayor a 5.7"pulgadas. De la serie KTP Panels de Siemens, se ha tomado en cuenta KTP700 de 7"pulgadas ya que la KTP400 Basic de 4"pulgadas no aplica por su tamaño.

**Tabla 10**

*Características Generales Pantalla KTP700*

<b>Características</b>	
Alimentación	24 V DC
Temperatura	-20 a 50 °C
Humedad	10 a 90 % RH
Protección	IP 65
Dimensiones	(154.1 x 85.9 mm)
Display	7"pulgadas
Color	65 536 colores
Resolución	800 x 480 Pixels
Touch	Si
Interfaces	RS485-422
	Puerto USB

Fuente: (Siemens, 2019).

### 2.6.1.2. Alternativa 2: Panasonic

Esta marca se ha tomado en cuenta por la facilidad de manejo de controladores y paneles HMI y su gran entrada en America Latina en los últimos años.

#### PLC

EL PLC de la marca Panasonic FP0R cuenta con las siguientes características:

**Tabla 11**

*Características Generales Panasonic FP0R*

<b>Características</b>	
Alimentación	24 V DC
Dimensiones (mm)	90 x 63.5 x 25
Entradas Digitales	24VDC a 4mA
Salidas Digitales	5 a 30 VDC o 5 a 250 VAC a 2A
Integrated Digital I/O	8 entradas / 6 salidas
Integrated Analog I/O	0
Modular	max. 3 Expansiones
Frec. de contaje max.	50 kHz
PWM output.	50 kHz
Comunicación Industrial	ModBus TCP/IEC60870
	Profibus
	CANopen
	Puertos RS232-RS484
	RS232C
	C-MEUNET-WO
	C-NET

Fuente: (Panasonic, 2019).

## Pantalla HMI

La pantalla HMI ha sido ofertada por la misma empresa, esta cuenta con las siguientes características:

**Tabla 12**

*Características Generales Pantalla GT32T-E*

<b>Características</b>	
Alimentación	24 V DC
Temperatura	-20 a 60 °C
Humedad	10 a 90 % RH
Protección	IP 67
Dimensiones	(163.2 x 128.8 x 39.1 mm)
Display	5.7" pulgadas
Color	4096 colores
Touch	Si
Puertos de Comunicación	RS232C - RS485
Adicionales	Puerto USB
	Tarjeta SD

Fuente: (Panasonic, 2019).

### 2.6.1.3. Alternativa 3: Renu Electronics

#### PLC y HMI

Renu Electronics es una marca India con entrada en varias industrias del Ecuador por las características que presenta.

Esta solución nos presenta otra forma de incorporar una pantalla HMI con el controlador en un solo dispositivo compacto.

**Tabla 13***Características Generales Renu Electronics FP4057T-E*

<b>Características</b>	
Alimentación	24 V DC
Integrated Digital I/O	-
Integrated Analog I/O	-
Modular	max. 5 Expansiones
Frec. de contaje max.	100 kHz
PWM output.	100 kHz
Temperatura	0 a 50 °C
Humedad	10 a 90 % RH
Protección (mm)	IP 65
Dimensiones	(195 H x 124 W x 50 D )
Display	5.7"pulgadas
Touch	Si
Puertos de Comunicación	RS232C - RS485 - RS422
	USB Device
	USB Host

Fuente: (Renu Electronics, 2019).

**2.6.1.4. Análisis de Factibilidad**

Mediante el análisis de factibilidad se determina la opción más acertada para implementar el proyecto de automatización en la planta procesadora de balanceados Aligransuc.

Para llegar a una solución se apuntó tres criterios los cuales se consideran los más importantes a tener en cuenta:

- **Criterio: Precio**

El factor económico es muy importante pues se necesita adquirir un equipo de calidad y que cumpla con los requerimientos antes establecidos, sin embargo este debe estar dentro del presupuesto de la empresa. Tomando en cuenta que es la primera etapa de automatización de la planta, el departamento de supervisión de la empresa ha determinado no invertir más de lo que se considere necesario.

Las tres alternativas expuestas en la sección 2.3 se han calificado en una matriz, Figura 54, con el método AHP (*Analytic Hierarchy Process*), con precios tentativos que han sido brindados por diferentes empresas con las que se cotizó el controlador y panel HMI.

CRITERIO: PRECIO							
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Matriz normalizada			Vector Promedio
Alternativa 1	1	7	3	0,68	0,64	0,69	0,67
Alternativa 2	0,14	1	0,3	0,10	0,09	0,08	0,09
Alternativa 3	0,33	3	1	0,23	0,27	0,23	0,24
SUMA	1,48	11,00	4,33				

Figura 54. Matriz PAH. Criterio:Precio.

Como resultado en base al precio es preferible adquirir los equipos de la alternativa 1 con un puntaje de validación de 0,67, mientras que se descartan las alternativas 2 y 3 con puntajes de 0,09 y 0,24 respectivamente.

■ **Criterio: Tamaño**

Como primera opción se pretende usar los tableros ya existentes y no adquirir uno nuevo hasta que se determine finalmente migrar todas las etapas a la nueva tecnología. En el tablero principal el espacio ha sido ocupado totalmente por los elementos de lógica cableada e instalación de motores, sin embargo en la consola manual 1 (Figura 32) es posible adaptar un controlador pequeño si sus dimensiones así lo permiten, caso contrario se adquirirá un tablero pequeño para el montaje de la pantalla HMI y del controlador que a futuro igual será reemplazado por uno de mayor tamaño. En la Figura 55, se muestra la matriz de calificación de las tres posibles soluciones de acuerdo a las dimensiones expuestas en la sección 2.3, tomando en cuenta que en la primera y segunda opción se tiene el controlador y panel HMI por separado y en la tercera opción es un solo dispositivo, por lo que ocupa menos espacio.

CRITERIO: TAMAÑO							
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Matriz normalizada			Vector Promedio
Alternativa 1	1	0,33	0,14	0,09	0,05	0,11	0,08
Alternativa 2	3	1	0,2	0,27	0,16	0,15	0,19
Alternativa 3	7	5	1	0,64	0,79	0,74	0,72
SUMA	11,00	6,33	1,34				

Figura 55. Matriz PAH. Criterio: Tamaño.

Con un puntaje de validación de 0,72 la alternativa 3 es la más acertada bajo el criterio de tamaño, mientras que las opciones 1 y 2 son descartadas con 0,08 y 0,19 respectivamente.

■ **Criterio: Instalación**

La instalación de los equipos también ha sido considerada y va de la mano con el criterio anterior: tamaño, pues para poder adaptar los controladores de la primera y segunda opción se debe volver a organizar los elementos existentes del tablero y adecuar nuevos rieles DIN para el montaje, salvo en la tercera opción que encajaría directamente en la tapa del tablero.

CRITERIO: INSTALACIÓN							
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Matriz normalizada			Vector Promedio
Alternativa 1	1	1	0,33	0,20	0,20	0,20	0,20
Alternativa 2	1	1	0,33	0,20	0,20	0,20	0,20
Alternativa 3	3	3	1	0,60	0,60	0,60	0,60
SUMA	5,00	5,00	1,67				

Figura 56. Matriz PAH. Criterio: Instalación.

La alternativa 3 nuevamente se presenta como la mejor opción bajo al criterio: instalación, con un puntaje de 0,60 mientras que las dos primeras opciones se valoran con 0,20.

Una vez obtenidos los puntajes de las tres alternativas propuestas de acuerdo a los tres diferentes criterios precio, tamaño e instalación, se procede a puntuar los criterios entre sí.

Se determinó que el criterio: tamaño tiene mayor importancia frente a los otros dos criterios y con un mayor puntaje frente a instalación, pues se desea conservar el tablero existente pero si el precio del equipo es mucho mayor que los otros no tiene sentido compararlo y es preferible adquirir un nuevo tablero.

MATRIZ DE COMPARACIÓN DE CRITERIOS							
	Precio	Tamaño	Instalación	Matriz normalizada			Vector Promedio
Precio	1	0,5	5	0,31	0,31	0,38	0,34
Tamaño	2	1	7	0,63	0,62	0,54	0,59
Instalación	0,2	0,11	1	0,06	0,07	0,08	0,07
SUMA	3,20	1,61	13,00				

Figura 57. Matriz PAH. Comparación de Criterios.

En la Figura 57 se da valor a los diferentes criterios, cuadrículas resaltadas de color verde, siguiendo el respectivo proceso de análisis en efecto se obtiene que el tamaño de los equipos se considera ligeramente más importante que el precio, sin embargo este debe ser moderado pues obtiene una puntuación de 0,34 frente 0,59 de precio, el criterio de instalación influye levemente en la toma de decisiones.

	Precio	Tamaño	Instalación	Total
Alternativa 1	0,67	0,08	0,20	0,29
Alternativa 2	0,09	0,19	0,20	0,16
Alternativa 3	0,24	0,72	0,60	0,55
Ponderación	0,34	0,59	0,07	

Figura 58. Matriz PAH. Valoración Final.

Para finalizar, en la matriz de la Figura 58 se concluye que se debe adquirir el equipo presentado en la alternativa 3 para un buen manejo de espacio y recursos destinados al proyecto de automatización.

Alternativa 3: Renu Electronics FP4057T-E, ilustrado en la Figura 59, y sus características detalladas se desglosan en la Tabla 14.



Figura 59. FlexiPanel FP4057T-E Renu Electronics.  
Fuente: (Renu Electronics, 2019).

**Tabla 14**

*Características FlexiPanel Renu Electronics FP4057T-E*

<b>Características Generales</b>	
Alimentación	24 VDC 10Watt
Protección	IP 65
Puertos de Comunicación	RS232C - RS485 - RS422
	USB Device
	USB Host
Dimensiones	(195 H x 142 W x 50 D )
Peso	710g
Modular	max. 5 Expansiones
Temperatura	0 a 50 °C
Humedad	10 a 90 % RH
<b>Características Display</b>	
Display	TFT, 5.7"pulgadas
Touch	Si
Resolución	320 x 240 Pixeles

Fuente: (Renu Electronics, 2019).

## 2.6.2. Módulos de PLC

### Módulo Digital

Para las entradas y salidas digitales se adquiere el módulo FPED-HS-0808RN, pues cumple con los requerimientos de salida a relé VAC y VDC, además incluye salida PWM para la variación de velocidad del motor DC, las características se pueden observar en la Tabla 16.

**Tabla 15**

*Características Módulo FPED-HS-0808RN Renu Electronics*

<b>Características</b>	
Alimentación	3.9 VDC proporcionada por la base FP
Entradas Digitales	8
Salidas Digitales	6 a relé
	2 PNP/NPN
Corriente de entrada nominal	5mA
Impedancia de entrada	4.7K ohm
Capacidad de salida	2A - salida a relé
	500mA - salida NPN/PNP
	300mA - salida PWM NPN
	250mA - salida PWM PNP
Carga nominal	230VAC/2A, 30VDC/2A
	500mA - 24VDC - NPN/PNP
	300mA - 24VDC - PWM NPN
	250mA - 24VDC - PWM PNP
Alta Velocidad	Canales de entrada: X0, X5, X2, X7
	Salida PWM: Y2, Y4

Fuente: (Renu Electronics, 2019).



Figura 60. Módulo FPED-HS-0808RN Renu Electronics.

Fuente: (Renu Electronics, 2019).

### Módulo Analógico

Para la lectura de señales analógicas se adquiere el módulo FPEA0202L, pues permite entrada de voltaje DC de 0-10 [V], sin embargo el voltaje máximo que entrega el circuito acondicionador es de 2,35 [V].



