

# **ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO**

## **CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

### **TÍTULO DEL PROYECTO**

**“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DIGITAL PARA EL SECADO DE BLOQUES PENSADOS Y OTROS DERIVADOS DE BAMBÚ, MEDIANTE LA AUTOMATIZACIÓN DE UN HORNO PARA BIGBAMBOO S.A.”**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO**

**REALIZADO POR:**

**ALEJANDRO SEBASTIÁN JURADO ROBAYO.**

**JOSÉ LUIS MOSQUERA GAVILÁNEZ.**

**DIRECTOR: ING. OSWALDO MARIÑO.**

**CODIRECTOR: ING. ALEXANDER IBARRA.**

**SANGOLQUÍ, 2013-02-18**

## **CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO**

El proyecto “**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DIGITAL PARA EL SECADO DE BLOQUES PRENSADOS Y OTROS DERIVADOS DE BAMBÚ, MEDIANTE LA AUTOMATIZACIÓN DE UN HORNO PARA BIGBAMBOO S.A.**”, fue realizado en su totalidad por Alejandro Sebastián Jurado Robayo y José Luis Mosquera Gavilánez, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecatrónico.

---

**Ing. Oswaldo Mariño.**

**DIRECTOR**

---

**Ing. Alexander Ibarra.**

**CODIRECTOR**

**Sangolquí, 2013-02-18**

## **LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO**

**“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DIGITAL PARA EL SECADO DE BLOQUES PRENSADOS Y OTROS DERIVADOS DE BAMBÚ, MEDIANTE LA AUTOMATIZACIÓN DE UN HORNO PARA BIGBAMBOO S.A.”**

**ELABORADO POR:**

---

Alejandro Sebastián  
Jurado Robayo

---

José Luis  
Mosquera Gavilánez

**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA.**

---

Director de la Carrera de Ingeniería Mecatrónica.

**Ing. Hernán Lara.**

**Sangolquí, 2013-02-18**

# CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

## AUTORIZACIÓN

Nosotros: Alejandro Sebastián Jurado Robayo y José Luis Mosquera Gavilánez.

Autorizo a la Escuela Politécnica del Ejército la publicación, en la biblioteca virtual de la institución del proyecto de grado titulado: 'DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DIGITAL PARA EL SECADO DE BLOQUES PRENSADOS Y OTROS DERIVADOS DE BAMBÚ, MEDIANTE LA AUTOMATIZACIÓN DE UN HORNO PARA BIGBAMBOO S.A.', cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

---

Alejandro Sebastián  
Jurado Robayo

---

José Luis  
Mosquera Gavilánez

**Sangolquí, 2013-02-18**

## **DEDICATORIA**

A la empresa BIGBAMBOO S.A quien es la promotora de este proyecto, bajo la representación del Economista Jorge Eguiguren, quien tuvo la confianza en nosotros y nos abrió las puertas para culminar con éxito esta etapa.

A la Escuela Politécnica del Ejército quien me brindo el conocimiento para realizar con éxito este proyecto y dejar en alto el nombre de la institución dentro del mundo industrial.

***Alejandro Sebastián Jurado Robayo.***

## **DEDICATORIA**

Dedico el presente proyecto a Dios por permitirme alcanzar mis metas, A mis padres, mi fortaleza Edwin y Alba por enseñarme a luchar en la vida y esforzarme por lo que quiero conseguir. A mi hermano Edwin, a mi esposa Majo por apoyarme y siempre estar conmigo y a mi hijito Edwin Nicolás, lo mejor que Dios me pudo dar.

***José Luis Mosquera Gavilánez.***

## AGRADECIMIENTO

A Dios, por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, y culminar con éxito esta etapa de mi vida, además de su infinita bondad y amor.

A mis padres Alex y Rita por todo el apoyo, por sus consejos, sus valores, por la motivación, el ejemplo de perseverancia que me han brindado día tras día hasta llegar a este momento.

A mis hermanos Marcus, Doménica, Gabriela, quienes con su colaboración y sus palabras siempre me han alentado.

A mi amigo y compañero de trabajo Marco Gutiérrez quien me brindó la oportunidad de realizar este proyecto y quien ha sido un ejemplo y guía en el trabajo y la vida.

A mi amigo José Mosquera quien ha sido sinónimo de esfuerzo y perseverancia dos virtudes que ha influenciado en mi trabajo y mi vida.

A los familiares, amigos, ingenieros y personas que me han colaborado o han influenciado en forma positiva de una u otra manera en el proyecto.

A los Ingenieros Oswaldo Mariño y Alexander Ibarra quienes han sido una guía durante toda esta etapa.

***Alejandro Sebastián Jurado Robayo.***

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por permitirme tener esta oportunidad de alcanzar una meta más en mi vida.

A la empresa BIGBAMBOO S.A por brindarnos la oportunidad de permitirnos desarrollar este proyecto.

A amigos que conocí, Marco, Alejandro que durante este proceso demostraron ser unos verdaderos amigos.

A mi familia, mis padres, mis tíos, mis abuelitos que aportaron con un granito de arena para esta formación.

Al Ing. Oswaldo Mariño, e Ing. Alexander Ibarra por guiarnos para poder culminar este trabajo exitosamente.

***José Luis Mosquera Gavilánez.***

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO .....	ii
LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO .....	iii
AUTORIZACIÓN .....	iv
DEDICATORIAS .....	v
AGRADECIMIENTOS .....	vii
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xiv
ÍNDICE DE TABLAS.....	xviii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xxi
RESUMEN.....	xxii
ABSTRACT.....	xxiii
<b>CAPITULO I .....</b>	<b>1</b>
<b>1. GENERALIDADES.....</b>	<b>1</b>
1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA. ....	1
1.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO.....	2
1.2.1. DESCRIPCIÓN DEL HORNO DE ACTIVACIÓN DE RESINA.....	2
1.2.2. PROCESO.....	3
1.2.3. DIMENSIONES DEL HORNO.....	4
1.3. REQUERIMIENTO.....	4
1.4. OBJETIVO.....	5
1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
1.6. ALCANCE DEL PROYECTO.....	6
<b>CAPITULO II .....</b>	<b>7</b>
<b>2. EL BAMBÚ COMO MATERIA PRIMA.....</b>	<b>7</b>
2.1. CUALIDADES DEL BAMBÚ.....	7
2.2. EL BAMBÚ EN EL ECUADOR.....	8

2.3.	ZONAS DE CULTIVO.....	9
2.4.	CULTIVO Y APROVECHAMIENTO DEL BAMBÚ. ....	9
2.5.	VARIEDADES DE BAMBÚ.....	10
2.6.	PRESERVACIÓN DEL BAMBÚ.....	11
2.7.	PROCESAMIENTO DEL BAMBÚ.....	12
	.....	12
2.8.	EL BAMBÚ COMO MATERIAL SUSTENTABLE.....	12
2.8.1.	PRODUCTOS ELABORADOS A PARTIR DEL BAMBÚ.....	13
<b>CAPITULO III .....</b>		<b>14</b>
3.	ALTERNATIVAS DE COMPONENTES.....	14
3.1.	SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE AIRE.....	15
3.1.1.	QUEMADOR.....	15
3.1.2.	SERPENTÍN.....	15
3.2.	SISTEMA DE VENTILACIÓN.....	17
3.2.1.	VENTILADORES.....	17
3.2.2.	TIPOS DE VENTILADORES INDUSTRIALES.....	17
3.2.2.1.	Ventiladores Axiales.....	18
3.2.2.2.	Ventiladores Centrífugos.....	19
3.3.	AISLANTES TÉRMICOS.....	20
3.3.1.	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.....	20
3.3.2.	RESISTENCIA TÉRMICA.....	21
3.3.3.	PINTURA TÉRMICA AISLANTE.....	21
3.3.3.1.	Aislante Insuladd.....	22
3.4.	VARIADORES DE FRECUENCIA.....	22
3.5.	CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE (PLC).....	24
3.5.1.	HMI.....	24
3.5.2.	SOFTWARE DE PROGRAMACIÓN.....	24
<b>CAPITULO IV .....</b>		<b>25</b>
4.	SELECCIÓN DE COMPONENTES.....	25
4.1.	SELECCIÓN DE VENTILADORES.....	25
4.1.1.	VENTILADORES PARA LA INYECCIÓN DE AIRE CALIENTE.....	25
4.1.1.1.	Presión Estática.....	26

4.1.1.2.	Calculo De Renovaciones Del Volumen De Aire Por Cada Hora.....	27
4.1.1.3.	Calculo de Caudal de Aire Requerido.....	27
4.1.2.	VENTILADOR PARA LA RECIRCULACIÓN DE AIRE CALIENTE. ....	30
4.1.2.1.	Calculo de Caudal de Aire Requerido.....	30
4.2.	SELECCIÓN DEL QUEMADOR.....	32
4.3.	SELECCIÓN DE AISLANTES TÉRMICOS.....	34
4.4.	SELECCIÓN DEL VARIADOR DE FRECUENCIA. ....	37
4.5.	SELECCIÓN DEL CONTROLADOR.....	39
4.6.	TABLA DE REQUERIMIENTOS. ....	42
<b>CAPITULO V</b>	<b>.....</b>	<b>43</b>
5.	IMPLEMENTACIÓN DE COMPONENTES PARA EL SISTEMA DE CONTROL. ....	43
5.1.	VARIADOR DE FRECUENCIA.....	43
5.1.1.	VARIADOR DE FRECUENCIA FR–D720-100NA.....	43
5.1.2.	CONEXIÓN Y CONFIGURACIÓN DEL VARIADOR DE FRECUENCIA. ....	44
5.1.3.	CABLEADO, CIRCUITO DE CONTROL Y ETAPA DE POTENCIA.....	45
5.1.4.	DISPOSICIÓN DE CONEXIÓN, ETAPA DE POTENCIA.....	46
5.1.5.	CIRCUITO DE CONTROL DEL VARIADOR DE FRECUENCIA.....	47
5.1.5.1.	Señales de entrada.....	47
5.1.5.2.	Señales de salida.....	49
5.1.6.	PARÁMETROS DEL VARIADOR DE FRECUENCIA.....	50
5.2.	OPLC UNITRONICS V570. ....	50
5.2.1.	HMI. ....	51
5.3.	MÓDULOS DE EXPANSIÓN.....	53
5.3.1.	Módulo digital IO-R08-IO. ....	53
5.3.2.	Módulo análogo IO-A06X.....	55
5.3.3.	MÓDULO DE TERMOCUPLAS IO-ATC8.....	56
5.4.	SOFTWARE DE APLICACIÓN DE UNITRONICS.....	58
5.5.	COMPONENTES ADICIONALES.....	58
<b>CAPITULO VI</b>	<b>.....</b>	<b>61</b>
6.	SISTEMA DE CONTROL. ....	61
6.1.	CONCEPTOS GENERALES DE UN SISTEMA DE CONTROL.....	61
6.1.1.	TIPOS DE SISTEMAS DE CONTROL.....	61

6.1.2.	SISTEMAS DE CONTROL LINEALES Y NO LINEALES. ....	61
6.1.3.	SISTEMAS VARIANTES E INVARIANTES CON EL TIEMPO.....	62
6.1.4.	SISTEMAS DE CONTROL EN TIEMPO CONTINUO.....	62
6.1.5.	SISTEMAS DE CONTROL EN TIEMPO DISCRETO. ....	62
6.1.6.	SISTEMAS DE LAZO ABIERTO.....	62
6.1.7.	SISTEMAS DE LAZO CERRADO.....	63
6.1.8.	SISTEMAS DE CONTROL DIGITAL. ....	64
6.2.	PID (PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO).....	65
6.2.1.	PROPORCIONAL. ....	66
6.2.2.	INTEGRAL. ....	67
6.2.3.	DERIVATIVO. ....	69
6.3.	FUNCIÓN TRANSFERENCIA. ....	70
6.3.1.	OBTENCIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA.....	73
6.4.	CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE UN CONTROLADOR.....	75
6.4.1.	SINTONIZACION DE CONTROLADORES.....	76
6.4.2.	REGLAS DE SINTONIZACIÓN.....	76
6.4.2.1.	Primer Método Basado en la respuesta al Escalón. ....	77
6.4.2.2.	Segundo Método Basado en Oscilaciones Sostenidas.....	77
6.4.3.	APLICACIÓN DE LA SINTONIZACIÓN ZIEGLER NICHOLS, BASADA EN LA RESPUESTA AL ESCALÓN.....	78
6.4.4.	SINTONIZACIÓN MÉTODO CONSTANTE DE RETARDO, PARA LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA OBTENIDA.....	79
6.4.5.	APLICACIÓN DE LA SINTONIZACIÓN ZIEGLER NICHOLS, BASADA OSCILACIONES OBTENIDAS.....	83
6.4.7.	SINTONIZACIÓN PROPORCIONAL.....	87
6.4.8.	SINTONIZACIÓN PROPORCIONAL INTEGRAL. ....	90
6.4.9.	SINTONIZACIÓN PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVA.....	93
<b>CAPITULO VII.....</b>		<b>98</b>
7.	VISILOGIC .....	98
7.1.	INTRODUCCIÓN.....	98
7.1.1.	CONFIGURACIÓN DEL HARDWARE.....	98
7.1.2.	DIRECCIONAMIENTO DE MÓDULOS DE EXPANSIÓN.....	99
7.1.3.	FILTROS.....	105

7.2. EDITOR LADDER .....	106
7.2.1. LADDER PARA EL CONTROL DEL HORNO DE ACTIVACIÓN DE RESINA.....	112
7.3. EDITOR HMI .....	120
7.3.1. HMI PARA EL CONTROL DEL HORNO DE ACTIVACIÓN DE RESINA..	122
7.4. PID SERVER.....	126
<b>CAPITULO VIII.....</b>	<b>128</b>
8. PRUEBAS Y RESULTADOS. ....	128
8.1. PRUEBA AL VACÍO.....	128
8.2. PRUEBA A MÁXIMA CARGA.....	129
8.3. PRUEBA ESCALABLE A 150 BLOQUES.....	131
8.4. RESPUESTA DEL PID SERVER.....	133
<b>CAPITULO IX.....</b>	<b>136</b>
9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	136
9.1. CONCLUSIONES.....	136
9.2. RECOMENDACIONES.....	138
<b>GLOSARIO.....</b>	<b>139</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>142</b>
<b>CARTA DE SATISFACCIÓN .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>MANUAL DE USUARIO.....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>MANUAL DE MANTENIMIENTO .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>PLANOS.....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Curva Temperatura en función del tiempo. ....	3
Figura 1.2. Horno de Activación de Resina (Ver ANEXO A).....	5
Figura 2.1. Bambú Gigante en el Ecuador.....	11
Figura 2.2. Procesamiento del Bambú. ....	12
Figura 2.3. Duela de Bambú.....	13
Figura 3.1. Diagrama de Flujo Proceso del Bambú. ....	14
Figura 5.1. Variador de Frecuencia Mitsubishi FRD-720.....	43
Figura 5.2. Alimentación y Conexión del Variador FR-D720. ....	45
Figura 5.3. Terminales de potencia ....	46
Figura 5.4. OPLC V570. ....	51
Figura 5.5. Módulo Digital IO-R08. ....	54
Figura 5.6. Módulo Análogo IO-A06X.....	55
Figura 5.7. Módulo de termocuplas IO-ATC8. ....	57
Figura 5.8. Tipos y rangos de Termocuplas. ....	59
Figura 5.9. Contactores. ....	59
Figura 5.10. Relés. ....	60
Figura 5.11. Temporizador. ....	60
Figura 6.1. Sistema de Control Lazo Abierto.....	63
Figura 6.2. Sistema de Control Lazo Cerrado. ....	64
Figura 6.3. Sistema de Control Digital. ....	65
Figura 6.4. Lazo PID.....	66
Figura 6.5. Valor Proporcional. ....	67

Figura 6.6. Controlador Proporcional Integral.....	68
Figura 6.7. Valor Derivativo. ....	69
Figura 6.8. Curva Temperatura en función del tiempo. ....	73
Figura 6.9. Comando Step (H).....	74
Figura 6.10. Respuesta al escalón de la Función de Transferencia Total. ....	75
Figura 6.11. Primer Método Ziegler Nichols. ....	77
Figura 6.12. Segundo Método Ziegler Nichols.....	78
Figura 6.13. Método de Sintonización Ziegler Nichols.....	78
Figura 6.14. Recta Tangente al punto de Inflexión.....	79
Figura 6.15. Calculo de retardo y constante de tiempo. ....	82
Figura 6.16. Constantes L y Tau. ....	82
Figura 6.17. Regla sintonización Ziegler Nichols Primer método. ....	83
Figura 6.18. Diagrama de Bloques con el Valor Proporcional.....	84
Figura 6.19. Respuesta, Método Oscilaciones Sostenidas $K_p=350$ . ....	85
Figura 6.20. Respuesta, Método Oscilaciones Sostenidas $K_p=400$ . ....	86
Figura 6.21. Respuesta, Método Oscilaciones Sostenidas $K_p=250$ . ....	86
Figura 6.22. Respuesta, Método Oscilaciones Sostenidas $K_p=700$ . ....	87
Figura 6.23. Controlador P. ....	89
Figura 6.24. Diagrama de bloques control Proporcional de Simulink. ....	89
Figura 6.25. Respuesta al control Proporcional.....	90
Figura 6.26. Controlador PI. ....	91
Figura 6.27. Diagrama de bloques control Proporcional-Integral de Simulink. ....	92
Figura 6.28. Respuesta al control Proporcional-Integral.....	92
Figura 6.29. Controlador PID.....	94

Figura 6.30. Controlador PID Sintonizado.....	95
Figura 6.31. Controlador PID Sintonizado.....	96
Figura 6.32. Diagrama de Bloques PID Simulink.....	97
Figura 6.33.Respuesta PID.....	97
Figura 7.1. OPLC V570.....	99
Figura 7.2. Direccionamiento de Módulos.....	100
Figura 7.3. Módulo Digital IO-R08.....	101
Figura 7.4. Direcciones de Salida Digitales.....	102
Figura 7.5. Direcciones de Temporizadores.....	102
Figura 7.6. Direcciones de Memorias de Bits.....	103
Figura 7.7. Continuación direcciones de Memorias Internas.....	104
Figura 7.8. Selección de filtros.....	106
Figura 7.9. Temperatura referencial.....	113
Figura 7.10. Temperaturas Termocuplas.....	114
Figura 7.11. Set Point.....	115
Figura 7.12. Bloque Configuración PID.....	116
Figura 7.13. Lazo PID.....	116
Figura 7.14. Bloque de lectura de datos PID.....	117
Figura 7.15. Actuadores Variadores de Frecuencia.....	118
Figura 7.16. Actuadores Variadores de Frecuencia y Quemadores.....	119
Figura 7.17. Valores de salida para los Variadores de Frecuencia.....	120
Figura 7.18. Estado gráficos.....	121
Figura 7.19. Display principal BIGBAMBOO S.A.....	122
Figura 7.20. Display MENU.....	123

Figura 7.21. Display TERMOCUPLAS. ....	124
Figura 7.22. Display ACTUADORES.....	125
Figura 7.23. Display PID.....	126
Figura 7.24. PID Server.....	127
Figura 8.1. Curva al Vacío.....	129
Figura 8.2. Curva Máxima Carga.....	130
Figura 8.3. Curva Escalable a 150 Bloques.....	132
Figura 8.4. Variables PID.....	133
Figura 8.5. Configuración PID Server.....	134
Figura 8.6. Representación de datos en el PID.....	134
Figura 8.7. Respuesta del PID Server en línea. ....	135

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Dimensiones del horno.....	4
Tabla 2.1. Cualidades del Bambu.....	8
Tabla 2.2. Zonas de Cultivo del Bambu.....	9
Tabla 2.3. Variedades de Bambues. ....	10
Tabla 2.4. Preservacion del Bambu.....	11
Tabla 3.1. Alternativas de Selección de Quemadores Industriales (Ver ANEXO D). 16	
Tabla 3.2 Alternativas Ventiladores .....	20
Tabla 3.3. Alternativas de Aislantes Térmicos (Ver ANEXO C).....	22
Tabla 3.4. Alternativas de selección Variadores de Frecuencia (Ver ANEXO E). ....	23
Tabla 3.5. Alternativas de Selección de PLC y HMI (Ver ANEXO F).....	24
Tabla 4.1. Puntuación Matriz .....	25
Tabla 4.2. Matriz Selección de Ventiladores.....	28
Tabla 4.3. Ponderación Selección de Ventiladores. ....	28
Tabla 4.4. Selección de Ventiladores a partir de la Ponderación. ....	29
Tabla 4.5. Matriz Selección de Quemadores.....	32
Tabla 4.6. Ponderación Selección de Quemadores. ....	32
Tabla 4.7. Selección de Quemadores a partir de la Ponderación.....	33
Tabla 4.8. Matriz Selección de Aislantes Térmicos. ....	35
Tabla 4.9. Ponderación de Aislantes Térmicos. ....	35
Tabla 4.10. Selección de Aislantes Térmicos a partir de la Ponderación.....	36
Tabla 4.11. Aislante Insuladd. ....	37
Tabla 4.12. Matriz Selección de Variadores de Frecuencia. ....	37

Tabla 4.13. Ponderación de Variadores de Frecuencia.....	37
Tabla 4.14. Selección de Variadores de Frecuencia a partir de la Ponderación .....	38
Tabla 4.15. Matriz Selección de Controlador.....	39
Tabla 4.16. Ponderación de Controladores .....	39
Tabla 4.17. Selección del Controlador a partir de la Ponderación.....	40
Tabla 4.18. Sensores y Actuadores Requeridos .....	42
Tabla 5.1. Notación del Variador FR-D720.....	44
Tabla 5.2. Bornes Circuito de control. ....	45
Tabla 5.3. Señales de entrada, Circuito de Control.....	47
Tabla 5.3. Señales de entrada, Circuito de Control (Continuación).....	48
Tabla 5.4. Señales de salida, Circuito de Control.....	49
Tabla 5.5. Parámetros Variador de Frecuencia .....	50
Tabla 5.6. Partes y Componentes Módulo IO-R08-IO. ....	54
Tabla 5.7. Partes y Componentes Módulo IO-A06X.....	56
Tabla 5.8. Partes y Componentes Módulo IO-ATC8. ....	57
Tabla 6.1. Datos Temperatura vs Tiempo. ....	71
Tabla 6.1. Datos Temperatura vs Tiempo (Continuación).....	72
Tabla 6.2. Valores Obtenidos Ziegler Nichols.....	83
Tabla 6.3. Valores Sintonizados PID .....	96
Tabla 7.1. Clasificación de Filtros.....	105
Tabla 7.2. Elementos Ladder.....	107
Tabla 7.2. Elementos Ladder (Continuación). ....	108, 109, 111
Tabla 7.3. Elementos gráficos HMI.....	121
Tabla 8.1. Tabla de datos al vacío.....	128

Tabla 8.2. Tabla de datos a Carga Máxima.....	130
Tabla 8.3. Tabla de datos Escalable a 150 Bloques.....	131
Tabla 8.4. Temperaturas Sensadas. ....	133

## ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A.- CATÁLOGOS QUEMADORES.
- ANEXO B.- CÁTALOGO VENTILADORES AXIALES GREENHECK.
- ANEXO C.- TABLA AISLANTES TÉRMICOS.
- ANEXO D.- ESPECIFICACIONES TÉCNICAS VARIADORES DE FRECUENCIA.
- ANEXO E.- ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PLC'S.
- ANEXO F.- PUESTA EN MARCHA, SEÑALES ANALÓGICAS Y PROTECCIÓN TÉRMICA DEL VARIADOR.
- ANEXO G.- DESARROLLO DE LA FUNCIÓN IDDATA.
- ANEXO H.- DESARROLLO DE LA FUNCIÓN IDENT.
- ANEXO I.- DESARROLLA DE LA FUNCIÓN PADE.
- ANEXO J.- COMPORTAMIENTO DEL HORNO DE FRAGUADO (SIN CONTROL Y CON CONTROL).
- ANEXO K.- CONFIGURACIÓN DEL HARDWARE.
- ANEXO L.- EDITOR LADDER.
- ANEXO M.- PID.
- ANEXO N.- EDITOR HMI.
- ANEXO O.- PID SERVER.

## RESUMEN

En el presente proyecto denominado: "DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DIGITAL PARA EL SECADO DE BLOQUES PRENSADOS Y OTROS DERIVADOS DE BAMBÚ, MEDIANTE LA AUTOMATIZACIÓN DE UN HORNO PARA BIGBAMBOO S.A.", el proyecto desarrollará un sistema de control para optimizar la curva térmica de un proceso de activación de resina, con el cual se consolida un bloque compacto de bambú, este el cual involucra la automatización de un horno en un nivel de campo, en el cual intervienen sensores y actuadores para su respectivo control.

Para la automatización tenemos los siguientes sistemas de calefacción, ventilación y control.

El diseño del controlador se basa en una función de transferencia, obteniendo el comportamiento del sistema, con el cual se diseña los parámetros para el controlador implementado PID, la programación consta, además, de la opción PID server con la que se realiza un rastreo en línea de las variables intervinientes: tiempo y temperatura.

## **ABSTRACT**

In the present Project called “DESIGN, CONSTRUCTION AND IMPLEMENTATION OF A SYSTEM OF CONTROL DIGITAL FOR THE DRYING BLOCKS PRESSINGS AND OTHER DERIVATIVES OF BAMBOO, THROUGH THE AUTOMATION OF A FURNACE TO BIGBAMBOO S.A ”, the Project consist in the developing a control system to optimize the thermal curve of an activation process of resin, which consolidated a compact block of bamboo, East which involves the automation of a furnace on a fill level which involves sensor and actuators for this respective control.

For automation we have the fallowing systems of heating, ventilation and control.

The design of the controller is based on a transfer function, of obtaining the behavior of the system with which the parameter is designed for the implemented PID controller, programing has, in addition the PID option server with which performs a trace on line of the variables involved: time and temperature.

# CAPITULO I

## 1. GENERALIDADES.

Para el presente trabajo, se tomara como base la utilización de la madera como elemento no renovable y de tala indiscriminada, como el Ecuador se encuentra en una zona tropical, en los años antecesores se observa una abundancia en los arboles madereros, los cuales generaban que la utilización de la misma se vea implementada en pisos, vigas, muebles de casa y en fin un sin número de enceres.

Una vez que observa que la tala de los bosques es abundante que la reforestación, se presta atención a la utilización de materiales alternativos que generen una sustitución en las necesidades de la utilización de la madera, es porque se observa y toma en cuenta al Bambú como un instrumento biodegradable, de corto periodo de crecimiento y de mejor características que la madera, para su utilización en pisos debido a su alta densidad y durabilidad.

Para llegar a obtener un piso de Bambú, que garantice las normas requeridas en su duración, resistencia y densidad es necesario establecer un proceso de tratamiento y manejo adecuado de los enceres que se van a utilizar, con la finalidad de brindar un producto alternativo de sustitución a la madera que ofrezca un mayor prolongación de su vida útil, y que forme parte del cuidado al medio ambiente.

### 1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.

El creciente interés de BIGBAMBOO S.A de poder ofrecer un producto de calidad en bloques solidos prensados de bambú, conlleva a la necesidad de poder activar la resina de los respectivos bloques para asegurar la impregnación de las fibras de las cuales cada bloque está constituido.

Para lo cual trae consigo la necesidad de realizar un proceso de activación de resina homogéneo, en el cual está involucrado un Sistema de Control con el fin de que todos los bloques prensados sometidos a este proceso cumplan la homogenización para la activación de resina que es parte de su constitución.

Mientras que a la madera se le realiza un proceso de secado, al bambú se realiza un proceso de activación la resina, a partir de esto en todo el texto se hablara de un proceso de activación de resina.

## **1.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO.**

Bloques prensados de bambú son expuestos al proceso de activación de resina con el cual van a alcanzar la temperatura adecuada para curar la resina, de tal forma que una vez activada la resina, se obtiene un bloque solido de bambú.

Es importante establecer la relación que existe con el horno de activación de resina, debido a que con dichas especificaciones, se busca un manejo adecuado del Bambú, además de un correcto punto de curado para la elaboración de bloques prensados.

### **1.2.1. DESCRIPCIÓN DEL HORNO DE ACTIVACIÓN DE RESINA.**

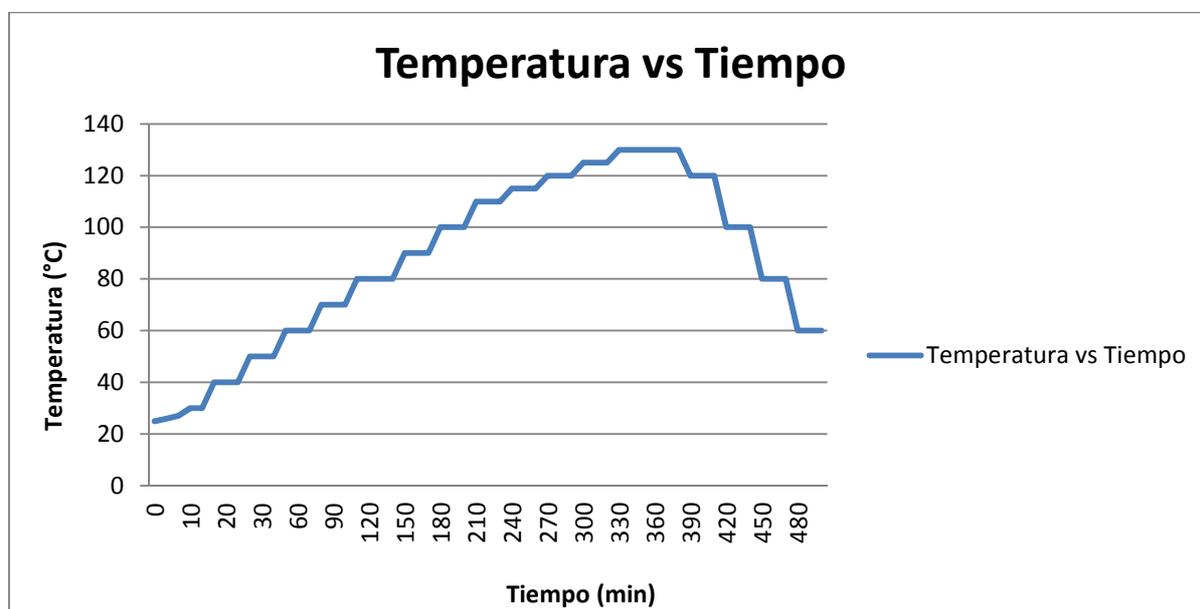
Un horno es un dispositivo que genera calor dentro de un compartimento cerrado, es utilizado para cocinar, calentar o secar alimentos, y en la industria con fines parecidos a grandes escalas, donde que se permita realizar lo mismo pero con una cantidad mayor de elementos, lo que permite que optimice tiempo.

Un horno de activación de resina es un dispositivo similar que genera calor, el cual involucra una sola variable que es la temperatura que en condiciones variables se lo puede utilizar para la activación de una resina, la misma que actúa como sustancia adherente en la consolidación de un bloque macizo.

## 1.2.2. PROCESO.

Una vez prensado 343N (35kgf) de materia prima como latilla de bambú en moldes a  $22 \times 10^6$  Pascal (220 Bar) se procede, a ingresar al horno de activación de resina cada uno de estos moldes ordenándolos en forma de matriz, con separadores de una longitud mínima igual al ancho del molde, una vez lleno el horno con un determinado número de bloques dado por la producción, se enciende el horno desde la temperatura ambiente hasta una temperatura dentro del horno de 403.15 °K (130 °C), todo esto en un proceso de 6 horas continuas y 2 horas de enfriamiento, todo el proceso de calentamiento del horno está dado por una curva establecida por el requerimiento de la fábrica, como se observa en la figura 1.1.

Estos 403.15 °K (130 °C) de temperatura garantizan que la resina que se encuentra impregnada en la materia prima prensada, se active para formar un bloque compacto de alta densidad de Bambú.



**Figura 1.1. Curva Temperatura en función del tiempo.**

En la presente grafica se observa la relación que existe entre la temperatura en función del tiempo, obteniendo datos de las horas y el desarrollo de la temperatura a medida que pasa el tiempo, estableciendo así una esquema de valores a respetarse, para un correcto punto de curado en la elaboración de los bloques compactos.

### 1.2.3. DIMENSIONES DEL HORNO.

El horno tiene las siguientes dimensiones:

**Tabla 1.1. Dimensiones del horno.**

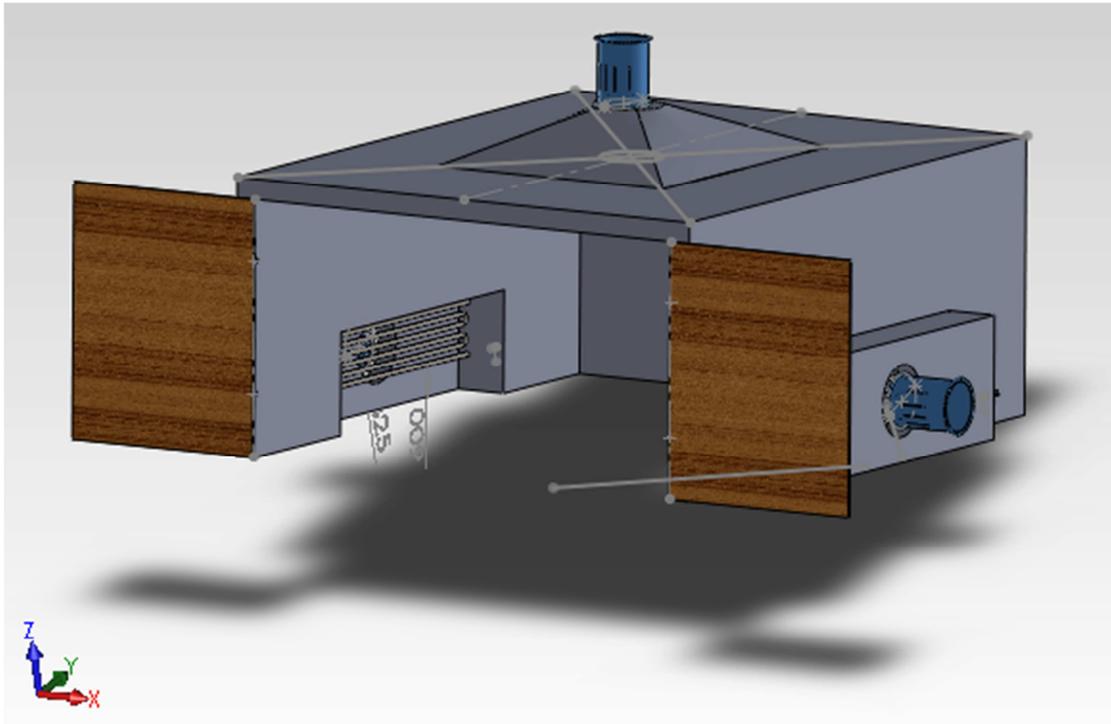
<b>Largo</b>	6 metros
<b>Ancho</b>	4.8 metros
<b>Altura</b>	2.7 metros

Fuente: Propia.

De donde el volumen total del Horno será de 77.76m.

### 1.3. REQUERIMIENTO.

El requerimiento es obtener dentro del horno una temperatura homogénea de 403.15 °K (130 °C), con el fin de que en el centro del bloque compacto de Bambú se obtenga una temperatura mayor a los 373.15 °K (100 °C), datos dados por la fábrica de la experiencia de producción, que se basa por la experiencia adoptada en el tratamiento de las fibras de Bambú como requerimiento del horno, como se observa en la figura 1.2.



**Figura 1.2. Horno de Activación de Resina.**

#### **1.4. OBJETIVO.**

Brindar a la empresa BIGBAMBOO S.A el diseño, construcción, e implementación de un sistema de control digital para la activación de la resina de bloques prensados de bambú, mediante la automatización de un horno de activación de resina.

#### **1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- Diseñar e implementar los diferentes sistemas que intervienen en el proceso que son: calefacción, ventilación, control.
- Realizar un HMI funcional, amigable al operador con las respectivas alarmas y parámetros de control.

- Tomar las conclusiones y los respectivos datos técnicos estandarizados para poder aplicar a un horno de mayor capacidad.

## **1.6. ALCANCE DEL PROYECTO.**

El proyecto tiene como alcance total, la automatización del horno en un nivel de campo o proceso según la pirámide de automatización, debido a que intervienen bloques de entrada / salida, PLC, controladores.

Se realizara mediante una interfaz Humano Máquina (HMI), las variables de entrada según los requerimientos establecidos y detallados por la empresa BIGBAMBOO S.A, la cual se involucra tanto la temperatura y el tiempo en el cual se fijan los set -point's para cada intervalo de tiempo y además muestra las temperaturas que se va obtenido en el tiempo que se establece.

Las variables que intervienen en este proceso son la temperatura y el tiempo, las mismas variables que generen una curva de temperatura en función del tiempo.

El sistema de control se enfoca, en controlar la cantidad de aire caliente que ingresa y la recirculación del mismo, es el mismo control quien monitorea las temperaturas y de redistribuir el calor para lograr una homogenización de temperaturas, esto lo hace mediante un control de velocidad de motores asíncronos de ventiladores turbo-axiales, los cuales inyectan aire para que pase a través de los serpentines, y este se caliente, de la misma forma existe un ventilador turbo-axial en la parte superior del horno, este es el encargado de la redistribución del calor en el sistema, generando turbulencia y dispersando aire caliente dentro de la cámara del horno de activación de la resina.

## **CAPITULO II**

### **2. EL BAMBÚ COMO MATERIA PRIMA.**

Bambú nombre común que reciben el conjunto de plantas que pertenecen a la familia de las gramíneas herbáceas, se caracterizan por sus tallos largos, que forman arbustos y que desarrolla culmos (cañas) de gran diámetro y tamaño, los cuales presenta características propias de una caña de gran prolongación y resistencia.

Crece especialmente en regiones tropicales y subtropicales, no es una madera, pero en los últimos tiempos se le ha considerado como homólogo de una pseudo madera por sus fibras leñosas, gracias a su sistema radicular (raíces), y su gran facilidad para desarrollarse, permite reforestar el ecosistema dañado a causas de talas, incendios, deslizamientos de tierras devuelve nuevamente la fertilidad al suelo, ya que fija nitrógeno, fósforo, calcio, potasio y sílice. Por todo esto es considerado como un gran fertilizador natural del suelo.

#### **2.1. CUALIDADES DEL BAMBÚ.**

Para conocer mejor el producto que se va a trabajar, se consideran las cualidades que posee el Bambú, siendo estas superiores al hierro por ser tan resistente como él, pero mucho más flexible y económico, por lo que se le ha considera el acero vegetal; el mismo se emplea en la construcción de viviendas, tableros, pisos, molduras, andamios, postes, puntales, etc., casi todo material que necesite tanto una prolongación como resistencia, en la practica el bambú y sus derivados, está considerada como planta de crecimiento más rápido del planeta, y crea una composición en sílice que caracteriza su resistencia y durabilidad.

Es un recurso renovable para detener la deforestación del planeta por sus grandes atributos. Es una de las plantas de mayor crecimiento, es un protector del

medio ambiente, ya que es un procesador de dióxido de carbono (12 toneladas por hectárea), mucho más eficiente que la mayoría de árboles de los bosques tropicales por lo que los bosques de Bambú colaboran en la reconstrucción de la atmósfera.

**Tabla 2.1. Cualidades del Bambú.**

<b>Cualidades del Bambú.</b>	<b>Descripción.</b>
Resistencia.	Mayor tracción que el acero.
Dureza	Mayor a la madera de roble.
Elasticidad.	Mayor que cualquier tipo de madera.
Crecimiento.	5 años.

Fuente: PROPIA

### **2.1.1. CICLO BIOLÓGICO DEL BAMBÚ.**

El Bambú, es un recurso forestal, de las especies más beneficiosas, debido a su desarrollo acelerado. Durante los 120 primeros días tiene crecimiento alrededor de 10 cm/día. Durante los primeros meses el Bambú emerge del recubierto de unas hojas gruesas para protegerla. Es aquí donde empieza el desarrollo para conseguir su altura total, en el momento donde elimina su protección se la denomina etapa juvenil o verde, al transcurso de 4 a 5 años alcanza su madurez para alcanzar alturas doscientas veces su diámetro.

### **2.2. EL BAMBÚ EN EL ECUADOR.**

En el país no se cuenta con una gran reserva de Bambú maduro, ya que se ha cosechado tierno para la demanda interna y la exportación, principalmente a Perú, hay muy poco Bambú maduro del que se ve grandes beneficios para la industria ecuatoriana y a su vez que mejora sus características con respecto al Bambú tierno,

por lo que los productores prefieren dejar madurar más el Bambú para aprovecharlo de una mejor manera.

Las principales zonas donde encontramos Bambú en el país son Esmeraldas y el Oriente, donde se estima hay unas 300 Hectáreas, mientras que la provincias más importantes para el cultivo están en: Guayas, Manabí y Los Ríos, que tienen una producción cercana a 2000 Hectáreas<sup>1</sup>.

### 2.3. ZONAS DE CULTIVO.

En las zonas de cultivo se delimita las principales características involucradas con el clima.

**Tabla 2.2. Zonas de Cultivo del Bambu.**

ÍTEM.	RANGO.
Temperatura.	293.15 – 303.15 °K (20 - 30 °C).
Altitud.	0 – 1800 msnm.
Humedad Relativa.	75% - 80%

Fuente: Propio.

### 2.4. CULTIVO Y APROVECHAMIENTO DEL BAMBÚ.

La distancia de siembra se debe considerar en una área de 5 m<sup>2</sup>, arar un plateo (área de crecimiento de raíces del Bambú) de alrededor de 1.5 m y realizar un agujero aproximado de 64 cm<sup>3</sup>, en la superficie de la tierra en la cual está asentada la planta, mediante estas medidas se busca generar una mejor comodidad y un óptimo crecimiento, para así extraer un Bambú maduro, el cual ya posee altas concentraciones de nitrógeno.

---

<sup>1</sup> (INBAR, 2011)

## 2.5. VARIEDADES DE BAMBÚ.

Existen alrededor de 1200 variedades de Bambú en el mundo, los mismos que son gramíneos con periodos muy largos de floración alrededor de 150 años, con lo cual complica su identificación y esto hace que sus semillas sean muy escasas, es por esto que en su cultivo se genera una auto - insemnación de la planta misma en su medio ambiente adecuado.

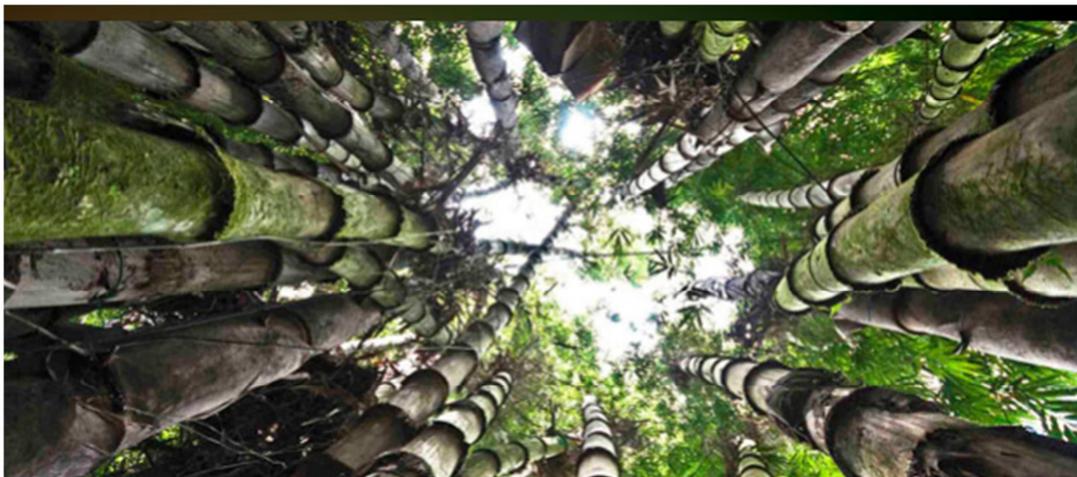
La variedad del Bambú es el que da las cualidades, puede variar su durabilidad, resistencia, flexibilidad, densidad, etc. También limita la edad, la época del cultivo e influye en las características del bambú, como materia prima para su utilización.

**Tabla 2.3. Variedades de Bambues.**

<b>Nombre</b>	<b>Nombre Científico</b>	<b>País</b>	<b>Diámetro(mm)</b>
Tacuara	<i>Phyllostachys aurea</i>	China	10 a 70
Caña Negra	<i>Phyllostachys nigra</i>	Taiwán, China	10 a 60
Caña de la India	<i>Phyllostachys viridis</i>	India	40 a 130
Moso	<i>Phyllostachys edulis</i>	China	60 a 150
Madake	<i>Phyllostachys vivax</i>	Japón	30 a 100
Marliac	<i>Phyllostachys marliacea</i>	Japón	30 a 100
Bambú Amarillo	<i>Bambusa vulgaris</i>	China	40 a 120
Caña Japonesa	<i>Arundinaia simonii</i>	China, Japón	10 a 32
Bambú Gigante	<i>Dendrocalamus Asper</i>	Ecuador	80 a 200

Fuente: Propia

El *Dendrocalamus Asper* es el tipo de bambu que se utiliza para la aplicación de los pisos prensados, al cual tambien se lo conoce como Bambu Gigante.



**Figura 2.1. Bambú Gigante en el Ecuador.<sup>2</sup>**

## **2.6. PRESERVACIÓN DEL BAMBÚ.**

Para que el Bambú pueda resistir al ataque de insectos y cambios drásticos de temperatura se debe conservar su preservación y secado.

**Tabla 2.4. Preservacion del Bambu.**

<b>ÍTEM.</b>	<b>DESCRIPCIÓN.</b>
Selección y Corte.	Tiempo de crecimiento mayor a 4 años.
Transporte	La humedad relativa menor a 20%.
Preservación Química.	Solución en 9.8N (1 Kgf) bórax – 9.8N (1kgf) ácido bórico.

Fuente: Propia

<sup>2</sup> (Bigbamboo, 1999)

## 2.7. PROCESAMIENTO DEL BAMBÚ.

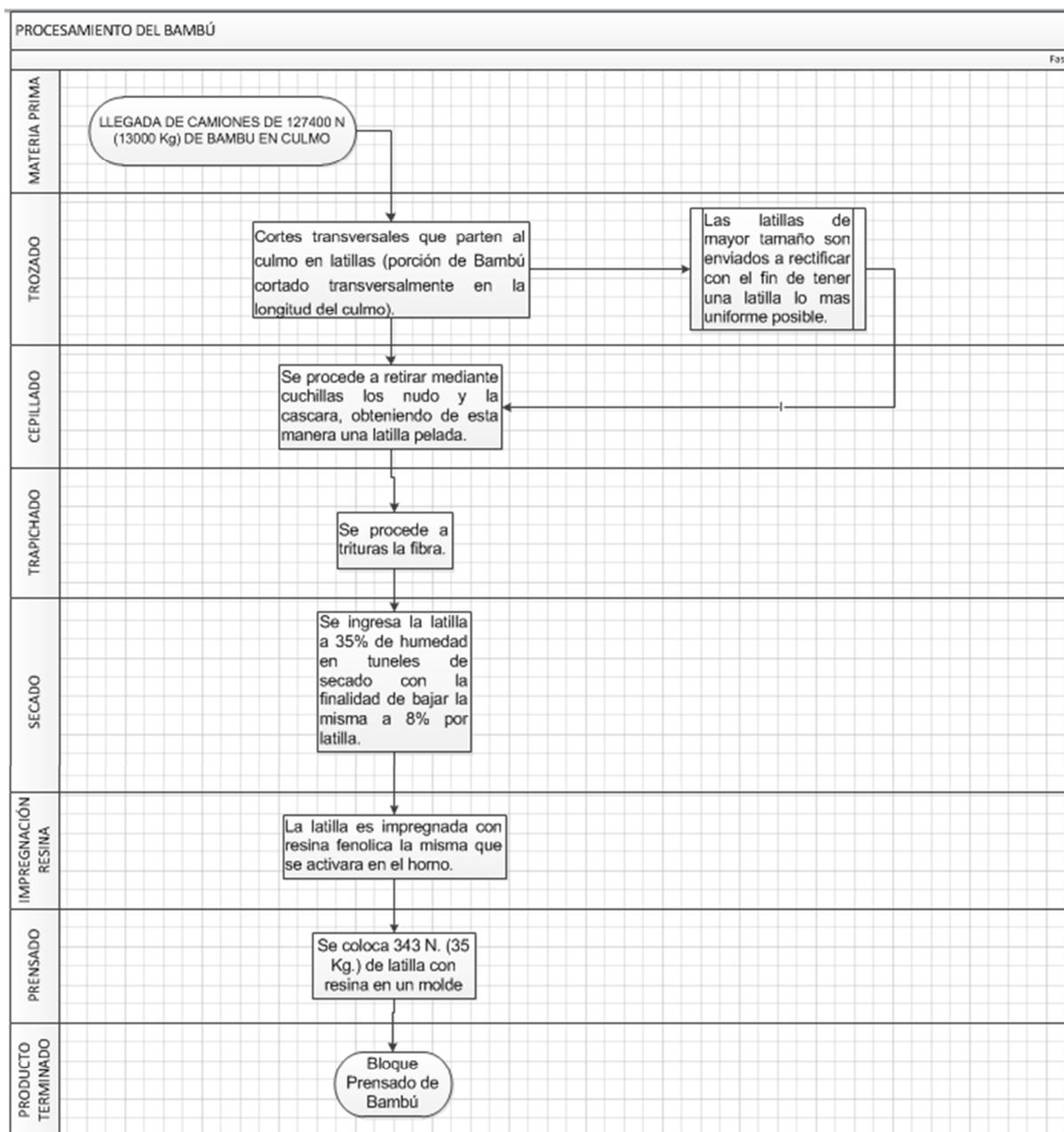


Figura 2.2. Procesamiento del Bambú.

## 2.8. EL BAMBÚ COMO MATERIAL SUSTENTABLE.

Los aportes que el Bambú ofrece como material más liviano que el acero, cinco veces más fuerte que el concreto<sup>3</sup>, y sustentable en la construcción de diversos artículos que sean de utilidad humana, han llegado a establecer que el Bambú seco es resistente, al punto de que se lo puede utilizar para hacer puentes, construcción de viviendas, edificación de estructuras para la construcción, debido a su gran aporte y resistencia como material de construcción.

A más de esto existe una variedad de productos que se desplazan de utilizar este producto a continuación se establecen unos de ellos.

### **2.8.1. PRODUCTOS ELABORADOS A PARTIR DEL BAMBÚ.**

En la búsqueda de estos productos se ha encontrado una amplia gama de enceres que son utilizados como por ejemplo: fabricación de muebles, tuberías, resinas, carbón vegetal, papel, fibras textiles, pisos, aglomerados, artesanías, entre otros, de esta manera se observa que es un producto sustentable y de altas resistencias, que garantiza una confiabilidad casi o superior a los materiales tradicionales.



**Figura 2.3. Duela de Bambú.<sup>4</sup>**

---

<sup>3</sup> (INBAR, 2011)

<sup>4</sup> (Bigbamboo, 1999)

## CAPITULO III

### 3. ALTERNATIVAS DE COMPONENTES.

Las alternativas se darán para satisfacer las necesidades, dentro del proceso de activación de la resina en bloques prensados de bambú.

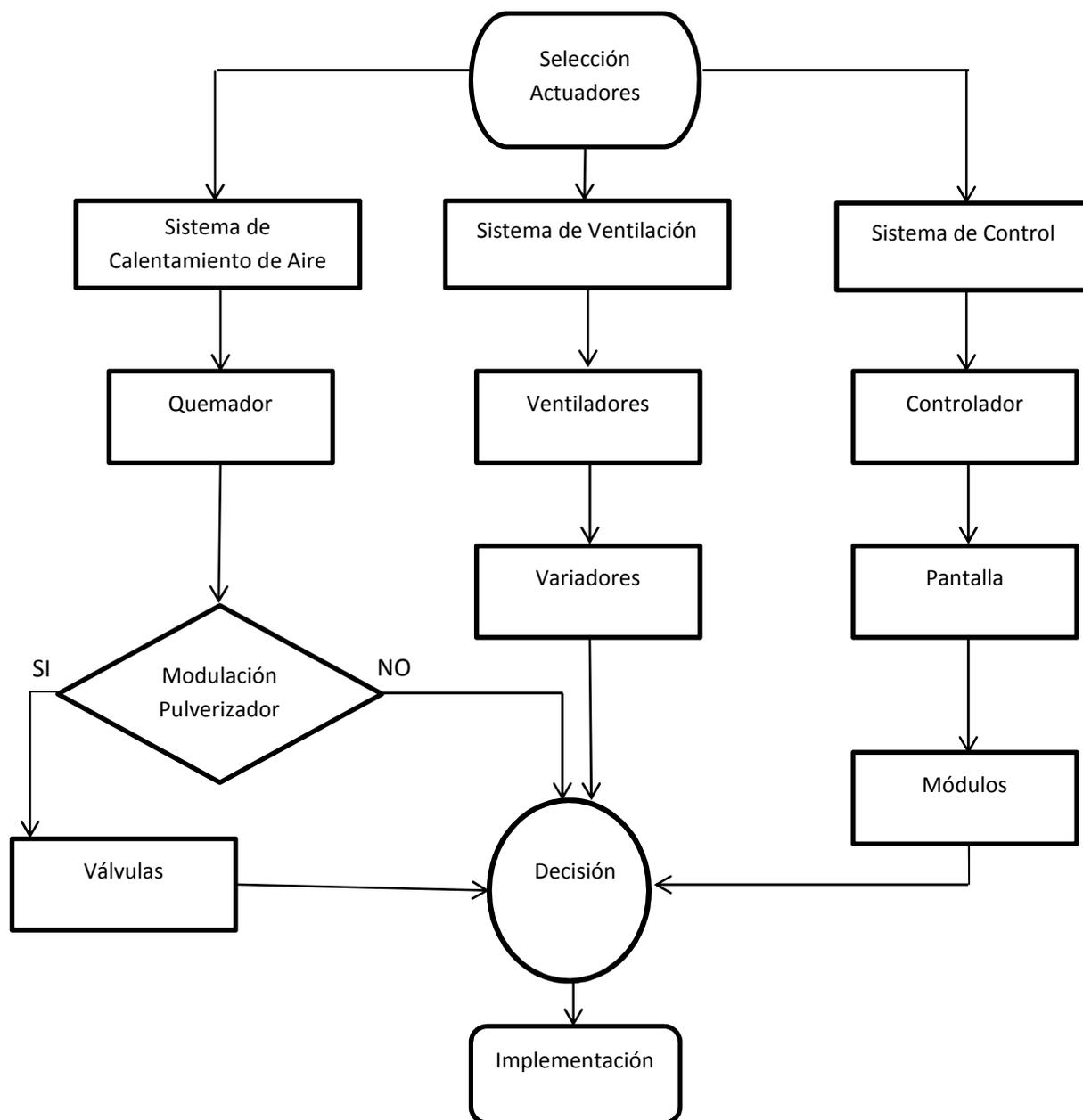


Figura 3.1. Diagrama de Flujo Proceso del Bambú.

### **3.1. SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE AIRE.**

Consiste en calentar el aire mediante un sistema conformado por un serpentín, un quemador, y un ventilador de extracción de gases de combustión de tiro inducido, que ayuda a la evacuación de los gases. El quemador proporciona la suficiente energía calorífica, la misma que se transmite a través del serpentín para ser calentado, el tiro inducido consiste en la evacuación de los gases que se generan en la combustión, esto hace que la relación aire combustible siempre sea la adecuada con el fin de que el quemador no se ahogue.

#### **3.1.1. QUEMADOR.**

Es un dispositivo que proporciona energía calórica generalmente en BTU/h, funciona al activarse electrodos mediante un voltaje proporcionado por el motor eléctrico el cual inflama una llama, considera datos de caudal de combustible que se va a inflamar y la relación de aire que debe existir para que esta combustión sea óptima.

#### **3.1.2. SERPENTÍN.**

Es un tubo de forma frecuentemente espiral, que se utiliza comúnmente para el paso de líquidos o gases calientes, la entrada del serpentín estará en contacto con un quemador, este a su vez calienta el tubo del serpentín el cual intercambia calor. El cual está construido en Acero AISI 1020.

**Tabla 3.1. Alternativas de Selección de Quemadores Industriales**  
**(Especificaciones técnicas ver ANEXO A).**

<b>Marca</b>	<b>Especificación</b>	<b>Tipo</b>	<b>Capacidad (Kw)</b>	<b>Potencia Motor(Kw)</b>	<b>Presión de</b>	<b>Operación</b>	<b>Costo (dólares)</b>
Riello	RSL 38	Gas	116 – 442	0.76	12	Bajo emisión de sonido Circuito aspiración aire Auto ajuste relación	850
Riello	RL 34/M MZ	Diesel	97 – 395	0.7	12	Bajo emisión de ruido Microprocesador, emisión de fallas.	750
Riello	Riello Press 1G	Diesel	130 – 534	0.6	12	Control y bomba autocebante de presión. Aumento de longitud difusor de combustión. Regulación y Ajuste caudal con tornillo.	680
KRANIMUS	GR-20	Diesel	95 – 239	0.6	x	Presión estática baja	500

Fuente: Propia.

## **3.2. SISTEMA DE VENTILACIÓN.**

Este sistema involucra los ventiladores axiales para suministrar un cierto número de CFM acorde al volumen de aire a calentar, este volumen de aire es empujado directamente sobre los radiadores para producir la convección forzada, turbulencia que genera la distribución del aire caliente dentro del horno con la finalidad de que sea homogéneo.

### **3.2.1. VENTILADORES.**

Es una máquina de fluido creada para producir corrientes de aire mediante aspas que giran y producen diferencias de presión. Sus aplicaciones son variadas, entre las que se encuentra la de renovar el aire en lugares cerrados, desplazar aire de un lugar a otro, disminuir la resistencia de transmisión de calor por convección.

Los ventiladores se usa principalmente para producir flujos de gases de un punto a otro, muchas veces estos gases solo sirven como medio de transporte de calor, humedad, etc., o de materiales solidos como polvo, cenizas, entre otros.

El fundamento es mover grandes cantidades de flujo a bajas presiones. Un ventilador sirve para asistir intercambiadores de calor, como los disipadores o los radiadores, con una finalidad de aumentar la transferencia de calor entre un sólido y el aire.

### **3.2.2. TIPOS DE VENTILADORES INDUSTRIALES.**

Para desplazar grandes cantidades de aire se requiere superar las pérdidas de presión del sistema

Existen dos tipos:

- Axiales
- Centrífugos

Los ventiladores axiales por reglas generales se utilizan para flujos altos de aire con bajas resistencias, mientras que los centrífugos son utilizados para flujos altos de aire con resistencias altas.

### 3.2.2.1. Ventiladores Axiales.

Son apropiados para la circulación de aire, gases o vapores, también son útiles para la inyección de aire a lugares como tiendas, almacenes y en nuestro caso hornos, etc.

Son empleados también para disipar calor que puede producir algún equipo que requiera una constante refrigeración, como transformadores, motores entre otros. Existen tres tipos de ventiladores axiales: **helicoidales, tubulares y turbo axiales con directrices.**

- **Ventiladores helicoidales:** se utilizan para mover aire con poca pérdida de carga y su aplicación más común es la ventilación general.
- **Ventiladores tubulares:** Disponen de una hélice de álabes estrechos de sección constante o con perfil aerodinámico, montada en una carcasa cilíndrica. Pueden mover aire dominando resistencias moderadas.
- **Ventiladores turbo axiales con directrices:** Tienen una hélice de álabes con perfil aerodinámico montado en una carcasa. En comparación con los otros tipos de ventiladores axiales, éstos tienen un rendimiento superior y pueden desarrollar presiones superiores.

### 3.2.2.2. Ventiladores Centrífugos.

El ventilador centrífugo consiste en una rueda con álabes (impulsor) que gira en una carcasa en forma de caracol. La corriente entra en el sentido del eje de la rueda y sale en el sentido radial, produciéndose así una desviación de 90°.

El aumento de presión se produce principalmente por la utilización de la fuerza centrífuga que despide el aire desde los álabes de la rueda en la dirección de la rotación. La potencia y el rendimiento de un ventilador dependen en gran medida del diseño del rodete y de sus álabes. Teniendo en cuenta el ángulo de salida del fluido, se distinguen tres familias:

- **Álabes curvados:** En el sentido de la rotación: El sentido de estos proporciona mayor presión para una misma velocidad tangencial. Sin embargo, las pérdidas en la transformación de la energía cinética son grandes y el rendimiento deficiente.
- **Álabes radiales:** Con salida perpendicular al sentido de la rotación: El rendimiento de esta clase de ruedas no es muy elevado y se destina a presiones moderadas. Son de auto limpieza pues las partículas sólidas que pudieran encontrarse en el fluido no se adhieren a las palas y esto justifica su uso en muchas aplicaciones.
- **Álabes inclinados:** Hacia atrás, en el sentido contrario a la rotación: Los álabes pueden ser rectos, curvos o de perfil aerodinámico. Estos rodetes necesitan una velocidad de rotación mayor para una misma presión y un mismo diámetro, pero funcionan en mejores condiciones, debido a la forma del canal entre las palas, por lo que su rendimiento es superior.

**Tabla 3.2 Alternativas Ventiladores  
(Especificaciones técnicas ver ANEXO B).**

<b>Marca</b>	<b>Especificación</b>	<b>Cfm</b>	<b>Pe</b>	<b>COSTO</b>
GreenHeck	S1-16-436-C8	1732	0.1	2000
GreenHeck	S1-16-426-B6	1588	0.25	1850
GreenHeck	S1-20-424-B4	1873	0.38	2500

Fuente: Propia.

### **3.3. AISLANTES TÉRMICOS.**

Son materiales caracterizados por su alta resistencia térmica, la cual se establece como una barrera al paso de calor generalmente entre cuerpos que tienden a igualarse en temperatura es decir a equilibrarse térmicamente.

Estos materiales poseen una baja conductividad térmica y además cuentan con un coeficiente bajo de absorción a la radiación del sol, algunos de estos materiales porosos o fibrosos tienen como objetivo inmovilizar al aire que es un material resistente al paso del calor.

Se considera a un material como aislante térmico cuando su coeficiente de conductividad térmica menor a  $0.06 \text{ w/K}\cdot\text{m}$  y una resistencia térmica mayor a  $0.25 \text{ m}^2 \cdot \text{K/w}$ .

#### **3.3.1. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.**

Es una propiedad física de los materiales que miden la capacidad de conducción de calor a través de un material, también es la capacidad de transferir su energía cinética de sus moléculas a otras adyacentes.

Según el sistema internacional de medidas la conductividad térmica viene dada:  $W/K * m$

Dónde:

w= Watts.

K= Grados Kelvin.

m= metro (unidades de longitud).

### **3.3.2. RESISTENCIA TÉRMICA.**

Depende netamente de la conductividad térmica del material y de su espesor, por lo tanto dependen de un material de la misma conductividad térmica puede tener diferente resistencia térmica conforme a su espesor.

Según el sistema internacional de medidas su unidad es:  $m^2 * K/w$

Dónde:

w= Watts.

K= Grados Kelvin.

m<sup>2</sup>= metro (unidades de área).

### **3.3.3. PINTURA TÉRMICA AISLANTE.**

Consiste en una pintura que contiene una carga de microesferas cerámicas, las cuales se pueden aplicar tanto en interiores como en exteriores.