Figura 61. Módulo FPEA0202L Renu Electronics.

Fuente: (Renu Electronics, 2019).

**Tabla 16***Características Módulo FPEA0202L Renu Electronics*

<b>Características</b>	
Alimentación	3.9 VDC proporcionada por la base FP
Entradas Analógicas	2
Resolución	12 bits
Modo de entrada	4 a 20 mA
	0 a 10 V
	-10 a 10 V
	0 a 20 mA
Salidas Analógicas	2
Resolución	12 bits
Modo de salida	4 a 20 mA
	0 a 10 V
	0 a 20 mA

Fuente: (Renu Electronics, 2019).

### 2.6.3. Sensores y Actuadores

Luego del análisis ingeniería de detalle en la Sección 2.5, se procede a usar los siguientes elementos:

#### 2.6.3.1. Sensores

##### Sensor de peso

Para el sensado de peso de la Tolva 1, actualmente en la planta se tiene instalado el indicador de peso de la Serie X10 cuyas especificaciones se encuentran detalladas en la sección 2.2.3.

### Sensor de corriente AC

En el sensado de amperaje en la etapa de molienda se toma en cuenta las especificaciones del motor de molino detalladas a continuación:

**Tabla 17**

*Especificaciones WX5500004-26001J Marathon Motors.*

Características	Valores
Voltaje	220 VAC
Frecuencia	60 Hz
Corriente nominal.	70 A
Corriente max.	100 A
Protección	IP55
Velocidad	3520 r/min

Según la Tabla 17, la corriente máxima del motor es de 100A por lo tanto el sensor a utilizar SCT-013-100 no invasivo, sus especificaciones están descritas en la Tabla



*Figura 62.* Sensor de Corriente No invasivo SCT-013-100.

Fuente: (Naylamp Mecathronics, 2016).

**Tabla 18***Especificaciones SCT-013-100.*

<b>Características</b>	<b>Valores</b>
Corriente de entrada (inducción)	0-100A AC
Modo de salida	0-50mA
No linealidad	$\pm 1 \%$
Resistencia (RL)	62 $\Omega$
Turn Ratio	1800:1
Temperatura de Operación	-20°C a 70°C
Longitud de cable	1m

Fuente: (Naylamp Mecathronics, 2016).

### Sensor de contacto

El sensor de contacto o fin de carrera permite saber si la compuerta de la tolva 2 está abierta o cerrada.

*Figura 63.* Interruptor fin de carrera.

Fuente: (Naylamp Mecathronics, 2016).

**Tabla 19***Especificaciones Sensor Fin de carrera.*

<b>Características</b>	<b>Valores</b>
Corriente de operación	3 A
IP	67

Fuente: (Naylamp Mecathronics, 2016).

### 2.6.3.2. Actuadores

#### Cilindro neumático

De acuerdo a los cálculos y resultados obtenidos en la sección 2.5.1, se implementará el cilindro neumático FVBC-32X400-S de la marca EMC.



Figura 64. Cilindro neumático FVBC-32X400-S EMC.

Fuente: (EMC, 2019).

**Tabla 20**

*Especificaciones FVBC-32X400-S EMC.*

Características	Valores
Tipo	Doble efecto
Presión de trabajo [MPa]	0.1 ~ 1.0
Presión max. [MPa]	1.5
Temperatura de Operación [°C]	-20 a 80 (aire seco)
Rango de velocidad [mm/s]	
Calibre	32
Carrera [mm]	400
Calibre	32
Diámetro del vástago (mm)	17
Diámetro interno(mm)	30

Fuente: (EMC, 2019).

### Electroválvula

La electroválvula a utilizar para accionar el cilindro es:

**Tabla 21**

*Especificaciones V5221-E1-08 EMC.*

Características	Valores
Alimentación	E1:110 VAC
Presión max. [MPa]	1,2
Temperatura de Operación [°C]	-5 a 60 (aire seco)
IP	65
Vías	5
Posiciones	3
Control	Simple
Accesorios de conexión	EPC-02 Racor Recto 8mm x 1/4"
	Silenciador 1/8"Bronce
	Manguera 8mm azul poliuterano
	Racor Tee 8mm
	Regulador de caudal G1/4"

Fuente: (EMC, 2019).



*Figura 65.* Electroválvula V5221-E1-08

Fuente: (EMC, 2019).

### Reductor mecánico

Se utiliza un reductor mecánico existente en la planta con las siguientes características:

**Tabla 22**

*Especificaciones reductor mecánico.*

Características	Valores
Torque de salida	100 [lb in]
Reducción	43:1

### Motor DC

El motor DC que se ha escogido para la implementación tiene las siguientes especificaciones:

**Tabla 23**

*Especificaciones Motor DC 63ZYT.*

Características	Valores
Alimentación	24 VDC
Velocidad sin carga	3600 rpm
Consumo de corriente sin carga	0.36 [A]
Consumo de corriente máxima con carga	2,2 [A]
Torque	14 [N cm]

### Preaccionador

Para la etapa de potencia de control de motor DC se hace uso de un relé de estado sólido DC - DC, pues la corriente máxima del PLC para salidas PWM es 250mA con carga y la corriente

máxima del motor es 2,2 [A], además el relé de estado sólido debe soportar altas frecuencias.

**Tabla 24**

*Especificaciones Relé de Estado Sólido CSS – P13X CSS -N13X.*

<b>Características</b>	<b>Valores</b>
Voltaje de control	5-48 VDC
Corriente de carga	40 A DC
Voltaje de carga	hasta 200 VDC
Frecuencia de operación	<1kHz

Fuente: (Disaleico, 2019).

#### 2.6.4. Fuente DC

Dado que el PLC es de 10 Watts máximo, se tiene que la corriente es igual a:

$$I = \frac{P[\text{Watts}]}{V[\text{VDC}]} \quad (2.19)$$

Donde:

P= Potencia en Watts

V= Voltaje

I= Corriente

$$I = \frac{10[\text{Watts}]}{24[\text{VDC}]}$$

$$I = 0,41[\text{A}]$$

$$I = 410[\text{mA}]$$

El motor DC es otro elemento que se va a alimentar con la fuente, siendo la corriente máxima del motor DC con carga de 2,2[A], la corriente total que requiere la fuente es:

$$I_T = 0,41[A] + 2,2[A]$$

$$I_T = 2,61[A]$$

Por lo tanto se escoge la fuente con las siguientes características:

Fuente DC a utilizar de la marca Carlo Gavazzi.



Figura 66. Fuente de poder SPDM24751 Carlo Gavazzi

Fuente: (Carlo Gavazzi, 2019).

**Tabla 25**

*Especificaciones Fuente de poder SPDM24751.*

Características	Valores
Alimentación	100 ~ 240 VAC
Voltaje de Salida	24 VDC
Corriente de salida	3 A
Temperatura de Operación	-25 a 71 [°C]
Dimensiones	90 x 100 x 40.5 mm

Fuente: (Carlo Gavazzi, 2019).

## 2.7. Diseño de Pantallas HMI

En la Figura 67 se observa la arquitectura de las pantallas a implementar para navegar en las diferentes áreas del sistema.

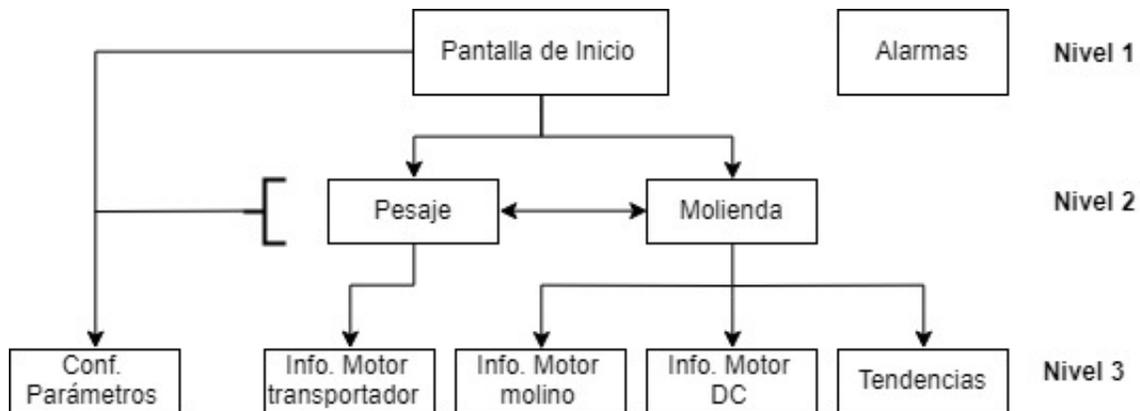


Figura 67. Arquitectura de pantallas HMI.

En la arquitectura de pantallas HMI de la Figura 67 no existe una pantalla de niveles de acceso, ya que no ha sido requerido por el personal de Aligransuc.

En el nivel 1 se tiene la pantalla de Inicio donde abarca las dos etapas en un gráfico general, en el siguiente nivel se tiene las 2 etapas desglosadas en una pantalla cada una, desde donde se puede acceder al nivel de equipos o nivel 3 que generalmente es de información de los equipos y gráficas de tendencias.

La pantalla de alarmas pertenece al Nivel 1 y se puede acceder a ella desde cualquier nivel de navegación.

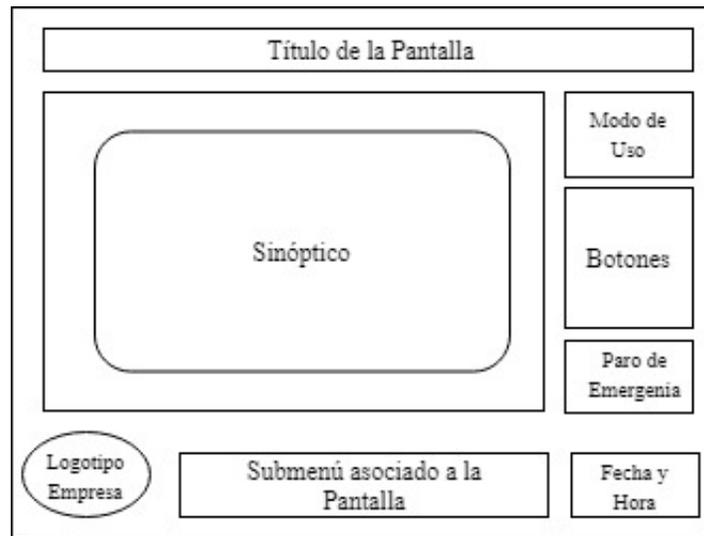


Figura 68. Distribución de pantalla nivel 1 y 2.

En la Figura 68 se muestra la distribución de las pantallas para el nivel de área y sub área correspondientes a nivel 1 y 2 de la arquitectura de navegación de la Figura 67.

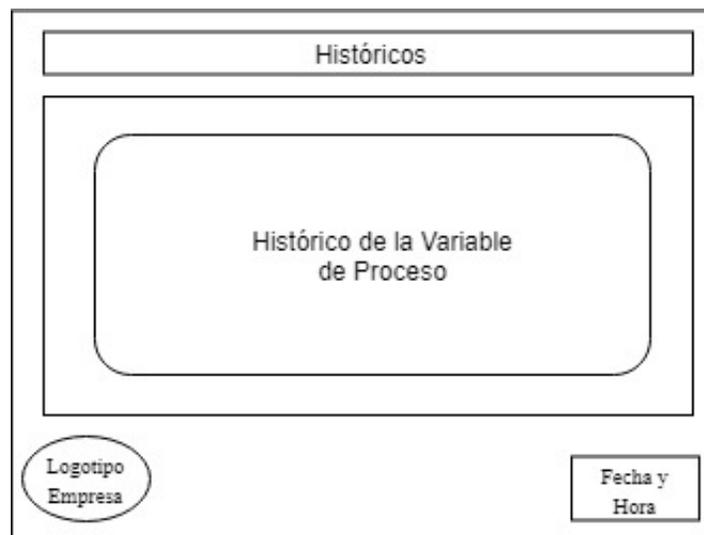


Figura 69. Distribución de pantalla Tendencia.