Su principal cualidad es la de conservar la temperatura interior, se puede aplicar en muros interiores como en exteriores.

La eficiencia de las pinturas térmicas en base a cerámica contiene un alto grado de eficiencia similar al del poliuretano con un espesor de alrededor una pulgada, conforma una barrera radiante muy efectiva.

### 3.3.3.1. Aislante Insuladd.

Es un aislante térmico que puede ser utilizado tanto para proteger del calor, como para mantener el calor.

Insuladd es un material aditivo utilizado para crear una barrera altamente eficiente contra el calor radiante, lo cual garantiza un consumo de energía menor, está diseñado para mezclarse con pinturas e impermeabilizantes para crear un pintura de barrera radiante.

**Tabla 3.3. Alternativas de Aislantes Térmicos  
(Especificaciones técnicas ver ANEXO C).**

<b>Aislante</b>	<b>Conductividad</b>	<b>Resistencia</b>	<b>Espesor(mm)</b>
Lana de Roca	0.03 - 0.05	0.33	10
Lana de Vidrio	0.03 - 0.05	0.67	20
Poli estireno	0.025 - 0.04	0.4	10
Lana de Oveja	0.035 - 0.050	0.29	10
Insuladd	0.035-0.04	3.52	120

**Fuente:** Propiedades Térmicas, Instituto Valenciano de la Edificación.

## 3.4. VARIADORES DE FRECUENCIA.

Es un sistema que controla la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna, por medio del control de la frecuencia que se suministra al motor. Son conocidos también como variadores de voltaje porque también a la vez que varía la frecuencia el voltaje también es modificado.

Los variadores de frecuencia son dispositivos utilizados para el control de velocidad rotacional de motores de corriente alterna. Donde intervienen la frecuencia de alimentación, el número de polos en el estator, en una relación:

$$\text{Velocidad(RPM)} = \frac{120 * f}{p} \quad [3.1]$$

Dónde:

f=frecuencia de suministro

p=número de polos (adimensional)

El variador de frecuencia se alimenta con corriente alterna (CA), la primera fase se realiza mediante un puente de diodos, se rectifica el voltaje y se convierte en corriente directa, este voltaje es filtrado por un banco de capacitores interno con la finalidad de reducir las emisiones de variación de señal, posteriormente con una etapa de inversión, la cual está compuesta por transistores (IGBT), que conmutan en secuencias determinadas (PWM) modulación por ancho de pulso para generar una forma de onda cuadrada de voltaje (CD) a una frecuencia constante y su valor promedio tiene la forma de onda senoidal de la frecuencia que se aplica al motor, la relación de voltaje y frecuencia de salida al motor debe mantenerse, es por este motivo que se aplica el método de modulación de ancho de pulso (PWM).

**Tabla 3.4. Alternativas de selección Variadores de Frecuencia  
(Especificaciones técnicas ver ANEXO D).**

<b>Marca</b>	<b>Especificación</b>	<b>Potencia(Kw)</b>	<b>Alimentación</b>	<b>Costo(dólares)</b>
Schneider	ATV11HU41M E	2.2	Trifásica 220	360
Mitsubishi	FR-D-720	2.2	Trifásica 220	450
Siemens	SINAMIC G110	2.2	Trifásica 220	600

Fuente: Propia.

### 3.5. CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE (PLC).

PLC como sus siglas lo indican se trata de un controlador lógico programable, es un dispositivo electrónico el cual se ha diseñado para programarlo y controlar procesos secuenciales y en tiempo real. Es un sistema basado en un microprocesador el cual contiene partes fundamentales como: CPU Unidad Central de Proceso, la memoria y el sistema de entradas y salidas E/S.

Las instrucciones almacenadas y los datos leídos de sus módulos de entrada son procesados de acuerdo a un programa diseñado el cual cumple una secuencia lógica, es aquí en donde se procesa la señal y se genera las señales de salida.

#### 3.5.1. HMI.

Constituye las siglas de interfaz humano – máquina, consecuentemente es la interacción entre el humano y la máquina, la cual se lleva a cabo en sistemas de automatización.

#### 3.5.2. SOFTWARE DE PROGRAMACIÓN.

El respectivo software de programación es aquel en el cual se puede programar y realizar la lógica secuencial de operación del PLC, es decir las instrucciones que el programa detalla a realizar a su respectivo controlador.

**Tabla 3.5. Alternativas de Selección de PLC y HMI  
(Especificaciones técnicas ver ANEXO E).**

Marca	Especificación	HMI	Software	Costo
Schneide	Twido	Pantalla Táctil 7"	Twido Suite	2200
Siemens	S7-200	Pantalla Táctil 9"	SIMATIC	3500
Unitronics	Visión V570	Incluye V570 Pantalla Táctil	Visilogic	1200

Fuente: Propia.

## CAPITULO IV

### 4. SELECCIÓN DE COMPONENTES.

La selección de todos los componentes está dados por los requerimientos, cálculos que se realizan a continuación y las tablas de alternativas que las encontramos en el CAPITULO ANTERIOR.

Para realizar la selección de la alternativa de los componentes, se utiliza el Método de Ponderación por Matrices.

El mismo que consiste en realizar una Matriz la cual está dada por criterios de selección de cada elemento como el costo, la presión, eficiencia entre otras, los cuales determinan la influencia que tienen dentro de una ponderación, y un factor de  $\sum+1$  con el fin de que la ponderación no sea muy pequeña y se la pueda representar<sup>5</sup>, la puntuación para llenar la matriz está dada por:

**Tabla 4.1. Puntuación Matriz.**

Influencia	Puntuación
No influye	0
Influye poco	0.5
Influye mucho	1

Fuente: Propia.

#### 4.1. SELECCIÓN DE VENTILADORES.

##### 4.1.1. VENTILADORES PARA LA INYECCIÓN DE AIRE CALIENTE.

---

<sup>5</sup> (Varo, 1994).

#### 4.1.1.1. Presión Estática.

La presión estática es la influencia de una fuerza, producida por un fluido (gas o líquido).

De tal manera que cualquier presión ejercida por un fluido, la cual no es ejercida por el movimiento o velocidad del fluido se llama presión estática.

El único lugar en el que la presión puede aumentar es cuando el flujo de aire pasa a través de un ventilador.

El horno tiene las siguientes dimensiones 4.8 X 6 X 2.7 m lo cual da lugar a un volumen de aire.

$$V = L \times L1 \times L2 [m] \quad [3.1]$$

Dónde:

L= Largo.

L1= Ancho.

L2= Altura.

$$V = 4.8 \times 6 \times 2.7 [m]$$

$$V = 77.76 \text{ m}^3$$

Volumen de aire que se calienta hasta alcanzar la temperatura de 403.15 °K (130 °C), que es la temperatura requerida en la empresa para el tratamiento de los bloques sólidos.

#### 4.1.1.2. Cálculo De Renovaciones Del Volumen De Aire Por Cada Hora.

La curva característica que presenta el horno de activación de resina determinan las temperaturas en función del tiempo, al primer ascenso de temperatura se da en un tiempo determinado de 30 min por lo cual, si se asume que debe existir una renovación de aire cada dos minutos se debe realizar 30 renovaciones por cada hora del volumen de aire del horno.

Por lo tanto el factor R/h se define como:

R/h = 30 renovaciones por cada hora.

#### 4.1.1.3. Cálculo de Caudal de Aire Requerido.

El caudal requerido para ventilación de aire depende principalmente del volumen de aire a calentar y la frecuencia de cambio de aire por hora la cual se establece por la relación:

$$Q = \frac{V \times \frac{R}{h}}{3600} \quad [3.2]$$

Dónde:

Q = caudal de aire requerido (m<sup>3</sup>/s)

R/h = frecuencia de cambio de aire

V = volumen de aire a ventilar (m<sup>3</sup>)

$$Q = \frac{77.76 \times 30}{3600} [m^3/s]$$

$$Q = 0.648 [m^3/s]$$

Correspondientes a 1372,85 CFM.

**Tabla 4.2. Matriz Selección de Ventiladores.**

	CFM	PRESIÓN ESTÁTICA	COSTO	$\Sigma+1$	PONDERACIÓN
<b>CFM</b>		0.5	1	2.5	0.33
<b>PRESIÓN ESTÁTICA</b>	0		1	2	0.27
<b>COSTO</b>	1	1		3	0.40
<b>TOTAL</b>				7.5	1.00

Fuente: Propia.

**Tabla 4.3. Ponderación Selección de Ventiladores.**

CRITERIOS	PONDERACIÓN
CFM	0.33
PRESIÓN ESTÁTICA	0.27
MENOR COSTO	0.40

Fuente: Propia.

**Tabla 4.4. Selección de Ventiladores a partir de la Ponderación.**

Marca	Especificación	CFM	Pe	COSTO	PONDERACIÓN			SELECCIÓN
					CFM	Pe(pca)	COSTO	
GreenHeck	S1-16-436-C8	1732	0.1	2000	0.31	0.07	0.03	0.41
GreenHeck	S1-16-426-B6	1588	0.25	1850	0.28	0.18	0.40	0.86
GreenHeck	S1-20-424-B4	1873	0.38	2500	0.33	0.27	0.14	0.74

Fuente: Propia.

La tabla 4.4. Indica según las ponderaciones analizadas el mejor resultado:

GreenHeck S1-16-426-B6 con las siguientes características:

- Turbo-Axiales.
- 1588 CFM.
- Presión estática de 62.27 Pascales (0.25 pca).

#### 4.1.2. VENTILADOR PARA LA RECIRCULACIÓN DE AIRE CALIENTE.

##### 4.1.2.1. Cálculo de Caudal de Aire Requerido.

Para el ventilador de recirculación de aire se necesita 10% más de caudal, por lo que este sirve tanto para la recirculación de aire como para la extracción del mismo.

$$Q = \frac{77.76 \times 30}{3600} [m^3/s]$$

$$Q = 0.648 [m^3/s]$$

$$Q_1 = 0.648 \times \frac{10}{100} [m^3/s]$$

$$Q_1 = 0.0648 [m^3/s]$$

$$Q_T = Q + Q_1 \quad [3.3]$$

$$Q_T = 0.648 + 0.0648[m^3/s]$$

$$Q_T = 0.7128 [m^3/s]$$

El valor del nuevo caudal corresponderá a 1510.135 CFM.

La tabla 4.4. Indica según las ponderaciones analizadas el mejor resultado:

GreenHeck S1-16-426-B6 con las siguientes características:

- Turbo-Axiales.
- 1588 CFM.
- Presión estática de 62.27 Pascales (0.25 pca).

## 4.2. SELECCIÓN DEL QUEMADOR.

Tabla 4.5. Matriz Selección de Quemadores.

	CAPACIDAD	POTENCIA	COSTO	DISPONIBILIDAD	$\Sigma+1$	PONDERACIÓN
CAPACIDAD		0,5	1	0	2,5	0,28
POTENCIA	0,5		1	0	2,5	0,28
COSTO	1	1		0	3	0,33
DISPONIBILIDAD	0	0	0		1	0,11
				TOTAL	9	1,00

Fuente: Propia.

Tabla 4.6. Ponderación Selección de Quemadores.

CRITERIOS	PONDERACIÓN
CAPACIDAD	0,28
POTENCIA	0,28
COSTO	0,33
DISPONIBILIDAD	0,11

Fuente: Propia.

**Tabla 4.7. Selección de Quemadores a partir de la Ponderación.**

Marca	Especificación	Tipo	Capacidad (Kw)	Potencia Motor(Kw)	Presión de Atomización (bar)	Costo (dólares)	PONDERACIÓN				SELECCIÓN
							CAPACIDAD	POTENCIA	COSTO	DISPONIBILIDAD	
Riello	RSL 38	Gas	116 – 442	0,76	12	850	0,25	0,28	0,25	0	0,78
Riello	RL 34/M MZ	Diesel	97 – 395	0,7	12	750	0,21	0,26	0,17	0,13	0,76
Riello	Riello Press 1G	Diesel	130 – 534	0,6	12	680	0,28	0,22	0,12	0,13	0,75
KRANIMUS	GR-20	Diesel	95 – 239	0,6	x	500	0,23	0,22	0,33	0,11	0,89

Fuente: Propia.

La tabla 4.7. Indica según las ponderaciones analizadas el mejor resultado:

El Quemador seleccionado es: Kranimus GR-20.

El mismo que tiene las siguientes características que se detalla:

- Ajuste del difusor para la correcta calibración de la salida del fuego.
- Ajuste del ventilador suministrador de aire para la relación aire combustible.
- Capacidad en un rango 95 – 239Kw.

### **4.3. SELECCIÓN DE AISLANTES TÉRMICOS.**

Para tener un sistema de control eficiente es necesario tomar en cuenta como parte alternativa el manejo de aislantes dado que el evitar la transferencia de calor hacia el exterior del horno contribuirá al mejor desempeño del mismo dado que la transferencia de calor se reduce.

La emulsión asfáltica es un aislante para superficies frías, comúnmente utilizado para techos, su constitución es basada a elementos derivados del petróleo, por lo tanto no son recomendados para aplicaciones de temperatura.

El aislante térmico Insuladd, es un compuesto aditivo cerámico que sirve como aislante térmico y se puede mezclar con otros productos en el caso específico con la emulsión asfáltica que bajo recomendaciones del fabricante se puede mezclar hasta obtener una emulsión aislante que se debe aplicar en un espesor de 3mm para alcanzar un rendimiento aceptable.

**Tabla 4.8. Matriz Selección de Aislantes Térmicos.**

	CONDUCTIVIDAD	RESISTENCIA	ESPESOR	$\Sigma+1$	PONDERACIÓN
CONDUCTIVIDAD		0	1	2	0,29
RESISTENCIA	0		1	2	0,29
ESPESOR	1	1		3	0,42
			TOTAL	7	1,00

Fuente: Propia.

**Tabla 4.9. Ponderación de Aislantes Térmicos.**

CRITERIOS	PONDERACIÓN
CONDUCTIVIDAD	0,29
RESISTENCIA	0,29
ESPESOR	0,42

Fuente: Propia.

Tabla 4.10. Selección de Aislantes Térmicos a partir de la Ponderación.

Aislante	Conductividad Térmica(w/K*m)	Resistencia Térmica(m <sup>2</sup> *K/w)	Espesor(mm)	PONDERACIÓN			SELECCIÓN
				CONDUCTIVIDAD	RESISTENCIA	ESPESOR	
Lana de Roca	0.03 - 0.05	0.33	10	0,25	0,03	0,04	0,31
Lana de Vidrio	0.03 - 0.05	0.67	20	0,25	0,06	0,07	0,38
Poli estireno	0.025 - 0.04	0.4	10	0,21	0,03	0,04	0,28
Lana de Oveja	0.035 - 0.050	0.29	10	0,29	0,02	0,04	0,35
Insuladd	0.035-0.04	3.52	120	0,29	0,29	0,42	1,00

Fuente: Propia.

La tabla 4.10 indica según las ponderaciones analizadas el mejor resultado:

**Tabla 4.11. Aislante Insuladd.**

Nombre	Espesor(mm)	Resistencia Térmica(m <sup>2</sup> K/w)
Insuladd	3	1.2

Fuente: Propia.

#### 4.4. SELECCIÓN DEL VARIADOR DE FRECUENCIA.

La selección del variador de frecuencia está dada básicamente por un parámetro, el cual es la potencia que se va a manejar y la configuración del torque variable o continuo.

**Tabla 4.12. Matriz Selección de Variadores de Frecuencia.**

	POTENCIA	ALIMENTACIÓN	COSTO	$\Sigma+1$	PONDERACIÓN
POTENCIA		0	1	2	0,29
ALIMENTACIÓN	0		1	2	0,29
COSTO	1	1		3	0,42
			TOTAL	7	1,00

Fuente: Propia.

**Tabla 4.13. Ponderación de Variadores de Frecuencia.**

CRITERIO	PONDERACIÓN
POTENCIA	0,29
ALIMENTACIÓN	0,29
COSTO	0,42

Fuente: Propia.

**Tabla 4.14. Selección de Variadores de Frecuencia a partir de la Ponderación.**

Marca	Especificación	Potencia(Kw)	Alimentación	Costo(dólares)	PONDERACIÓN			SELECCIÓN
					POTENCIA	ALIMENTACIÓN	COSTO	
Schneider	ATV11HU41M	2.2	Trifásica 220	360	0,29	0,29	0,11	0,69
Mitsubishi	FR-D-720	2.2	Trifásica 220	450	0,29	0,29	0,42	1,00
Siemens	SINAMIC G110	2.2	Trifásica 220	600	0,29	0,29	0,14	0,72

Fuente: Propia.

La tabla 4.14 indica según las ponderaciones analizadas el mejor resultado:

Los ventiladores adquiridos tienen una potencia de 3HP por lo tanto los variadores de velocidad Mitsubishi FR-D720 y admiten un amplia modulación de parámetros para configurar acorde a la necesidad del comportamiento de dicho actuador.

#### 4.5. SELECCIÓN DEL CONTROLADOR.

**Tabla 4.15. Matriz Selección de Controlador.**

	HMI	COSTO	ESCALABILIDAD	$\Sigma+1$	PONDERACIÓN
HMI		1	0,5	2,5	0,31
COSTO	1		1	3	0,38
ESCALABILIDAD	0,5	1		2,5	0,31
TOTAL				8	1,00

Fuente: Propia.

**Tabla 4.16. Ponderación de Controladores.**

CRITERIO	PONDERACIÓN
HMI	0,31
COSTO	0,38
ESCALABILIDAD	0,31

Fuente: Propia.

**Tabla 4.17. Selección del Controlador a partir de la Ponderación.**

Marca	Especificación	HMI	Software	Costo	Escalabilidad	PONDERACIÓN			SELECCIÓN
						HMI	COSTO	ESCALABILIDAD	
Schneider	Twido	Pantalla Táctil 7"	Twido	2200	POCO	0,08	0,30	0,08	0,46
Siemens	S7-200	Pantalla Táctil 9"	SIMATIC	3500	MEDIO	0,16	0,11	0,16	0,42
Unitronics	Visión V570	Incluye V570	Visilogic	1200	ALTO	0,31	0,38	0,31	1,00

Fuente: Propia.

La tabla 4.17 indica según las ponderaciones analizadas el mejor resultado:

La empresa UNITRONICS ofrece un nuevo de tipo de controlador llamado OPLC, el cual conforma el PLC + HMI en el mismo sistema, el software de programación es Visilogic el cual es un software libre, y el precio del controlador con la HMI es considerablemente más bajo respecto a otras marcas de muy buen prestigio.

Especialmente lo que se busca es tener un PLC + HMI por lo que por lo que se tomó como elección la empresa UNITRONICS que posee este tipo de tecnología llamado OPLC.

El OPLC que se va a utilizar es el OPLC UNITRONICS VISION 570 que posee las siguientes características:

- Pantalla táctil de 5.7", 16 bit de color, permite la visualización de las operaciones.
- Conector para módulos de expansión, como módulos de E/S analógicos, E/S digitales, de comunicación Ethernet TCP / IP, GSM / SMS, de termocuplas, entre otras.
- Todo esto permite que el OPLC Vision570 ejecute un control complejo y completo de todas las tareas de automatización.

#### 4.6. TABLA DE REQUERIMIENTOS.

**Tabla 4.18. Sensores y Actuadores Requeridos.**

<b>Cantidad.</b>	<b>Unidad.</b>	<b>Requerimiento.</b>
<b>2</b>	Unidad	KRANIMUS GR-20 Quemador 93 – 239 Kw.
<b>4</b>	Galones	Aislante térmico Insulad
<b>3</b>	Unidad	Ventiladores Turbo-Axiales GreenHeck S1-16-426-B6 – 3 HP 220 V – 60 Hz.
<b>3</b>	Unidad	Variador de frecuencia FR – D720- 100NA, Mitsubishi 3HP 220 V 60 Hz
<b>1</b>	Unidad	OPLC UNITRONICS VISION 570
<b>1</b>	Unidad	Módulo análogo IO – ATC 08
<b>1</b>	Unidad	Módulo digital IO R08L
<b>1</b>	Unidad	Módulo análogo IO – AO6X

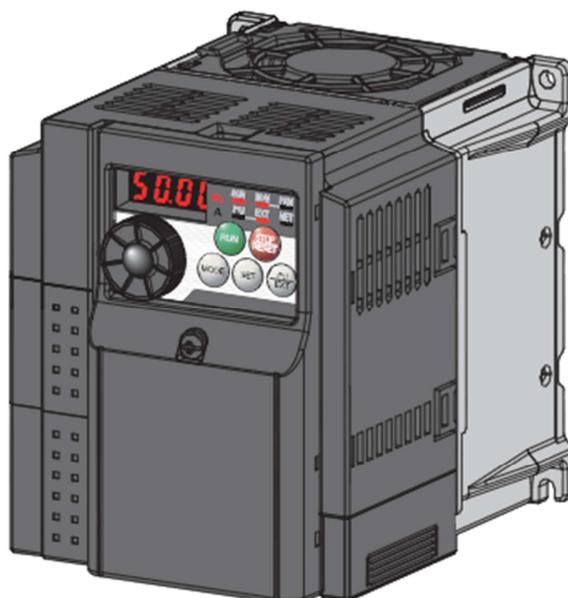
Fuente: Propia.

## CAPITULO V

### 5. IMPLEMENTACIÓN DE COMPONENTES PARA EL SISTEMA DE CONTROL.

#### 5.1. VARIADOR DE FRECUENCIA.

##### 5.1.1. VARIADOR DE FRECUENCIA FR-D720-100NA.



**Figura 5.1. Variador de Frecuencia Mitsubishi FRD-720<sup>6</sup>.**

El variador de frecuencia FR-D720 viene dado por la serie y numeración descrita a continuación:

---

<sup>6</sup> (Electric, 2008)

**Tabla 5.1. Notación del Variador FR-D720.**

<b>FR -D720</b>
Indica la clase de variador y su alimentación 220VAC TRIFÁSICA

Fuente: Propia

### **5.1.2. CONEXIÓN Y CONFIGURACIÓN DEL VARIADOR DE FRECUENCIA.**

La especificación del variador dada la numeración indica la tensión de la alimentación al dispositivo, los pasos y componentes se detallan a continuación.

- Tensión de alimentación Trifásica.
- Interruptor de Alimentación de energía.
- Contactor.
- Variador de Frecuencia.
- Filtro de salida.
- Motor.

Todos los parámetros de puesta en marcha, configuración y protecciones se detalla en el ANEXO G.



**Figura 5.2. Alimentación y Conexión del Variador FR-D720.**

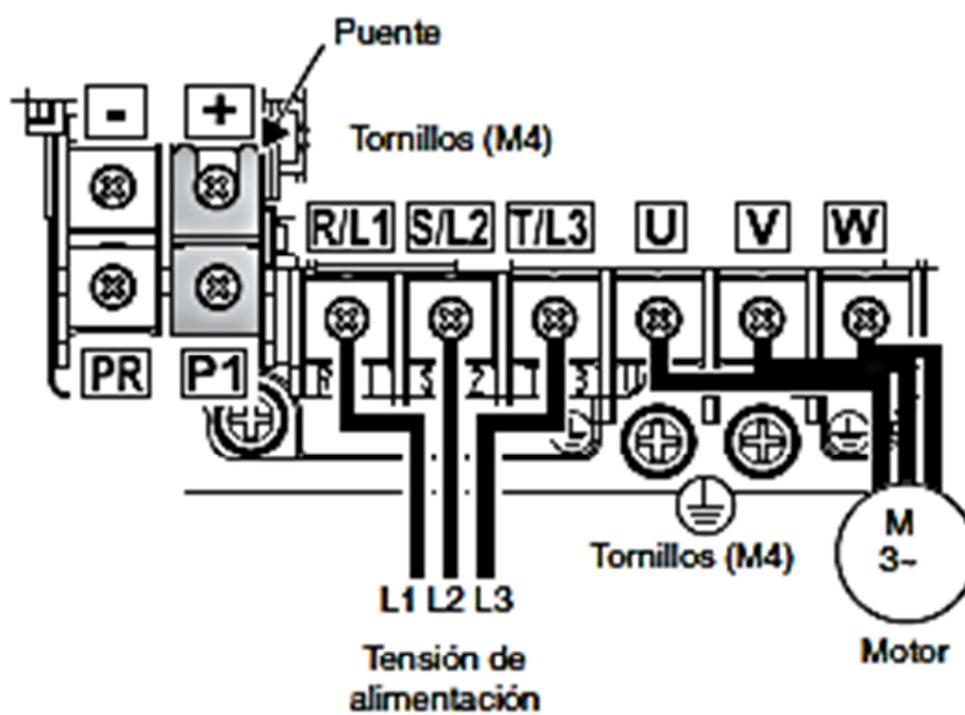
### 5.1.3. CABLEADO, CIRCUITO DE CONTROL Y ETAPA DE POTENCIA.

**Tabla 5.2. Bornes Circuito de control.**

BORNE	DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN
R/L1	Fases	Alimentación variador.
U,V,W	Conexión al motor.	Salida del variador de frecuencia.
+,PR	Conexión para resistencia de frenado externa.	En los bornes + y PR se puede conectar una resistencia de frenado.
+,-	Conexión para unidad de frenado externa.	En los bornes + y – es posible conectar una unidad de frenado externa, como una unidad central de alimentación, regeneración.
+,P1	Conexión para choque intermedio.	Choque intermedio (Opcional).
PE	PE.	Conexión del conductor del variador de frecuencia.

Fuente: Propia

## 5.1.4. DISPOSICIÓN DE CONEXIÓN, ETAPA DE POTENCIA.

Figura 5.3. Terminales de potencia.<sup>7</sup>

---

<sup>7</sup> (Electric, 2008)

### 5.1.5. CIRCUITO DE CONTROL DEL VARIADOR DE FRECUENCIA.

#### 5.1.5.1. Señales de entrada.

**Tabla 5.3. Señales de entrada, Circuito de Control.**

SEÑAL	BORNE	DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN	DATOS TÉCNICOS
ENTRADA	STF	Señal de marcha derecha.	El motor gira a la derecha cuando se activa la señal STF.	Tensión de activación 21-26V DC Corriente de Activación 4 – 6mA DC.
ENTRADA	STR	Señal de marcha izquierda.	El motor gira a la izquierda cuando se activa la señal STR.	Tensión de activación 21-26VDC Corriente de Activación 4 – 6mA DC.
ENTRADA	RH, RM, RL	Preselección de Velocidad.	Preselección de frecuencias Establecidas	Tensión de activación 21-26VDC Corriente de Activación 4 – 6mA DC.

Fuente: Propia.

**Tabla 5.3. Señales de entrada, Circuito de Control (Continuación).**

PUNTOS DE REFERENCIA	SD	Punto de referencia (0) VDC para salida a 24 V DC. Terminal PC.	Una función de control determinada.	-
	PC	Punto de referencia para lógica positiva.	Salida 24 V DC a 0.1mA.	-
	10	Salida de tensión a un potenciómetro.	Salida 5 V DC.	Salida de tensión 5 V DC a 10mA DC.
	2	Entrada de tensión para asignar valores a la frecuencia.	Se asigna este borne para una salida de frecuencia proporcional.	Resistencia de entrada 20K $\square$ alimentación máxima 20 V DC.
	4	Entrada de corriente para asignar valores a la frecuencia.	Se asigna este borne para una salida de frecuencia proporcional.	Resistencia de entrada 233K $\square$ alimentación máxima 30mA DC.
	5	Punto de referencia para activar la señal de asignación de valores de frecuencia (2,4).	Este borne sirve de referencia 0 V DC para las magnitudes de los valores nominales analógicos.	-
	10	Entrada PTC.	Los bornes 2 y 10 sirven como (Protección térmica del motor).	Resistencia sensor PTC 500 $\square$ .

Fuente: Propia.

### 5.1.5.2. Señales de salida.

**Tabla 5.4. Señales de salida, Circuito de Control.**

	<b>BORNE</b>	<b>DENOMINACIÓN</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>DATO TÉCNICO</b>
SALIDA A RELÉ	A,B,C	Salida de Alarma.	Constituyen como contactos de relé que se activan como protección.	Carga: 230 V AC/0,3 A (con factor de potencia: 0,4) o bien
	RUN	Salida de señal para marcha de motor.	La señal se activa cuando la frecuencia de salida es mayor o igual que la frecuencia del variador 0,5Hz.	Carga permitida: 24 V DC (máx. 27 V DC), 0,1 A (La caída máxima de tensión con señal conectada es de 3,4 V.)
	SE	Referencia para salidas de señal.	Referencia para la señal RUN.	-
SALIDA ANALÓGICA	AM	Salida de tensión analógica.	Valores de Visualización de frecuencia.	Tensión de salida: 0–10 V DC Corriente máxima de salida: 1mA.

**Fuente:** Propia.

### 5.1.6. PARÁMETROS DEL VARIADOR DE FRECUENCIA.

La configuración de parámetros del variador de frecuencia, es definida según el comportamiento que se desee tener del mismo para nuestro caso particular, los actuadores son motores trifásicos asíncronos de 220 VAC de alimentación y la frecuencia nominal de trabajo 60 Hz.

La configuración establecida para la configuración para trabajar con valores análogos es la siguiente:

**Tabla 5.5. Parámetros Variador de Frecuencia.**

PARÁMETRO	VALOR
77	0
126	60 Hz
160	0
241	1
267	2
C5	0 Hz
C6	20%
C7	100%

Fuente: Propia

### 5.2. OPLC UNITRONICS V570.

Un OPLC constituye la unión de un PLC con una Pantalla conocida como HMI la cual se realiza en una sola interfaz este conjunto se denomina OPLC.

PLC sus siglas significan Controlador Lógico Programable, es un dispositivo electrónico programable destinado a controlar procesos lógicos y secuenciales.

### 5.2.1. HMI.

HMI sus siglas significan Interfaz Humano Máquina y como su nombre lo dice es la interfaz existente entre el humano y la máquina, el conjunto de PLC + HMI se reducen dando lugar a un solo dispositivo electrónico programable conocido como OPLC que adjunta funciones de sus dos partes conformantes.

- Reducir el cableado entre dispositivos los cuales involucra mayor eficiencia.
- Reduce la programación debido a que ya están en una sola interfaz el panel (HMI) y el controlador que se le asigna sus determinadas funciones lógicas secuenciales dando como resultado una programación en un solo ambiente.
- Reducción del hardware debido a que ya es solo un dispositivo compacto.



Figura 5.4. OPLC V570<sup>8</sup>.

---

<sup>8</sup> (Unitronics, 1999)

Los OPLC vision son controladores logicos programables que componen un panel de mando integral como los V570, comprenden una pantalla tactil a color y que integra un teclado virtual cuando el operador necesita introducir datos.

*Comunicaciones:*

- 2 puertos de comunicación RS232/RS485.
- 1 puerto para CANbus.
- Las comunicacione en fuciones de bloques SMS,GPRS, MODBUS.

*I/O Opciones de entrada, salida.*

- Adaptador.
- Módulos de expansión I/O se pueden anadir mediante la via de expansión.

*Informacion.*

- En este Módulo se puede calibara la pantalla tactil.
- Ver y editar valores en Operadores.
- Inicializar y Resetear el OPLC.

### *Programacion, Software y Utilidades.*

El paquete de software en este OPLC es Visilogic lo cual constituye un software de programación para configurar las opciones HMI y las opciones Ladder, además integra funciones de bloques como PID, y su cable de comunicación para poder descargar información al PLC.

Entre las utilidades que brinda esta el acceso remoto para programación y diagnóstico.

Al OPLC Visión 570 se le complementará con los siguientes módulos:

- IO-AO6X\_módulo.
- IO-ATC8\_módulos.
- IO-RO8 IO-RO8L\_módulo.

Estos módulos se seleccionaron según el requerimiento y necesidades presentes en el Sistema de Control.

## **5.3. MÓDULOS DE EXPANSIÓN.**

### **5.3.1. Módulo digital IO-R08-IO.**

Constituyen un módulo de expansión que trabajan específicamente con un modelo de OPLC asignado, el módulo trabaja con una alimentación de 24VDC lo cual se suministra a la alimentación del módulo de expansión.

Consta de 8 salidas a reles.

La interfaz requerida entre el OPLC y el módulo IO-R08-IO es el adaptador.

El módulo de expansión es para montar sobre una riel DIM en un panel electrónico.

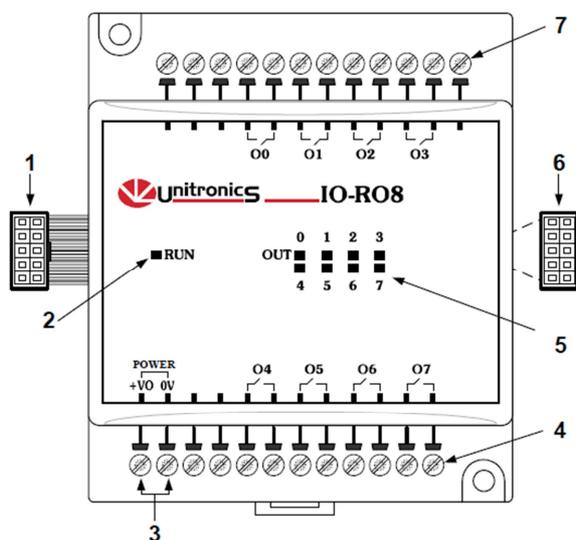


Figura 5.5. Módulo Digital IO-R08.<sup>9</sup>

Tabla 5.6. Partes y Componentes Módulo IO-R08-IO.

ITEM	IDENTIFICACION DE COMPONENTES
1	Conector Módulo a Módulo.
2	Indicador del estado de la comunicación.
3	Alimentacion del Módulo de Expansión.
4	Puntos de Conexión O4-O7.
5	Indicador de los estados de las salidas digitales.
6	Puerto de Conexión módulo a módulo.
7	Puntos de Conexión O0-O3.

Fuente: Propia.

<sup>99</sup> (Unitronics, 1999)

### 5.3.2. Módulo análogo IO-A06X.

El módulo de expansión análogo IO-A06X trabaja conjuntamente con un controlador unitronics específico en este caso el OPLC Visión V570.

Este módulo ofrece salidas de 6 a 12 bits que se puede elegir en rangos de salida tales como:

- 0 - 10 VDC.
- 0 - 20mA.
- 4 - 20mA.

El módulo de expansión es para montar sobre una riel DIM en un panel electrónico.

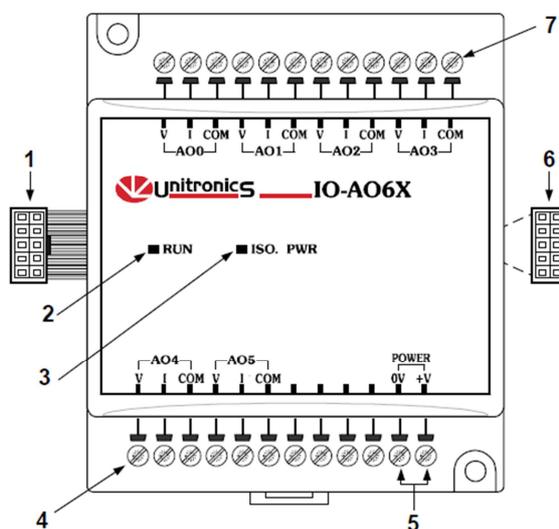


Figura 5.6. Módulo Análogo IO-A06X.<sup>10</sup>

<sup>10</sup> (Unitronics, 1999)

**Tabla 5.7. Partes y Componentes Módulo IO-A06X.**

<b>ITEM</b>	<b>DESCRIPCION DE COMPONENTES.</b>
1	Conector Módulo a Módulo.
2	Indicador de Estado de comunicación.
3	Indicador de fuente de alimentacion.
4	Puntos de conexión AO4-AO5.
5	Fuente de Alimentacion 24V DC.
6	Puerto de conexión módulo a módulo.
7	Puntos de conexión AO0-AO3.

Fuente: Propia

### 5.3.3. MÓDULO DE TERMOCUPLAS IO-ATC8.

El módulo de expansión IO-ATC8 es un módulo que funciona conjuntamente con modelo específico de unitronics en este caso V570.

El módulo ofrece 8 entradas análogas o termocuplas todo depende de la programación del software específicamente a la configuración del mismo.

La interfaz entre módulo a módulo está dada por el adaptador.

El módulo de expansión es para montar sobre una riel DIM en un panel electrónico.

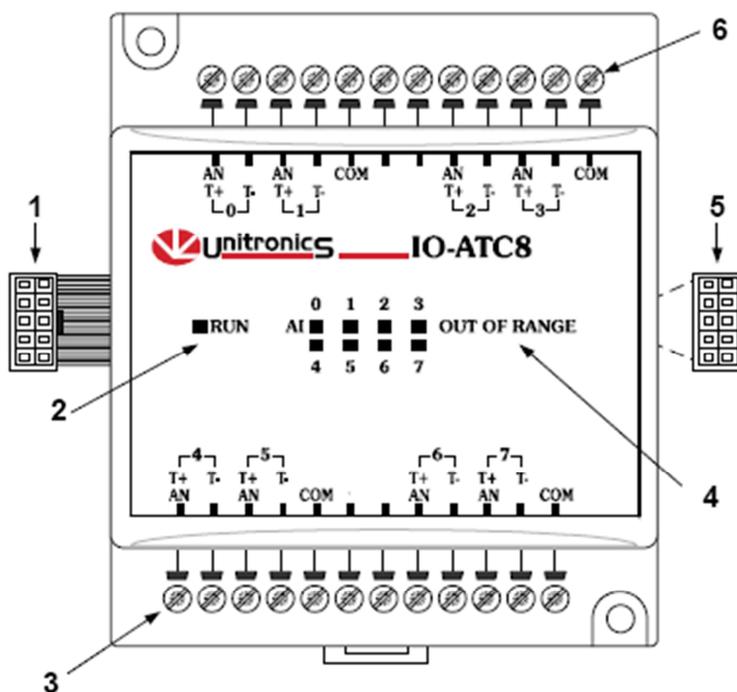


Figura 5.7. Módulo de termocuplas IO-ATC8<sup>11</sup>.

Tabla 5.8. Partes y Componentes Módulo IO-ATC8.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES.
1	Conector Módulo a módulo.
2	Indicador de estado de comunicación.
3	Puntos de conexión I4 – I7.
4	Indicador de estado de entradas.
5	Conector Módulo a módulo.
6	Puntos de conexión I0-I3.

Fuente: Propia.

<sup>11</sup> (Unitronics, 1999)

#### **5.4. SOFTWARE DE APLICACIÓN DE UNITRONICS**

Es un software de programación compatible con controladores Visión a color que incluyen pantallas táctiles HMI a color, puede configurar el hardware cuando se selecciona un controladora a visión presentándole las opciones y funciones apropiadas, Visilogic no es compatible con las versiones OPLC serie V120.

El controlador Visión V570 incluye una pantalla táctil de 256 colores integrada, incluye teclado virtual cuando la aplicación realmente lo requiere, el V570 es compatible con módulos de expansión I/O, este tipo de controladores ofrecen hasta 1024 Displays, una aplicación puede incluir hasta 500 imágenes el software de programación Visilogic incluye imágenes a colores para las respectivas aplicaciones de este controlador.

#### **5.5. COMPONENTES ADICIONALES.**

Los componentes que complementan al OPLC y los módulos dentro del Sistema de Control son:

- **Termocuplas.**

Son transductores conformados por dos metales distintos unidos que producen una variación de voltaje, que se da mediante la diferencia de temperatura entre dos extremos, el uno denominado punto caliente y el otro denominado punto frío, los mismos que son muy utilizados como sensores de temperatura, por ser económicos, intercambiables, con conectores estándares, y miden un amplio rango de temperatura.

Dígito	Catálogo	Sensor	Dimensiones Bulbo mm.		Rango de T°	T° Maxima
			Largo	∅		
0415666-8	TCS-106J	Termocupla J	2	4	0 a 600°C	400°C
0415668-4	TCS-106K	Termocupla K	2	4	0 a 800°C	400°C
0415670-6	TCB-902K	Termocupla K	100	5	0 a 800°C	500°C
0415672-2	TCP-907/PT-100	PT-100	50	5	-50 a 300°C	400°C
0415673-0	TCP-907/PT-100	PT-100	100	5	-50 a 300°C	400°C
0415674-9	TCP-907/PT-100	PT-100	150	5	-50 a 300°C	400°C
0415678-1	TCP-109-J	Termocupla J	100	5	600°C	600°C
0415680-3	TCP-109-K	Termocupla K	200	5	800°C	600°C
0415683-8	* TSB/K	Termocupla K	100	9,5	0 a 800°C	800°C

Figura 5.8. Tipos y rangos de Termocuplas.

- **Contactores.**

Son componentes electromecánicos, cuyo objetivo es permitir o interrumpir el paso de corriente, se activa al energizar su bobina interior.

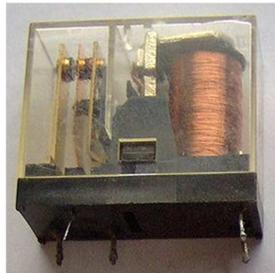


Figura 5.9. Contactores<sup>12</sup>.

<sup>12</sup> (Mejia, 1999)

- **Relé**

Dispositivo electromecánico, que funciona como un interruptor controlado por un circuito eléctrico, se acciona mediante una bobina, esta a su vez acciona los contactos que se necesiten.



**Figura 5.10. Relés.**

- **Temporizadores**

Es un dispositivo que posee frecuencia programable, que permite medir el tiempo, cuando pasa el tiempo configurado, se activa o se desactiva según la disposición del dispositivo.



**Figura 5.11. Temporizador<sup>13</sup>.**

---

<sup>13</sup> (Mejia, 1999)

## **CAPITULO VI**

### **6. SISTEMA DE CONTROL.**

#### **6.1. CONCEPTOS GENERALES DE UN SISTEMA DE CONTROL.**

Existen diferentes tipos de Sistemas de Control los cuales se los ha implementado para funciones muy complejas de producción hasta tareas simples y rutinarias. Un ejemplo muy simple de un sistema de control es un interruptor donde la persona es el que realiza las funciones del controlador, el actuador es el foco, la variable a ser manipulada es la energía eléctrica y también el interruptor, y la variable retroalimentada y controlada es a su vez la iluminación de la lámpara.

Uno de los motivos para el uso de un sistema de control es la manipulación para mantener una o varias variables, dentro de un valor o un rango de valores previamente definido.

##### **6.1.1. TIPOS DE SISTEMAS DE CONTROL.**

Dependiendo como lo vemos los sistemas de control se pueden clasificar de varias maneras, según el análisis se los puede determinar por lineales y no lineales, por el tiempo como variables y no variables, según la señal con la que se trabaje como continuos o discretos, modulados y no modulados, y de lazo abierto o lazo cerrado.

##### **6.1.2. SISTEMAS DE CONTROL LINEALES Y NO LINEALES.**

Todos los sistemas en algún grado siempre serán no lineales por lo que los sistemas lineales no existen pero se les utilizan la suposición de la linealidad en el sistema en la utilización para obtener modelos ideales y a su vez facilitar el diseño de los sistemas de control.

### **6.1.3. SISTEMAS VARIANTES E INVARIANTES CON EL TIEMPO.**

Al hablar de un sistema de control variante se refiere a la mayoría de sistemas, pues los parámetros cambian durante el tiempo de funcionamiento. Los sistemas invariantes se los utiliza solo en circunstancias para diseño en condiciones totalmente óptimas.

### **6.1.4. SISTEMAS DE CONTROL EN TIEMPO CONTINUO.**

Al hablar de este sistema se refiere cuando el mismo depende de la variable del tiempo "t" en varias partes del mismo.

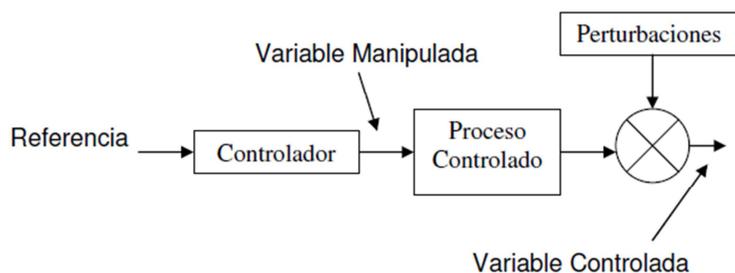
### **6.1.5. SISTEMAS DE CONTROL EN TIEMPO DISCRETO.**

A diferencia del sistema en tiempo continuo, en este la señal se da en forma de pulsos o recopilado digitalmente en algún o algunos puntos del sistema.

A este sistema a su vez se lo divide en sistema de control de datos muestreados y sistema de control digital, en el primero nos referimos donde la señal se da en forma de pulsos digitales, mientras que en el sistema de control digital, hablamos de la utilización de un controlador digital, como un microcontrolador, una computadora y en nuestro caso la utilización de un OPLC.

### **6.1.6. SISTEMAS DE LAZO ABIERTO.**

La principal característica de este sistema es que no presenta una señal de retroalimentación, la variable controlada no es retroalimentada para su comparación con la variable de entrada, por esto no se comprueba el error en el sistema de control.



**Figura 6.1. Sistema de Control Lazo Abierto.**<sup>14</sup>

Para que este tipo de control sea estable se depende mucho de la confianza sobre los elementos del proceso, de que las señales externas y que puedan perturbar al sistema no tenga una influencia desestabilizante considerable. Este sistema se utiliza cuando la exactitud no es primordial en el proceso.

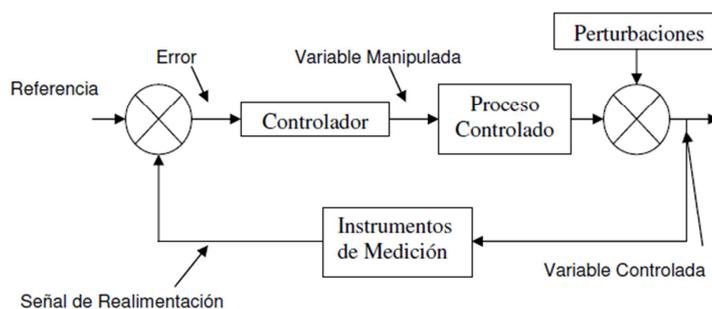
#### **6.1.7. SISTEMAS DE LAZO CERRADO.**

Su característica es que la variable de salida o controlada es retroalimentada a la entrada del sistema, con lo que se compara continuamente el error existente entre el valor de referencia o SETPOINT y la variable controlada.

Este sistema permite realizar diferentes acciones para corregir el error de forma rápida durante el proceso, con esto se obtiene un sistema que responde rápidamente a cambios durante el proceso.

---

<sup>14</sup> (USAC, 1999).



**Figura 6.2. Sistema de Control Lazo Cerrado.**<sup>15</sup>

### 6.1.8. SISTEMAS DE CONTROL DIGITAL.

Un sistema de control digital forma parte de un controlador digital donde tenemos programado el control total del proceso. Para unir la parte digital con la parte física se necesita de la intervención del convertidor digital/análogo D/A y el convertidor análogo/digital A/D.

El convertidor digital/análogo es el encargado de convertir el valor de la acción calculado o corregido dentro del programa en una señal física que va actuar sobre el proceso.

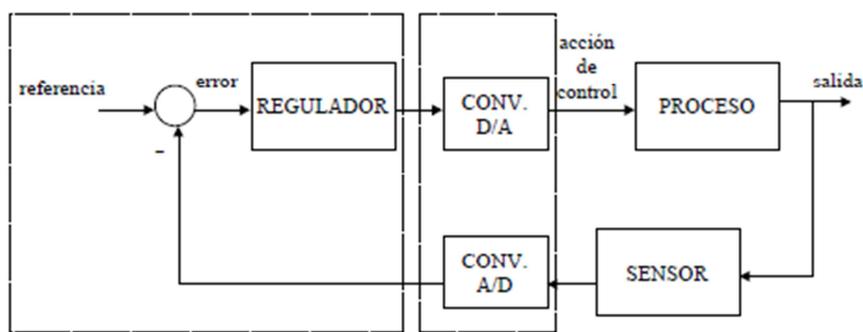
El convertidor análogo/digital se encarga de convertir la señal física proporcionada por el sensor en un número o dato manipulable dentro del programa.

Pasos para la construcción de un controlador digital:

- Leer la variable de salida mediante el sensor, en un tiempo “t” que es el tiempo de muestreo, pasar por el convertidor análogo/digital. Elección del tiempo de muestreo.

<sup>15</sup> (USAC, 1999)

- Calcular el error  $e(k)$  entre la retroalimentación y la señal de entrada.
- Procesar la entrada digital y el error en el controlador digital.
- Obtener mediante el convertidor digital/análogo la señal procesada a los actuador.
- Volver a leer la variable y así se forma un lazo cerrado en un control digital.



**Figura 6.3. Sistema de Control Digital.**<sup>16</sup>

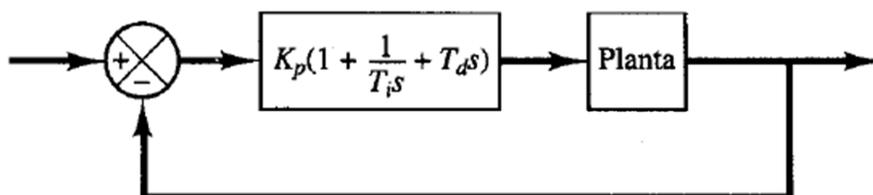
## 6.2. PID (PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO).

Es un proceso controlado por un sistema de compensación (retroalimentación) en lazo cerrado, que está dado por un regulador de acciones proporcionales, integrales y derivativas, de esta forma se logran características estables en el proceso, esto quiere decir que responda a cambios en las variables y lo haga de forma estable.

Este control se realiza en tiempo continuo eso quiere decir que el controlador no deja de recibir información en ningún punto del proceso.

<sup>16</sup> (USAC, 1999)

El controlador PID puede presentar la ausencia de una de las acciones de control por ello tenemos el controlador PI, PD, P o I. El controlador PI (proporcional integral) es uno de los más utilizados ya que la acción derivativa es muy sensible a las perturbaciones y la acción integral tiene gran influencia sobre la acción de control.



**Figura 6.4. Lazo PID.**<sup>17</sup>

El correcto funcionamiento del PID en la regulación de un proceso se necesita como cosas fundamentales, un sensor que determine la señal del sistema, un controlador que capte procese y envíe la señal, un actuador que modifique al sistema de manera controlada.

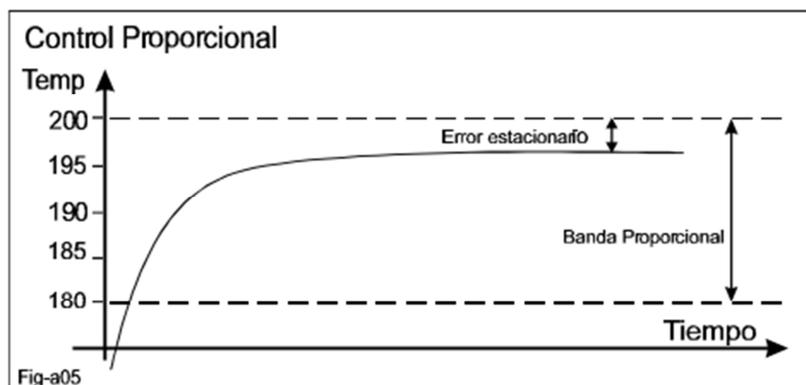
### 6.2.1. PROPORCIONAL.

Consiste en el producto entre la señal de error retroalimentada y la constante proporcional, esto con el fin de hacer el error en estado estacionario casi nulo, este valor solo será óptimo en un determinado tiempo del control.

La constante proporcional tiene un valor límite en el sistema cuando este se sobrepasa se produce una sobre oscilación, esta constante no considera el tiempo, por lo que se le complementa con una de las otras acciones integral y derivativa.

---

<sup>17</sup> (Ogata, 2009)



**Figura 6.5. Valor Proporcional.<sup>18</sup>**

Está dado por la relación entre la salida del controlador y la señal de error es:

La acción de control es proporcional a la señal de error, por la que la función de transferencia es una constante:

—

Donde se denomina la ganancia proporcional.

### 6.2.2. INTEGRAL.

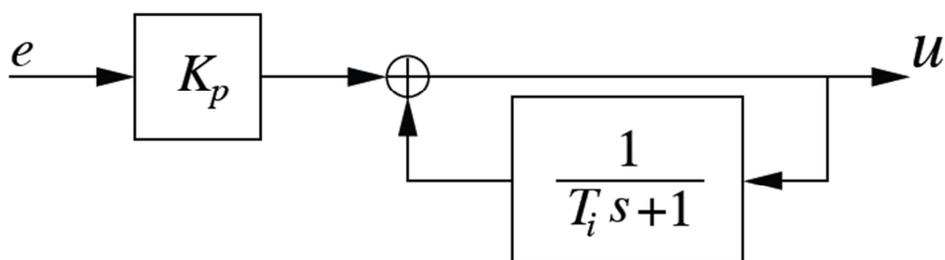
Este tiene como propósito disminuir y eliminar el error en estado estacionario, que es provocado por la constante proporcional, este actúa cuando hay una desviación entre la variable y el set point.

<sup>18</sup> (Industrial, 1999)

Este tiene la función de promediarlo o sumarlo por un periodo determinado de tiempo, este es adicionado a la constante proporcional forman el control PI obteniendo una respuesta estable sin error estacionario.

La ganancia total del lazo de control debe ser menor a 1, esto por el hecho de conducir una estabilidad del mismo.

Este se utiliza para obviar los inconvenientes con el offset que es la desviacion permanente de la variable controlada con respecto al set point.



**Figura 6.6. Controlador Proporcional Integral.**<sup>19</sup>

La acción correctora se efectúa mediante la integral del error:

La función de transferencia corresponde a:

— —

---

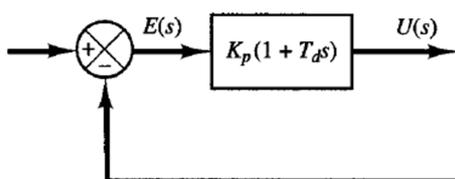
<sup>19</sup> (Visioli, 2010)

### 6.2.3. DERIVATIVO.

Este se manifiesta cuando hay un cambio de valor total en el error, cuando el error es constante solo se aplican o actúan las constantes proporcional e integral.

Lo que realiza la constante derivativa es mantener al mínimo el error corrigiéndolo a la velocidad con que se produce así evita que el error se incremente.

Esta se suma a la señal PI, después de derivarla respecto al tiempo y multiplicarla por una constante formando el PID. Hay que adapta la capacidad del controlador para que responda en una forma adecuada en el tiempo ya que a una mayor derivativa corresponde un cambio más rápido.



**Figura 6.7. Valor Derivativo.**<sup>20</sup>

El control derivativo genera una señal de control proporcional a la derivada del error:

—

Hay inestabilidad en el proceso cuando el tiempo de acción derivada es grande y cuando esta es muy pequeña oscila demasiado con relación al set point.

<sup>20</sup> (Ogata, 2009)

La parte derivativa del PID es poco utilizada por la sensibilidad al ruido y a las complicaciones que este conlleva.

El tiempo de acción óptimo derivativo es el que toma en retornar la variable al set point con las mismas oscilaciones.

### 6.3. FUNCIÓN TRANSFERENCIA.

Es un modelo matemático que correlaciona a través de un cociente, la respuesta de un sistema modelado a una señal de entrada.

Además constituye el modelo matemático del sistema, de tal forma que expresa la ecuación diferencial que relaciona la variable de salida con la variable de entrada.

Se la representa de la siguiente forma:

$$h(s) = \frac{y(s)}{u(s)} \quad [6.6]$$

Dónde:

$h(s)$ = es la función de transferencia.

$y(s)$ = corresponde a la transformada de Laplace de la señal de salida del sistema.

$u(s)$ = corresponde a la transformada de Laplace de la señal de entrada del sistema.

Además de que la función de transferencia relaciona la salida respecto de la entrada, también proporciona información sobre el comportamiento físico del sistema.

Para obtener la función de transferencia del horno de activación de resina se realizó diferentes pruebas con las termocuplas a una frecuencia constante en uno de los variadores con lo que se obtuvo los siguientes datos:

**Tabla 6.1. Datos Temperatura vs Tiempo.**

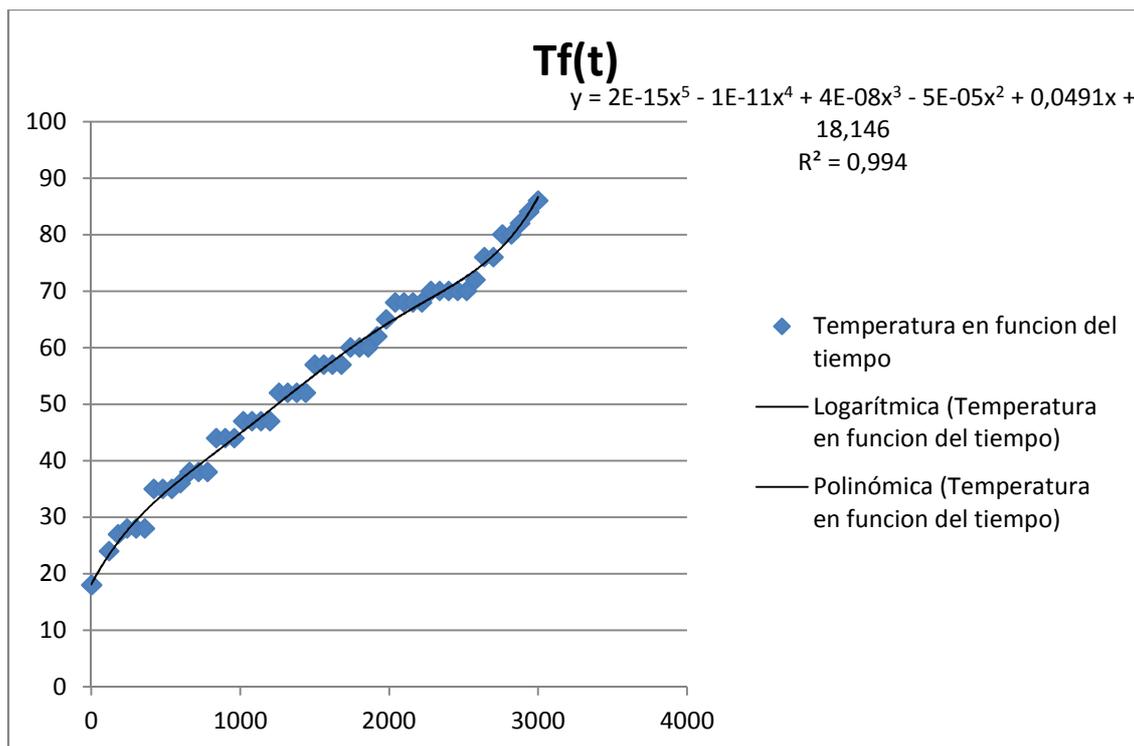
Tiempo (s)	Temperatura ( °C)
0	18
5	18
120	24
180	27
240	28
300	28
360	28
420	35
480	35
540	35
600	36
660	38
720	38
780	38
840	44
900	44
960	44
1020	47
1080	47
1140	47
1200	47
1260	52
1320	52
1380	52
1440	52
1500	57
1560	57
1620	57
1680	57
1740	60
1800	60

Fuente: Propia.

**Tabla 6.1. Datos Temperatura vs Tiempo (Continuación).**

Tiempo (s)	Temperatura ( °C)
1860	60
1920	62
1980	65
2040	68
2100	68
2160	68
2220	68
2280	70
2340	70
2400	70
2460	70
2520	70
2580	72
2640	76
2700	76
2760	80
2820	80
2880	82
2940	84
3000	86

Fuente: Propia.



**Figura 6.8. Curva Temperatura en función del tiempo.**

### 6.3.1. OBTENCIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA.

Para obtener la función de transferencia vamos a utilizar como herramienta el software MATLAB donde encontramos las funciones IDDATA e IDENT las mismas que se explican en los ANEXOS G, H respectivamente, a partir de datos obtenidos del comportamiento del sistema.

La función de transferencia obtenida es:

$$P1D = \frac{2.5341 \exp^{-6.1942 s}}{3226.2s + 1}$$

La función de transferencia muestra un retardo de la forma  $\exp(-T_d*s)$ , la función PADE explicada en el ANEXO I nos ayuda a obtener una aproximación de la función de transferencia en la forma —.

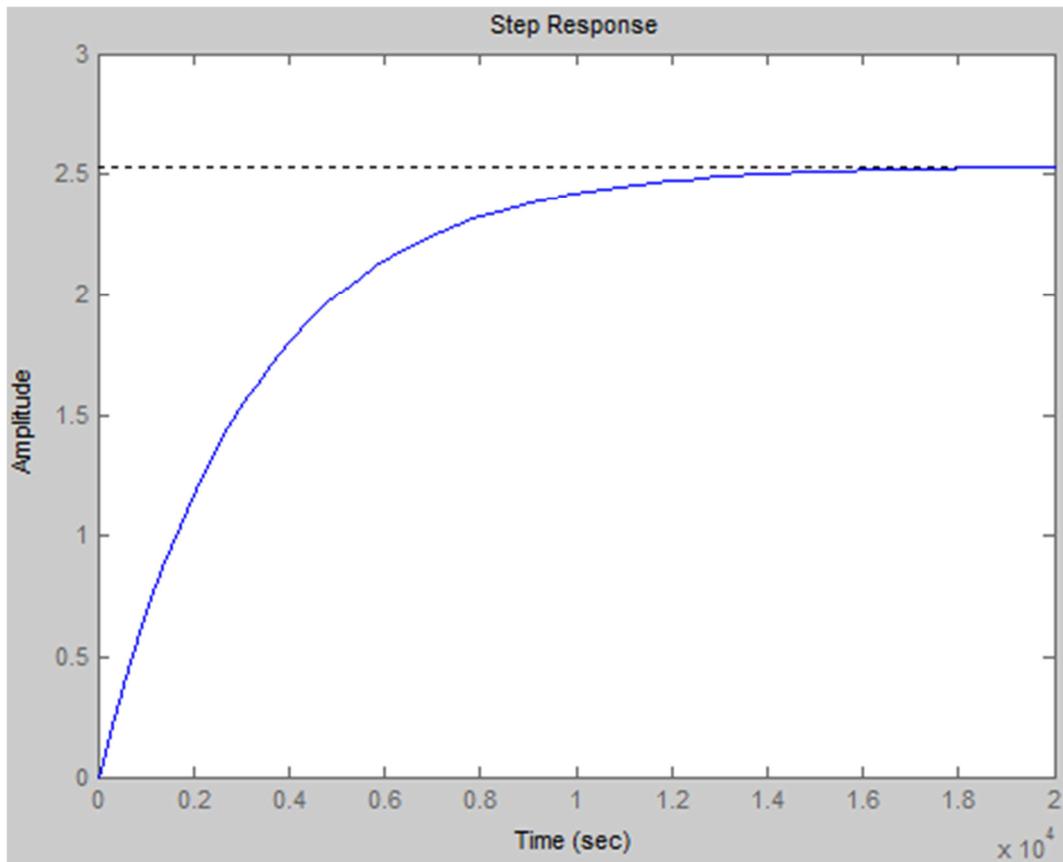
La función de transferencia obtenida es:

---

Al aplicar un Step (H), en la ventana de comandos de MATLAB se obtiene:

```
Transfer function:
      -2.534 s + 0.8182
-----
3226 s^2 + 1043 s + 0.3229
fx >> Step(H) |
```

**Figura 6.9. Comando Step (H).**



**Figura 6.10. Respuesta al escalón de la Función de Transferencia Total.**

#### **6.4. CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE UN CONTROLADOR**

La utilización de un controlador en serie con la planta nos permite una modificación constante de la función de transferencia en lazo abierto, de esta manera podemos mejorar significativamente el comportamiento en lazo cerrado.