Para el nivel 3 no se tiene sub menú asociado, pues este es el último nivel, aquí se encuentran las pantallas de información de dispositivos, tendencias y configuración de parámetros.

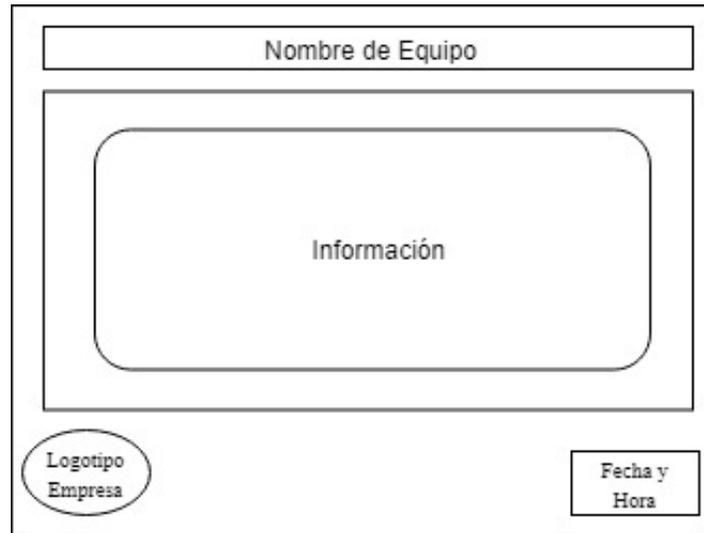


Figura 70. Distribución de pantalla de Información de equipos.

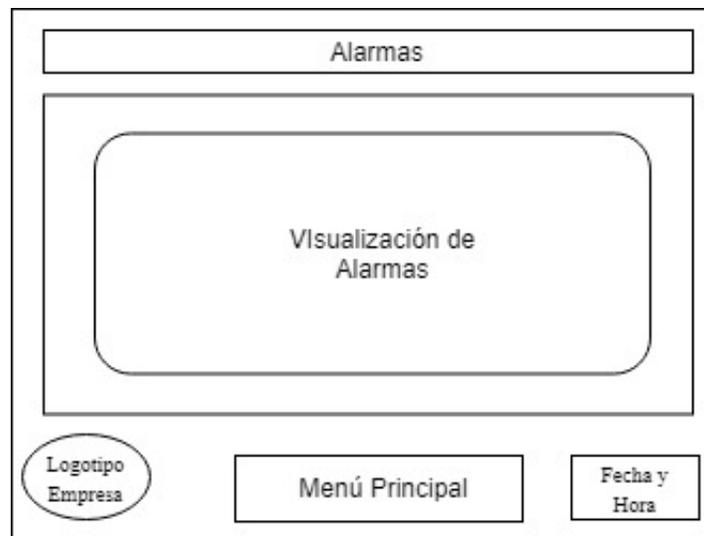


Figura 71. Distribución de pantalla de Alarmas

En la pantalla de alarmas únicamente se tiene el título de la pantalla, la información correspondientes a las alarmas, logotipo de la empresa en la parte inferior izquierda, y por último fecha y hora en la parte inferior derecha.

La distribución de cada una de las pantallas se basa en la guía Gedis, la cual ayuda a organizar y presentar adecuadamente la información para ambientes industriales.

## Capítulo 3

### Montaje

En el presente capítulo se describe la implementación de los elementos descritos en el capítulo anterior.

#### 3.1. Montaje de Hardware

Los elementos se instalan en el tablero de consola manual existente en la planta, cuyas medidas son 800 x 800 mm, gracias a que los equipos que se adquirieron presentan la ventaja de ocupar un espacio reducido.

El diagrama de conexiones del sistema puede observarse en el Anexo A.6.

La distribución de la consola manual está disponible en el Anexo A.13.



*Figura 72.* Consola manual 1.

### **3.1.1. PLC y HMI**

Para el montaje del PLC FP4057T-E Renu Electronics, se procede a realizar una abertura de 184,3 x 131,3 mm en la parte frontal del tablero como se muestra en la Figura 73.



Figura 73. Montaje de controlador en panel frontal.

### 3.1.2. Módulos de PLC

La ubicación de los módulos analógico y digital se lo realiza de la siguiente manera:

- Slot 1: Módulo de I/O digitales.
- Slot 2: Módulo de I/O analógicas.
- Slot 3: -
- Slot 4: -
- Slot 5: -

Cada módulo es montado de acuerdo a las instrucciones señaladas en el dispositivo.

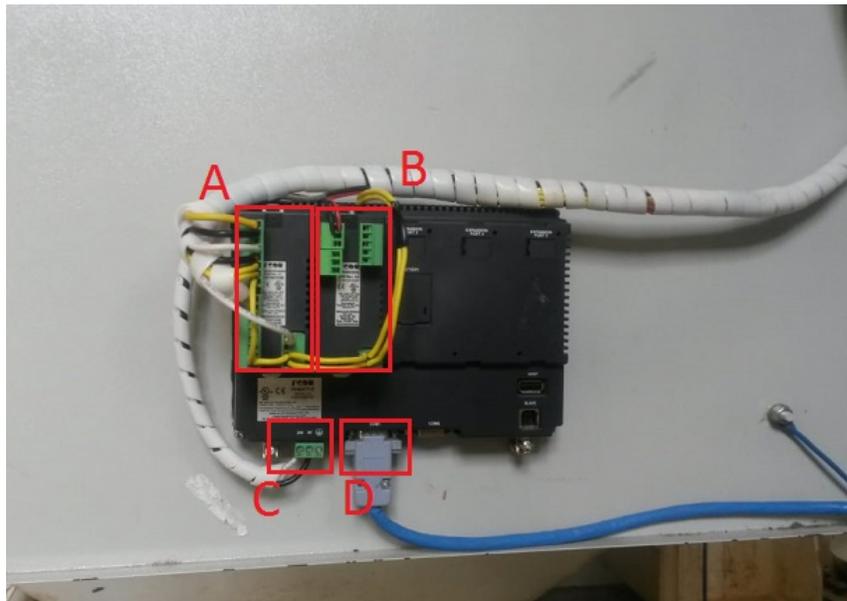


Figura 74. Montaje de módulos en PLC.

En la Figura 74 se puede observar a detalle las conexiones de módulos.

- A: Módulo digital FPED-HS-0808RN
- B: Módulo analógico FPEA0202L
- C: Alimentación de PLC Flexi Panel
- D: Conexión RS-232

El montaje final de elementos en el tablero se puede observar en la Figura 75



*Figura 75. Montaje de elementos en tablero.*

### **3.1.3. Sensores y Actuadores**

#### **3.1.4. Sensores**

##### **Sensor de Peso**

El indicador de peso conjuntamente con la caja de galgas ya se encuentran instalados en la planta. Sin embargo, se realizó el cableado desde la báscula hacia el PLC con cable de terminal RS-232 para su comunicación.



*Figura 76.* Indicador de peso.

### **Sensor de corriente**

El sensor SCT-013-100 se lo ubica en el tablero principal como se observa en la Figura 77, pues es donde se encuentra el conexionado del motor AC del molino de martillos.



*Figura 77.* Ubicación de sensor SCT-013-100 (azul).

### 3.1.5. Actuadores

#### Cilindro neumático y electroválvula

El diseño estructural de la compuerta de la Tolva de pesaje no permitía instalar el cilindro neumático por lo que se modificó totalmente la estructura de dicha compuerta.

Como se observa en la Figura 78 la electroválvula se instaló en la parte posterior de la compuerta 1 conectada al cilindro neumático mediante la manguera azul de poliuretano, previo haber conectado 2 racor rectos en el cilindro y 3 racor rectos en la electroválvula.

El regulador de caudal se instaló en la unión de la conexión de la electroválvula a la línea neumática existente en la planta en la que se utilizó el racor Tee.



*Figura 78.* Montaje de cilindro en Tolva 1.

Para mayor detalle de la estructura de la Tolva 1 se recomienda revisar el Anexo A.8.

#### Motor DC y reductor mecánico

Para el montaje de motor DC se construyó una estructura de soporte para el motor y la caja reductora como se observa en la Figura 79.

El acoplamiento entre caja reductora y tornillo de compuerta necesita de un acoplador, por lo que se construye un acople con medidas específicas como se ve en el Anexo A.9. Así mismo, para unir el motor DC y la caja reductora se hace uso de otro acople cuyas medidas se observan en el Anexo A.10.



*Figura 79. Montaje de motor DC en Tolva 1.*

Para mayor detalle de la estructura luego del montaje se recomienda revisar el Anexo A.11.

### **Preaccionador**

El relé de estado sólido se instaló en la consola de mando, para mayor detalle de la ubicación recurrir al Anexo A.13.

## 3.2. Programación de Software

RenuElectronics presenta su propio software de programación, el software FlexiSoft es abierto de tal manera que no requiere ningún tipo de licencia para su uso.

A continuación la configuración de módulos y puertos para el correcto funcionamiento de la aplicación presentada en el proyecto.

### 3.2.1. Instalación de FlexiSoft

1. Ingresar a la página web <https://renuelectronics.com/> a través del navegador.
2. Dirigirse a la sección "*Downloads*" → "*Installable Software*"
3. Descargar FlexiSoft 2.35 ya que la versión 2.36 aún está en prueba y presenta algunos inconvenientes.
4. Luego de la descarga, ejecutar el archivo .exe y aceptar los términos y condiciones para una correcta instalación.

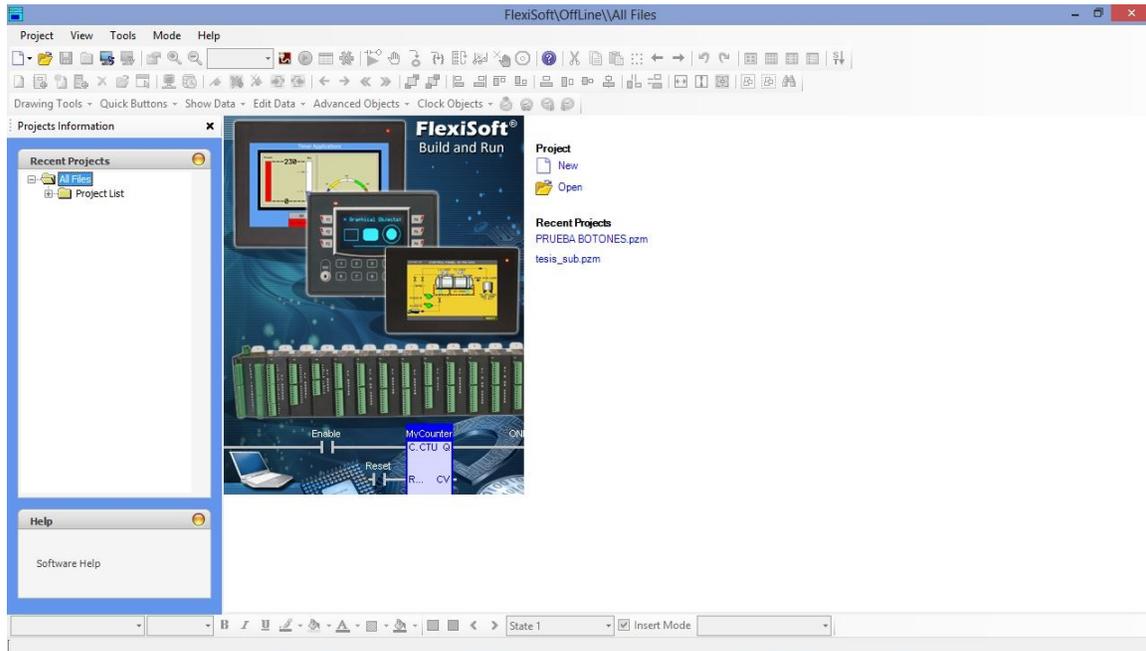


Figura 80. Interfaz gráfica de FlexiSoft.