En estado estacionario para mejorar la capacidad de seguimiento tenemos un controlador PI (proporcional integral), este formula un comportamiento transitorio satisfactorio.

Si se quiere reducir notablemente el tiempo de respuesta mientras se mantiene un grado satisfactorio de estabilidad relativa se puede utilizar un controlador PD (proporcional derivativo).

Para combinar las características de PI y PD se utiliza un controlador PID este es a menudo efectivo cuando el controlador PI es suficiente para producir el comportamiento deseado en modo estacionario pero se busca una mejora adicional de la respuesta transitoria, teniendo en cuenta que la parte derivativa es muy propensa al ruido.

#### **6.4.1. SINTONIZACION DE CONTROLADORES.**

La sintonización de los controladores Proporcional - Integral - Derivativo, consiste en la determinación del ajuste de sus parámetros ( $K_c$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ ), para lograr un comportamiento del sistema de control aceptable y robusto de conformidad con algún criterio de desempeño establecido.

Para poder realizar la sintonización de los controladores, primero se identifica la dinámica del proceso, y a partir de esta determinar los parámetros del controlador utilizando el método de sintonización seleccionado.

#### **6.4.2. REGLAS DE SINTONIZACIÓN.**

El proceso de seleccionar los parámetros del controlador cumple con especificaciones de desempeño.

La sintonización basada en Ziegler Nichols, trabaja con reglas para sintonizar controladores, en base a las respuesta escalón experimentales o basadas en el valor de  $K_p$  que produce en la estabilidad marginal, esto cuando se usa solo la acción proporcional del sistema, estas reglas de sintonización son recomendables cuando no se conocen los modelos matemáticos de las plantas a controlar.

Para determinar los valores de la ganancia proporcional  $K_p$ , del tiempo integral  $T_i$ , del tiempo derivativo  $T_d$ , en base a la respuesta transitoria de una planta específica.

Existen dos métodos denominados reglas de sintonización Ziegler Nichols.

#### 6.4.2.1. Primer Método Basado en la respuesta al Escalón.

Para poder aplicar este método es conveniente que la respuesta al escalón de la planta tenga una forma de S la cual está determinada por parámetros tales como:

- $L$  que corresponde a la constante de retardo y  $T$  que es la constante de tiempo.

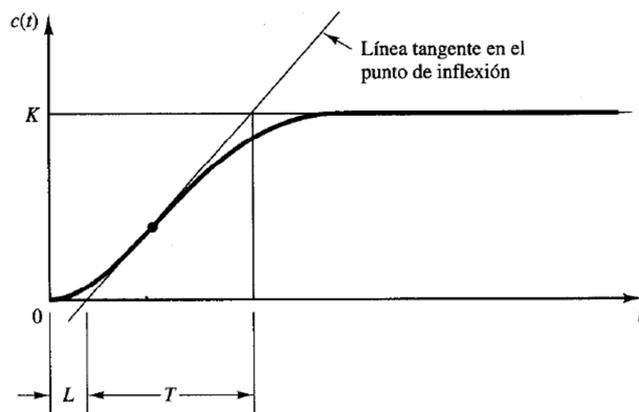


Figura 6.11. Primer Método Ziegler Nichols.<sup>21</sup>

#### 6.4.2.2. Segundo Método Basado en Oscilaciones Sostenidas.

<sup>21</sup> (Ogata, 2009)

Para poder aplicar este método, se establece valores de  $T_i$  infinito y de  $T_d=0$ , en donde se incrementa la acción proporcional  $K_p$ , desde 0 hasta un valor crítico  $K_c$ , donde se exhiben oscilaciones sostenidas.

En caso que no se logre obtener oscilaciones sostenidas para cualquier valor que pueda tomar  $K_p$  este método no se aplica.

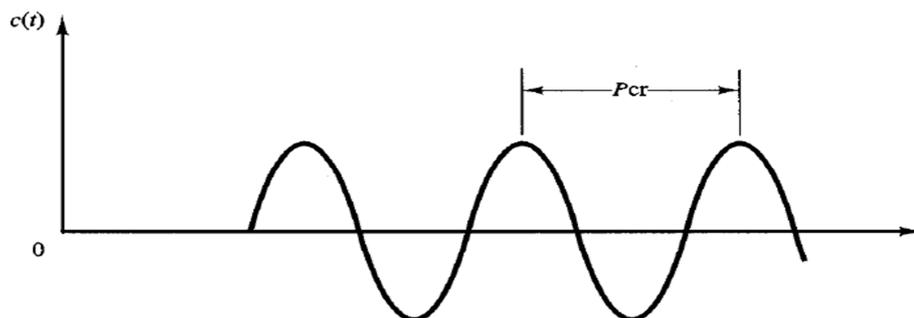


Figura 6.12. Segundo Método Ziegler Nichols<sup>22</sup>.

#### 6.4.3. APLICACIÓN DE LA SINTONIZACIÓN ZIEGLER NICHOLS, BASADA EN LA RESPUESTA AL ESCALÓN.

A partir de la función de transferencia obtenida:

---

Se puede obtener las constantes de retardo y de tiempo establecido, según el modelo de respuesta al escalón se presenta de la siguiente manera:

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts + 1}$$

[6.7]

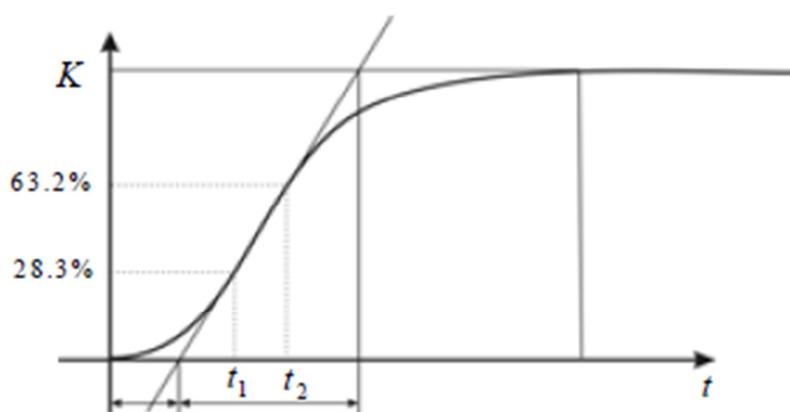
---

<sup>22</sup> (Ogata, 2009)

**Figura 6.13. Método de Sintonización Ziegler Nichols<sup>23</sup>.**

Por lo tanto la función de transferencia obtenida se caracteriza por un retardo y corresponde a P1D, convenientemente el Primer método de Ziegler Nichols se va a utilizar.

Al referirnos a la **figura 6.10**, la respuesta al escalón proporciona el comportamiento de la planta y existe en un punto de inflexión en la curva para que pueda adoptar la forma de S con la cual se traza una recta tangente, la misma determina L, que corresponde a la constante de retardo y T que es la constante de tiempo, de la siguiente forma.



**Figura 6.14. Recta Tangente al punto de Inflexión<sup>24</sup>.**

#### **6.4.4. SINTONIZACIÓN MÉTODO CONSTANTE DE RETARDO, PARA LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA OBTENIDA.**

El primer método de Ziegler Nichols es un método gráfico, basado en la respuesta del sistema, Se procederá a calcular en base a la función de transferencia las constantes citadas en un M file del software MATLAB.

<sup>23</sup> (Ogata, 2009)

<sup>24</sup> (Sáez, 2002)

## % SINTONIZACIÓN ZIEGLER NICHOLS PRIMER MÉTODO

H=tf([-2.534 0.8182],[3226 1043 0.3229]); % Función de transferencia total

pp=pole(H); % Polos Función de transferencia

dt=0.05; % Diferencial de tiempo

t=0:dt:60; % Rango de tiempo

y=step(H,t); % Respuesta al Escalón

dy=diff(y)/dt; %derivada de la función

[m,p]=max(dy); %punto de inflexión

d2y=diff(dy)/dt; % segunda derivada

yi=y(p);

ti=t(p);

L=ti-yi/m; % Retardo

Tau=(y(end)-yi)/m+ti-L;% Constante de tiempo

figure(1)

plot(t,y,'b',[0 L L+Tau t(end)],[0 0 y(end) y(end)],'k')

title('Respuesta al Escalon')

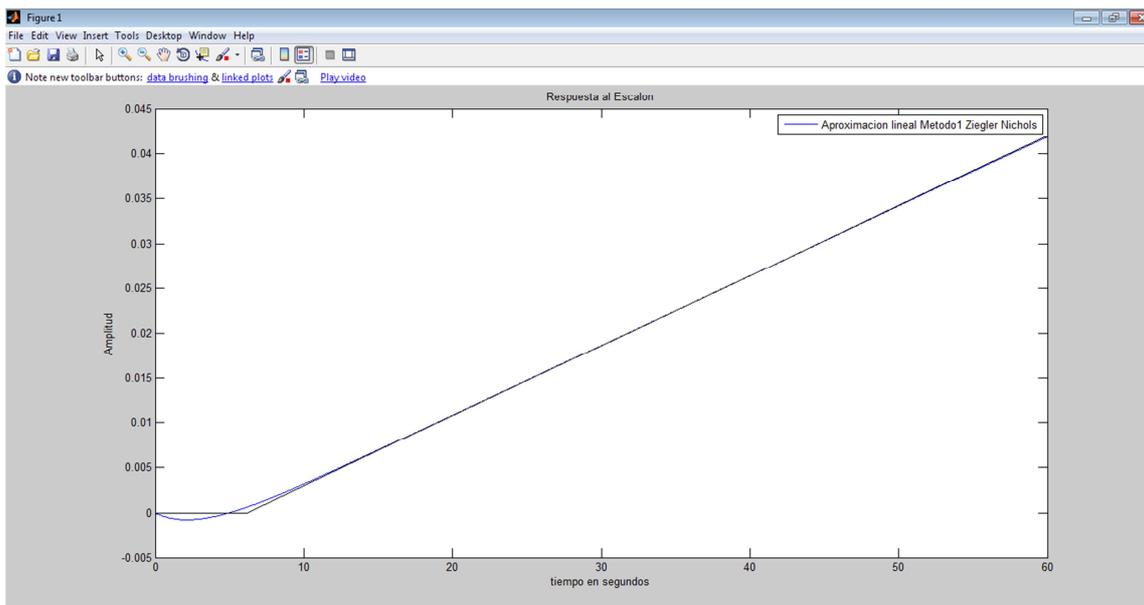
ylabel('Amplitud')

xlabel('tiempo en segundos')

legend('Aproximación lineal Metodo1 Ziegler Nichols')

El siguiente M file tiene por objeto calcular las constantes de retardo y de tiempo para lo cual se detalla el siguiente procedimiento:

- Ingreso de la función de transferencia.
- Establecer un diferencial de tiempo.
- Establecer el rango de tiempo.
- Almacenar en una variable la respuesta al escalón.
- Derivar la variable almacenada con el escalón.
- Obtener el punto de inflexión.
- Calcular el retardo y la constante de tiempo.
- Graficar la recta tangente y la respuesta al escalón.
- Obtener las constantes requeridas en este caso  $L$ =retardo y  $\tau$ =Constante de tiempo.



**Figura 6.15. Calculo de retardo y constante de tiempo.**

Al ejecutar el archivo las constantes obtenidas son;

$L = 6.1257$ .

$\tau = 53.7024$ .

```
>> L
L =
    6.1257
>> Tau
Tau =
    53.7024
fx >>
```

**Figura 6.16. Constantes L y Tau.**

Una vez obtenidos los valores el controlador se basa en la siguiente figura 6.16:

Tipo de controlador	$K_p$	Ti	$T_d$
P	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

**Figura 6.17. Regla sintonización Ziegler Nichols Primer método<sup>25</sup>.**

**Tabla 6.2. Valores Obtenidos Ziegler Nichols.**

Controlador	Kp	Ti	Td
P	8.77	Inf	0.00
PI	7.89	20.42	0.00
PID	10.52	12.25	3.06

Fuente: Propia.

#### 6.4.5. APLICACIÓN DE LA SINTONIZACIÓN ZIEGLER NICHOLS, BASADA OSCILACIONES OBTENIDAS.

En segundo método consiste en obtener valores tales como el tiempo integral Ti, tienda al infinito, y el valor del tiempo derivativo Td, sea cero. Al incrementar el valor proporcional Kc desde cero hasta un valor crítico Kcr y un periodo de oscilación crítico, en donde las oscilaciones presentadas por la respuesta del controlador sean sostenidas.

A partir de la función de transferencia obtenida:

<sup>25</sup> (Ogata, 2009)

El controlador tiene la siguiente forma:

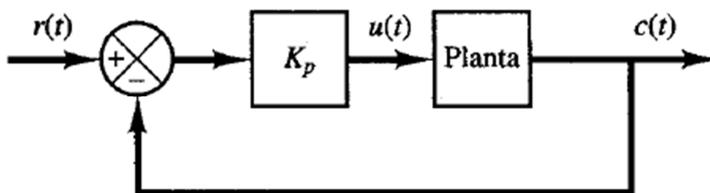


Figura 6.18. Diagrama de Bloques con el Valor Proporcional<sup>26</sup>

#### 6.4.6. SINTONIZACIÓN MÉTODO CONSTANTE DE RETARDO, PARA LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA OBTENIDA.

El segundo método de Ziegler Nichols consiste en un método, en el cual se busca que el controlador presente como respuesta oscilaciones sostenidas, para lo cual se parte de un valor proporcional hasta llegar a su valor crítico y obtener las constantes requeridas para el mismo.

#### % SINTONIZACIÓN ZIEGLER NICHOLS SEGUNDO MÉTODO

```
H=tf([-2.534 0.8182],[3226 1043 0.3229]); % Función de transferencia total
```

```
% Valor de la constante proporcional
```

```
Kp=350;
```

```
G=tf([Kp],[1]) %Controlador
```

```
% Lazo Cerrado
```

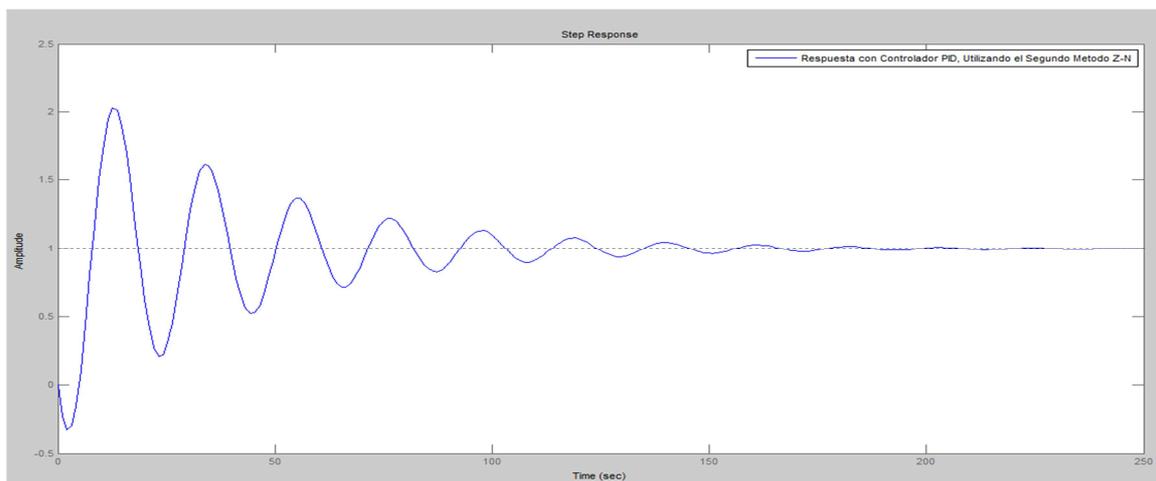
```
HLC=feedback(G*H,1);
```

<sup>26</sup> (Ogata, 2009)

```
figure(1)
```

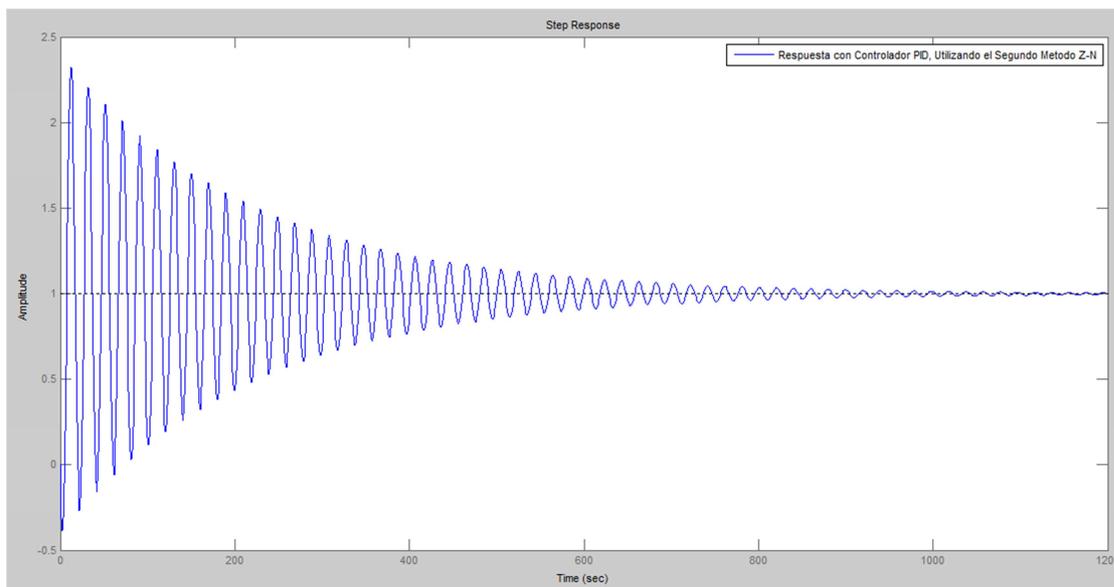
```
step(HLC)
```

```
legend('Respuesta con Controlador PID, Utilizando el Segundo Método Z-N')
```



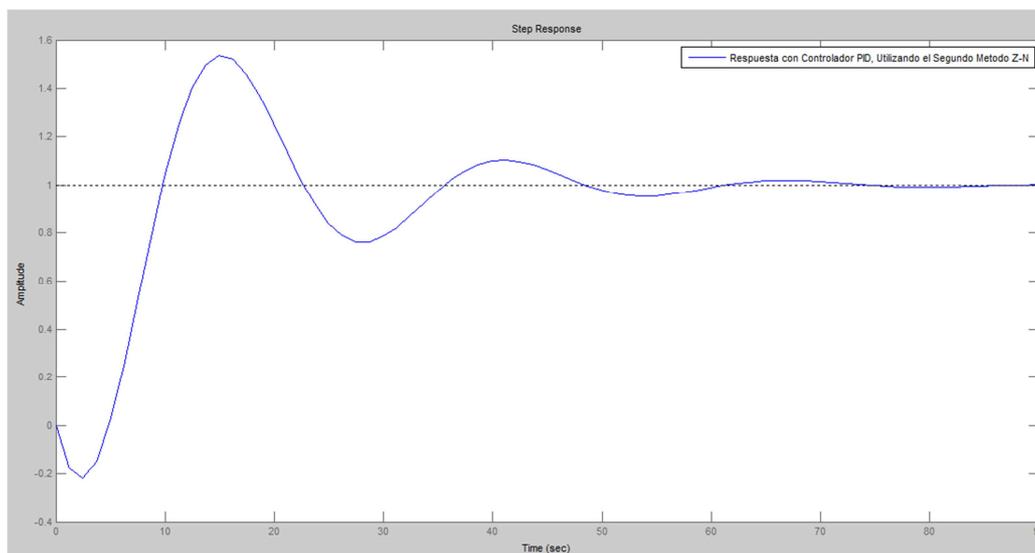
**Figura 6.19. Respuesta, Método Oscilaciones Sostenidas  $K_p=350$ .**

Se observa el comportamiento perturbado del controlador, lo cual muestra la acción proporcional del mismo, al variar este valor el comportamiento cambia, y este método consiste en buscar su valor crítico, al establecer un valor más alto de 400 en  $K_p$ , se obtiene la siguiente respuesta.



**Figura 6.20. Respuesta, Método Oscilaciones Sostenidas  $K_p=400$ .**

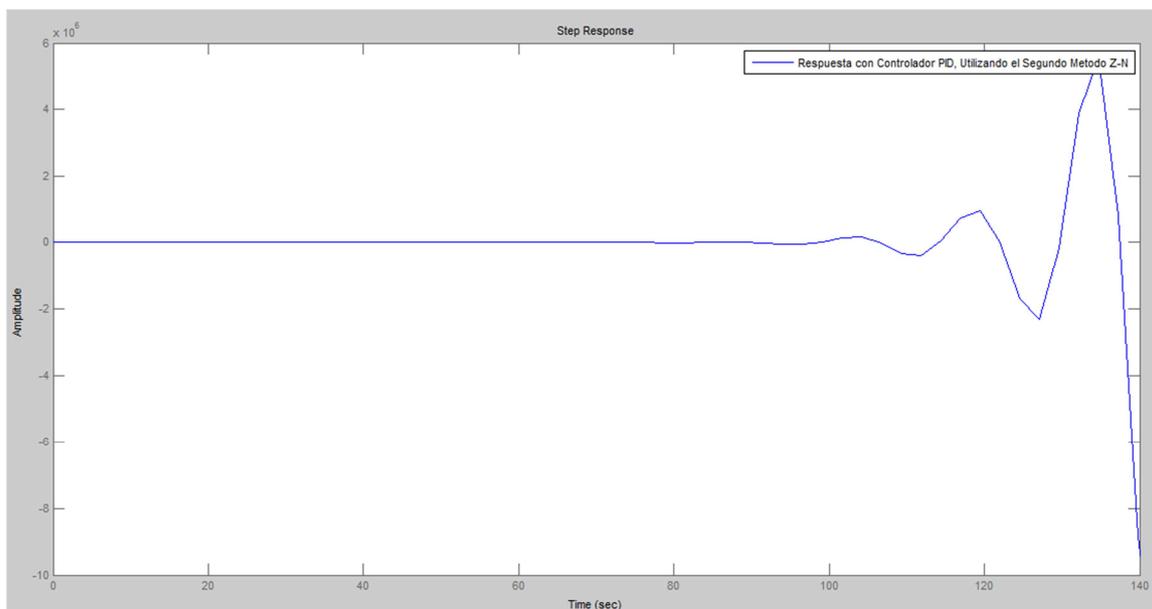
De la misma manera si se establece un valor de  $K_p$  por debajo del establecido es decir menor a 350, un valor de 250 en  $K_p$ , se obtiene el siguiente comportamiento.



**Figura 6.21. Respuesta, Método Oscilaciones Sostenidas  $K_p=250$ .**

Al observar el comportamiento con el valor establecido de 250 en  $K_p$ , el controlador no se logra obtener un valor crítico para el mismo.

El comportamiento del controlador para un valor 700 en  $K_p$ .



**Figura 6.22. Respuesta, Método Oscilaciones Sostenidas  $K_p=700$ .**

Por tal razón este método, no es aplicable para la sintonización del controlador dado que para distintos valor de  $K_p$  no presenta oscilaciones sostenidas.

El método a desarrollar es el basado en la constante de retardo.

#### **6.4.7. SINTONIZACIÓN PROPORCIONAL.**

Consiste en establecer el valor  $K_p$  obtenido para el tipo de controlador P, con el cual se va a observar el comportamiento.

Los parámetros obtenidos están sujetos a una refinación de sus valores lo que quiere, realizar ligeras modificaciones a los valores obtenidos con la finalidad de obtener un mejor resultado.

```
% Sintonización Controlador P
```

```
Kp_P= Tau/L; % Kp controlador P
```

```
Kp_P_R=4*Kp_P; % Kp_P valor proporcional Afinado
```

```
G3=tf([Kp_P_R],[0 1]) % Controlador
```

```
HLC3=feedback(G3*H,1); % Retroalimentación función de transferencia
```

```
G_P=tf([Kp_P],[0 1]);
```

```
HLCP=feedback(G_P*H,1); % Retroalimentación función de transferencia  
sintonizada
```

```
figure(5)
```

```
step(HLCP,HLC3)
```

```
legend('P','P Sintonizado')
```

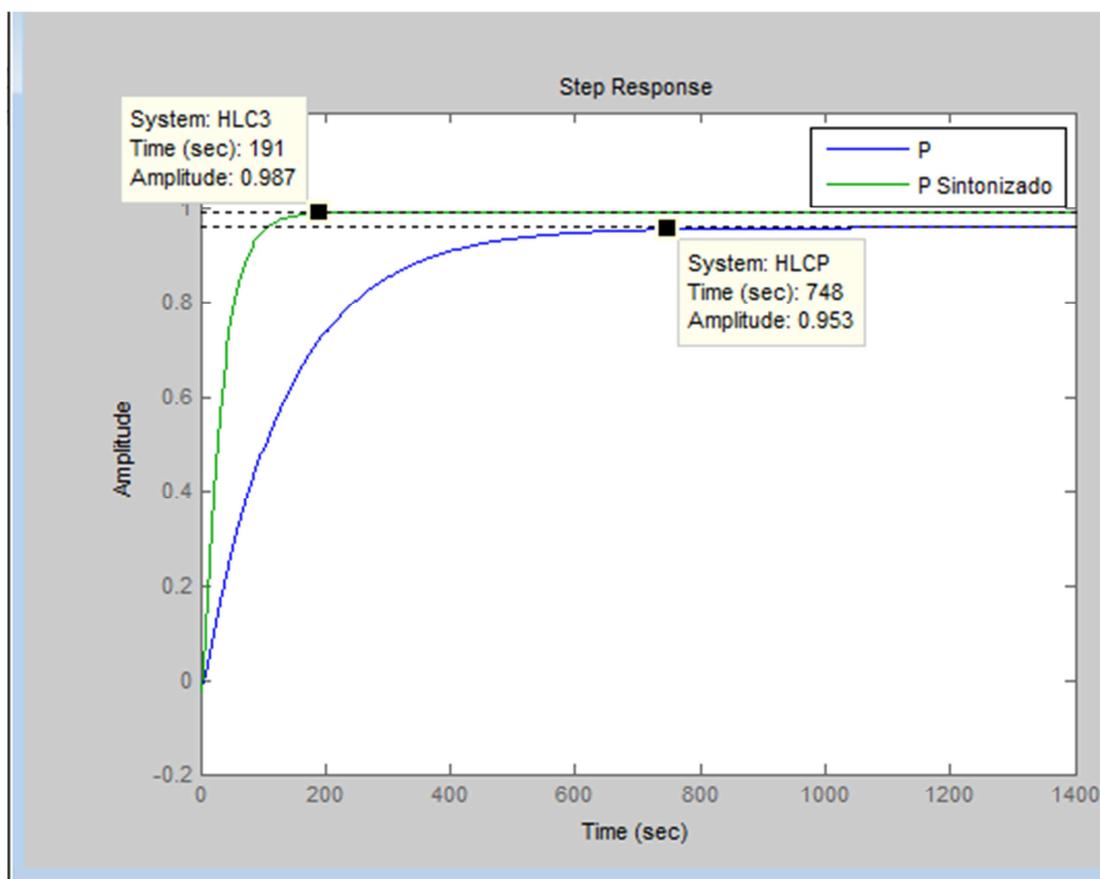


Figura 6.23. Controlador P.

El resultado de afinación del valor  $K_p$  resulta satisfactorio dado a que el tiempo de estabilidad es mucho menor y la amplitud alcanzada es muy cercana con un valor de 0.987.

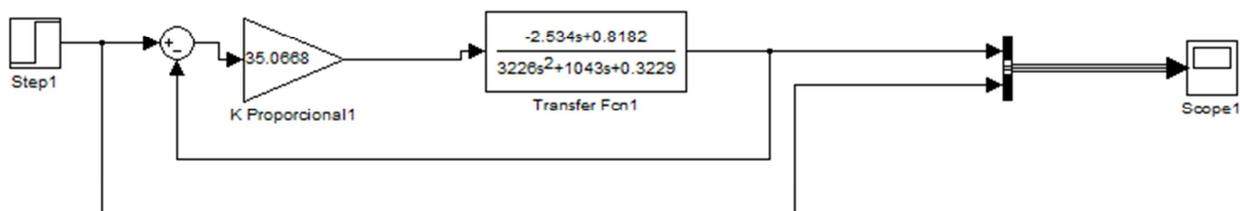
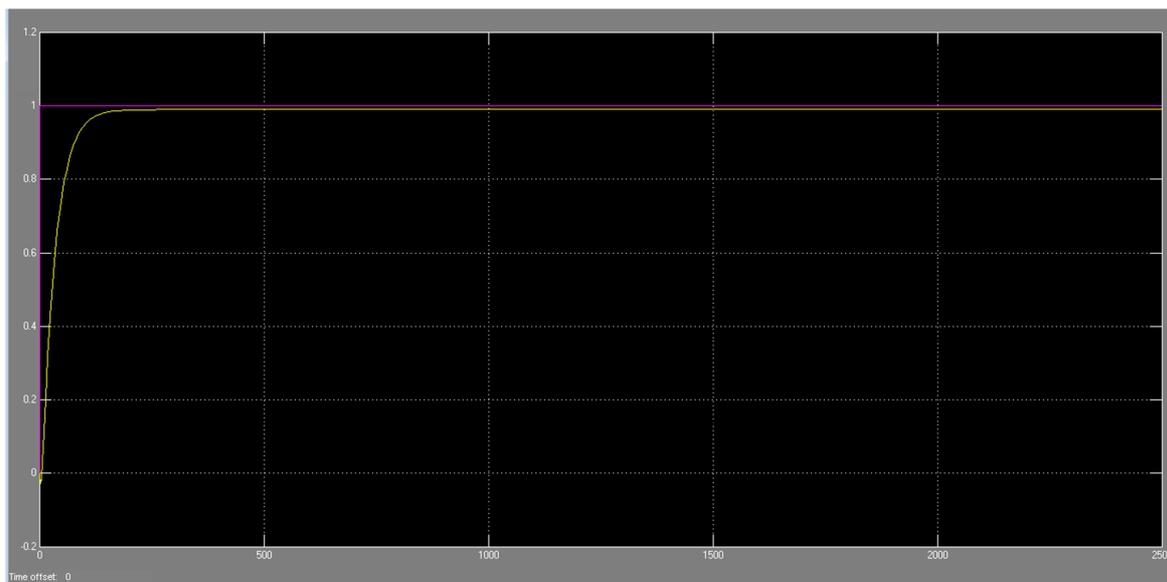


Figura 6.24. Diagrama de bloques control Proporcional de Simulink.



**Figura 6.25. Respuesta al control Proporcional.**

#### **6.4.8. SINTONIZACIÓN PROPORCIONAL INTEGRAL.**

Consiste en establecer Los valores de  $K_p$ ,  $T_i$  obtenidos para el tipo de controlador PI, con el cual se va a observar el comportamiento.

Los parámetros obtenidos están sujetos a una refinación de sus valores lo que quiere, realizar ligeras modificaciones a los valores obtenidos con la finalidad de obtener un mejor resultado.