### 3.2.2. Creación de un nuevo programa e instalación de módulos.

El Software FlexiSoft nos presenta la siguiente interfaz de trabajo mostrada en la Figura 80.



Figura 81. Selección de dispositivo.

En la ventana principal de FlexiSoft nos dirigimos a la pestaña “*Project*” y hacemos click en “*New*” y se presenta la siguiente ventana donde se escoje el dispositivo con el que se va a trabajar.

En la ventana “*Select Product*” de la Figura 82 se selecciona la serie FlexiPanels, el producto, modelo y lenguaje de programación tal como se muestra en la Figura 82.

A continuación se crea una aplicación donde se puede empezar a trabajar, pero no sin antes instalar los módulos de expansión.

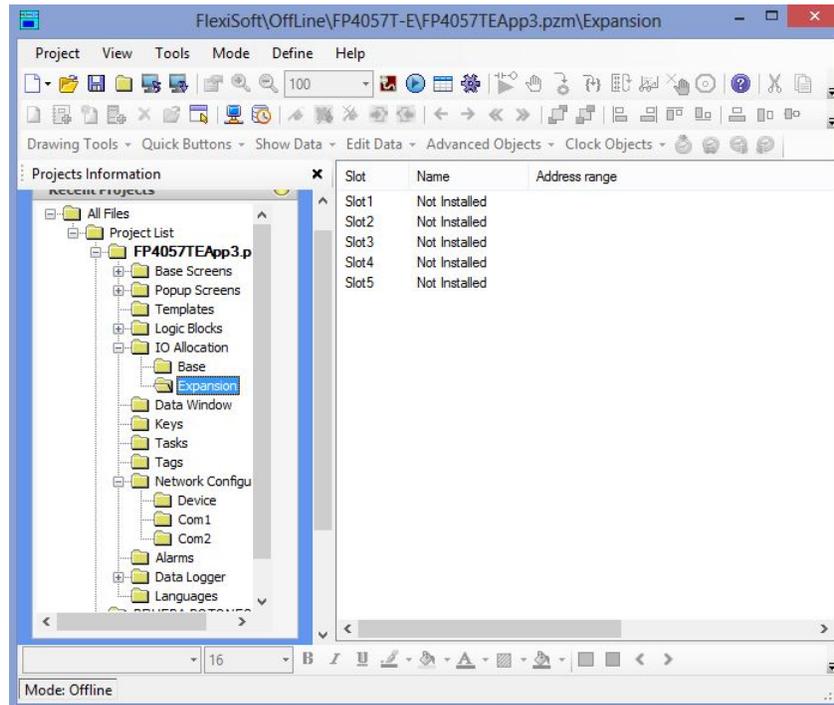


Figura 82. Módulos de expansión.

Para instalar los módulos nos dirigimos a “IO Allocation” → “Expansion” y hacemos doble click en “Slot1”.

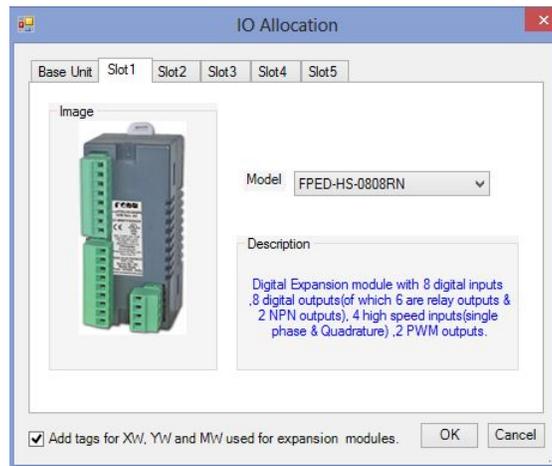


Figura 83. Selección de Módulo FPED-HS-0808RN.

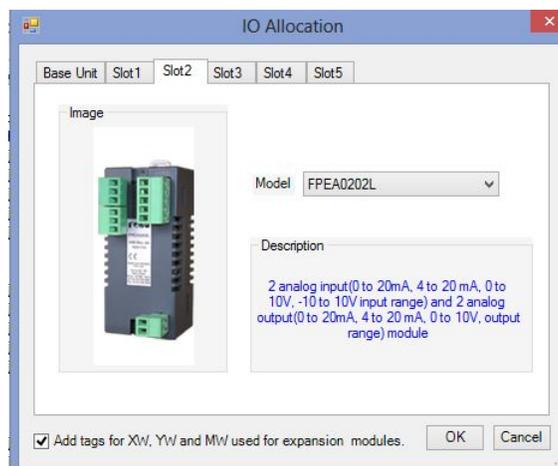


Figura 84. Selección de Módulo FPEA0202L.

En la ventana que se muestra se selecciona el módulo de entradas y salidas digitales que hemos adquirido para nuestra aplicación como se muestra en la figura 83.

Así mismo seleccionamos el módulo de entradas y salidas analógicas en el “Slot2”, Figura 84.

Para verificar que los módulos se han instalado correctamente, la ventana de slots debe visualizarse de la siguiente manera:

Slot	Name	Address range	Description
Slot1	FPEd-HS-0808...	X [ 01000 - 01007 ], Y [ 01000 - 01007 ], [ XW0100 ], [ Y...	Digital Expansion module with 8 digital inputs ,8 dig...
Slot2	FPEA0202L	[XW0200 - XW0201 ], [ YW0200 - YW0201 ], [ MW0200 -...	2 analog input(0 to 20mA, 4 to 20 mA, 0 to 10V, -1...
Slot3	Not Installed		
Slot4	Not Installed		
Slot5	Not Installed		

Figura 85. Verificación de módulos instalados.

### 3.2.3. Comunicación Balanza - PLC

Por defecto el indicador de la balanza viene configurados los siguientes parámetros:

- Data Bits: 8
- Parity: None
- Stop Bits: 1

Se cambia el baud rate a 9600 para comunicación con el FlexiPanel.

Los datos enviados desde el indicador por el puerto serial viene dada de la siguiente manera:

- Dirección de mensaje: ADR=00
- Formato de la información ASCII: “=,X6,X5,X4,X3,X2,X1,X0”, es decir si el peso es de 300Kg, la salida de datos es: “=0000300”.

#### 3.2.3.1. Configuración puerto Serial RS-232.

En la comunicación entre el indicador de peso y el controlador se debe realizar la siguiente configuración de puerto serial para la recepción de datos.

Se selecciona la pestaña “*Network Configuration*”, se hace click derecho sobre “*Com1*” y se selecciona “*New*”.

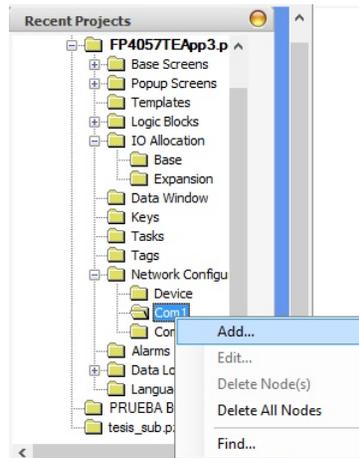


Figura 86. Configuración comunicación Serial RS - 232.

En la Figura 87 se muestra la configuración de parámetros para comunicación serial.

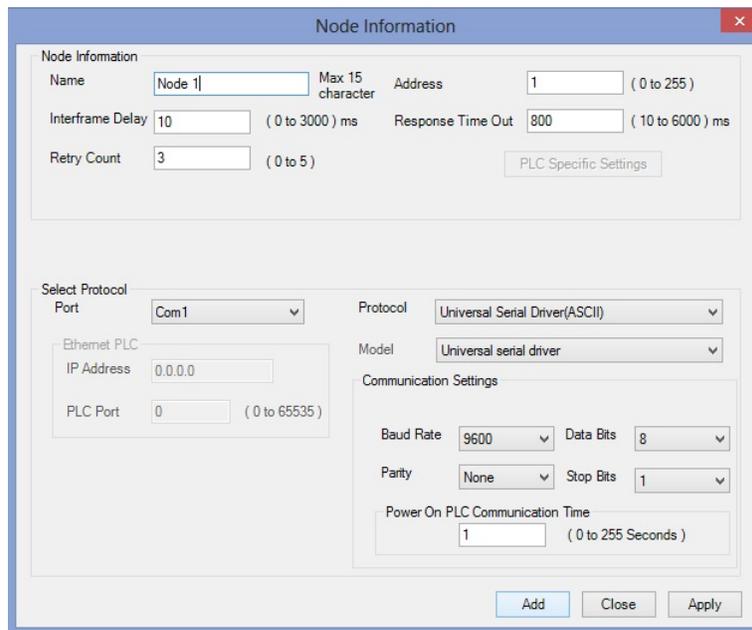


Figura 87. Configuración de parámetros.

Para lograr la comunicación con el indicador de peso se selecciona:

- Protocolo de comunicación: “*Universal Serial Driver ASCII*”
- Baud Rate: 9600
- Data Bits: 8
- Parity: None
- Stop Bits: 1

Cabe recalcar que los valores de estos parámetros deben ser los mismos que han sido configurados en la balanza digital.

Una vez añadido el protocolo de comunicación , hacemos doble click en “*Node 1*” y en la ventana de “*Node Information*” damos click en “*Driver Settings*”.

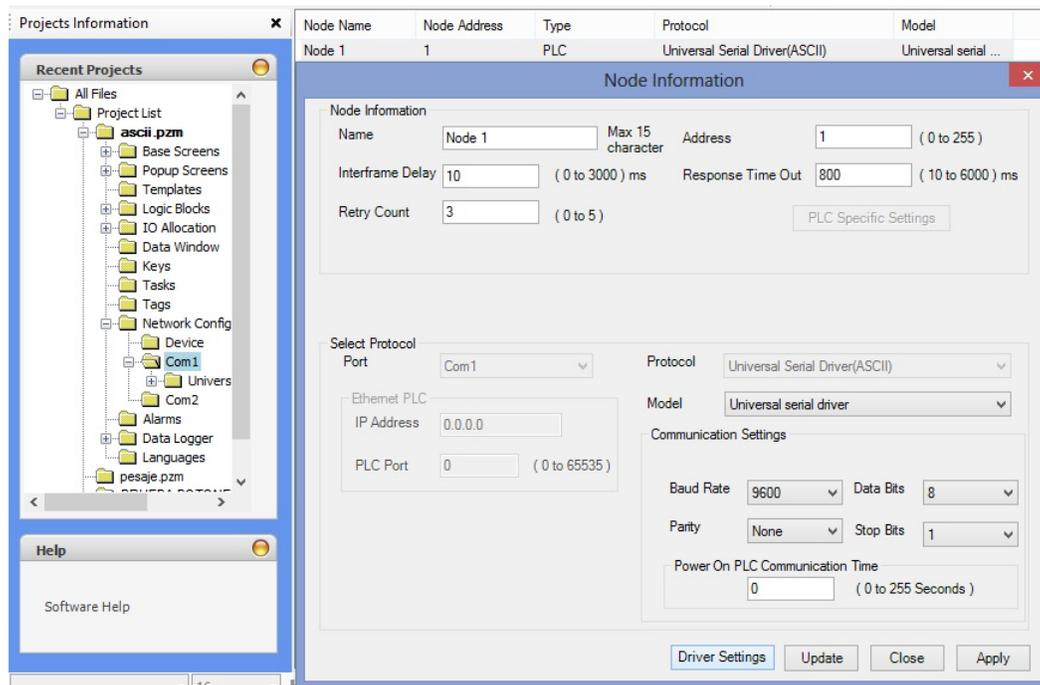


Figura 88. Acceso a “*Driver Settings*”.

Aparece una nueva ventana “*Universal Driver Settings*” y nos dirigimos a la pestaña “*Receive*”, aquí configuramos la dirección donde queremos que se guarde la información recibida.

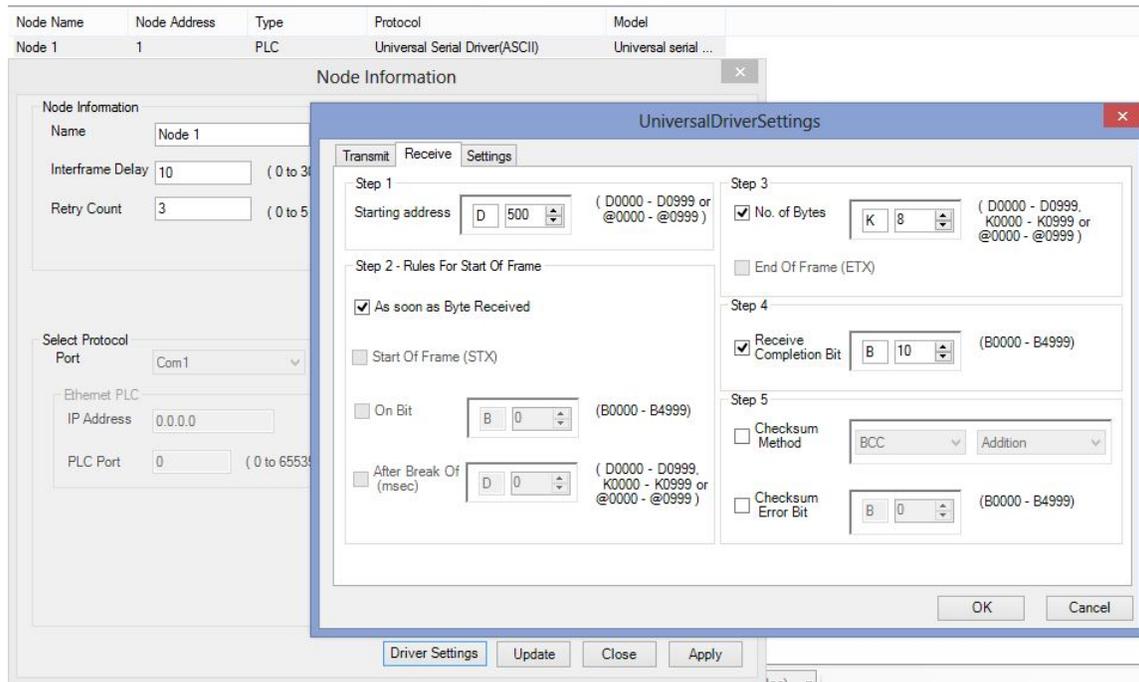


Figura 89. Configuración de recepción de datos.

En la Figura 89 se puede observar que los datos se guardan 8 bits a partir de la dirección “D500”, es decir se almacena en D500, D501, D502, ... , D507.

### 3.2.4. Lectura de Sensor de Corriente

En la Sección 2.5.3 se diseñó el circuito acondicionador para obtener una señal de voltaje DC a partir del sensado de señal de corriente AC.

En la implementación se determinó que la resistencia utilizada de  $47 \Omega$  tiene un valor real de  $50.7 \Omega$ , por lo tanto el nuevo voltaje máximo de salida es 2.54V DC.

La resolución del módulo analógico FPEA0202L es de 12 bits, es decir 11 bits de datos y uno de signo, por lo tanto:

$$2^{11} = 2048$$

Modo de entrada: 0 - 10 V

$$\frac{10V}{2048} = 4,9[mV]$$

Es decir, la variación de voltaje más pequeño que el módulo puede detectar es de 4,9 mV.

**Tabla 26**

*Equivalencia de variables*

Resolución PLC	Voltaje de entrada [V]	Corriente de molino [A]
2048	10	-
520	2.54	100
130	0.64	25
0	0	0

En la Tabla 26 se encuentran los valores para lectura analógica en un rango de 0 a 10 V, que equivale de 0 a 2048 correspondientemente, sin embargo la salida máxima del circuito acondicionador que lee la entrada analógica del plc es 2,54V que equivale a 520. Por lo tanto para el escalamiento en el programa ladder, la ecuación es:

$$y = x \frac{25}{130}$$

donde,

- y: lectura de corriente real en amperios.

- x: valor de resolución equivalente en el plc.

En la Figura 90 se muestra la implementación de código LADDER para la lectura de corriente, aquí se puede observar que:

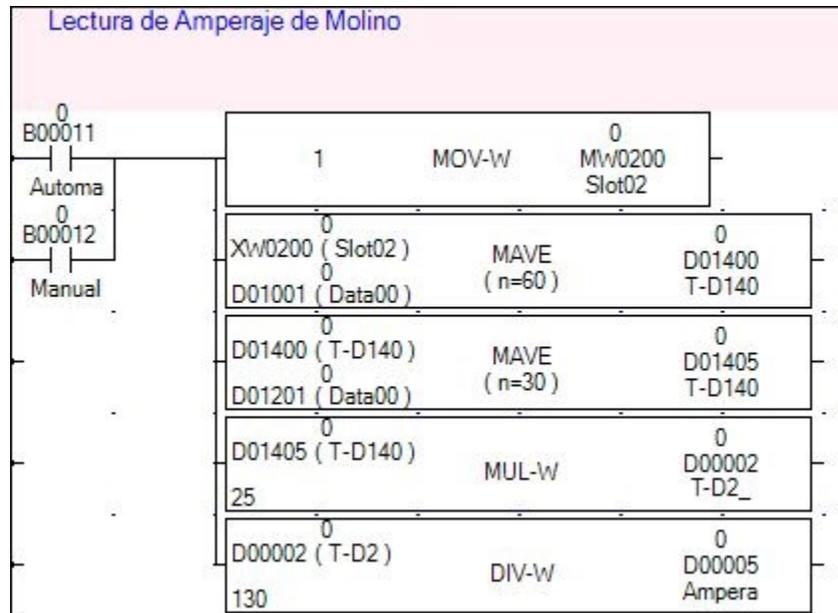


Figura 90. Lectura de Corriente de motor de molino (FlexiSoft).

En la Figura 90 se muestra la implementación de código LADDER para la lectura de corriente, aquí se puede observar que:

- Primer bloque: Corresponde a la configuración de la entrada analógica para lectura de voltaje de 0 a 10 V.
- Segundo bloque: Filtro digital mediante el método de cálculo de valor promedio para los primeros 60 datos leídos.
- Tercer bloque: Filtro digital mediante el método de cálculo de valor promedio para los primeros 30 datos leídos.

- Cuarto y quinto bloque: Escalamiento para valor de Amperaje.

### 3.2.5. Implementación de control Fuzzy en PLC

En la Sección 2.5.4 se obtuvo el polinomio de quinto orden que se ajusta a la curva de respuesta del controlador Fuzzy. Para la programación en ladder en el software FlexiSoft se convierte los coeficientes de formato *float* a formato de número racional utilizando el comando "*format rational*" en Matlab, pues los bloques de operaciones matemáticas en ladder permite trabajar únicamente con números enteros.

### 3.2.6. Programación Ladder

Para implementar la lógica secuencial en Ladder se parte del Graficet de Nivel 1 de la Sección 2.4 y se lleva al Nivel 2.

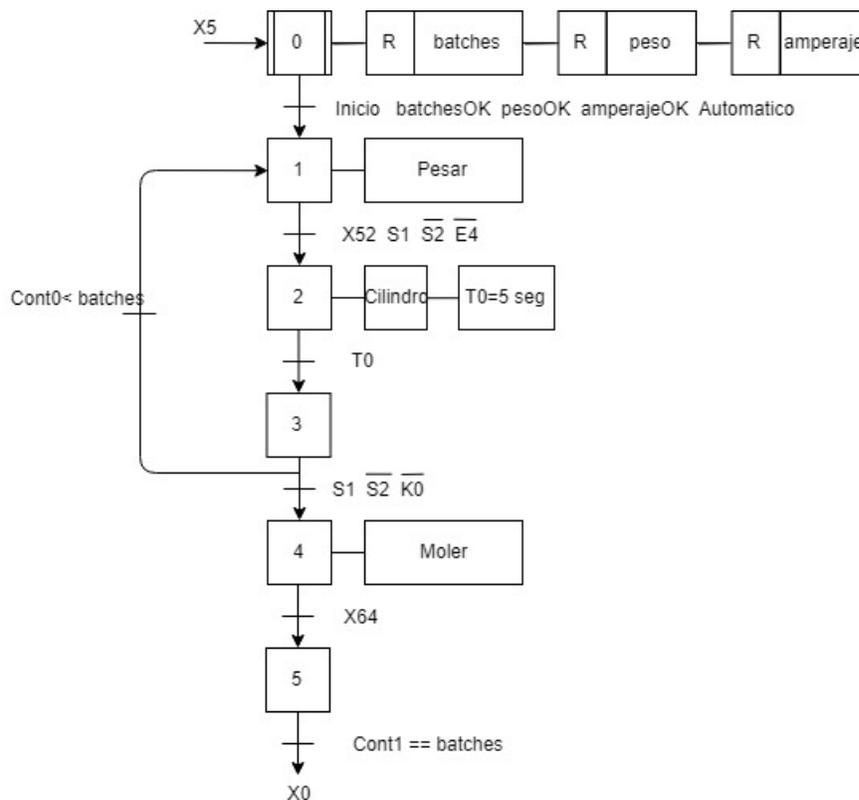


Figura 91. Grafcet de Producción Nivel 2.

Las variables correspondientes al Grafcet de Producción de Nivel 2 ilustrado en la Figura 91 se detallan a continuación:

**Tabla 27**

Descripción de Etiquetas: Grafcet de Producción

Nº	Etiqueta	Dirección	Descripción
1	Inicio	B00010	Señal de inicio
2	batchesOK	B00023	batches definidos $\geq 1$
3	pesoOK	B00015	peso definido $\geq 1$
4	amperajeOK	B00024	amperaje definido $\geq 1$
5	S1	X01000	Fin de carrera compuerta cerrada

CONTINÚA ➡

6	S2	X01000	Fin de carrera compuerta abierta
7	Cilindro	Y01000	Cilindro (abrir compuerta 1)
8	T0	B00016	Temporizador 5 seg
9	Cont0	C00000	Contador de batches pesados
10	Cont1	C00001	Contador de batches molidos
11	T0	B00016	Temporizador 5 seg
12	Automatico	B00011	Modo de marcha Automático

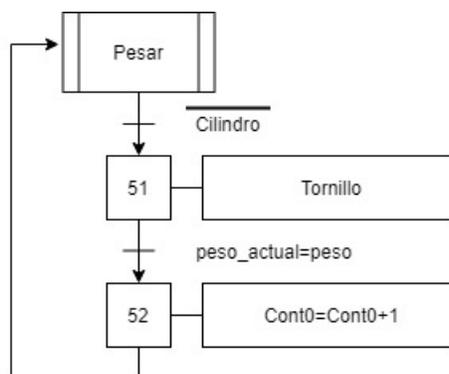


Figura 92. Graficet de pesaje Nivel 2.