##### **% Refinamiento Controlador PI**

$K_p_{PI} = 0.9 \cdot \tau / L$ ; % Valor  $K_p$  controlador PI

$T_i_{PI} = L / 0.3$ ; % Valor  $T_i$  controlador PI

$K_i_{PI} = K_p_{PI} / T_i_{PI}$ ; % Valor  $K_i$  controlador PI

$K_p_{PI\_R} = 1.5 \cdot K_p_{PI}$ ; % Valor proporcional afinado

$K_i_{PI\_R} = 0.6 \cdot K_i_{PI}$ ; % Valor integral afinado

```
G2=tf([Kp_PI_R Ki_PI_R],[1 0]) % Controlador
```

```
HLC2=feedback(G2*H,1); % Retroalimentación función de transferencia
```

```
G_PI=tf([Kp_PI Ki_PI],[1 0]);
```

```
HLCPI=feedback(G_PI*H,1); % Retroalimentación función de transferencia refinada
```

```
figure(4)
```

```
step(HLCPI,HLC2)
```

```
legend('PI','PI Sintonizado')
```

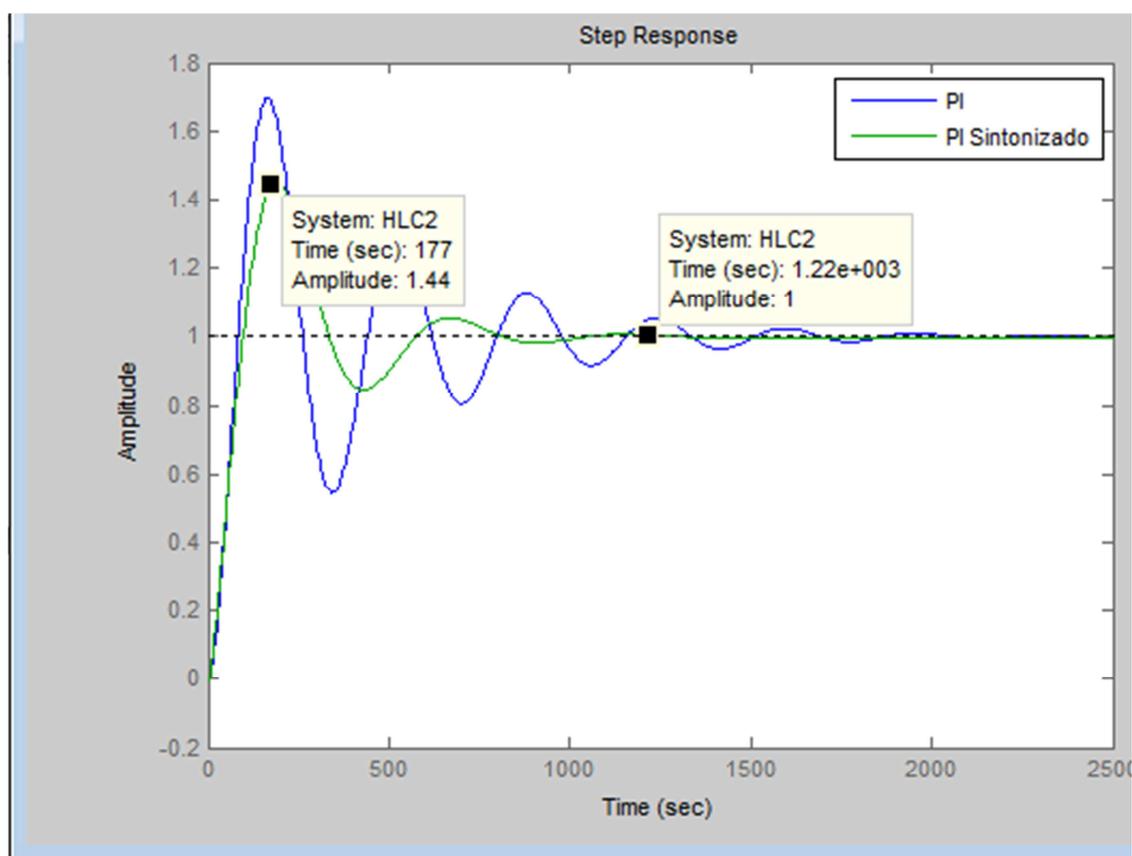


Figura 6.26. Controlador PI.

El resultado de afinación del valor  $K_p$  y el valor  $T_i$  resulta satisfactorio dado a la amplitud alcanzada con el valor corregido corresponde a 1.44 de amplitud, Cabe recalcar que el tiempo de estabilidad es muy lejano para este controlador consta alrededor de los 1220 segundos.

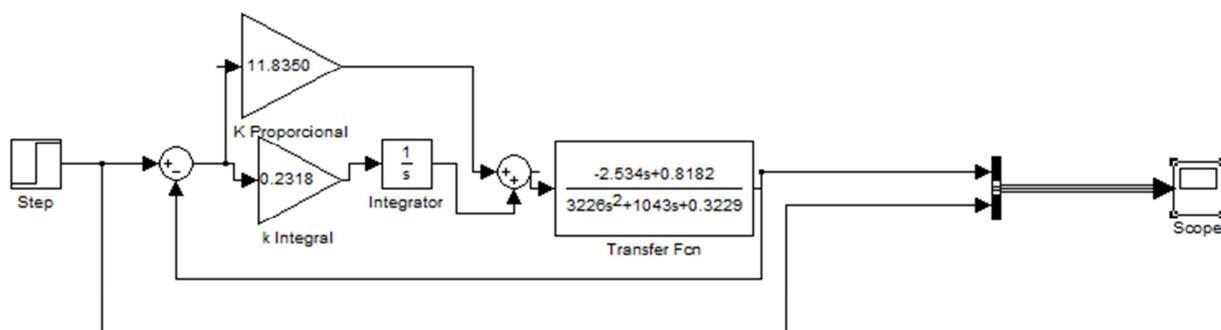


Figura 6.27. Diagrama de bloques control Proporcional-Integral de Simulink.

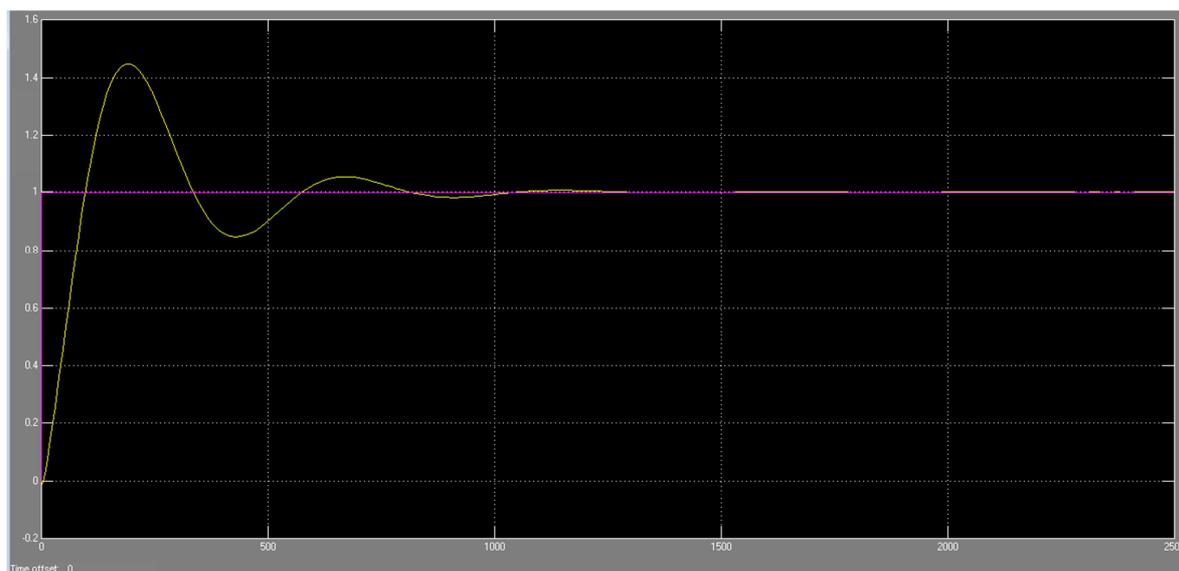


Figura 6.28. Respuesta al control Proporcional-Integral.

#### 6.4.9. SINTONIZACIÓN PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVA.

Consiste en establecer Los valores de  $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$  obtenidos para el tipo de controlador PID, con el cual se va a observar el comportamiento.

Los parámetros obtenidos están sujetos a una refinación de sus valores lo que quiere, realizar ligeras modificaciones a los valores obtenidos con la finalidad de obtener un mejor resultado.

**% Refinamiento Controlador PID**

$K_p=1.2 \cdot \text{Tau}/L;$

$T_i=2 \cdot L;$

$T_d=0.5 \cdot L;$

$K_i=K_p/T_i;$

$K_d=K_p \cdot T_d;$

$G=\text{tf}([K_d \ K_p \ K_i],[1 \ 0])$  %Controlador

$K_{p1}=3 \cdot K_p;$  % Valor afinado  $K_p$

$K_{d1}=2.1 \cdot K_d;$  % Valor afinado  $K_d$

$K_{i1}=0.8 \cdot K_i;$  % Valor afinado  $K_i$

$T_{i1}=K_{p1}/K_{i1};$

$T_{d1}=K_{d1}/K_{p1};$

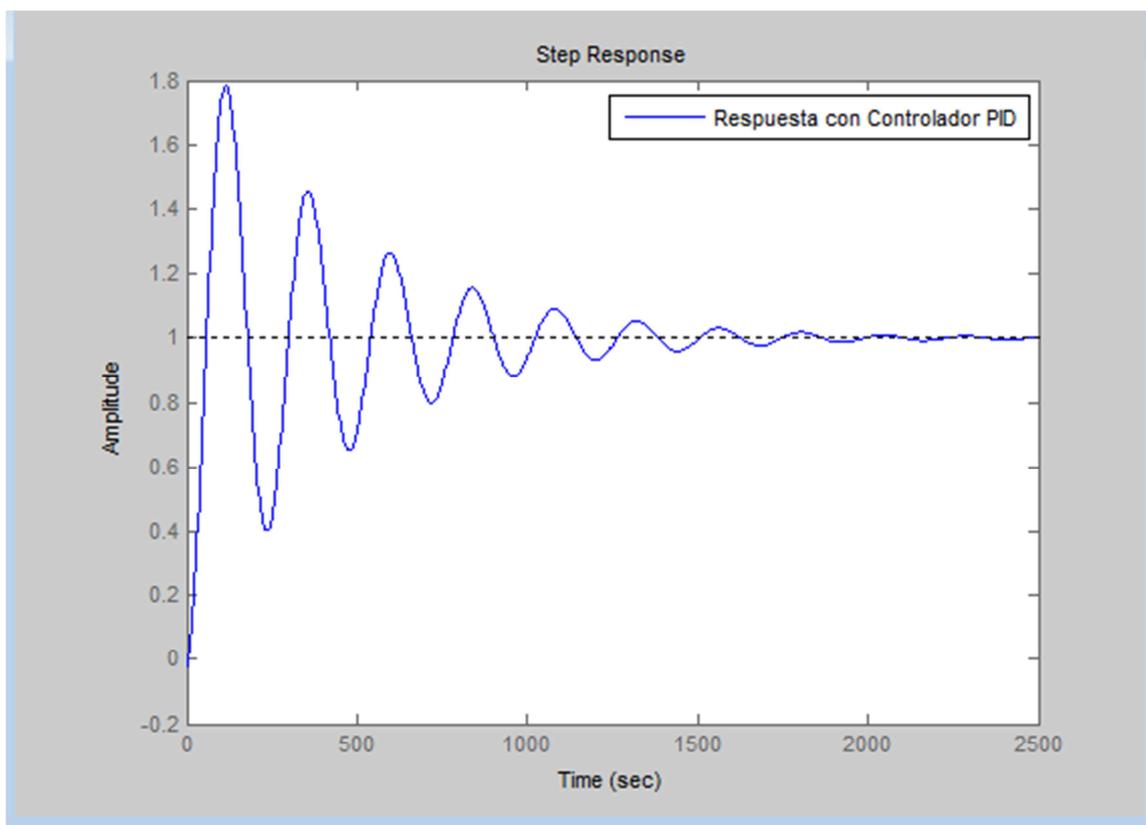
$G1=\text{tf}([K_{d1} \ K_{p1} \ K_{i1}],[1 \ 0])$  %Controlador

$\text{HLC1}=\text{feedback}(G1 \cdot H,1);$  % Retroalimentación función de transferencia

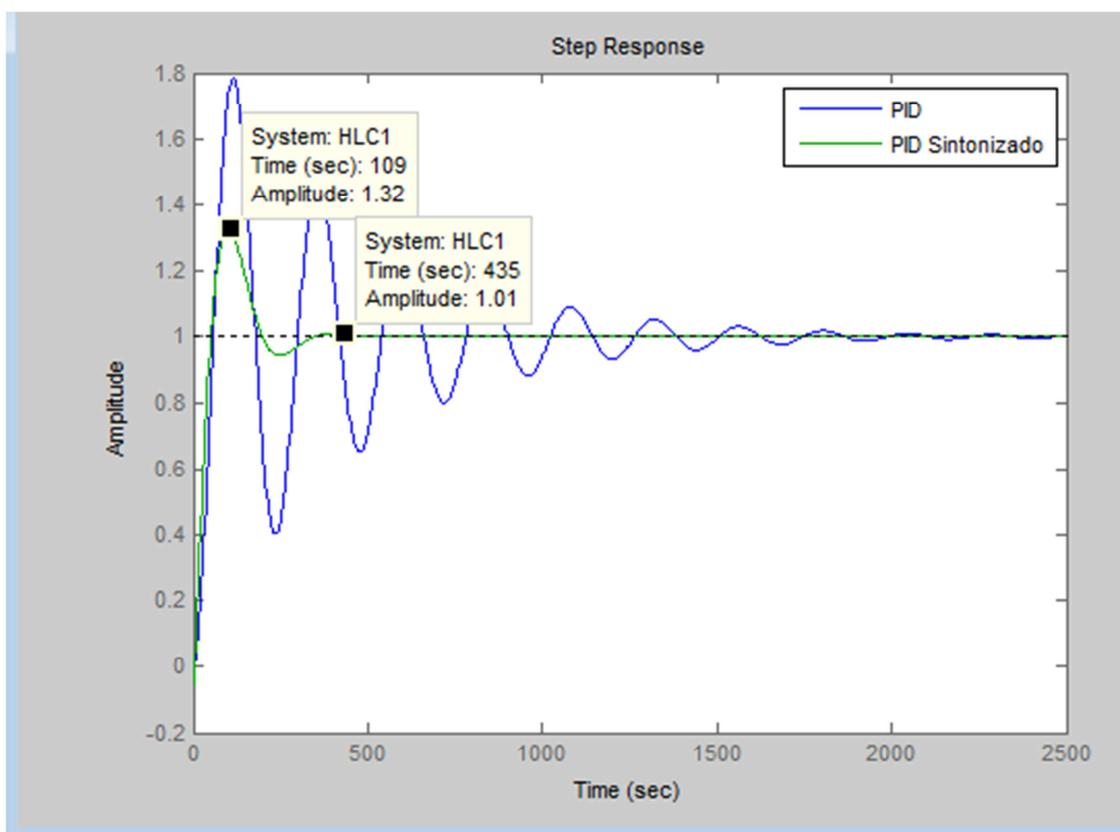
figure(3)

step(HLC,HLC1)

```
legend('PID','PID Sintonizado')
```



**Figura 6.29. Controlador PID.**



**Figura 6.30. Controlador PID Sintonizado.**

El resultado de afinación del valor  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$  resulta satisfactorio dado a la amplitud alcanzada con el valor corregido corresponde a 1.32 de amplitud, el tiempo de estabilización de este tipo de controlador está en 435 segundos con lo cual el controlador es óptimo.

Al utilizar la herramienta de simulación de MATLAB Simulink, se puede presentar el controlador en forma de suma de ganancia o a su vez en el bloque detallado PID de la herramienta Simulink.

Los valores de PID sintonizado son los siguientes:

Tabla 6.3. Valores Sintonizados PID.

<b>Kp1</b>	31.5601
<b>Ki1</b>	0.6869
<b>Kd1</b>	67.665

Fuente: Propia.

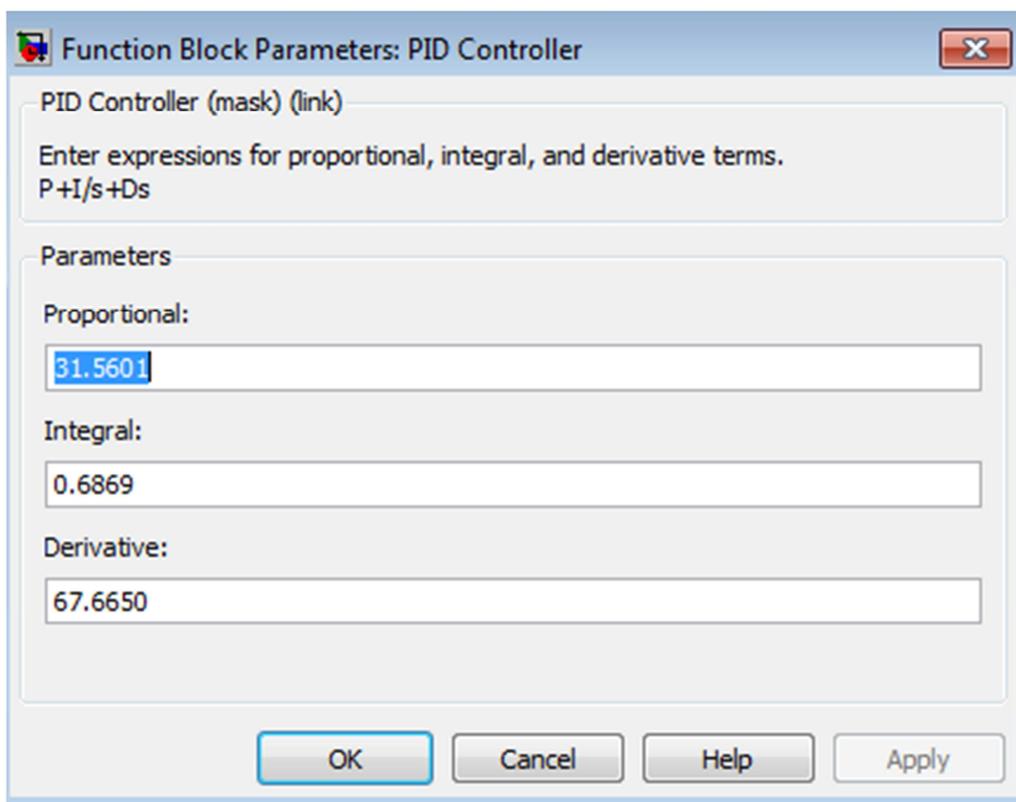


Figura 6.31. Controlador PID Sintonizado.

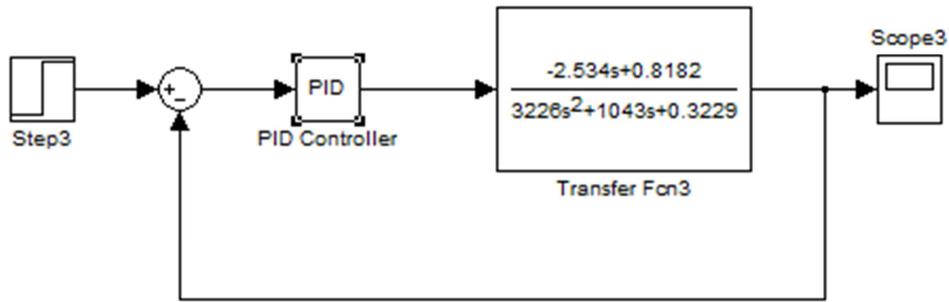


Figura 6.32. Diagrama de Bloques PID Simulink.

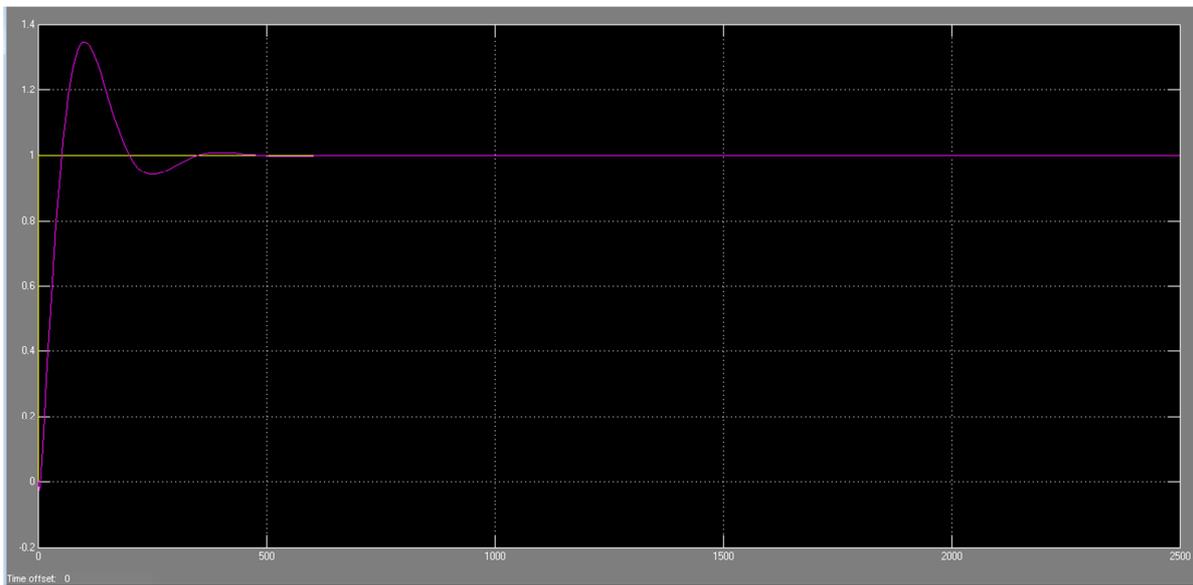


Figura 6.33. Respuesta PID.

## **CAPITULO VII**

### **7. VISILOGIC**

#### **7.1. INTRODUCCIÓN**

Es el software que se utiliza para crear proyectos para los controladores VISION, se utiliza para escribir, borrar, cargar y descargar el control del PLC como también las aplicaciones HMI en el controlador.

Las aplicaciones del PLC se escriben en un Ladder, y se utiliza el editor HMI para crear los displays que se muestran en la pantalla del controlador, este puede contener texto e imágenes fijas o variables.

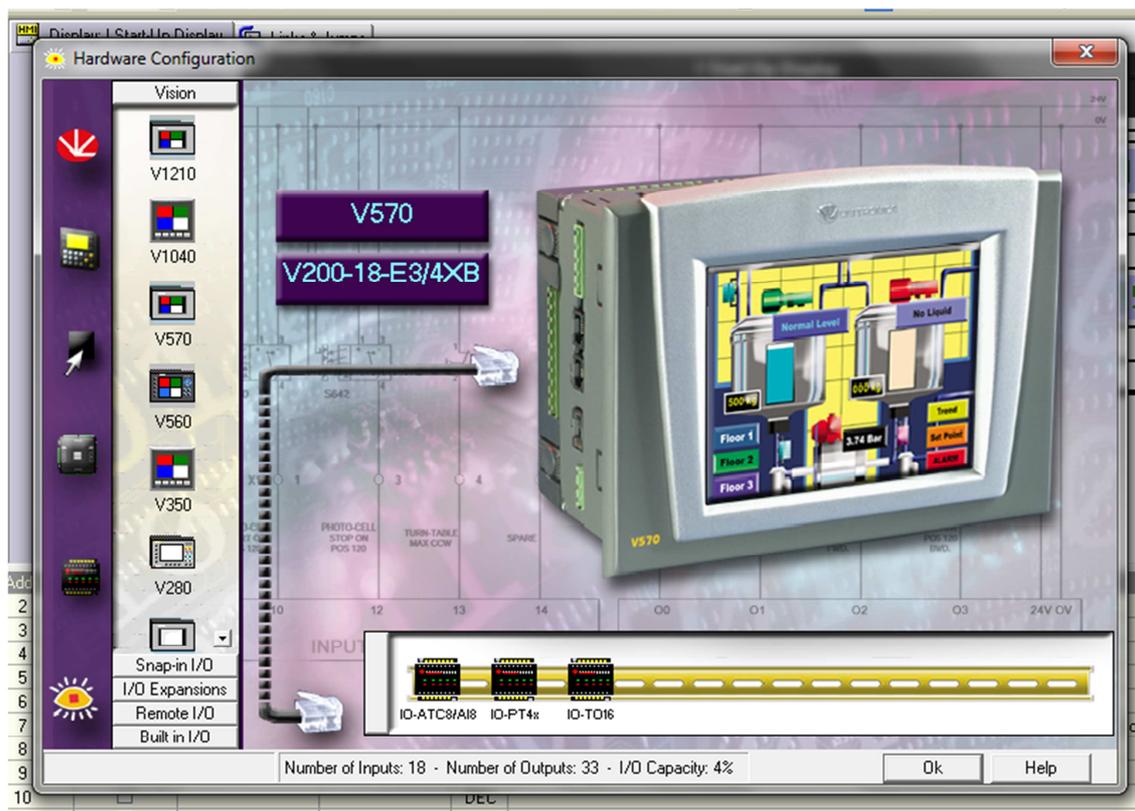
Las variables se ingresan en el display para, mostrar valores en tiempo real, representar texto e imágenes en tiempo real, mostrar mensajes de texto dinámico.

Para la creación de aplicaciones en Visilogic tenemos 2 editores:

- Ladder
- Display HMI

#### **7.1.1. CONFIGURACIÓN DEL HARDWARE.**

La configuración del hardware se realiza automáticamente al crear un proyecto, la misma que se explica en el ANEXO J, la configuración obtenida del OPLC con sus módulos es la siguiente:

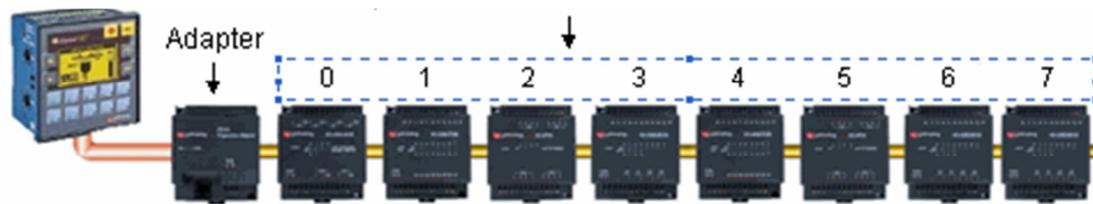


**Figura 7.1. OPLC V570.**

### **7.1.2. DIRECCIONAMIENTO DE MÓDULOS DE EXPANSIÓN.**

Las entradas tanto como las salidas de los módulos de expansión reciben direcciones asignadas con un número y una letra, la letra indica si es entrada o salida tenemos I/O hablamos de una entrada si es I o de una salida si es O, el número asignado consiste en la ubicación física de cada uno de los módulos lo cual involucra netamente su posición.

Los módulos de expansión son numerados del 0 al 7.



**Figura 7.2. Direccionamiento de Módulos<sup>27</sup>.**

La ubicación de cada una de las entradas y salidas dada por la siguiente formula:

$$32+16*X+Y$$

Donde:

X= número de ubicación del módulo de expansión

Y= número de entrada o salida física del módulo de expansión

En la posición número 1 se encuentra el Módulo de expansión IO-R08 que es un módulo digital y se direcciona la entrada número 3 de la siguiente forma:

<sup>27</sup> (Unitronics, 1999)

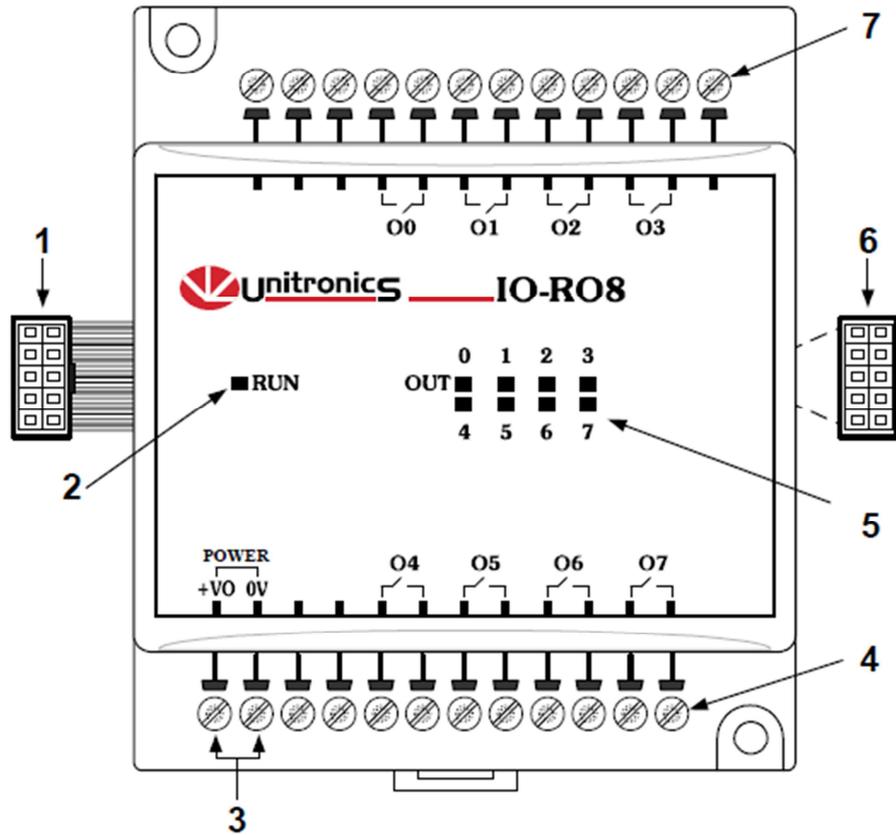


Figura 7.3. Módulo Digital IO-R08<sup>28</sup>.

X=1, Y=4 por que está en la cuarta posición teniendo en cuenta el número 0, y aplicamos la fórmula:

$$32+16*1+4= 52$$

Por lo tanto la ubicación de la entrada del módulo digital IO-R08 es:

I 52.

<sup>28</sup> (Unitronics, 1999)

## Outputs

Address	PowerUp	Description
32		RELE 1 VARIADOR 1 Y 2
33		RELE 2 ON VARIADOR 1 Y 2
34		RELE 3 VARIADOR 3
35		RELE 4 RUN VARIADOR 3 FWD
36		RELE 5 RUN VARIADOR 3 RWD
37		RELE 6 QUEMADOR IZQUIERDO ON
38		RELE 7 QUEMADOR DERECHO ON
39		

Figura 7.4. Direcciones de Salida Digitales.

## Timers

Address	PowerUp	Format	Type	Reset PW	Description
1	00:00:30.00	TIME	TD		RUN VARIADOR 1 Y 2
2	00:00:10.00	TIME	TD		FWD VARIADOR 3 ON
3	00:00:10.00	TIME	TD		RWD VARIADOR 3 ON
4	00:00:30.00	TIME	TD		SET POINT

Figura 7.5. Direcciones de Temporizadores.

## Memory Bits

Address	PowerUp	Description
0		PID: Action: 0: Reverse(Heating-default) 1: Direct(Cooling)
1		SALTO TERMOCUPLAS
2		SALTO ACTUADORES
3		SALTO PID
4		APAGADO QUEMADORES
5		VARIADOR 1 Y 2 ARRANQUE
6		VARIADOR 3 ARRANQUE
7		FWD VARIADOR 3
8		RUN FWD VARIADOR 3
9		RWD VARIADOR 3
10		RUN RWD VARIADOR 3
11		QUEMADOR IZQ ON
12		QUEMADOR DER ON
13		OFF VARIADOR 1 Y 2
14		OFF VARIADOR 3
15		QUEMADOR IZQ OFF
16		QUEMADOR DER OFF
17		INICIO
18		SALTO MENU
19		PID CONFIGURACION
20		RUN AUTO TUNE
21		BOTON AUTO TUNE
22		PID ON
23		OPERARIO
24		APAGADO TOTAL
25		SET POINT

Figura 7.6. Direcciones de Memorias de Bits.

## Memory Integers

Address	PowerUp	Format	Description
0		DEC	PID: Set Point - the target value
1		DEC	PID: Process Value - the PID input
2	32	DEC	PID: Proportional band - defined in units of 0.1% (P gain)
3	46	DEC	PID: Integral time - defined in units of 1 second (I gain)
4	2	DEC	PID: Derivative time - defined in units of 1 second (D gain)
5		DEC	PID: Sample Time - defined in units of 10 mSec .Recommended value=10 to 100 (0.1 to 1 sec)
6	0	DEC	PID: Input Range - Process Value Low limit
7	1500	DEC	PID: Input Range - Process Value High limit
8	10	DEC	PID: Output Range - Control Value Lowlimit
9	60	DEC	PID: Output Range - Control Value High limit
10		DEC	PID: Control Value - the PID output
11		DEC	PID: PID Status
48		DEC	TERMOCUPLA 1
49		DEC	TERMOCUPLA 2
50		DEC	TERMOCUPLA 3
51		DEC	TERMOCUPLA 4
52		DEC	TERMOCUPLA 5
60		DEC	SUMATEMPERATURAS
61		DEC	TEMPERATURA REFERENCIAL
64		DEC	VARIADOR 1 ANALOGO
65		DEC	VARIADOR 2 ANALOGO
66		DEC	VARIADOR 3 ANALOGO

Figura 7.7. Continuación direcciones de Memorias Internas.

### 7.1.3. FILTROS.

Una de las opciones dentro de la configuración del hardware es el uso de filtros disponibles para la versión utilizada V570 y específicamente para los módulos de expansión que utiliza valores análogos como es el módulo IO-ATC8.

El uso de filtros es sumamente importante para proteger al sistema de valores fluctuantes lo que ocasionaría tener una lecturas erróneas, estos filtros se basan en el valor del proceso FIFO (el que primero entra es el primero en salir).

El proceso de filtrado se ejecuta después de cada nueva lectura analógica.

Existe un campo de filtros y es activada para definir la entrada analógica, existen 3 valores bajo, medio, alto lo cual indica:

**Tabla 7.1. Clasificación de Filtros.**

TIPOS DE FILTRO	DESCRIPCIÓN.
BAJO	Calcula el promedio de las 2 últimas lecturas.
MEDIO	Toma las 4 últimas lecturas, elimina los valores más bajos y muy altos, luego calcula el promedio de los 2 valores restantes.
ALTO	Toma las últimas 8 lecturas, elimina las 2 más bajas y los 2 valores muy altos, luego calcula el promedio de los 4 valores restantes.

Fuente: PROPIA

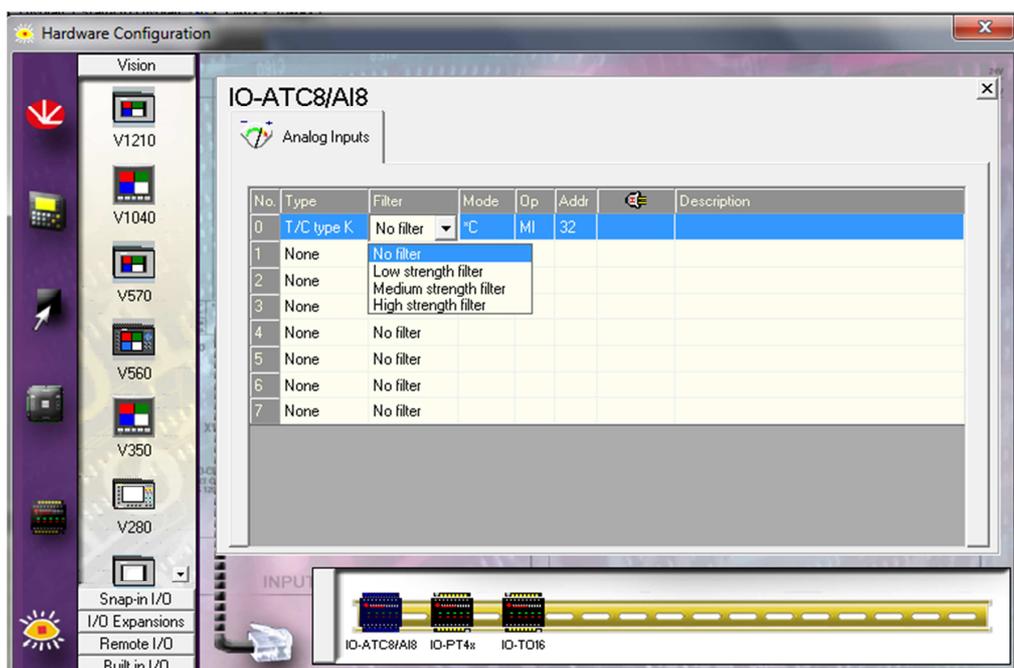


Figura 7.8. Selección de filtros<sup>29</sup>

## 7.2. EDITOR LADDER

Se utiliza para crear el diagrama Ladder donde se incluyen todas las aplicaciones de control, este se explica en el ANEXO K.

El diagrama Ladder está compuesto por contactos, bobinas y elementos de funciones en segmentos.

Los contactos representan condiciones de entradas, la corriente fluye de izquierda a derecha, por esto el primer elemento en un segmento siempre toca el lado izquierdo.

Las bobinas representan instrucciones de salida, para la activación de las bobinas el estado lógico de los contactos debe permitir que fluya la corriente a través del segmento hasta la bobina, por esto todos los elementos tienen que estar conectados.

<sup>29</sup> (Unitronics, 1999)

Se usa el editor Ladder para:

- Colocar y conectar los elementos Ladder.
- Colocar funciones como comparar, matemáticas, lógicas, reloj, almacenar y vectores.
- Insertar bloques de funciones (FB) en el programa.
- Poner módulos y subrutinas del programa.
- Colocar comentarios en los segmentos.

Los elementos Ladder son:

**Tabla 7.2. Elementos Ladder**

<b>CONTACTOS</b>	Contactos.
	Contacto directo (NO).
	Contacto inverso (NC).
	Transición positiva (subida).
	Transición negativa (bajada).
	Inmediato: Leer entrada física.
	Inmediato: Actualizar entrada de alta velocidad.

**Fuente:** Propia.

**Tabla 7.2. Elementos Ladder (Continuación).**

<b>BOBINAS</b>	Bobinas.
	Bobina directa.
	Bobina inversa (negada).
	Set de bobina.
	Reset de bobina.
	Bobina de conmutación.
	Inmediato: Escribir en la salida.
<b>COMPARAR</b>	Comparar funciones.
	Mayor que.
	Mayor/Igual.
	Igual.
	Distinto.
	Menor/Igual.
	Menor que.
<b>MATEMÁTICAS</b>	Función matemática.
	Sumar.
	Restar.
	Multiplicar.
	Dividir.
	Módulo.
	Liberalización, valor único.
	Liberalización, vector.
	Factor.
	Potencia.
	Raíz cuadrada.
	Incrementar/Decrementar.

**Fuente:** Propia.

**Tabla 7.2. Elementos Ladder (Continuación).**

<b>FLOTANTES</b>	Funciones con coma flotante.
	Básico: Almacenar directo, Sumar, Restar, Multiplicación.
	Extendida: Raíz cuadrada, Potencia, Exp, LN, Log10.I
	Trigonometría: Sin, Cos, Tan, ArcSin, ArcCos, ArcTan.
	Comparar: Mayor que, Mayor Igual, Igual, Distinto, Menor.
	Convertir: A+B/n, INV (A+B/n).
<b>LÓGICAS</b>	Funciones lógicas.
	Y.
	O.
	XOR.
	Shift Izquierda/Derecha.
	Rotar Izquierda/Derecha.
	Bit Set/Reset.
	Bit Test.
	Almacenar estado de bits.
	Cargar estado de los bits.
	RS-SR Flip-Flop.
	RLO a Bit.
<b>RELOJ</b>	Funciones de reloj.
	Hora.
	Día de la semana.
	Día del mes.
	Mes.
	Año.
	Funciones UTC (Universal Time).

**Fuente:** Propia.

**Tabla 7.2. Elementos Ladder (Continuación).**

<b>ALMACENAR</b>	Funciones de almacenamiento.
	Almacenar función directa.
	Almacenar función indirecta.
	Almacenar temporizador/Predeterminar contador.
	Cargar funciones indirectas.
	Cargar temporizador/Predeterminar contador.
	Almacenar Hora/Contador: Valor actual.
	Cargar Temporizador/Contador: Valor actual.
<b>VECTOR</b>	Cargar.
	Cargar valor de bits de temporizador.
	Almacenar.
	Buscar.
	Llenar/Llenar Offset.
	Copiar/Copiar Offset.
	Comparar/Comparar Offset.
	Bit a Numérico, Numérico a Bit.
	Obtener Máx.
	Obtener Mín.
	Vector: Copiar Memoria.
	Shift Byte izquierda.
<b>LLAMADAS</b>	Llamadas.
	Saltar a Etiqueta.
	Cargar Display HMI.
	Display HMI Cargado.
	Cargar último Display HMI.
	Llamar Subrutina.
	Subrutina Retorno.

Fuente: Propia.

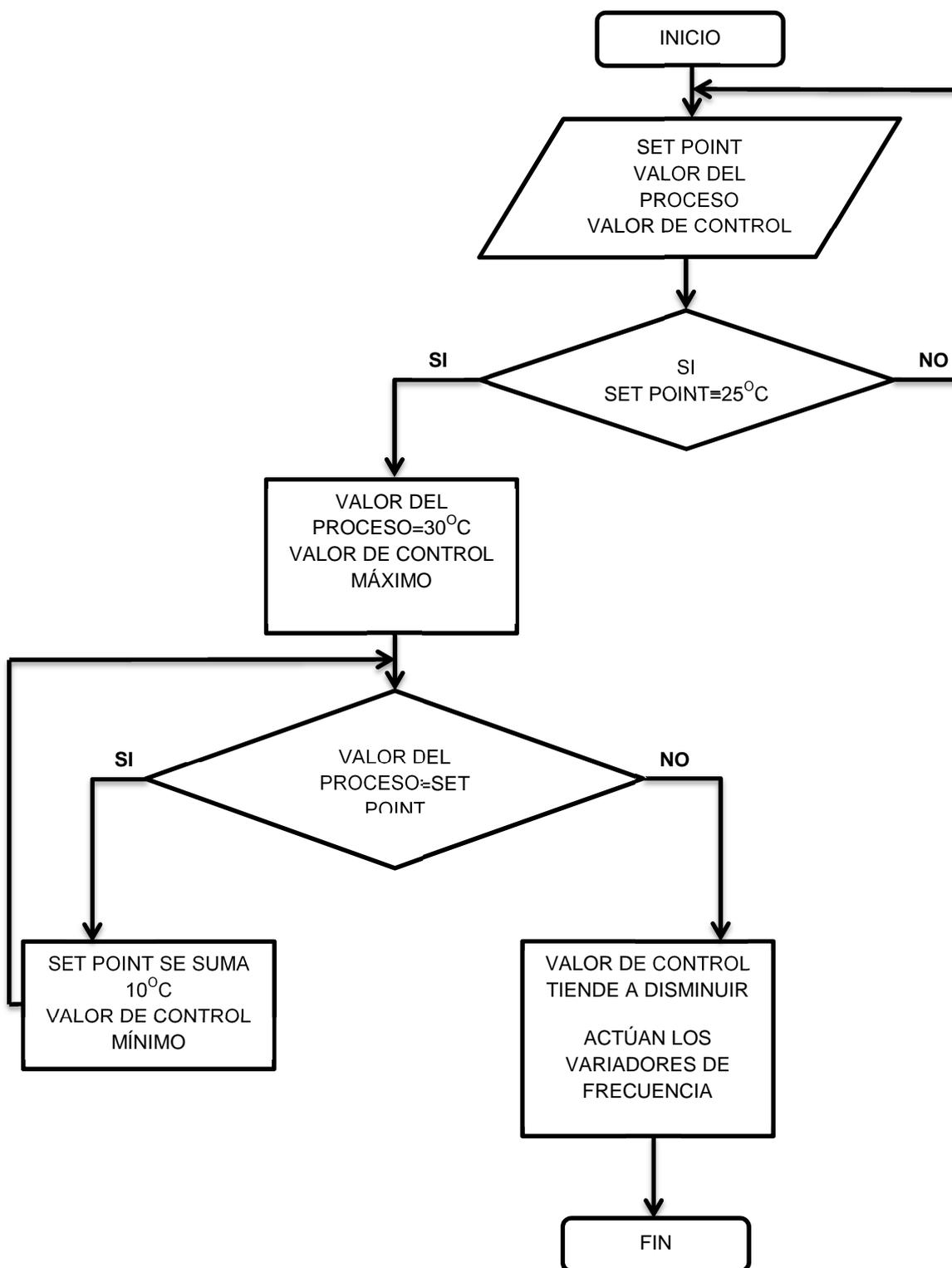
**Tabla 7.2. Elementos Ladder (Continuación).**

<b>CADENAS</b>	Trasladar.
	Núm. a ASCII.
	Mostrar RTC (ASCII.
	IP a ASCII.
<b>HMI</b>	Función Cargar display HMI.
	HMI-Ladder: Dibujar Píxel/Línea.
	HMI-Ladder: Borrar rectángulo.
	HMI-Ladder: Var anterior.
	Invertir Var/Ocultar Var.
<b>TABLA DE DATOS</b>	Tablas de datos.
	Leer/Escribir.
	Leer/Escribir directo.
	Tabla de datos: Borrar tabla.
	Tabla de datos: Buscar fila.

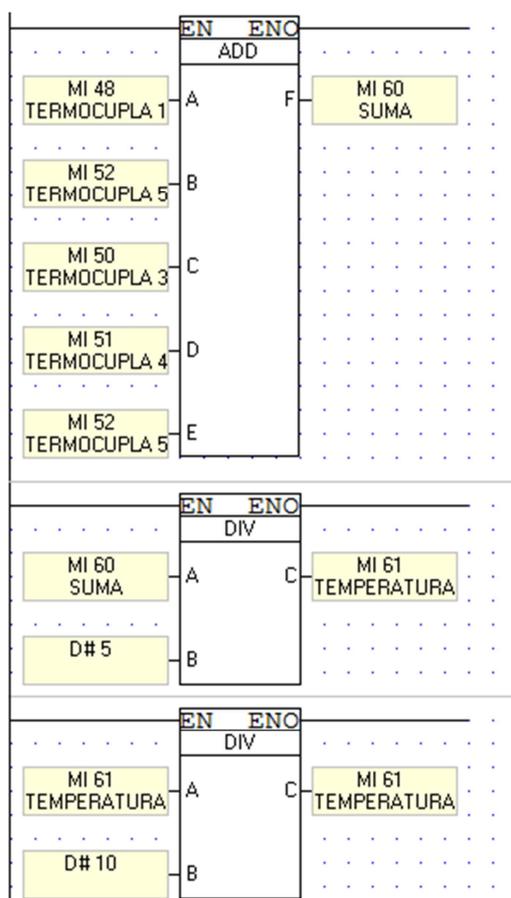
**Fuente:** Propia.

### 7.2.1. LADDER PARA EL CONTROL DEL HORNO DE ACTIVACIÓN DE RESINA.

El diagrama de flujo representa el proceso que se realiza para el control del horno.

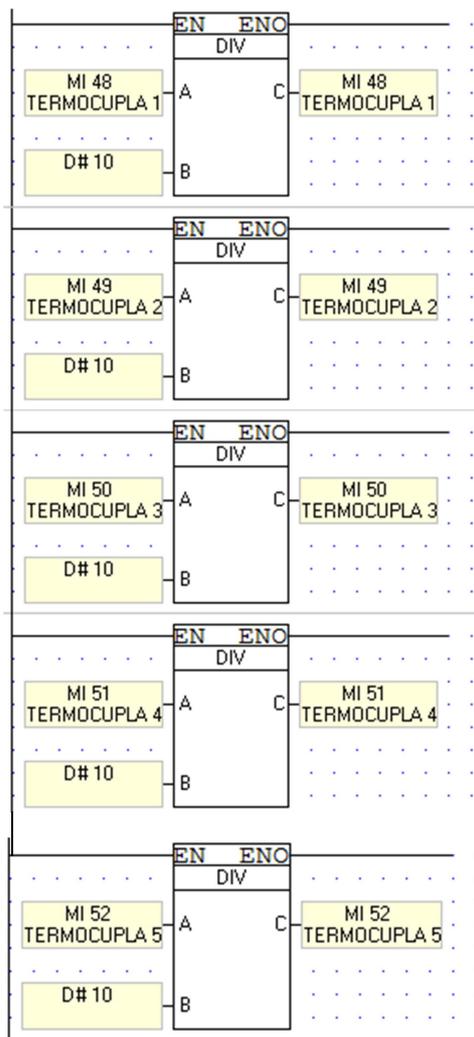


La Temperatura referencial consiste en sumar las temperaturas de las cinco termocuplas y dividirlas para cinco esto, con el fin de tener una temperatura promedio o referencial que nos de una visión general de las temperaturas en el horno, considerando que dentro del horno las temperaturas son homogéneas con una diferencia de +/- 5 grados de temperatura.



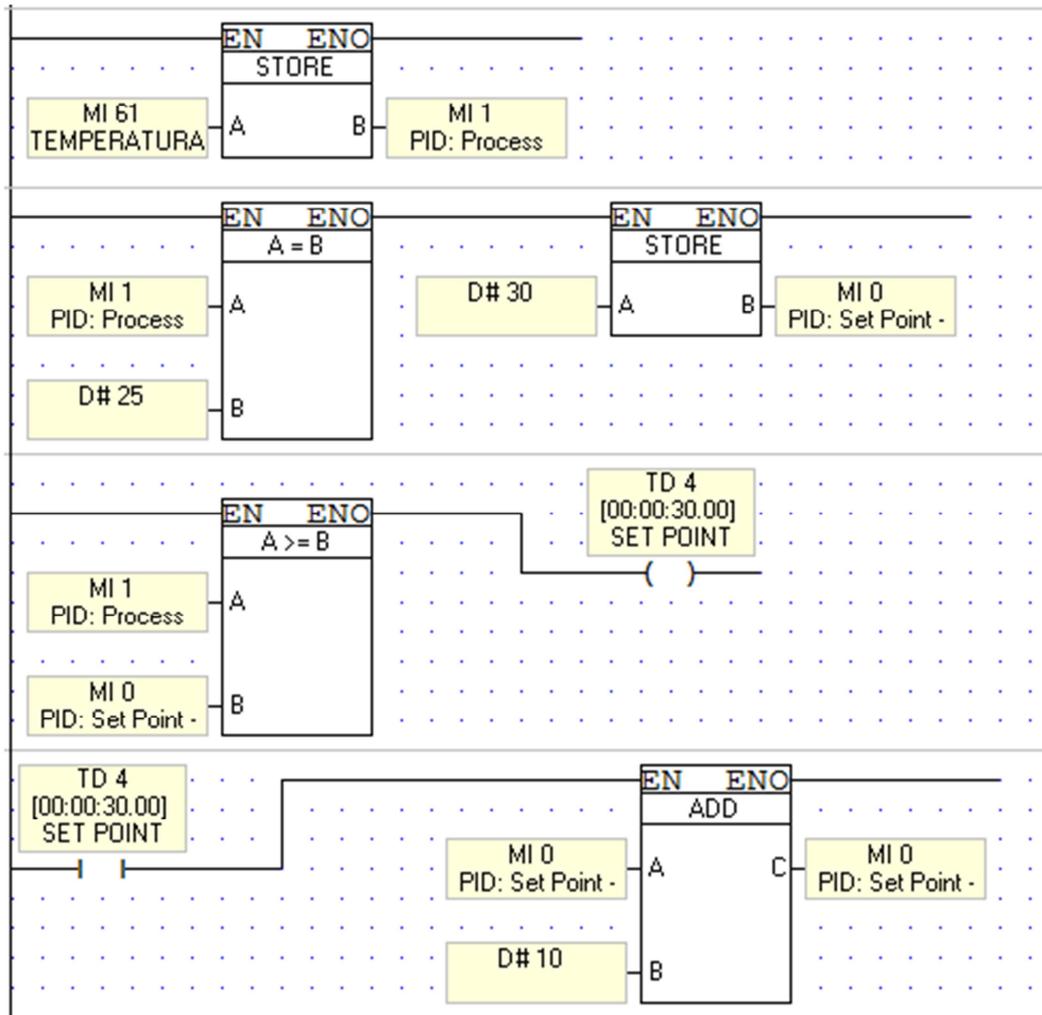
**Figura 7.9. Temperatura referencial.**

Por la resolución del OPLC se tiene que dividir la temperatura para un valor de 10, por ejemplo si la termocupla está leyendo 30 grados centígrados se visualiza 300 en el OPLC por tal razón se divide la temperatura para el valor de 10.



**Figura 7.10. Temperaturas Termocuplas.**

Cada vez que el valor de proceso que está dado por la temperatura referencial, alcanza a 25 grados centigrados se inicializa el proceso con la obtención del set point el mismo que al llegar al valor de proceso 25 toma el valor de 30 grados centigrados el que se almacenara en (MI 0) que dentro del bloque de configuración de PID corresponde al set point, de aquí en adelante cada vez que el valor de proceso sea igual al valor de set point este se sumara 10 grados este y se almacenara.



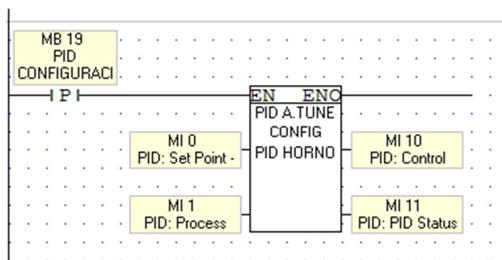
**Figura 7.11. Set Point.**

Ingresamos los límites del pv (valor del proceso superior e inferior).

Ingresamos los límites del cv (control del proceso superior e inferior).

Se almacena el set point.

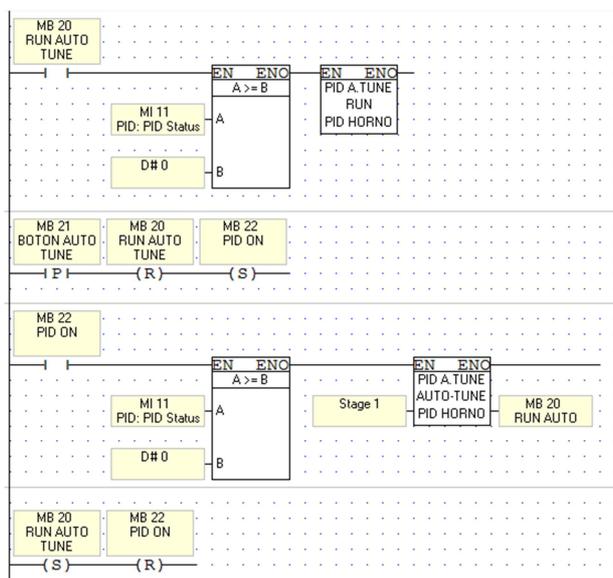
Se establecen los parámetros de Kp, Ti, Td.



**Figura 7.12. Bloque Configuración PID.**

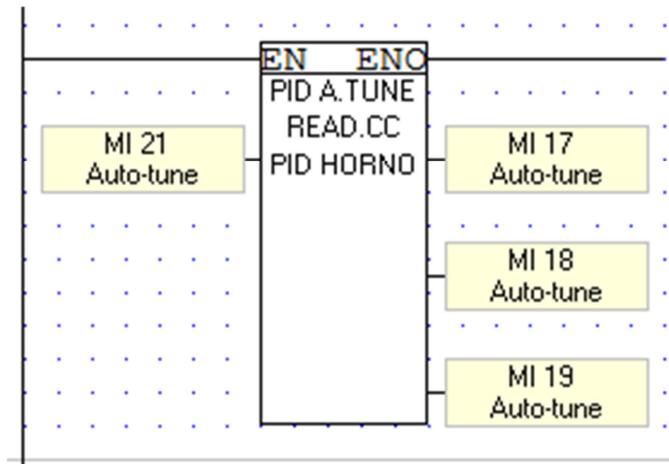
Se activa un lazo de PID este lazo consiste en recolectar los parámetros mediante la utilización de un bloque llamado PID auto tune que se encarga de escribir los parámetros recopilados de la planta en el bloque de configuración de PID y el bloque PID que es el que se encarga de realizar la función PID con los datos ingresados en el bloque de configuración PID.

Todos los parametros, configuracion del PID se explican en el ANEXO L.



**Figura 7.13. Lazo PID.**

Valores de control de salida, proporcional, integral, derivativo este bloque es necesario para realizar el rastreo en línea a través del PID Server.



**Figura 7.14. Bloque de lectura de datos PID.**

Al finalizar el diagrama ladder, se energizan las bobinas, accionando las salidas físicas de los módulos detallados en la sección PLANOS.

- RELE 1: energizará el variadores 1 y 2.
- RELE 2: temporizador 10 segundos este arrancara al variador 1 y 2.
- RELE 3: energizará el variador 3.
- RELE 4: arranca en sentido horario el motor 3 por medio del variador 3.
- RELE 5: arranca en sentido anti horario el motor 3 por medio del variador 3.
- RELE 6: enciende el quemador izquierdo.
- RELE 7: enciende el quemador derecho

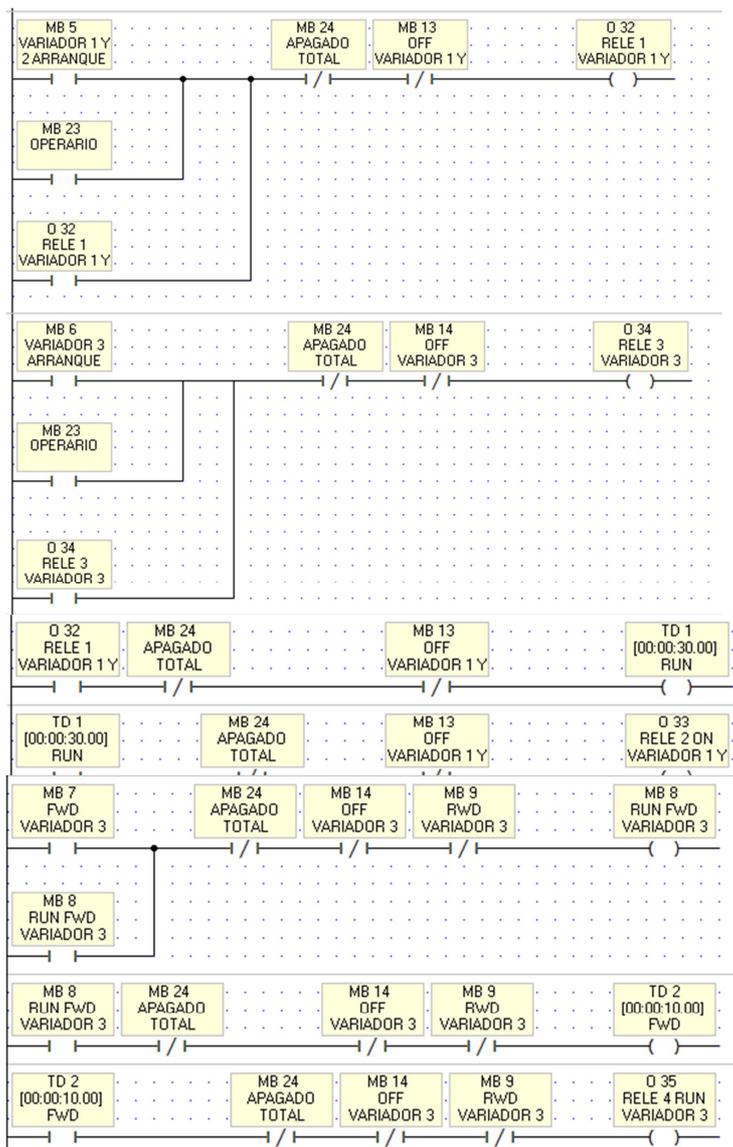


Figura 7.15. Actuadores Variadores de Frecuencia.

Una vez obtenido los valores de salida de control estos son enviados a través de un bloque de linealización a la entrada de los variadores para el control de los mismos.

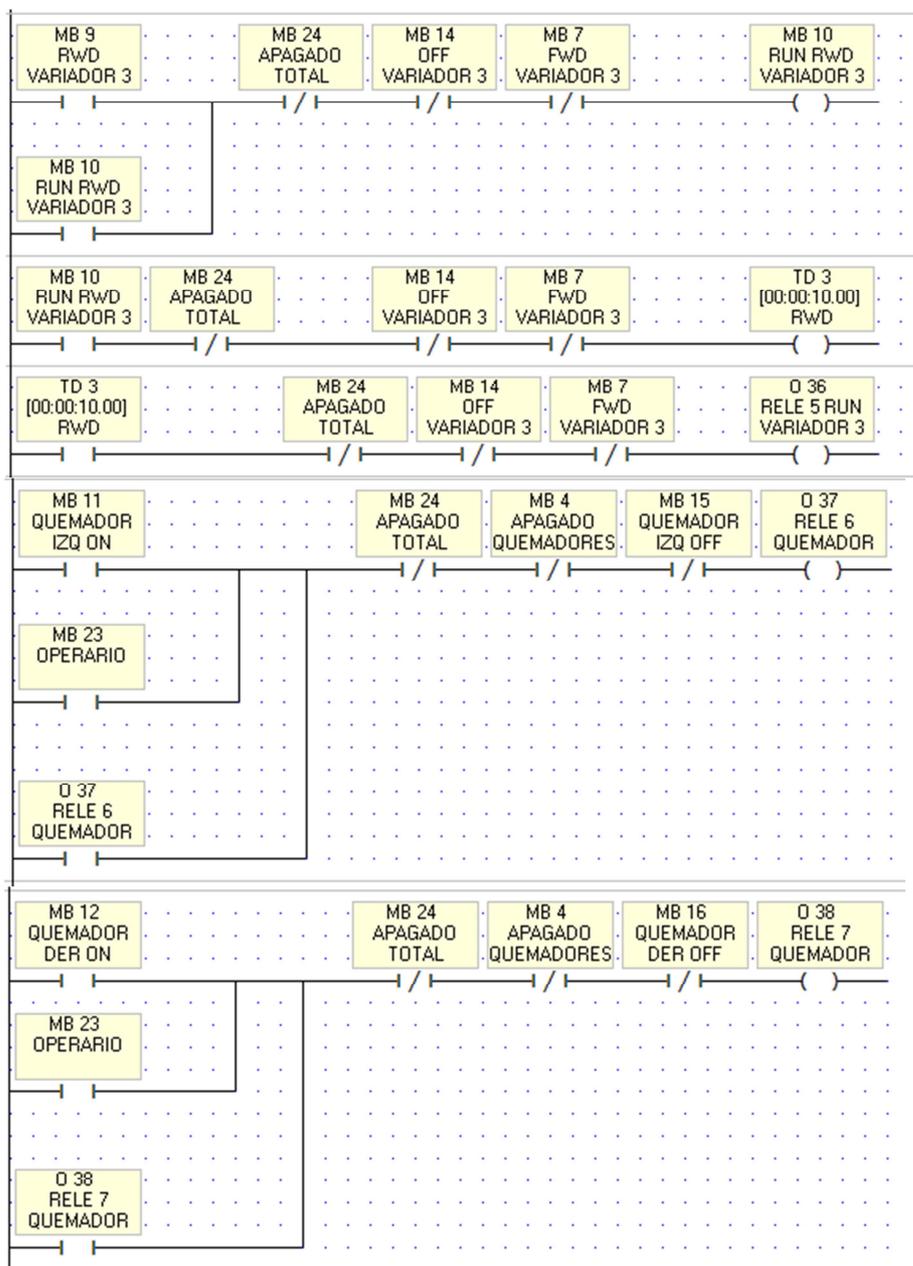
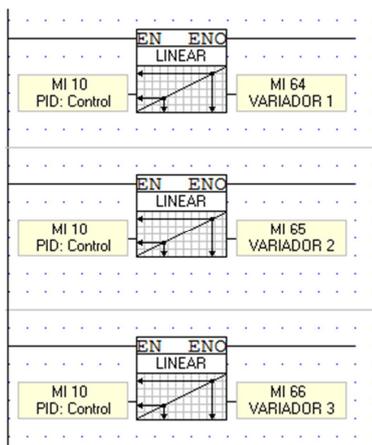


Figura 7.16. Actuadores Variadores de Frecuencia y Quemadores.



**Figura 7.17. Valores de salida para los Variadores de Frecuencia.**

### 7.3. EDITOR HMI

Se utiliza para crear displays que se observan en la pantalla del controlador una vez cargado el programa, este se explica en el ANEXO M.

Cuando se selecciona uno de los HMI desde el explorador de proyectos se abre una réplica del display, este refleja el que se encuentra cargado en el controlador VISION.

Un display puede contener texto e imágenes estas indican al operario el proceso que se realiza y las alarmas en diferentes etapas del proceso.

Al introducir variables en los displays podemos:

- Mostrar valores en tiempo real.
- Representar valores en tiempo real con imágenes, texto entre otras opciones.

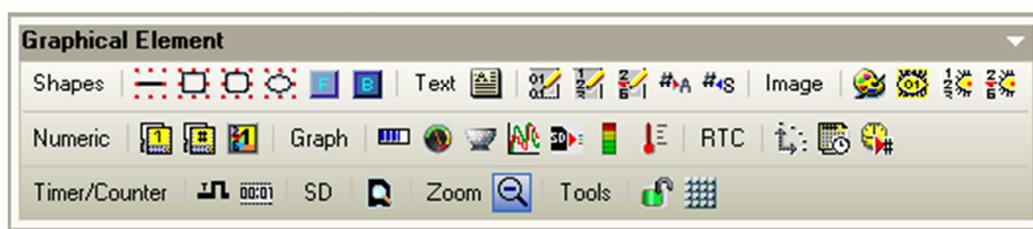
- Mostrar mensajes dinámicos en función al proceso realizado.

Dentro de la opción HMI, una barra de elementos gráficos donde encontramos:

**Tabla 7.3. Elementos gráficos HMI**

Variable de texto.	Variable de imagen.	Variable numérica.	Variable de reloj.	Variable de temporizador/ contador.
Texto binario (bit).	Imagen binaria.	Número.	Reloj en tiempo real.	Temporizador.
Lista de textos: por puntero.	Lista de imágenes: por puntero.	Contraseña.	Variabes de reloj.	Contador.
Lista de textos: por rango.	Lista de imágenes: por rango.	Gráfico de barras/formas.	Variable de reloj valor RTC\UTC.	
Cadena ASCII.				
Mostrar RTC (ASCII).				

Fuente: Propia.



**Figura 7.18. Estado gráficos<sup>30</sup>.**

<sup>30</sup> (Unitronics, 1999)

### 7.3.1. HMI PARA EL CONTROL DEL HORNO DE ACTIVACIÓN DE RESINA.

Display de inicio donde encontramos:

- Tiempo de proceso.
- Temperatura referencial del horno.
- Mensaje del proceso.
- Botón de inicio del proceso.



Figura 7.19. Display principal BIGBAMBOO S.A.

Display MENU donde se especifican los diferentes displays tales como:

- Display Termocuplas.
- Display Actuadores.
- Display PID.



**Figura 7.20. Display MENÚ.**

Display TERMOCUPLAS donde se visualiza las temperaturas de las cinco termocuplas y la temperatura referencial del horno.



Figura 7.21. Display TERMOCUPLAS.

Display ACTUADORES en el cual se tienen los botones de arranque de los variadores de frecuencia y quemadores.

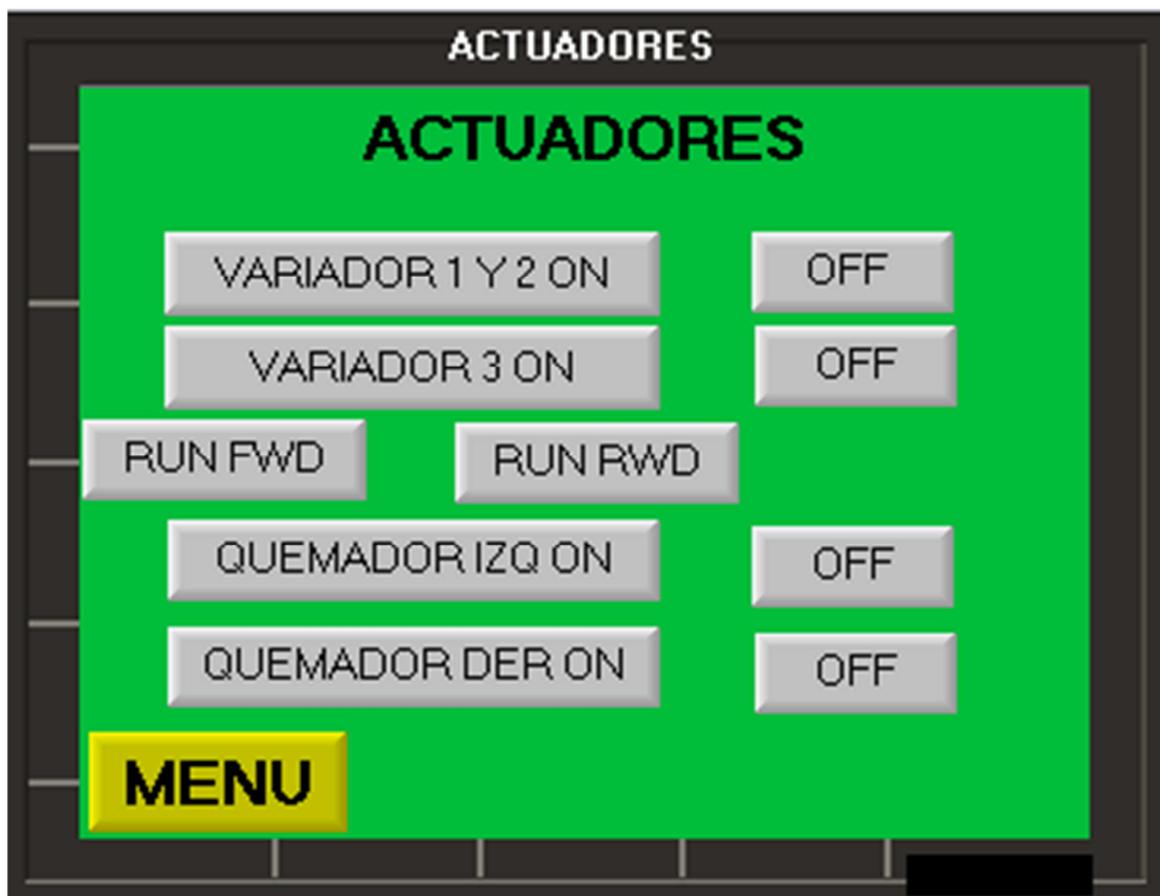


Figura 7.22. Display ACTUADORES.

Display PID encontramos el valor del Set Point, el Valor de entrada del Proceso, el estado del PID, el valor de salida del PID.

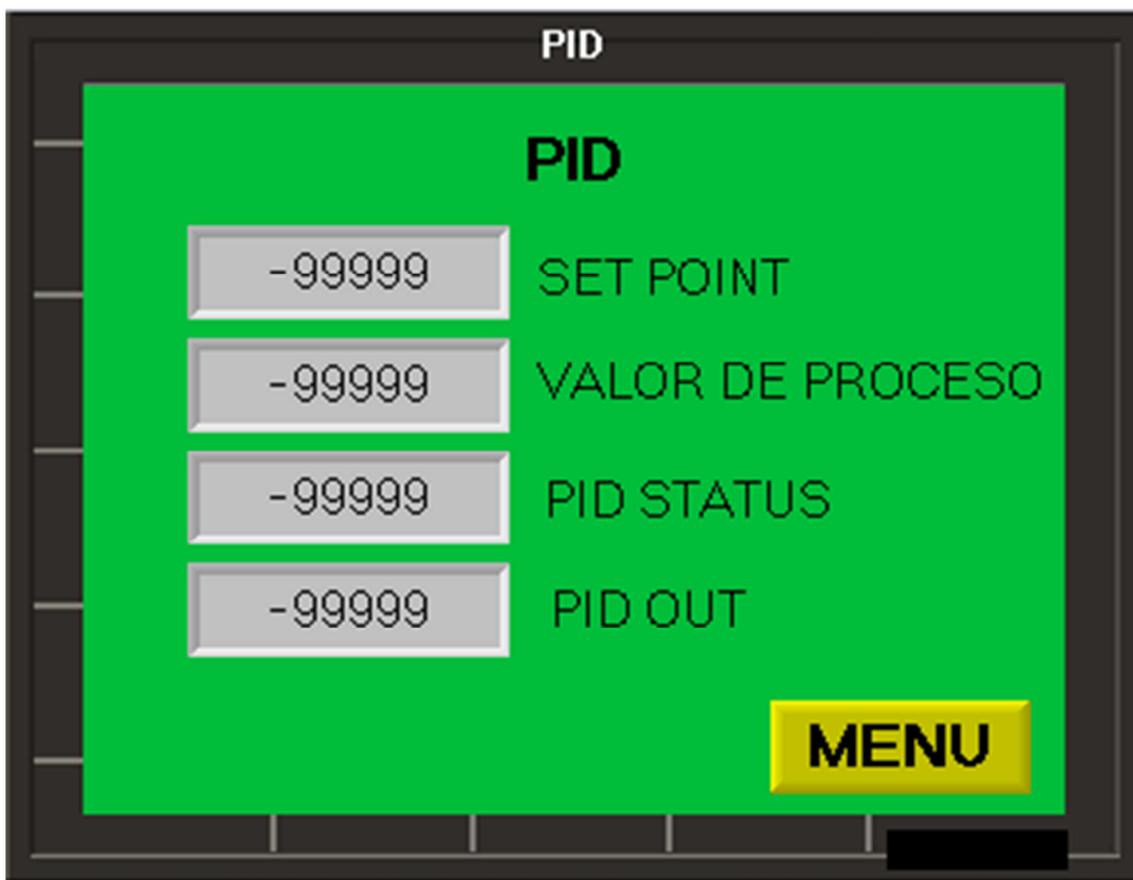


Figura 7.23. Display PID.

#### 7.4. PID SERVER

Es una herramienta muy útil para aplicar PID y monitorear el sistema.

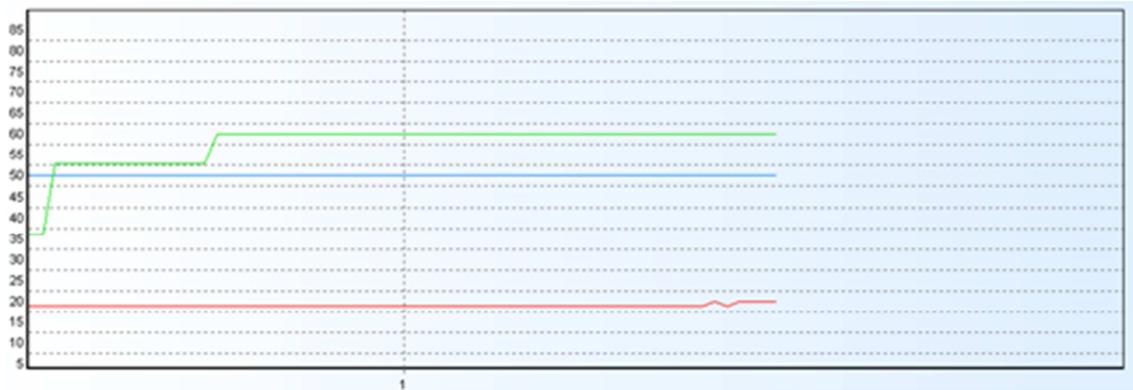
Se encuentra en el menú Tools de Visilogic.

Una vez abierto el programa se realiza un Nuevo Loop donde se coloca los parámetros y direcciones de la configuración del PID.

Para realizar la conexión del PID server con el PLC y monitorear el proceso se necesita información del PLC.

La configuración del PID Server se explica en el ANEXO N.

La respuesta del sistema es el siguiente:



**Figura 7.24. PID Server.**

## CAPITULO VIII

### 8. PRUEBAS Y RESULTADOS.

En el siguiente CAPITULO detalla las distintas pruebas a diferente carga con el control implementado PID, obteniendo resultados acorde al tipo de carga utilizada.

#### 8.1. PRUEBA AL VACÍO.

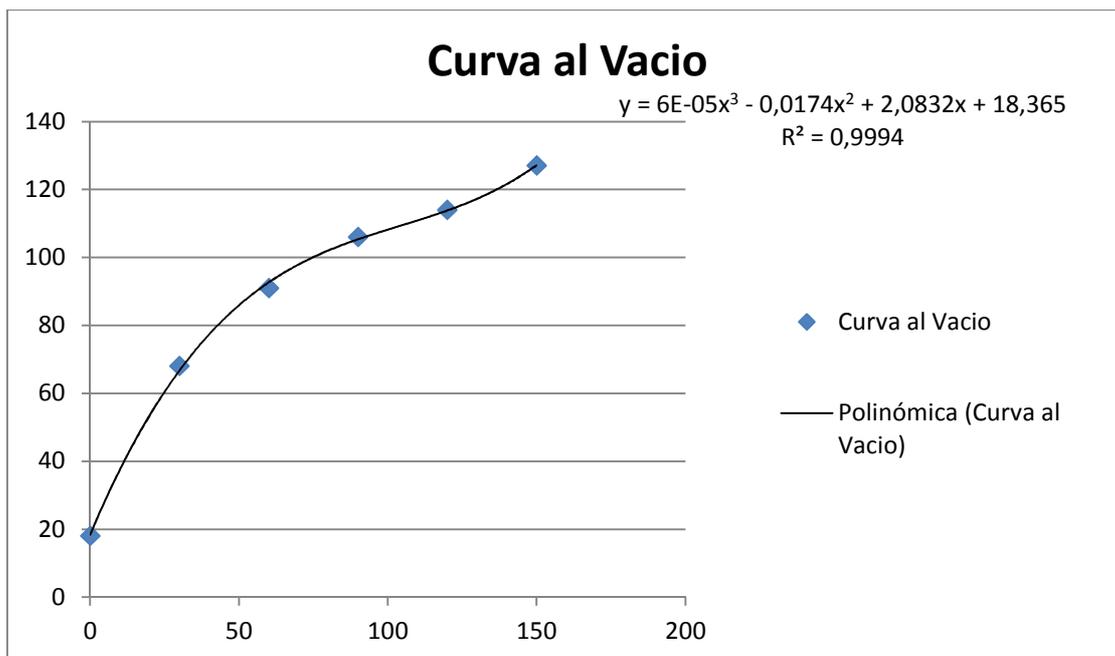
La primera prueba se realizó en vacío, es decir sin ningún tipo de carga, obteniendo el siguiente comportamiento.

**Tabla 8.1. Tabla de datos al vacío**

Tiempo (min)	Temperatura(°C)
0	18
30	68
60	91
90	106
120	114
150	130

Fuente: Propia

La cual muestra el comportamiento del horno en donde la temperatura referencial alcanza su valor máximo de 130°C en un tiempo estimado de 150 minutos.



**Figura 8.1. Curva al Vacío.**

El siguiente gráfico muestra la tendencia del comportamiento del horno con la cual la temperatura, referencial asciende hasta el valor requerido que son los 403.15 °K (130 °C) para la activación de resina de los bloques prensados de bambú.

El objetivo de homogenizar la temperatura consiste en crear una turbulencia dentro del horno, con la cual genera una recirculación de aire caliente para poder distribuir la temperatura en todos los puntos y de esta forma lograr un rango de error de  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  en todos los puntos sensados.

## 8.2. PRUEBA A MÁXIMA CARGA.

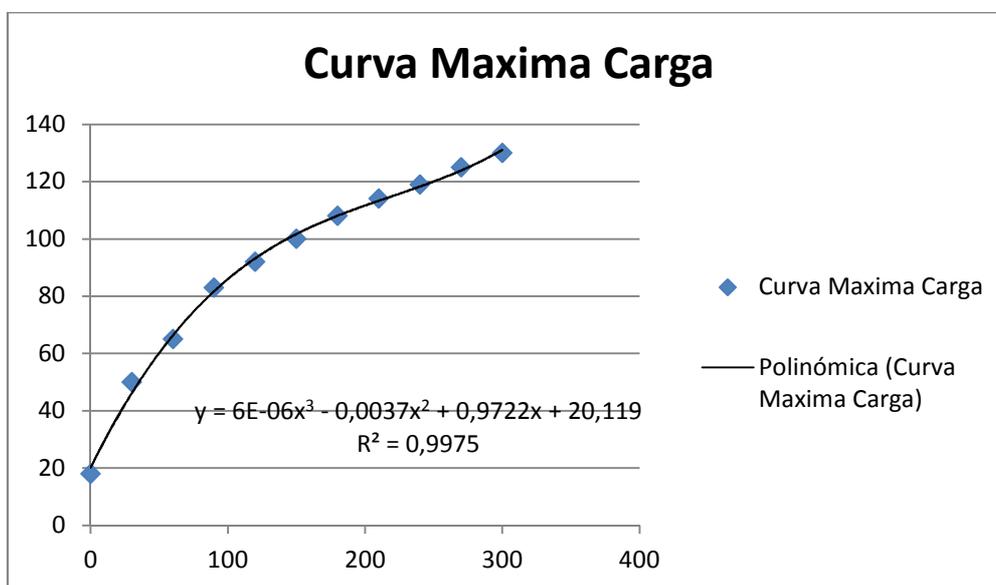
La siguiente prueba consiste con ochenta bloques de carga obteniendo los siguientes resultados.

**Tabla 8.2. Tabla de datos a Carga Máxima.**

Tiempo (min)	Temperatura(°C)
0	18
30	50
60	65
90	83
120	92
150	100
180	108
210	114
240	119
270	125
300	130

Fuente: Propia

El cuadro presentado la tendencia de los bloques a máxima carga la cual mantiene a ochenta bloques los cuales alcanzan la temperatura de 130°C la tendencia es la siguiente.



**Figura 8.2. Curva Máxima Carga.**

### 8.3. PRUEBA ESCALABLE A 150 BLOQUES.

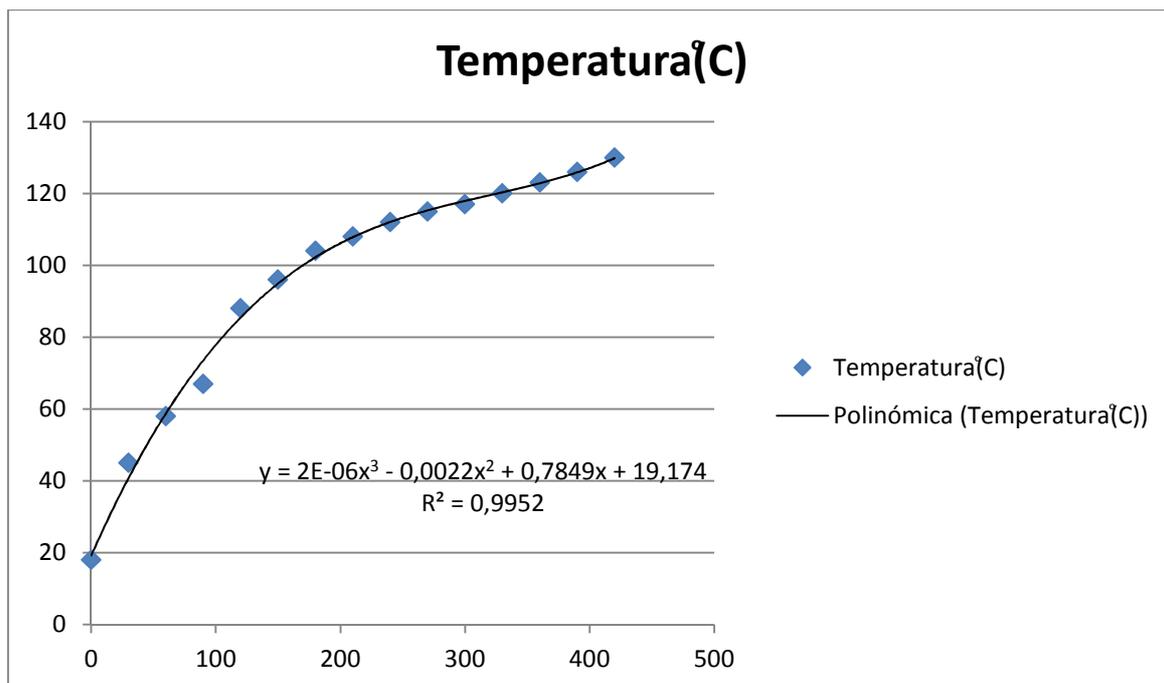
El enfoque de esta prueba es obtener los parámetros de estandarización y escalabilidad para una mayor producción de bloques, como es el caso de 150 bloques con el cual el comportamiento del horno es el siguiente.

**Tabla 8.3. Tabla de datos Escalable a 150 Bloques.**

Tiempo (min)	Temperatura(°C)
0	18
30	45
60	58
90	67
120	88
150	96
180	104
210	108
240	112
270	115
300	117
330	120
360	123
390	126
420	132

Fuente: Propia

El cuadro presentado la tendencia de los bloques a carga escalable con 150 bloques de carga, el comportamiento es el siguiente:



**Figura 8.3. Curva Escalable a 150 Bloques.**

Luego de realizadas todas las pruebas se determina que la carga térmica suministrada por los quemadores, nos da una temperatura máxima saturada en el horno de 411.15 °K (138 °C), por lo que se mantiene en este valor, durante 3 horas, requerimiento dado por Akzonobel distribuidor de la resina para este proceso, con el fin de garantizar que la resina se active en todos los bloques sometidos a este proceso.

En el siguiente cuadro se muestra el rango de temperatura sensadas de las cinco termocuplas y una temperatura referencial.

**Tabla 8.4. Temperaturas Sensadas.**

TIEMPO HORAS	TERMO 1. °C	TERMO 2. °C	TERMO 3. °C	TERMO 4. °C	TERMO 5. °C	TEMP. REF.
0	17	17	17	17	17	17
30	67	75	73	68	74	70
60	93	97	102	95	103	100
90	109	112	119	107	121	115
120	121	120	129	120	127	125
150	128	123	134	135	127	130

Fuente: Propia.

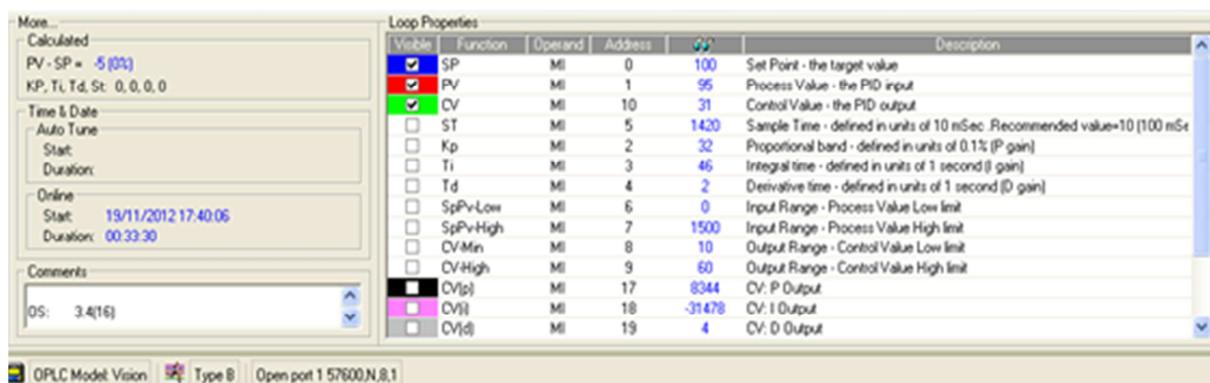
#### 8.4. RESPUESTA DEL PID SERVER.

Acorde al cálculo anteriormente realizado se obtuvieron las constantes de la función PID que se muestran a continuación:

```
>> Kp1
Kp1 =
    31.5601
>> Td1
Td1 =
    2.1440
>> Ti1
Ti1 =
    45.9430
fx >>
```

**Figura 8.4. Variables PID.**

Se ingresan en la configuración del PID Server los datos de Kp, Ti, Td.



**Figura 8.5. Configuración PID Server.**

Como se observa en la Figura 8.5 los parámetros Kp, Ti, Td son los encontrados en el cálculo del PID estos son los que regulan la configuración en control PID en línea.

Los datos obtenidos mediante la función de PID server muestran el valor del SET POINT la cual se muestra en color azul, el valor de Proceso se muestra en color rojo y el valor de Control se muestra de color verde.



**Figura 8.6. Representación de datos en el PID Server.**

En el gráfico se muestra la función de PID en ejecución teniendo en cuenta el cálculo de la señal de respuesta (valor de Control), para el SET POINT asignado.

Con dichos valores el controlador actúa de la siguiente manera.



**Figura 8.7. Respuesta del PID Server en línea.**

El controlador tiende a subir el valor de control, para que el valor de proceso alcance el valor del SET POINT.

## **CAPITULO IX.**

### **9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

#### **9.1. CONCLUSIONES.**

- Se realizó para la empresa BIGBAMBOO S.A el diseño, construcción, e implementación de un sistema de control digital del horno de activación de resina para bloques prensados de bambú, mediante la interacción del OPL, sensores y actuadores.
- Se diseñó e implemento los sistemas de calefacción, ventilación y control formando en conjunto una automatización de campo o proceso del horno de activación de resina.
- La HMI diseñada brinda al operario una interfaz amigable y funcional para el control del proceso de activación de resina y la manipulación de las variables que involucran al mismo.
- El sistema de control implementado es escalable a 150 bloques con el mismo laso de control, en un intervalo mayor de tiempo de ascenso.
- El controlador implementado genera turbulencia de aire caliente, lo cual permite que la diferencia de temperaturas en los puntos sensados del horno este dentro de un rango de 10 grados centígrados respecto a la referencial.
- Se modifica la curva de temperatura dada por BIGBAMBOO S.A, para el proceso de activación de resina, debido a que la nueva curva de temperatura diseñada con el controlador resulta eficiente, con menor tiempo de activación y es escalable.

- La Empresa BIGBAMBOO S.A en su proceso inicial de activación de resina, se basaba en una carga de 60 bloques en un proceso de 12 horas para la activación de la resina, con un quemador de 3GPH (Galones por hora) de combustible Diesel, en el cual invertían 60 centavos de dólar por bloque, a partir de la implementación del control en una carga de 80 bloques con dos quemadores a diesel que consumen 4GPH en un proceso 6 horas se invierte 30 centavos de dólar, consecuentemente se obtiene un ahorro energético y económico.

## 9.2. RECOMENDACIONES.

- BIGBAMBOO S.A adopte la curva de temperatura obtenida, dado que la curva dada por la empresa es basada en el proceso de activación de resina chino de la empresa TUKA BAMBÚ, la cual utiliza energía eléctrica como fuente de suministro, por tal motivo los costos de implementación son elevados, es por tal razón que la empresa BIGBAMBOO se basó en otra fuente de suministro de energía con la cual se obtuvo una nueva curva de temperatura garantizando la correcta activación de la resina de los bloques.
- Adquirir quemadores de mayor capacidad y modulables, con el fin de poder manipular el flujo de combustible a través de una válvula proporcional, para obtener un ahorro energético mayor.
- Revestir los ductos de recirculación de aire de los ventiladores con aislantes, para que la pérdida de calor al ambiente sea menor, los aislantes utilizados para la cámara interna del horno deben ser de un grado de resistencia térmica mayor para que no existan zonas frías, y poder delimitar un espacio de trabajo mayor.
- Colocar filtros de aire en los quemadores para impedir el paso de partículas de viruta ya que los mismos se encuentran en una zona muy expuesta a estas.
- La implementación de su sistema de alarmas con sensores de llama para los quemadores, nivel para los tanques de combustible, humo para el horno, esto con el fin de realizar un proceso seguro.

## GLOSARIO.

<b>°C.-</b>	Grados Centígrados.
<b>°K.-</b>	Grados Kelvin.
<b>AC.-</b>	Corriente Alterna.
<b>Bar.-</b>	Medida de presión.
<b>Bit.-</b>	Es un dígito del sistema de numeración binario.
<b>CFM.-</b>	Pies Cúbicos por Minuto, medida de caudal.
<b>DC.-</b>	Corriente Directa.
<b>EU.-</b>	Unidades de Ingeniería.
<b>FB.-</b>	Bloque de función.
<b>Feedback.-</b>	Retroalimentación.
<b>Floración.-</b>	Tiempo que permanecen abiertas las flores de las plantas de una misma especie.
<b>GSM.-</b>	Sistema Global de comunicaciones móviles.
<b>Hz.-</b>	Unidades de frecuencia.
<b>IGBT.-</b>	Transistor bipolar de puerta aislada.

<b>IP.-</b>	Protocolo de Internet.
<b>Kgf.-</b>	Unidades de fuerza.
<b>Ladder.-</b>	Lenguaje de programación escalera.
<b>M file.-</b>	Archivo de MATLAB.
<b>mA.-</b>	Miliamperio, unidad de medida de corriente eléctrica.
<b>MATLAB.-</b>	Es un entorno de lenguaje de alto nivel e interactivo para cálculo numérico, visualización y programación.
<b>MB.-</b>	Memoria de bits.
<b>MI.-</b>	Memoria interna.
<b>Modbus.-</b>	Protocolo de comunicación.
<b>Msnm.-</b>	Metros sobre el nivel del mar.
<b>N.-</b>	Unidad de fuerza, Newton.
<b>NC.-</b>	Contacto Normalmente Abierto.
<b>NO.-</b>	Contacto Normalmente Cerrado.
<b>Offset.-</b>	Compensación.
<b>Pascal.-</b>	Unidad de medida de presión.

<b>Pca.-</b>	Pulgadas de columna de agua.
<b>Plateo.-</b>	Área de crecimiento de raíces de bambú.
<b>PWM.-</b>	Modulación por ancho de pulso.
<b>Riel DIM.-</b>	Es un riel de metal de un tipo estándar ampliamente utilizado para interruptores de montaje y equipo de control industrial dentro de bastidores para equipos.
<b>RTC.-</b>	Reloj en tiempo real.
<b>Set Point.-</b>	Punto de referencia.
<b>SIMULINK.-</b>	Es un entorno de diagrama de bloques para simulación multidominio y diseño basado en modelos.
<b>SMS.-</b>	Servicio de mensajes escritos.
<b>SPAD.-</b>	Registro de datos Quick Start.
<b>TCP.-</b>	Protocolo de Control de Transmisión.
<b>UTC.-</b>	Valor de reloj en tiempo real.
<b>V AC.-</b>	Voltaje de corriente alterna.
<b>V DC.-</b>	Voltaje de corriente continua.

## REFERENCIAS

### BIBLIOGRAFÍA.

- Bigbamboo. (1999). *Bambu en Ecuador*. Obtenido de [www.bigbamboo.com.ec](http://www.bigbamboo.com.ec)
- Electric, M. (2008). *Mitsubishi Electric - Variadores de frecuencia - FR-D 700*. Obtenido de <http://www.mitsubishi-automation.es>
- INBAR. (2011). *Red Internacional del Bambú y el Ratán*. Obtenido de <http://www.inbar.int>
- Industrial, i. A. (1999). *Info PLC*. Obtenido de <http://infopl.net/>
- Mejia, G. E. (1999). *Grupo Electro Comercial Mejia*. Obtenido de <http://www.grupoecmejia.com>
- Ogata, K. (2009). *Ingenieria de Control Moderna*. Tercera.
- Sáez, D. (2002). *Control de Sistemas*.
- Unitronics. (1999). *Unitronics - Vision570™*. Obtenido de <http://www.unitronics.com/Series.aspx?page=Vision570>
- USAC. (1999). *BiblioPagina*. Obtenido de <http://biblioteca.usac.edu.gt>
- Varo, J. (1994). *Gestión Estratégica de la Calidad*. Segunda.
- Visioli, A. (2010). *Practica PID Controller*.