Las variables correspondientes al Graficet de Pesaje de Nivel 2 ilustrado en la Figura 92 se detallan a continuación:

**Tabla 28**

*Descripción de Etiquetas: Graficet de Pesaje*

No	Etiqueta	Dirección	Descripción
1	Tornillo	Y01005	Activación de motores de transportador de materia
2	pesoactual	SW0007	peso obtenido de balanza
3	peso	SW0000	peso definido por el operador

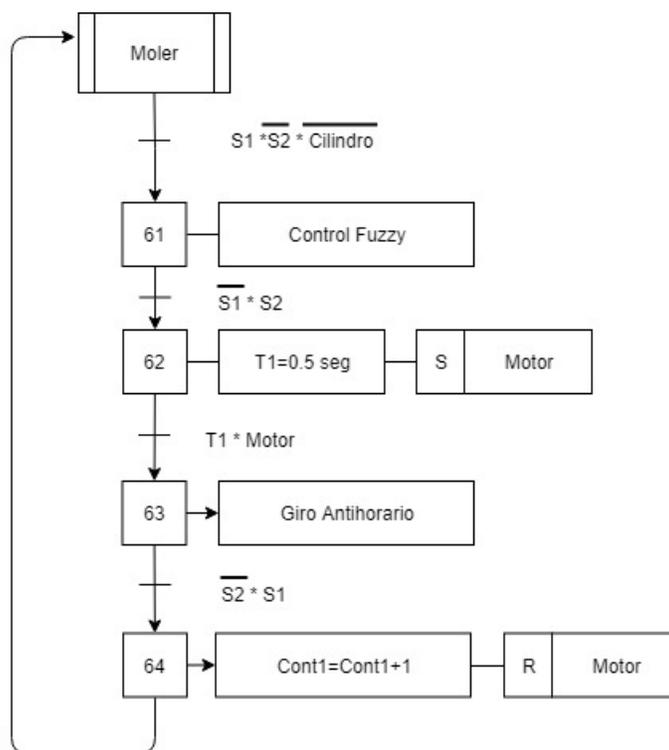


Figura 93. Grafcet de molienda Nivel 2.

Las variables correspondientes al Grafcet de Molienda de Nivel 2 ilustrado en la Figura 93 se detallan a continuación:

**Tabla 29**

*Descripción de Etiquetas: Grafcet de Molienda*

Nº	Etiqueta	Dirección	Descripción
1	T1	T00030	Temporizador de 0.5 seg
2	Motor	Y01001	Salida para cambio de Giro
3	Giro-horario	Y01006	Giro Horario motor DC
4	Giro anti-horario	Y01007	Giro Anti-Horario motor DC

Las direcciones asignadas en el PLC para cada una de las tags del proceso se encuentran detalladas en las Tablas 27, 28 y 29.

En la programación Ladder se consideran 2 modos de marcha:

- Automático: Ingresa al Graficet de producción y llama a las subrutinas de pesaje y molienda de forma secuencial respetando las condiciones de transición de un estado a otro.
- Manual: Mediante botones “Pesar y “Medir” de la pantalla principal ilustrado en la Figura 94, se llama a las respectivas subrutinas sin seguir una secuencia predeterminada, es decir no depende una de la otra sino depende del accionar del operador.

Las alarmas se han definido cuando:

- S1 y S2 activadas al mismo tiempo: Error sensores de Compuerta 2.  
Nivel de alarma: Advertencia.
- Registro D500 diferente de “3D”, valor hexadecimal del signo “ = ”, es decir la balanza no está enviando datos al plc, para un mejor entendimiento ver la Sección 3.2.3.  
Nivel de alarma: Advertencia.
- Lectura de corriente mayor a 80 [A].  
Nivel de alarma: Crítica.

La programación ladder implementada en el PLC puede verse en el Anexo A.7.

### **3.2.7. Implementación de pantallas HMI**

En la Sección 2.7 se planteó la distribución de las pantallas para cada uno de los niveles.



Figura 94. Pantalla de Inicio.

En la Figura 94 se ilustra el diseño de la pantalla principal implementada en el panel HMI, en esta se puede elegir si se va a trabajar en modo “Automático.” “Manual”, también en el sub menú asociado se tiene un botón de acceso a la pantalla de configuración de Parámetros mostrada en la Figura 95. Hay que tomar en cuenta que el panel cuenta con botones de navegación a la derecha de la pantalla, a través de ellos se accede a:

- F1: Mantiene en pantalla de Inicio
- F2: Pantalla de Pesaje
- F3: Pantalla de Molienda
- F4: Pantalla de Tendencia
- F5: Alarmas



Figura 95. Pantalla de Configuración de Parámetros.

Desde la Pantalla de Pesaje ilustrada en la Figura 96 se lee el peso actual de la Tolva a través de un display numérico y el número de batches que han sido pesados. Desde esta pantalla se puede acceder a:



Figura 96. Pantalla de Pesaje.

- F1: Pantalla de Inicio
- F3: Pantalla de Molienda
- F5: Alarmas



Figura 97. Pantalla de Molienda.

Desde la Pantalla de Molienda ilustrada en la Figura 97 se puede visualizar el valor de amperaje mediante un display numérico y su equivalencia de rendimiento del mismo, desde esta se puede acceder a:

- F1: Pantalla de Inicio
- F2: Pantalla de Pesaje
- F4: Pantalla de Tendencias
- F5: Alarmas

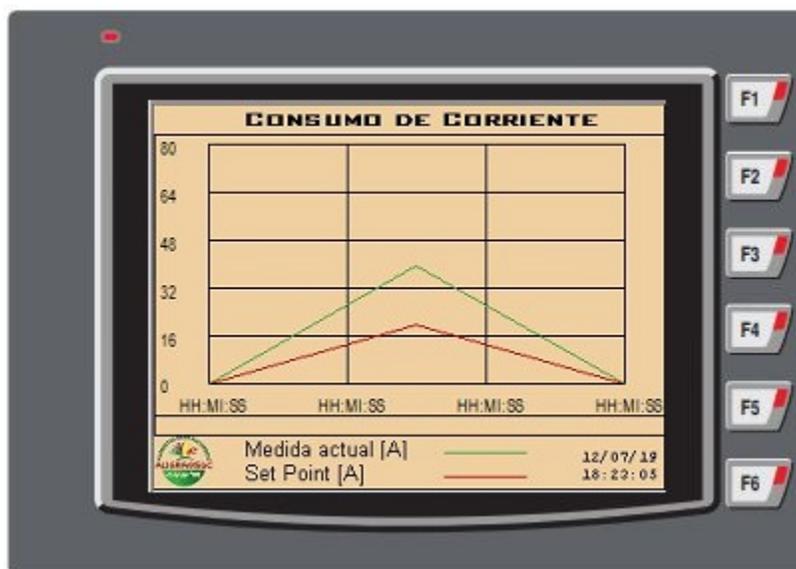


Figura 98. Pantalla de Tendencias.

En la Pantalla de Tendencias ilustrada en la Figura 98 muestra el valor de corriente de referencia ingresado por el operador y el valor de corriente real del motor del molino en tiempo real, desde esta pantalla se puede acceder a:

- F1: Pantalla de Inicio
- F3: Pantalla de Molienda

En la "Pantalla de Alarmas", Figura 99 se visualiza el tipo de alarma, hora y el grado de alerta que puede ser crítica o de advertencia, el led de aviso en caso de presentarse una alarma se encuentra en el panel en la parte superior izquierda, este parpadea hasta corregir el problema además se produce una advertencia sonora. Desde la pantalla de Alarmas ilustrada en la Figura 99 se puede acceder a:

- F1: Pantalla de Inicio

- F2: Pantalla de Pesaje
- F3: Pantalla de Molienda

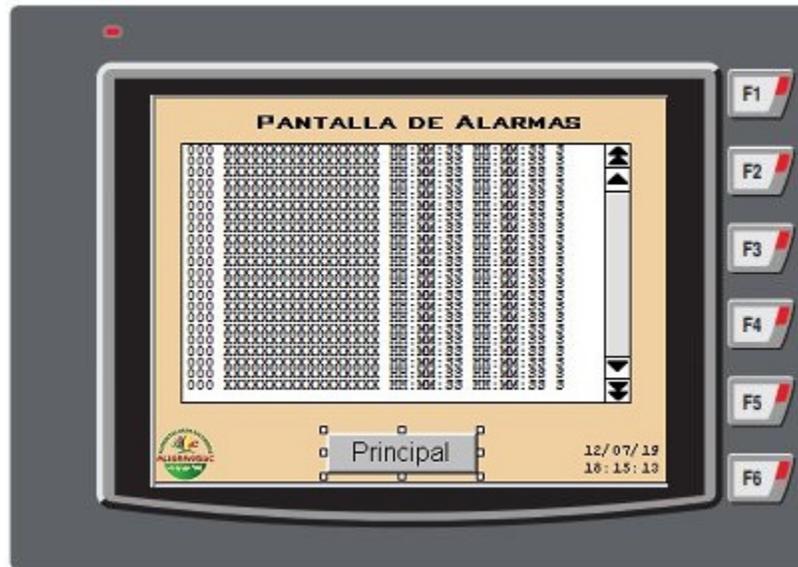


Figura 99. Pantalla de Alarmas.

## Capítulo 4

# Pruebas y Resultados

En el presente capítulo se desarrollan las pruebas al sistema implementado con la finalidad de verificar las condiciones finales del mismo y garantizar su funcionamiento correcto.

### 4.1. Pruebas FAT y SAT

Se efectúan las pruebas FAT y SAT, las cuales se realizan en la Planta Procesadora de Balanceados ALIGRANSUC en el cantón Lago Agrio.

#### 4.1.1. Prueba de Hardware

Para comprobar el montaje de equipos se consideran evaluar los siguientes puntos:

- Inspección visual
- Conexiones
- Diseño

- Alimentación eléctrica
- Señales de entrada y salida

Las pruebas se realizan conjuntamente con el supervisor de Aligransuc y para ello se utiliza las siguientes herramientas:

- Dispositivo de medición: multímetro
- Herramientas: destornilladores, cables, aislante, etc.
- Ordenador personal

**Tabla 30***Pruebas FAT: Inspección visual*

Descripción	SI	NO
Acabado de instalaciones de acuerdo a las especificaciones	X	
Placas de identificación		X
Señalización de componentes		X
Ajuste de pernos	X	
Montaje de equipos en rieles	X	
Perforaciones para ingreso de cables	X	
Verificación de la integridad física de los componentes	X	

**Tabla 31***Pruebas FAT: Conexiones*

Descripción	SI	NO
Conexiones de acuerdo a los diseños aprobados	X	
Ensayos de continuidad de conexiones	X	
Perforaciones para ingreso de cables	X	

**Tabla 32***Pruebas FAT: Diseño*

Descripción	SI	NO
Cantidad de equipos de acuerdo a las especificaciones	X	
Distribución de componentes	X	

**Tabla 33***Pruebas FAT: Alimentación Eléctricas*

Descripción	SI	NO
Alimentación general del gabinete	X	
Alimentación de fuente 24 VDC	X	
Alimentación de PLC	X	
Alimentación de circuito acondicionador	X	

**Tabla 34***Pruebas FAT: Señales de entrada y salida*

Descripción	SI	NO
Voltaje en entradas digitales	X	
Voltaje en salidas digitales	X	
Entradas analógicas	X	
Salida PWM	X	

#### 4.1.2. Pruebas de Software o de funcionamiento SAT

Para verificar el funcionamiento correcto de Software se considera:

- Comunicación entre dispositivos
- Secuencia de la lógica de control

- Directrices HMI

Para evaluar se hace uso de un computador personal.

**Tabla 35**

*Pruebas SAT: Comunicación entre dispositivos*

Descripción	SI	NO
Comunicación mediante puertos RS-232 entre balanza y PLC	X	

**Tabla 36**

*Pruebas SAT: Lógica de Control*

Descripción	SI	NO
Verificación de bloque principal	X	
Verificación de llamado a subrutinas	X	
Verificación de secuencia subrutina Pesar	X	
Verificación de secuencia subrutina Moler	X	
Verificación en modo manual	X	
Verificación en modo automático	X	

**Tabla 37**

*Pruebas SAT: Verificación de HMI*

Descripción	SI	NO
Verificación de arquitectura de pantallas	X	
Distribución de pantallas	X	
Navegación	X	
Uso del color	X	
Valores del proceso	X	
Ingreso de datos	X	
Visibilidad de alarmas	X	
Visibilidad y ubicación de gráficos	X	

Para verificar correctamente las directrices del HMI se evalúan los indicadores propuestos en la guía Gedis, cuyo rango de evaluación es de 1 a 5 asignado a cada sub indicador de acuerdo al nivel de importancia que es fijado por el personal de la planta.

**Tabla 38***Evaluación de HMI mediante Guía Gedis*

<b>Arquitectura</b>	<b>Tipo</b>	<b>Medida</b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
Correspondencia con el proceso	Cuantitativa	[SI, NO] [5,0]	5	0,4
Número de Capas	Cuantitativa	[le<4, le>4] [5,0]	5	0,3
Existencia de Mapas	Cualitativa	[a, m, na] [5, 3, 0]	3	0,3
<b>Distribución</b>	<b>Tipo</b>	<b>Medida</b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
Consistencia	Cuantitativa	[SI, NO] [5,0]	5	0,2
Densidad	Cualitativa	[a, m, na] [5,3,0]	3	0,3
Simetría y balance	Cualitativa	[a, m, na] [5,3,0]	5	0,2
Flujo de proceso	Cualitativa	[claro, med, -] [5,3,0]	3	0,2
<b>Navegación</b>	<b>Tipo</b>	<b>Medida</b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
Correspondencia con la arquitectura	Cuantitativa	[a, m, na] [5,3,0]	5	0,3
Accesibilidad	Cuantitativa	[a, m, na] [5,3,0]	5	0,4
Consistencia	Cualitativa	[SI, NO] [5,0]	5	0,3
<b>Color</b>	<b>Tipo</b>	<b>Medida</b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
Visibilidad	Cualitativa	[SI, NO] [5,0]	5	0,2
Contraste con el fondo	Cuantitativa	[a, m, na] [5,3,0]	5	0,2
Número de colores	Cuantitativa	[4<c<7, c>7][5,0]	5	0,2
Diferencia entre colores	Cuantitativa	[a, m, na] [5,3,0]	5	0,1
Uso de colores primarios	Cualitativa	[SI, NO] [5,0]	5	0,2
Consistencia	Cualitativa	[SI, NO] [5,0]	5	0,1
<b>Información textual</b>	<b>Tipo</b>	<b>Medida</b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
Número de tamaños	Cuantitativa	[SI, NO] [5,0]	5	0,3
Número de fuentes	Cuantitativa	[f<4, f>4][5, 0]	5	0,2
Visibilidad del texto	Cualitativa	[SI, NO] [5,0]	5	0,5
Espaciamento	Cualitativa	[SI, NO] [5,0]	5	0,5

CONTINÚA 

<b>Estado de los equipos</b>	<b>Tipo</b>	<b>Medida</b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
Facilidad de reconocimiento	Cualitativa	[a, m, na] [5,3,0]	5	0,4
Visibilidad del estado del equipo	Cualitativa	[SI, NO] [5,0]	5	0,4
Consistencia	Cualitativa	[SI, NO] [5,0]	5	0,2
<b>Valores del proceso</b>	<b>Tipo</b>	<b>Medida</b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
Visibilidad	Cuantitativa	[a, m, na] [5,3,0]	5	0,3
Ubicación	Cuantitativa	[a, m, na] [5,3,0]	5	0,2
Consistencia	Cualitativa	[SI, NO] [5,0]	5	0,1
<b>Gráficos y Tablas</b>	<b>Tipo</b>	<b>Medida</b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
Formato	Cuantitativa	[a, m, na] [5,3,0]	5	0,3
Ubicación	Cuantitativa	[a, m, na] [5,3,0]	5	0,3
Visibilidad	Cuantitativa	[a, m, na] [5,3,0]	5	0,3
Configuración de tendencias	Cualitativa	[SI, NO] [5,0]	0	0,1
<b>Comandos e ingreso de datos</b>	<b>Tipo</b>	<b>Medida</b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
Visibilidad	Cuantitativa	[a, m, na] [5,3,0]	5	0,3
Maniobrabilidad	Cuantitativa	[a, m, na] [5,3,0]	5	0,4
Retroalimentación	Cuantitativa	[a, m, na] [5,3,0]	3	0,2
Consistencia	Cualitativa	[SI, NO] [5,0]	5	0,1
<b>Alarmas</b>	<b>Tipo</b>	<b>Medida</b>	<b>Valor</b>	<b>Peso</b>
Visibilidad de la ventana de alarmas	Cuantitativa	[a, m, na] [5,3,0]	3	0,3
Accesibilidad	Cuantitativa	[a, m, na] [5,3,0]	3	0,3
Ubicación	Cuantitativa	[a, m, na] [5,3,0]	3	0,2
Información de los textos de alarmas	Cuantitativa	[a, m, na] [5,3,0]	3	0,1
Visibilidad de alarmas en sinópticos	Cuantitativa	[a, m, na] [5,3,0]	3	0,05
Reconocimiento de la situación	Cualitativa	[SI, NO] [5,0]	4	0,05

Para conocer el valor final de cada indicador evaluado se usa la siguiente ecuación

$$Indicador = \frac{\sum_{j=1}^J w_j \text{Subindicador}_j}{\sum_{j=1}^J w_j} \quad (4.1)$$

donde,

- J= número de sub indicadores
- $w_j$  = peso del sub indicador
- Subíndice = valor del sub índice

**Tabla 39**

*Resultados de evaluación Guía Gedis*

<b>Indicador</b>	<b>Medida</b>	<b>Peso</b>
Arquitectura	5	0,1
Distribución	3,88	0,1
Navegación	5	0,2
Color	5	0,2
Información Textual	5	0,1
Estado de los equipos	5	0,05
Valores del proceso	5	0,1
Gráficos	4,5	0,05
Comandos e ingresos de datos	4,6	0,05
Alarmas	3,05	0,05
<b>Total</b>		<b>4,74</b>

Luego de aplicar la Ecuación 4.1, se obtiene los resultados correspondientes a cada indicador y finalmente la evaluación total de las pantallas HMI, cuyo valor es 4,74 , de tal manera que ingresa en un nivel de aceptación alto y cumple con los requerimientos establecidos por el supervisor de la planta de balanceados.

### 4.1.3. Evaluación de Control Fuzzy

En este apartado se compara los valores del controlador Fuzzy implementado en el PLC con los valores teóricos obtenidos en el diseño de Matlab.

**Tabla 40**

*Comparación de salida PWM*

<b>Entrada: Error</b>	<b>Salida PWM (Matlab)</b>	<b>Salida PWM (PLC)</b>	<b>Error (%)</b>
0.5	82	82	0
1.5	82	83	1,22
3	86,4	86	0,46
4	88	88	0
5	90	90	0
6	92	92	0
7	93,6	94	0,43
8.5	98	97	1,03
9	98	98	0
10	98	98	0

Se realiza diez pruebas de error para obtener los valores de salida PWM para control de velocidad de motor en el PLC y en el software de Matlab utilizando la herramienta “*Fuzzy Logic Designer*”. Estos resultados se detallan en la Tabla 40, donde hay que tomar en cuenta que la salida PWM resultante del cálculo en el PLC es de tipo entero, ya que el bloque matemático para el dato de registro PWM en el dispositivo controlador lo aproxima de forma automática.

### 4.1.4. Análisis de KPI's

Para la evaluación de KPI's se toma datos obtenidos de 5 pruebas realizadas con los siguientes parámetros configurados:

- Número de *batches*: 5

- Peso establecido: 300 Kg
- Corriente referencial de molino: 50 A

### **Pesaje**

Tiempo de pesaje: 13 minutos

Variación de cantidad de materia prima: Luego de realizar 5 pruebas se obtuvo los siguientes resultados.

**Tabla 41**

*Pruebas de pesaje antes de la automatización*

<b>Descripción</b>	<b>Peso[Kg]</b>	<b>Error[Kg]</b>
Prueba 1	300	0
Prueba 2	300	0
Prueba 3	300	0
Prueba 4	301	1
Prueba 5	300	0
Error promedio		0,2

En la Tabla 42 se observa que el Error de pesaje de materia prima pasó de 2 Kg a 0,2 Kg.

**Tabla 42**

*Comparación KPI's de pesaje*

<b>KPI's evaluados</b>	<b>Error[Kg] sin automatizar</b>	<b>Error[Kg] con automatizar</b>
Tiempo	13 min	13 min
Error peso	2 [Kg]	0,2 [Kg]

## Molienda

Se realiza 5 pruebas luego de la implementación del sistema para comparar con los datos antes obtenidos en la Sección 2.1.3.

**Tabla 43**

*Pruebas de tiempo de molienda después de la automatización.*

Descripción	Tiempo [min]
Prueba 1	15
Prueba 2	14,7
Prueba 3	14,5
Prueba 4	16,2
Prueba 5	15,6
Tiempo promedio	15,2

Tras las 5 pruebas detalladas en la Tabla 43 se determina un tiempo de molienda promedio de 15.2 minutos. El proceso de molienda mejoró ya que al disminuir el tiempo se aprovechó de mejor manera el trabajo del molino. Los resultados se muestran a continuación:

**Tabla 44**

*Pruebas de molienda después de la automatización.*

Descripción	Corriente	Porcentaje respecto a corriente nominal [%]
Prueba 1	43,78	62,54
Prueba 2	44,8	64
Prueba 3	45,15	64,5
Prueba 4	44,24	63,2
Prueba 5	43,61	62,3
Promedio	44,31	63,30

En la Tabla 44 se muestra los resultados tras las pruebas en la que se obtiene un porcentaje promedio del molino respecto a corriente nominal de 63,30 %

$$W = AV\sqrt{3} \quad (4.2)$$

Para calcular el consumo de potencia del motor en molienda se tiene (4.2), los resultados se muestran en la tabla 45.

**Tabla 45***Consumo de potencia (molienda)*

	<b>Consumo Potencia [kW]</b>	<b>Tiempo /batch(300Kg)</b>	<b>Batch/hora</b>
Antes de la automatización	23,64	25 min	2,4
Después de la automatización	24,12	15,2 min	3,94

El consumo de potencia luego de implementar el sistema automatizado es mayor, sin embargo el tiempo de molienda es menor por lo que se puede producir 1,54 batches más.

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## Conclusiones

Se diseñó e implementó un sistema automatizado para las etapas de pesaje y molienda para la planta de balanceado Aligrasuc, dando lugar a mejoras de índices de rendimiento como tiempo, cantidad de materia prima excesiva y consumo energético.

Se identificó las variables que intervienen en cada etapa para el diseño de los lazos de control. En pesaje se implementó un control on - off que depende directamente de la variable peso y en molienda gracias al estudio de consumo de corriente del molino se realizó un control Fuzzy por las condiciones y características especiales que presenta la planta como la existencia de perturbaciones constantes además de que este control simula la experticia del operador.

Se determinó que los criterios con mayor peso para la elección de equipos fue el espacio que ocupan y su precio, por ello se decidió utilizar un dispositivo que incluya el panel HMI y controlador, de tal manera que se utiliza mejor el espacio disponible.

Mediante el análisis de la lógica secuencial se determinó dos modos de funcionamiento del sistema, manual y automático. El modo manual es utilizado en la planta pues no están acondicionados los silos de almacenamiento de soja que al igual que el maíz pasa por las etapas de pesaje y

molienda, mientras que el modo automático se utilizará luego de las mejoras de almacenamiento de materia prima por parte de la empresa.

La materia prima en exceso por batch en la etapa de pesaje pasó de 2Kg a 0.2Kg en cinco pruebas realizadas luego de la automatización. El sistema al ser más exacto y preciso en la composición de materia prima mejora la calidad del producto final. Así mismo, en la etapa de molienda se disminuyó el tiempo de trabajo de 25 a 15.2 minutos aproximadamente, de forma que el proceso se vuelve más eficiente al aprovechar el consumo de potencia del motor para el mismo trabajo en un menor tiempo de producción, o a su vez, se pasa 1.54 batches más a la etapa de molienda, lo que equivale a 462 Kg de maíz según las pruebas de 300Kg por batch.

A través de las pruebas FAT se concluyó la instalación y funcionamiento correcto del sistema automatizado, el cual cumple con los requerimientos establecidos por el personal de la empresa.

## **Recomendaciones**

Se recomienda implementar el accionamiento de otro transportador de materia para el acarreo de soja desde los silos de almacenamiento hacia la tolva y poner en marcha el modo automático del sistema.

Para evitar perturbaciones excesivas por las caídas repentinas de columnas de maíz al molino que se han acumulado en las paredes de la Tolva 2, se recomendable modificar la estructura mecánica de la compuerta. Sin embargo para el funcionamiento actual se debe definir la corriente de referencia del molino en un valor no mayor a 60 A.

Se debe realizar mantenimiento constante de las compuertas donde se encuentran acoplados el cilindro neumático y el motor DC debido a la excesiva cantidad de polvo y materia acumulada en las guías y en la estructura mecánica en general, lo que afecta directamente al funcionamiento

correcto de los actuadores.

El mantenimiento preventivo y correctivo del sistema debe realizarse para evitar paradas de producción que generan pérdidas de materia prima y otros recursos.

## Referencias

- Aguilera, P. (2002). *Programación de plc's* . Universidad autónoma de Nuevo León.
- Alvarez, M. d. l. , Hernández, S. A., y Nerio, S. P. (2006). *Reingeniería de proceso en la producción de alimentos concentrados balanceados avícolas* . Universidad de El Salvador.El Salvador.
- Arias, C. D., y León, S. M. (2016). *Análisis y propuesta de implementación de un silo de almacenamiento de balanceado, para mejorar la capacidad de producción de la fábrica de balanceados .<sup>ec</sup>uapollo* . Universidad Técnica de Cotopaxi.
- Bañuelos, G., Gómez, A., López, R. D., Aguirre, L. R., y Sánchez, A. (2003). *Automatización del proceso de producción de alimento balanceado para ganado bovino en la empresa .<sup>o</sup>limentos y forrajes gómez* . Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. México,D.F.
- Bonessi, M. (2012). *Instalación de una planta elaborada de alimentos balanceados en la provincia de la pampa, estudio de factibilidad* . Instituto Tecnológico de Buenos Aires.
- Caiza, J. F., Torres, C. F., Suárez, R. E., y León, M. (2018). *Sensor de medición de potencia y corriente con transferencia de datos en tiempo real a la página thingspeak*. Revista Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas Vol. 2, núm. 2. Descargado de <http://investigacion.utc.edu.ec/revistasutc/index.php/ciya/article/download/167/143> (Recuperado el 20 de Junio de 2019)
- Carlo Gavazzi. (2019). *Automation components*. Descargado de <https://www.gavazzionline.com> (Recuperado el 07 de Julio de 2019)
- Carrillo, C., y Calero, G. (2016). *Automatización del proceso de dosificación, ensacado y control de peso en lazo cerrado para la máquina mezcladora de balanceado de la estación experimental tunshi epoch* . Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba.
- Chachapoya, D. (2014). *Producción de alimentos balanceados en una planta procesadora en el cantón cevallos* . Escuela Politécnica Nacional. Quito.
- Corona, L., Abarca, G. S., y Carreño, J. M. (2014). *Sensores y actuadores*. Grupo Editorial PATRIA, S.A de C.V.: Descargado de [https://books.google.com.ec/books?id=wMm3BgAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=actuadores&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwie17\\_Ck4rjAhUjx1kKHxjdBGoQ6AEIKDAA#v=onepage&q=actuadores&f=false](https://books.google.com.ec/books?id=wMm3BgAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=actuadores&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwie17_Ck4rjAhUjx1kKHxjdBGoQ6AEIKDAA#v=onepage&q=actuadores&f=false)

- Disaleico. (2019). *Relés de estado sólido css*. Descargado de <https://www.disaileco.com> (Recuperado el 05 de Julio de 2019)
- ECAMEC. (2009). *Sensores de corriente, comparativa de tecnologías*. ECAMEC Tecnología. Descargado de <http://www.ecamec.com.ar/newsletter/bajarnotab0509.pdf> (Recuperado el 20 de Junio de 2019)
- EMC. (2019). *Fvbc/fxbc series iso6431/iso1552 standar cylinder*. Descargado de <http://www.emc-machinery.com> (Recuperado el 24 de Junio de 2019)
- Flintec. (2019). *Celdas de carga*. Direitos Autorial. Descargado de <https://www.flintec.com/co/sensores-de-peso/celdas-de-carga/viga> (Recuperado el 19 de Junio de 2019)
- García, E. (2001). *Automatización de procesos industriales*. Editorial Universitat Politècnica de València. Descargado de <https://books.google.com.ec/books?id=zCr4ygAACAAJ>
- Gobierno Provincial de Sucumbíos. (2019). *Áreas productivas*. Descargado de <http://sucumbios.gob.ec> (Recuperado el 15 de agosto de 2019)
- Guerrero, D. M. O. (2014). *Sistema automatizado para el control de flujo de trigo en las tolvas de la empresa molinos miraflores s.a.*. Ambato, Ecuador: Universidad Técnica de Ambato.
- Herrera, E. M. (2018). *Diseño e implementación de un sistema de control distribuido para el área de dosificado de macro ingredientes de una planta tipo para la producción de balanceado*. Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Matriz Sangolquí.
- Intor. (2013). *Manufacturing solutions*. Descargado de <http://www.intor.com.ar> (Recuperado el 24 de Junio de 2019)
- Mann, H. (2010). *El alimento balanceado: De fabricación en planta de alimentos al consumo en granjas*. DESARROLLO Y NUTRICIÓN ANIMAL S.A., XXII Congreso Nacional de Avicultura.Panamá. Descargado de <https://www.engormix.com/avicultura/articulos/fabricacion-de-alimento-balanceado-t28616.htm> (Recuperado el 12 de Abril de 2019)
- Maya, S. (2016). *Procesos de producción de alimentos balanceados*. Corporación Universitaria Lasallista. Antioquia.
- Morales, A. J., y Vera, E. D. (2018). *Diseño de una planta piloto para la elaboración de alimentos*

- balanceados de pollos para la empresa agrogruled s.a* . Facultad de Ingeniería Química. Universidad de Guayaquil.
- Naylamp Mecathronics. (2016). *Sensor de corriente ac no invasivo sct-013*. Descargado de <https://naylampmechatronics.com> (Recuperado el 25 de Junio de 2019)
- Orellana, J. (2015). *Corporación Nacional de Avicultores del Ecuador, luego de 20 años*. CONAVE.
- Ortiz, J., Ordoñez, R., y Morales, R. (2016). *Control de un motor con lógica difusa*. Memorias del Congreso Internacional de Investigación Academia Journals.
- Panasonic. (2019). *Autómatas programables*. Descargado de <https://www.panasonic-electric-works.com> (Recuperado el 21 de Junio de 2019)
- Ponsa, P., y Granollers, A. (2010, Junio). *Diseño y automatización industrial*.
- Ponsa, P., y Vilanova, R. (2005). *Automatización de procesos mediante la guía gemma*.
- ProEcuador. (2018). *Alimento para animales*. PROECUADOR - GESTIÓN FINANCIERA. Descargado de <https://www.proecuador.gob.ec/alimentos-para-animales/> (Recuperado el 10 de Abril de 2019)
- Renu Electronics. (2019). *Automation simplified*. Descargado de <https://renuelectronics.com> (Recuperado el 21 de Junio de 2019)
- Rodriguez, M. (2015). *Sensor, transductor y captador*. Revista Digital INESEM. Descargado de <https://revistadigital.inesem.es/gestion-integrada/diferencia-sensor-transductor-captador/> (Recuperado el 19 de Junio de 2019)
- Ruiz, E., Inche, J. L., y Chung, A. R. (2008). *Desarrollo de una interfaz hombre máquina orientada al control de procesos*. Industrial Data, vol. 11, núm. 1. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú. Descargado de <http://www.redalyc.org/pdf/816/81611211010.pdf> (Recuperado el 20 de Junio de 2019)
- Sanchez, V., y Pizarro, D. (s.f.). *Diagnóstico del nivel de automatización en las pequeñas y medianas industrias de la ciudad de cuenca*. Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología.
- San Segundo Carrillo, P. (2010). *Introducción al modelado grafcet*.
- Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, Senplades. (2017). *Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021, Toda una Vida*. Consejo Nacional de Planificación - CNP. Descargado de <http://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/>

- downloads/2017/10/PNBV-26-OCT-FINAL\_0K.compressed1.pdf (Recuperado el 10 de Abril de 2019)
- SEIKA . (2017). *Los 5 niveles de automatización industrial*. SEIKA Automation. Descargado de <https://www.seikaweb.com> (Recuperado el 13 de Junio de 2019)
- Siemens. (2019). *Industry support siemens*. Descargado de <https://support.industry.siemens.com/cs/start?lc=en-WW> (Recuperado el 21 de Junio de 2019)
- SMC. (2019). *Automatización*. SMC, Internacional Training. Descargado de <https://www.smctraining.com/webpage/indexpage/311/> (Recuperado el 10 de Junio de 2019)
- Suñé, A., Gil, F., y Arcusa, I. (2004). *Manual práctico de diseño de sistemas productivos*. Ediciones Díaz de Santos, S. A.
- Tapia, A. M. (2008). *Proyecto de reingeniería del proceso productivo de una planta de alimentos balanceados* . Guayaquil, Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Tapia, R. A. (2010). *Estudio para la creación de una fábrica de alimentos balanceados, ubicada en la parroquia de pifo, provincia de pichincha* . Escuela Politécnica del Ejército.
- Villacrés, F. (1975, Octubre). *La industria de alimentos balanceados en ecuador*. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias.