

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E
INVESTIGACIÓN**

IMPLEMENTACIÓN DE UN HORNO PROTOTIPO PARA
ACABADO FINAL DE PASTO SINTÉTICO

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA

ING. RENÉ RUBÉN GALAZ PALMA

DIRECTOR:
M.C. JOSÉ MANUEL CHÁVEZ

HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO.

AGOSTO DE 2016



Dedicatoria

Quiero dedicar esta tesis a mis padres por el apoyo que me dieron y ver en su rostro el orgullo de ser buenos padres donde me enseñaron a trascender y valorar cada una de mis experiencias.

A mis hermanos por estar siempre apoyándome en cada una de las decisiones que tomo y por siempre estar a mi lado en cada experiencia.

Agradecimientos

Primeramente quiero agradecer a Dios por darme todas las facilidades que puso en mi camino y por todas los obstáculos que decidió ponerme a prueba para madurar y aprender para forjarme por el buen camino.

Quiero agradecer al PhD. Guillermo Valencia por su apoyo en toda mi carrera de ingeniería y en mi preparación para obtener el grado de maestro en ingeniería en electrónica. Agradezco al PhD. José Hoyo por hacer que me superara y lograra mejores resultados. Agradezco a mi director de tesis M.C. José Chávez por ser más que un guiador de mi perfil, sino un gran compañero y amigo que estuvo en cada una de mis etapas de mi formación. Y quiero agradecer a mi papá M.C. Rafael Galaz que fue quien me heredó todo este conocimiento y estoy orgulloso de llevar su apellido y por toda la capacidad que me mostró y enseñó en cada una de mis experiencias familiares, laborales y de estudio que gracias a mi padre que me guio por un camino del cual Dios esta orgulloso de él.

“Muchas veces genio es sinónimo de perseverancia” [Thomas Alva Edison].

Resumen

En un sistema de fabricación de pasto sintético, se tiene la etapa de acabado final, en esta se realiza el secado del adhesivo utilizando un horno. Este trabajo de tesis se enfoca en desarrollar un horno prototipo, el cual utiliza como sistema calefactor de lámparas de radiación infrarrojo, con el fin de secar el adhesivo de las fibras previamente tejidas en la primera etapa de fabricación de pasto sintético. El horno es controlado por un sistema con controlador lógico programable (*Programmable Logic Controller, PLC*), el cual se programó con el estándar *IEC-61131-3* procesando los componentes de entrada, salida y se puede comunicar con interfaz protocolo *EtherNet/IP*.

Se diseña una interfaz gráfica de usuario (*Graphical User Interface, GUI*) que interactúa con el operador y el horno. Para complementar las condiciones del monitoreo de operación se implementa el interfaz hombre-máquina (*Human Machine Interface, HMI*). El *HMI* se interconecta con el *PLC*, y éste procesa una serie de instrucciones programadas con la ayuda del estándar *IEC-61131-3*.

La planta, constituida por una cámara de almacenamiento de calor, producido por dos lámparas infrarrojas de ondas cortas, calienta una banda constituida por un tapete de pasto sintético, donde queda visible la superficie inferior, o también conocida como “*backing*” o soporte primario. La banda es impulsada por un motor trifásico de corriente alterna, acoplado a un reductor, que hace girar un rodillo y mientras la banda está tensionada mueve un segundo rodillo, para tener un movimiento en una trayectoria repetitiva.

En el presente documento se muestra un control de temperatura de tipo *ON-OFF* con histéresis y al mismo tiempo, se controla la velocidad lineal de la banda. Se utiliza un controlador lógico programable, programada con lenguaje diagrama escalera (*Ladder Diagram, LD*) y monitoreado por un operador con una pantalla táctil que ajusta los parámetros del proceso para el control del sistema.

Abstract

In a fabrication system of synthetic turf, that it has a finished final system stage thought an adhesive is dried over the rug using an oven. This thesis is focused in the development of an oven prototype that it is operated by a heating system that works with infrared radiation lamps, in order to dry the adhesive of the fibers previously sewed in the first stage of the synthetic turf fabrication. The oven is controlled by a *PLC (Programmable Logic Controller)*. The *PLC* is programmed with the standard *IEC-61131-3*, and process the in-out components and it would be communicated with a protocol *EtherNet/IP* interface.

Graphical User Interface (*GUI*) is designed to interact between the user and the oven. To complete the conditions of the operation monitoring, it implements the Human Machine Interface (*HMI*). The *HMI* is interconnected with the *PLC*, and it processes a series of programming instructions with help of the standard *IEC-61131-3*.

The plant is made by a chamber to stock the heat, it is produces by two infrared short-wave lamps that warm a band madden by a synthetic turf rug. However, the back surface stays visible, also called backing or primary support. The band is dived by a three-phase motor; it is joined by a reducer that it might to turn a roll while the band is tensed that move a second roll, to obtain a moving in a repetitive trajectory.

In the present document shows an *ON-OFF* temperature control with hysteresis and the same time, it controls the lineal speed of the band. It uses a programmable logic controller, programed with a Ladder Diagram (*LD*) and monitored by a user with a touch screen to set the parameters of the process in order to control the system.

Contenido

Índice de figuras	iv
Índice de tablas	vi
Capítulo I. Introducción	1
1.1. Antecedentes	2
1.2. Planteamiento del problema	4
1.3. Ventajas del desarrollo del prototipo	6
1.4. Objetivo	7
1.4.1. Objetivo general	7
1.4.2. Objetivos específicos	7
1.5. Justificación	8
1.6. Limitaciones	8
1.7. Metodología del trabajo	9
1.8. Organización del documento	10
Capítulo II. Conceptos teóricos del proyecto	11
2.1. Sistemas de control	12
2.2. Control digital	15
2.3. Controlador Lógico Programable	20
2.3.1. Hardware de un <i>PLC</i>	20
2.3.1.1. Módulos de entradas y salidas	21
2.3.1.2. Procesador de un <i>PLC</i>	21
2.3.2. Programación de un <i>PLC</i>	23
2.4. Modelo Matemático	28
2.4.1. Sistema térmico	30
2.5. Conclusión	31

Capítulo III. Diseño del prototipo	32
3.1. Introducción al diseño del prototipo	33
3.2. Análisis del problema	36
3.3. Diseño del horno prototipo	37
3.3.1. Características del horno	38
3.3.2. Características de los componentes del horno	40
3.3.2.1. Lámparas	40
3.3.2.2. Sensor de temperatura	41
3.3.2.3. Relevador de estado sólido (<i>SSR</i>)	42
3.3.2.4. Motor para transportar el pasto	42
3.3.2.5. Variador de frecuencia (<i>VFD</i>)	46
3.3.2.6. Conmutador de red (<i>Switch</i>)	47
3.3.2.7. Controlador Lógico Programable (<i>PLC</i>)	48
3.3.2.8. Interfaz Máquina Usuario (<i>HMI</i>)	49
3.4. Diseño del diagrama eléctrico	50
3.5. Desarrollo matemático para el control del sistema	54
3.5.1. Función de transferencia de la variable temperatura	55
3.5.2. Función de transferencia de la velocidad de giro de la banda	58
3.6. Programación del <i>PLC</i>	65
3.6.1. Diagrama escalera para la programación del <i>PLC</i>	67
3.6.2. Instrucciones personalizadas	69
3.7. Conclusión	71
Capítulo IV. Resultados	72
4.1. Planta del sistema	73
4.1.1. Lámparas radiando energía calorífica	74
4.1.2. Banda de pasto sintético	80
4.2. Sistema de control implementado	81
4.3. Interfaz entre el usuario y la máquina	83
4.4. Ejecución del proceso	84
4.5. Presentación del horno prototipo	85
4.6. Conclusión	87

Capítulo V. Conclusiones.....	88
5.1. Conclusiones generales.....	89
5.2. Aportaciones.....	90
5.3. Recomendaciones a trabajos futuros.....	90
Bibliografía.....	92

Índice de figuras

2.1.	Sistema de lazo cerrado de un horno.....	12
2.2.	Sistema de control de lazo cerrado de un horno.....	14
2.3.	Sistema de control digital en lazo abierto.....	15
2.4.	Respuesta escalón implementado a un sistema digital de primer orden en diferentes retardos en una entrada escalón comparada.....	16
2.5.	Comportamiento del sistema según su muestreo.....	17
2.6.	Sistema muestreado con tiempos altos.....	18
2.7.	Comparación de señal analógica, cuantificada, muestreada y digital.....	19
2.8.	Procesador de un <i>PLC</i>	22
2.9.	Diagrama de contactos (<i>Ladder Diagram</i>).....	24
2.10.	Diagrama función de bloques (<i>FBD</i>).....	25
2.11.	Lenguaje lista de instrucciones (<i>IL</i>).....	25
2.12.	Lenguaje de programación avanzado estructurado.....	26
2.13.	Lenguaje de programación en diagrama de secuencia lógica funcional.....	26
3.1.	Diagrama de etapas del proyecto.....	34
3.2.	Sistema de control del prototipo en diagrama a bloques.....	35
3.3.	Prototipo para horno de acabado final.....	37
3.4.	Curva de capacidad de carga del motor.....	44
3.5.	Pantalla de monitoreo del sistema de control.....	50
3.6.	Diagrama a bloques del diagrama eléctrico del sistema de control.....	53
3.7.	Diagrama a flujos del programa del sistema de control.....	66
3.8.	Instrucciones en un escalón en el lenguaje de programación diagrama escalera.....	68
3.9.	Dos o más instrucciones en paralelo es una rama.....	68
3.10.	Diagrama a flujo para la lectura de la temperatura del sistema.....	70
3.11.	Diagrama a flujo el control de velocidad del motor del sistema.....	70

4.1.	Planta del horno prototipo	74
4.2.	Temperatura emitida por la lámpara infrarroja	76
4.3.	Resultados de colocación de las lámparas en el horno prototipo	77
4.4.	Posición de las lámparas dentro del horno	78
4.5.	Lámparas colocadas dentro del horno	79
4.6.	Banda de tapete de pasto sintético en rodillo sobre el eje del motor	81
4.7.	Sistema de control para el horno prototipo	82
4.8.	<i>GUI</i> del sistema de control para el interfaz máquina-usuario <i>HMI</i>	83
4.9.	Prototipo armado	86

Índice de las Tablas

3.1.	Lista de entradas y salidas al sistema de control.....	36
3.2.	Comparación del sistema real al sistema de prototipo.....	39
3.3.	Velocidad síncrona.....	44
3.4.	Dirección de <i>IP</i> de los dispositivos del proyecto.....	47
3.5.	Lista de parámetros de los dispositivos de alta potencia.....	51
3.6.	Listado de los componentes físicos para el control del sistema.....	52
3.7.	Variables a controlar en el proceso.....	54
3.8.	Equivalencias de temperatura y corriente de salida.....	55
3.9.	Parámetros del motor a utilizar.....	59
3.10.	Relación de frecuencia y revoluciones por minuto del motor de $\frac{1}{4}$ <i>HP</i>	59
3.11.	Relación de frecuencia y revoluciones por minuto del motor con reductor <i>40:1</i>	60
3.12.	Ejemplos de interpretación de la frecuencia según el <i>PLC</i> y el variador de frecuencia.....	63
4.1.	Temperatura radiada de la lámpara a una distancia desde el centro.....	75
4.2.	Parámetros que se pueden modificar por medio del <i>HMI</i>	84

Capítulo I

Introducción

Un control de procesos a lo largo del tiempo se han hecho más sofisticados, complejos y muy costosos, pero más eficientes. Prácticamente en cada actividad humana se encuentran con sistemas autómatas que ayudan a la comodidad del integrante. En el transcurso de los tiempos, las actividades humanas han requerido de técnicas que cumplan para desarrollar productos o servicios que ayuden al consumidor. Se desarrollan técnicas que estandarizan la forma de trabajo para el desarrollo de sistemas, como es el caso de estándar de programación *IEC 61131-3* utilizado en el desarrollo y análisis de control de sistemas sofisticados [1].

Los acontecimientos históricos que influyeron a un desarrollo rápido de la teoría de control, fueron fuertemente afectados por la preocupación de los griegos y árabes para la medición exacta del tiempo comprendiendo *300 AC.* hasta *1200 DC.* La preocupación del hombre por comprender el espacio y tiempo fue de gran importancia para estas sociedades. La tecnología ha tenido un incremento exponencial al desarrollo de la comunicación de masas dentro de la primera y segunda guerra mundial, ya que en éstas fechas la sociedad establecía un lugar en la comunidad global. No obstante, la llegada del microprocesador es cuando comenzó a desarrollarse la nueva era digital [2].

La época industrial desarrolló diferentes mecanismos y procesos para el desarrollo de varios productos [2].

Esta tesis aporta al conocimiento de una máquina para el acabado final de pasto sintético. Se requiere de un proceso específico, para producir pasto sintético que sea lo más similar al pasto natural. Este tipo de pasto sintético es utilizado en campos deportivos, en plazas y en cualquier lugar de forma decorativa. El desarrollo tecnológico para la producción de tapete de pasto sintético, se enfoca en la parte del acabado final, es decir, después de tejer las hebras. El acabado final consiste en impregnar una sustancia, ya sea poliuretano o látex especializado en esta aplicación, para que sea procesado dentro de un horno de alta temperatura y que se seque en la superficie posterior del pasto sintético. El control del proceso de secado de una sustancia sobre la superficie posterior del tapete de pasto sintético será el tema principal de esta tesis. El desarrollo del control para el proceso de secado, se logra con la construcción de un sistema comprendido por lámparas infrarrojas, un motor-reductor y un sistema de control. Estos elementos combinados desarrollan un prototipo para el estudio y funcionamiento del secado de la sustancia en la parte posterior del pasto sintético [2].

1.1. Antecedentes

El pasto sintético es también conocido como césped artificial, pasto artificial, césped sintético o hierba artificial considerado como una alfombra producido por la industria que iguala al césped natural pero, éste es fabricado con materiales sintéticos. Su uso frecuente se presenta en campos deportivos, zonas comerciales y residenciales. Su primer uso fue en el año de 1965, en Houston, Texas. Fue popularizándose cada vez más en los años 70, pero no fue aceptado hasta el siglo XXI. Donde nuevas superficies artificiales, se desarrollaron empleando arena y caucho. A esto se le llamo “Tercera Generación” del pasto sintético. Hoy en día, las fibras son de polietileno, pudiendo llegar a poco más de 5 centímetros de largo, que se tejen en una tela recubierta llamada “backing”. Cada fabricante cuenta con métodos diferentes

para el desarrollo del pasto, donde se pueden observar las diferencias en los parámetros de la alfombra, pudiendo tener variaciones en la altura y en la forma de la fibra, diferencia de peso y densidad en las puntadas; pero todas éstas diferencias deben de cumplir con unos requisitos de durabilidad y propiedades mecánicas. Por éstas razones es necesario la creación de varias pruebas y prototipos que ayuden a determinar las propiedades necesarias para determinar los parámetros de entrada y salida del sistema, en la producción correcta del césped artificial [3].

El proceso de fabricación del pasto sintético tiene tres etapas importantes siendo las etapas: “*tufting*”, “*proceso de acabado*” y “*la instalación final, embalado y transporte*”. La sección “*tufting*”, corresponde a varias bobinas de hilo sintético verde, se colocan en una fileta de la máquina; donde el hilo es conducido por unos tubos hasta cada una de las agujas, que se encuentran a lo largo de un telar que mide entre *12 y 15 pies*. La máquina alimentada del “*backing*” del ancho correspondiente, actúa como soporte, y la máquina procede a tejer el hilo. Esto, ya tejido, se le llama tapete de césped artificial. A medida que las agujas van tejiendo los hilos a través del “*backing*”, generan grandes cantidades de bucles, y son cortados mediante unas hojas de navajas resistentes y adheridas a unos ganchos, que están sincronizados con la tejedora del hilo. Después de este proceso, el pasto sintético se transporta para ser llevado a otra etapa. La siguiente etapa es el proceso de acabado, cabe resaltar que en esta etapa, es el campo de estudio del presente documento. Esta etapa de fabricación se da por finalizado el pasto artificial. Para darle mejor calidad y mejorar la adhesión del hilo con el soporte primario o también conocido como “*backing*”, una máquina impregna una capa fina de poliuretano sobre la parte posterior del tapete de pasto sintético. Esta máquina regula y controla la cantidad de la sustancia empleada sobre la parte trasera del césped artificial. Inmediatamente la superficie trasera se expone a un horno de alta temperatura, calentado por radiación infrarroja, para que se seque la sustancia sobre la superficie; provocando la adhesión de la sustancia sobre el “*backing*” que sostiene las hebras del pasto. Inmediatamente saliendo del horno, el material está en temperatura alta, por lo que es fácil de perforar orificios en determinadas distancias, para drenar el agua que cae sobre el pasto, una vez ya

instalada. Después de esta etapa y antes de su empaquetado se revisa detalladamente y es embalado en rollos; se etiqueta con sus características y referencias. A esta etapa se le llama instalación final, embalado y transporte. El desarrollo de máquinas para la producción de este producto a avanzado constantemente en su eficiencia y en su forma de producir con técnicas mejoradas a las anteriores. Mostrando diseños de ingeniería, desarrollo en el control de calidad y de procesos, se abre oportunidades de estudio y desarrollo tecnológico para máquinas especializadas a este producto [4].

1.2. Planteamiento del problema

Actualmente, se desarrollan varios métodos para producir tapete de pasto sintético. Es necesario determinar varios parámetros de control con el método adecuado para producir alfombra de césped artificial. De todas las etapas para producir pasto sintético el más crítico, en la etapa de proceso de acabado final, es el secado. En la etapa de secado, constituido por un horno se encuentra varias variables a controlar que son la temperatura, humedad y tiempo de secado. Combinando las tres variables a controlar se tendrían variables derivadas más complejas de predecir, como pueden ser velocidad de sincronización, velocidad de producción, energía consumida por metro cuadrado, temperatura superficial y temperatura ambiente encerrada en el horno, predicción de tiempo de estabilidad de la temperatura.

Un método que ayude a desarrollar el estudio de las variables a controlar y las variables derivadas, es indispensable para desarrollar varios estudios e investigaciones de trabajo para el desarrollo futuro de las máquinas productoras de pasto sintético. Este método es limitado en el desarrollo científico, ya que la información para el desarrollo de producción del pasto sintético puede decirse que es privado.

El desarrollo científico utiliza varios métodos para el análisis y estudio de diferentes fenómenos físicos. Lo importante es como analizar los fenómenos

físicos utilizando los métodos necesarios para poder controlar todo tipo de variables.

Los materiales a procesar provocan varias perturbaciones al sistema, por ejemplo, supóngase que entra el tapete de pasto sintético con una sustancia “X” con determinado grosor de material impregnado; pudiera ser el caso que la sustancia varié su grosor, por lo que el sistema tendría que compensar la potencia, ya sea aumentándola o disminuyéndola. De igual manera podría ocurrir que la sustancia “X” es reemplazada por la sustancia “Y”, de igual manera el sistema es obligado a ser compensado para una correcta adhesión a la superficie primaria.

En el presente trabajo se observa, analiza y desarrolla un prototipo que cumpla la función de un horno, para secar el adhesivo del césped sintético en el proceso de acabado final, controlado por un *PLC* (controlador lógico programable) y analizando lo elemental de un horno real para el estudio del comportamiento del césped sintético. Utilizando las redes de Petri, y el estándar *IEC 61131-3* se pretende desarrollar un prototipo que permita estudiar el comportamiento del césped sintético en el horno y resolver las siguientes preguntas:

- ¿Cuál es el método adecuado para el análisis correcto del comportamiento del pasto sintético en la etapa del proceso de acabado final?
- ¿Cuánta energía se requiere para dar una eficiencia en el acabado final del pasto sintético?
- Por tipo de sustancia implementada y grosor, ¿Cuánta energía se requiere para mejorar la velocidad de curación de la sustancia sobre la superficie?
- ¿Cuál es la velocidad de producción optima para el pasto sintético?
- ¿Qué elementos se necesitan para el desarrollo del prototipo?

Implementando los métodos se pretende resolver el problema descrito anteriormente.

1.3. Ventajas del desarrollo del prototipo

Es más factible realizar pruebas en sistemas de pequeña escala que en los sistemas grandes. En el estudio de pruebas de las sustancias aplicadas al pasto sintético, es más práctico y sencillo desarrollarlos en un prototipo especializado en el sistema.

Algunas de las ventajas del uso del prototipo son:

- Permite desarrollar sistemas, partiendo de ideas poco claras y cambiantes.
- La información complementaria que otorga, apoya las estimaciones de esfuerzos de todas las áreas de trabajo.
- Son sencillos de abordar para el usuario final.
- El desarrollador del proyecto, trabaja activamente en la construcción del prototipo, ya que lo puede ver, y dependiendo de este, se utiliza desde el primer momento.
- Se minimiza la incertidumbre o el riesgo de la implementación.
- Su aplicación se redunda a una mayor satisfacción para el usuario final, por su activa participación con el producto.
- Proporciona un mayor conocimiento del sistema con menor tiempo de aprendizaje.
- Permite a todos los involucrados en el proyecto a entender bien y mejorar el problema antes de su implementación final.

Estas ideas sobre el prototipo ayudan a una mejor enseñanza y respuesta para entender el problema final.

1.4. Objetivo

La presente tesis enfoca los siguientes objetivos generales y específicos descritos a continuación.

1.4.1. Objetivo general

Diseñar e implementar un sistema prototipo, aplicando métodos de programación estructurada para el control de velocidad y temperatura que sincronice un proceso simulador de la etapa de acabado final. Solo siendo enfocado en la etapa del horno, o secado de la sustancia impregnada sobre el soporte primario del tapete de pasto sintético.

1.4.2. Objetivos específicos

- Generar un sistema para procesar el polímero impregnado sobre el soporte primario del césped sintético, que pase por un horno que adhiera la sustancia con el soporte.
- Diseñar un horno prototipo, que permita el análisis de pruebas para el cálculo de temperatura con el propósito de mejorar el procesamiento y velocidad lineal en la adhesión del polímero sobre el soporte principal del tapete de pasto sintético.
- Desarrollar un modelo matemático, para determinar la energía que consumen las lámparas infrarrojas utilizadas en el horno prototipo.

- Determinar distancia y la altura entre lámparas que debe de tener la superficie para una mayor eficiencia.
- Desarrollar un sistema con un *PLC* que permita el control del horno.
- Determinar un método para la sincronización de velocidad de un motor.
- Implementar un sistema de control para un motor que sincronice la velocidad de producción y curado.

1.5. Justificación

Las empresas productoras de césped artificial, requieren de herramientas que analicen los diferentes materiales de producción para mejorar los procesos y la calidad de producto. Se requiere estudios del proceso para el desarrollo de este producto.

La documentación técnica de las máquinas productoras de pasto sintético es insuficiente y con esta investigación se contribuirá desarrollo tecnológico en la producción de pasto sintético. El cual utiliza algoritmos de control de temperatura *ON-OFF* con histéresis y variación de velocidad lineal en la banda transportadora de pasto sintético.

1.6. Limitaciones

El presente trabajo acota las siguientes recomendaciones:

- Aunque el diseño del prototipo sea de escala pequeña. Es importante tener puntos de vista para todo tipo de condiciones.

- Como el prototipo es pequeño, el tiempo de exposición de la radiación infrarroja sobre el soporte principal del pasto artificial cuando este en movimiento, será mucho menor que en el real.
- El método de impregnado será manual, ya que, el presente trabajo no presentará un desarrollo científico en la etapa de impregnado, por lo que el grosor variará dependiendo de la consistencia que se empalme la sustancia.

1.7. Metodología de trabajo

Para poder desarrollar con éxito el trabajo de tesis, se muestra la lista siguiente, una metodología a seguir para el cumplimiento de los objetivos expuestos en este capítulo.

- 1) Obtener información para el desarrollo del trabajo, ya sea de artículos, páginas de internet confiables de empresas que trabajen en este sector.
- 2) Conocer el sistema completo para la obtención de información y resolver dudas de operación.
- 3) Desarrollar el diseño del prototipo, aclarando el equipo a utilizar y el consumo energético que se utilizará.
- 4) Diseñar la construcción técnica de control.
- 5) Armar el prototipo.
- 6) Determinar un protocolo de seguimiento para probar el prototipo.
- 7) Hacer pruebas de funcionalidad del prototipo.
- 8) Realizar diferentes experimentaciones, donde se someta cada una de las diferentes aplicaciones bajo este sistema.
- 9) Validar los resultados de la experimentación.

1.8. Organización del documento

El trabajo de investigación consta de 5 capítulos descritos conforme a la información mostrada.

En el *capítulo II* se presentan los conceptos básicos de la investigación. Basándose en los componentes que completan el prototipo, se identificarán las herramientas para la construcción del horno.

El *capítulo III* presenta el diseño para la construcción del prototipo, en el cual consiste en el desarrollo de la estructura e identificación del hardware y software que se utilizará para la implantación del sistema completo para la producción del césped artificial.

El análisis de los resultados obtenidos en el desarrollo y diseño del prototipo para las experimentaciones se presentan en el *capítulo IV*.

Las conclusiones del desarrollo tecnológico del prototipo implementado en esta tesis se encuentra en el *capítulo V*.

Capítulo II

Conceptos teóricos del proyecto

En la industria, existen infinidad de sistemas de manufactura que requieren de procesos automáticos repetitivos controlados por algoritmos, sistemas robustos y flexibles, con capacidad de modificaciones en su secuencia de programación. El controlador normalmente utilizado por las industrias para sus procesos es el controlador lógico programable (*Programmer Logics Controller, PLC*). Se encuentran aplicaciones para controlar desde motores hasta sistemas de control de manera inalámbrica [5].

Nuevos sistemas cada vez más complejos para simular, desarrollar e implementar sistemas de automatización industrial, fomentan retos que permiten emplear técnicas con mejor generalidad para los sistemas [6]. Estos controladores ofrecen funciones predeterminadas para el control de un proceso, como por ejemplo el control *ON-OFF*, secuencias controladas por eventos o controles *P, PI, PID*, entre otros [7].

Los modelos matemáticos permiten analizar el comportamiento de problemas físicos, químicos, etc. La formalización para el entendimiento matemático a un problema, en términos generales es casi siempre complicado para el modelado matemático [8].

En el capítulo II tiene como objetivo tener en claro las definiciones utilizadas en la tesis. En las secciones 2.1 y 2.2, se ven los temas para identificar un sistema de control y un control digital. En la sección 2.3 se menciona la manera de poder operar un programador lógico programable. Para

determinar un modelo matemático de una planta se indica en la sección 2.4. Este capítulo termina en la sección 2.5 con una conclusión.

2.1. Sistemas de control

El desarrollo de sistemas modernos demanda técnicas sofisticadas en plazos cortos. El control automático en los sistemas, es conformado por elementos interconectados, formando un sistema. Un sistema puede ser controlado y activado con las señales de entradas pudiendo ser un sensor, para obtener una respuesta en su salida. Se representa con diagrama a bloques, como se muestra en la figura 2.1 [9].

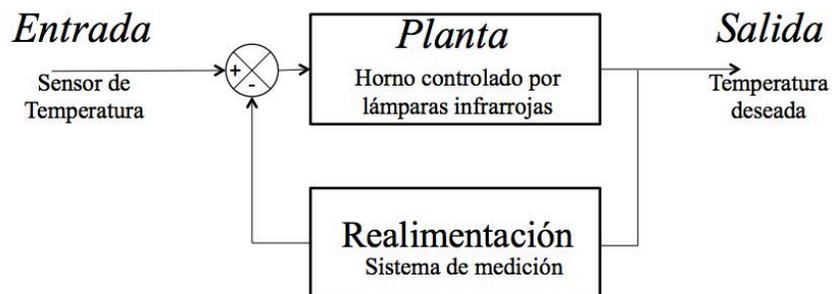


Figura 2.1. Sistema de lazo cerrado de un horno.

La figura 2.1 representa la forma más básica para representar un sistema, mediante entradas y salidas en un bloque. El sistema se puede representar como un bloque que tiene una entrada y una salida. Se dice que es un bloque ya que en realidad no es importante que tiene dentro de ella, sino lo importante es la relación entre la salida y la entrada. La realimentación es un medio para medir la señal relacionada con la variable de salida, que se compara con la señal de referencia. Se considera un sistema de control, siempre y cuando la salida pueda ser controlada de modo que pueda presenciar un cambio o valor definido. El término sistema se utiliza para describir un grupo de componentes que interactúan entre sí, de esta manera se vuelve a mencionar que lo importante es la relación entre las entradas y las salidas [10].

Para continuar es importante entender los siguientes términos:

- **Planta:** Es un objeto físico que permite realizar una tarea determinada.
- **Proceso:** Es una serie de operaciones coordinadas, para el desarrollo de una salida.

Con los términos anteriores se entiende la diferencia entre planta, proceso y sistema. Esta tesis propone un sistema completo de la planta y su proceso.

Para un sistema de control se describen los siguientes elementos:

- **Proceso a controlar:** Es el proceso que se quiere controlar para obtener una salida determinada.
- **Variable controlada:** Variable en la que se quiere mantener una condición específica.
- **Variable manipulada:** Señal que se modifica para mantener en un valor específico a la variable controlada.
- **Señal de referencia:** También llamado “SetPoint” y es el valor en el cual se quiere mantener la variable controlada.
- **Error o señal actuadora:** esta es una diferencia entre la señal retroalimentada y la señal controlada.

- ***Perturbación:*** Es ruido en el proceso, que altera directa o indirectamente a la variable controlada.
- ***Elementos de medición:*** Produce una señal relacionada con la condición de la variable controlada.
- ***Controlador:*** Es el que decide que acción tomar cuando se recibe una señal errónea.
- ***Entrada:*** Es la señal que se aplica al sistema.
- ***Salida:*** Respuesta obtenida del sistema.

Para controlar un sistema como el de la figura 2.1, es necesario agregar una etapa denominada controlador. Un horno prototipo es el sistema a controlar en esta tesis y tiene como salida la temperatura; el controlador debe de mantener una temperatura de salida deseada para poder manipular el producto que se producirá. En la figura 2.2 se muestra un diagrama a bloques de un sistema de lazo cerrado con su controlador del un horno prototipo.

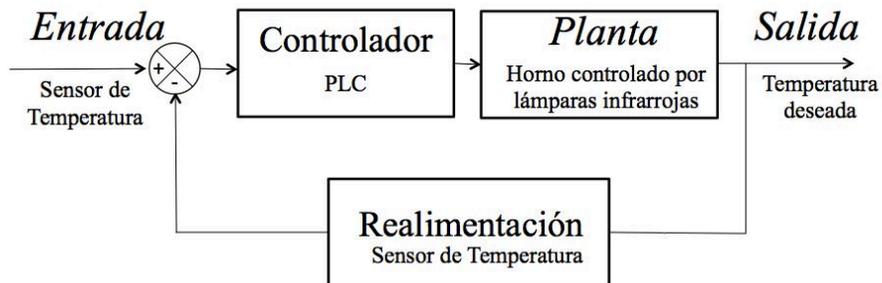


Figura 2.2. Sistema de control de lazo cerrado de un horno.

2.2. Control digital

Los sistemas de control se utilizan cada vez más con microprocesadores. En la figura 2.3 se muestra la forma básica que toma un sistema de control digital [11].

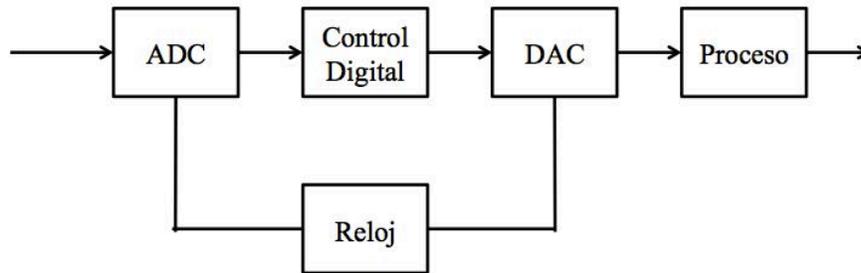


Figura 2.3. Sistema de control digital en lazo abierto.

Por sus siglas en inglés “ADC” y “DAC” significan Convertidor Analógico a Digital y Convertidor Digital a Analógico respectivamente. El reloj es utilizado para proporcionar una señal en pulsos para que los convertidores puedan leer o escribir un dato. El sistema se ejecuta en instantes de muestreo, es decir, la velocidad del pulso es la velocidad de muestreo del sistema. Para la primera fase que es el convertidor Analógico a Digital. Éste dispositivo actúa sobre una variable física, que puede ser un voltaje o corriente dependiendo de la situación, y es convertido a un número binario. La conversión de “ADC” ocurre repetitivamente en instantes de tiempo en T segundos. T es nombrado el tiempo de muestreo y $1/T$ es la frecuencia de muestreo en ciclos por segundo o Hertz (Hz). El convertidor Digital a Analógico “DAC” convierte un número binario a un voltaje análogo o a un retenedor, que mantiene el mismo voltaje en

todo periodo muestreado; el resultado es aplicado a un actuador. Los sistemas controlados por computadora son descritos como se mostró en la figura 2.3. La señal de salida del proceso puede ser en señal de tiempo continuo o en tiempo discreto. Estos sistemas pueden ser nombrados sistemas muestreados, y a este término es sinónimo de sistema controlado por computadora. En los sistemas de control digital, existen algunos ejemplos en los que no pueden ser totalmente comprendidos en la teoría de control continuo, a pesar de que el proceso sea lineal, sea invariante en el tiempo y sea también continuo. Por la presencia del reloj hace que un sistema controlado por computadora sea variante en el tiempo [11].

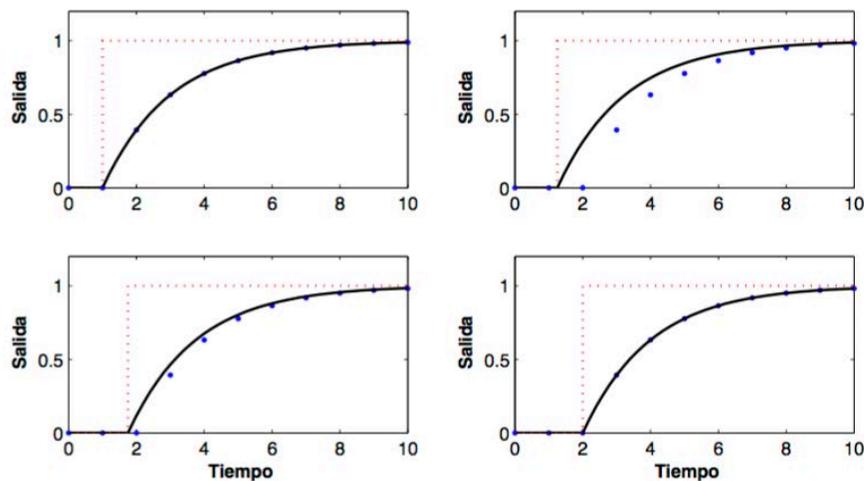


Figura 2.4. Respuesta escalón implementado a un sistema digital de primer orden en diferentes retardos en una entrada escalón comparada.

En la figura 2.4, si la señal de entrada es retardada, la señal de salida también será retardada, esto sucede solo sí el retardo es múltiplo del período de muestreo, la entrada es independiente del momento en que se aplica. Un

muestreo pequeño otorga más información al sistema, pero existen muchos factores que puedan negar este factor, como la computadora, la complejidad del sistema, etcétera. El problema se origina cuando el muestreo se vuelve más grande y el sistema empieza a ser distinto y puede llegar a ser inestable. En la figura 2.5 se muestra una comparación de señales [11].

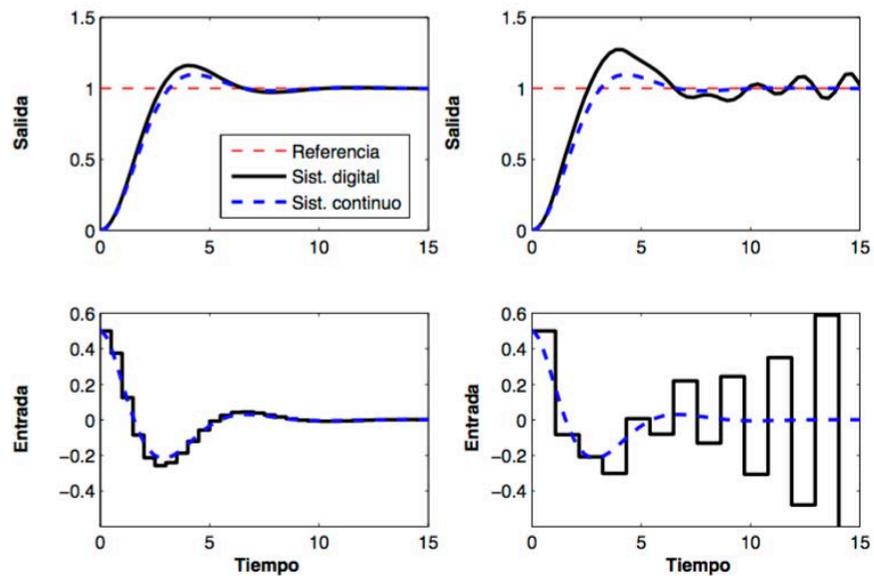


Figura 2.5. Comportamiento del sistema según su muestreo.

La Figura 2.5 parece que el sistema analógico es superior al sistema digital, pero esto no es ciertamente en todos los casos. Las acciones periódicas naturales del control son utilizadas para obtener estrategias de control con mejor funcionamiento. Si se considera el mismo análisis de la figura 2.5, pero con tiempo de muestreo mucho mayor. Su ajuste es mucho más rápido que un comportamiento de sistema continuo. En la figura 2.6 el sistema se estabiliza en

cuanto llega al valor de referencia en menor tiempo que el sistema continuo [11].

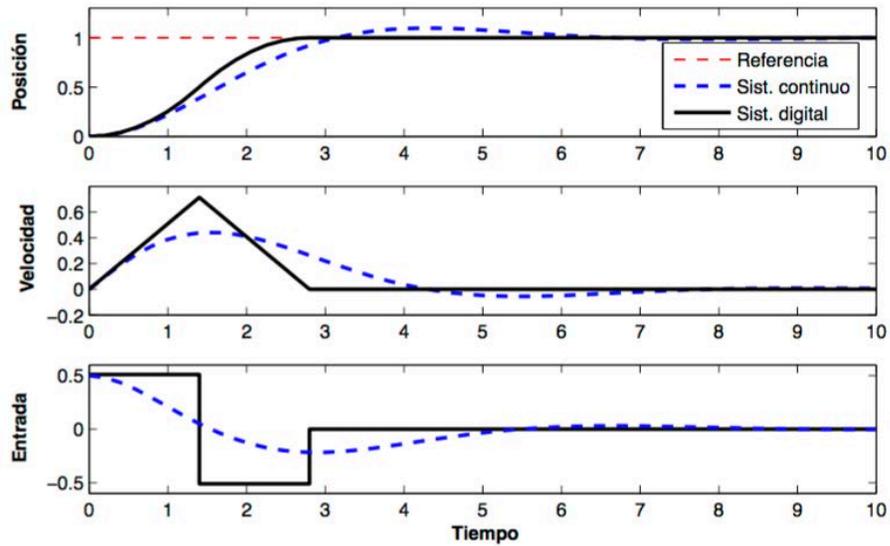


Figura 2.6. Sistema muestreado con tiempos altos.

En la mayoría de los problemas que se presentan en sistemas de control digital son en su mayoría problemas de cálculo. Una señal discreta en el tiempo $f(t)$ es una señal cuya variable independiente t solamente puede tomar valores dentro del conjunto $\{\dots, -3h, -2h, -1h, 0h, 1h, 2h, 3h, \dots\}$. Es decir, $t = kh, k \in \mathbb{Z}$. Donde \mathbb{Z} es el conjunto de los números positivos, negativos y cero. Para diferenciar una señal muestreada y una señal digital, se define que la señal muestreada es una señal discreta cuyo dominio toma valores en el intervalo $(-\infty, \infty)$, y la señal digital es una señal discreta con valores cuantificados. Observar figura 2.7 para identificar sus diferencias. Es muy común que los tiempos discretos y digitales se intercambien. El tiempo discreto

solo se emplea para el estudio teórico, y el término digital se utiliza en conexión con el hardware y software [11].

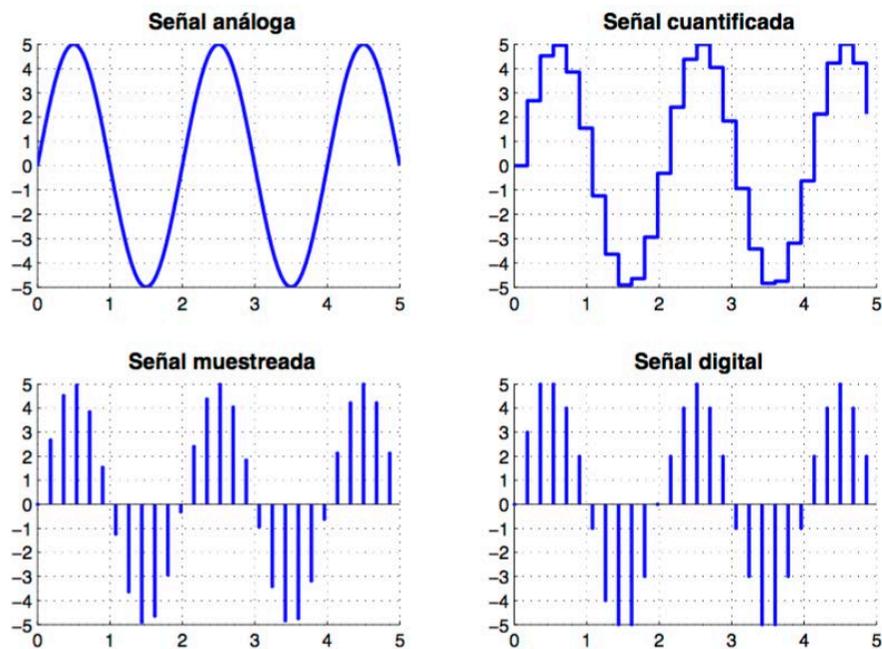


Figura 2.7. Comparación de señal analógica, cuantificada, muestreada y digital.

La señal analógica es un caso único de la señal en tiempo continuo. Prácticamente, se utiliza el término “Tiempo continuo” en vez de “Analógico” para la representación de esta señal. La señal cuantificada también es tiempo continuo, pero solo es cuantificada en amplitud. Una señal en tiempo discreto es donde la variable del tiempo t está cuantificada, si la amplitud adopta valores en un intervalo continuo, entonces es una señal muestreada. Una señal digital es una señal de tiempo discreto con amplitud cuantificada. Los sistemas de control

digital incluyen señales de tiempo continuo o en tiempo discreto, donde las señales de tiempo discreto están codificadas en forma numérica [11].

2.3. Controlador Lógico Programable

Actualmente, existe un método popular para desarrollar sistemas lógicos industriales. Éste método toma decisiones por codificación que son almacenadas en una unidad de memoria y ejecutadas en una unidad de procesamiento. De esta manera si es necesario hacer un cambio, solo se necesita hacer cambios a la codificación denominados cambios de software, implementados fácil y rápidamente solo con la ayuda de una computadora. Este método es denominado en ocasiones automatización flexible. Cuando es utilizado el método flexible, las series de instrucciones codificadas que controla el sistema se le llama programa. A estos sistemas que tiene este método se conoce como sistemas programables. Por lo tanto, si se tienen todos los componentes en un solo dispositivo para construir sistemas programables, a este dispositivo completo se le conoce como controlador lógico programable [12].

2.3.1. Hardware de un *PLC*

El controlador lógico programable se divide en tres partes: módulos de entradas y salidas, el procesador y el dispositivo de programación. A continuación se describirán cada uno de estos [12].

2.3.1.1. Módulos de entradas y salidas

Los módulos de entradas y salidas de un *PLC*, como objetivo tiene que interconectar los dispositivos industriales de alta potencia a dispositivos electrónicos de baja potencia, que procesa los datos para una ejecución lógica. El módulo de entrada tiene como propósito analizar los convertidores de señal incorporados en él, por lo general leen señales de $120 V_{ac}$ o $24 V_{cd}$ y son convertidas a señales digitales. Estos convertidores son aislados por optoacopladores, para mantener aislada el circuito de entrada y el procesador. Cada módulo de salida tiene un amplificador de salida que recibe una señal digital baja potencia del procesador, y es convertida a una señal de alta potencia. Estos dispositivos pueden ser operados ópticamente para ser aislados por *TRIACS* [12].

2.3.1.2. Procesador de un *PLC*

El procesador de un *PLC* ejecuta el programa como se muestra en la figura 2.8, la arquitectura del procesador del *PLC*. Para llevar a cabo este programa, el procesador debe almacenar las condiciones [13].

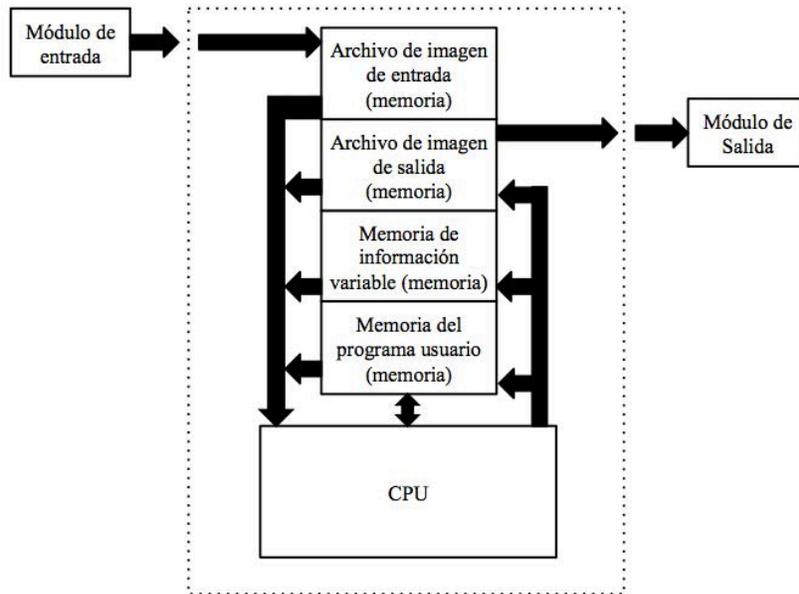


Figura 2.8. Procesador de un *PLC*.

Las condiciones de entrada son almacenadas en el archivo de la imagen de entrada. El procesador conoce las últimas condiciones de entrada debido a que las instrucciones del programa de usuario son contingentes bajo esas condiciones. Las condiciones de salida son almacenadas en el archivo de imagen de salida. Cuando un dato es almacenado en este archivo este se direcciona al módulo de salida. La unidad de procesamiento central *CPU*, ejecuta el programa de usuario. Éste actualiza una y otra vez el archivo de imagen de salida. Pero a su vez es necesario leer el estado de la salida, por lo que a su vez lee y escribe información en este módulo. La memoria del programa de usuario es llamada así al almacenamiento de la codificación lógica del *PLC* manipulada por el usuario. Para que un *PLC* pueda controlar un sistema, éste debe de contener una serie de instrucciones lógicas codificadas que constituyan el programa de operación. Para la organización de un programa, es conveniente agrupar las instrucciones como unos escalones de una

escalera, de ésta proviene un formato lógico escalera. En la memoria de información variable tiene como función almacenar los datos extras del *PLC* como un temporizador, el que cuenta el número de segundos que ha pasado y los acumula cuando es requerido [13].

2.3.2. Programación de un *PLC*

Los lenguajes de programación utilizados en los *PLC* han evolucionado iniciando a finales de los años 60's hasta la fecha. El estándar de programación fue creado por la Comisión Electrotécnica Internacional (*International Electrotechnical Commission, IEC*), que tiene como objetivo responder a la complejidad creciente de los sistemas de control y a la diversidad de autómatas programables incompatibles entre sí. Por lo que la solución adoptada fue estandarizar la programación y se optó por crear la norma *IEC 61131-3*, que es adoptada por los fabricantes de *PLC*. Actualmente el *IEC 61131-3* es un estándar de los autómatas programables y sus propios puertos de comunicación, incluyendo los lenguajes de programación utilizados. Ésta norma es dividida en cinco partes que en vista general, hardware, lenguaje de programación, guía de usuario y comunicación. El estándar *IEC 61131-3* es la base que estandariza los lenguajes de programación para la automatización industrial. Se definen cinco lenguajes de programación normalizados, que a su vez se agrupan en dos literales y tres gráficos estos son [1]:

- Lista de instrucciones (*IL*).
- Texto estructurado (*ST*).
- Diagrama de contactos (*LD*).
- Diagrama de función de bloques (*FBD*).
- Secuencia gráfica funcional (*SFC*).

Elegir un lenguaje de programación depende de diferentes criterios como son los conocimientos del programador, el problema que se debe de solucionar, el nivel del tipo de proceso, la estructura del sistema de control que se quiera manejar y la coordinación que se tiene con otros departamentos que estarán en contacto con el sistema. Los cuatro lenguajes de programación anteriormente mencionados, están relacionados y dan la posibilidad de resolver un problema en común según sea la habilidad del usuario [13].

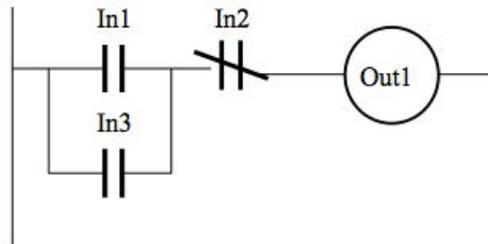


Figura 2.9. Diagrama de contactos (*Ladder Diagram*).

El diagrama de contactos (*LD*), mostrado en la figura 2.9, tiene origen en los Estados Unidos de América. Se basa en una representación gráfica de relevadores. En programas de *PLC* es común utilizar diagrama escalera. Se define que en cada escalón de la escalera opera una secuencia de compuertas que se lee de izquierda a derecha, y de arriba hacia abajo. En cada escalón debe iniciar con alguna entrada o bit de lectura y debe de finalizar con al menos una salida [13].

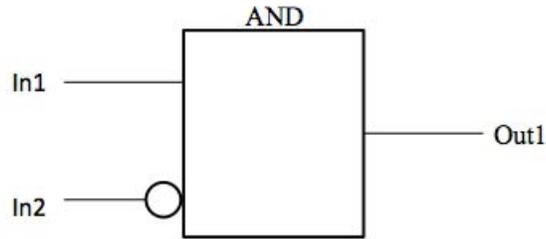


Figura 2.10. Diagrama función de bloques (*FBD*).

El lenguaje diagrama de función de bloques (*FBD*), como se muestra en la figura 2.10, son comunes en su uso en la industria con aplicaciones de flujo de información y control. Permite que el usuario pueda utilizar los elementos juntos y que parezcan circuitos eléctricos [13].

LD	In1
ANDN	In2
ST	Out1

Figura 2.11. Lenguaje lista de instrucciones (*IL*).

El lenguaje Lista de instrucciones (*IL*), como se muestra en la figura 2.11, es un lenguaje de bajo nivel similar al lenguaje máquina o también conocido como lenguaje ensamblador. Cuando se va a utilizar un sistema muy pequeño, éste es de mucha utilidad, o también se usa para declarar rutinas específicas del programa [13].

```
Out1 = In1 OR In3 AND NOT In2
```

Figura 2.12. Lenguaje de programación avanzado estructurado.

El lenguaje de texto estructurado (*ST*), como se muestra en la figura 2.12, es un lenguaje de alto nivel avanzado, éste contiene todos los elementos de programación de un lenguaje moderno como *PASCAL* o *BASIC*. Éste utiliza subrutinas para realizar diferentes partes de la función de control. Puede ser utilizado para codificar instrucciones muy complejas. Tiene operaciones como el *IF-THEN-ELSE*, *DO-WHILE*, *REPEAT-UNTIL* y operaciones booleanas como *AND*, *OR* y una variedad de datos específicos [13].

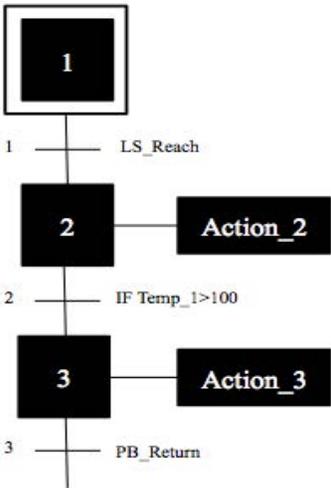


Figura 2.13. Lenguaje de programación en diagrama de secuencia lógica funcional.

El diagrama Secuencial lógico funcional (*SFC*), mostrado en la figura 2.13, es un lenguaje gráfico representado por medio de diagramas de secuencia de control en un programa. Este lenguaje está comprendido por tres elementos que son [7]:

- Etapa
- Transiciones
- Acciones

El elemento etapa, es el estado en que se presenta el proceso. Por ejemplo el proceso de un horno, tiene tres etapas, la etapa de inicialización, la etapa de calentado y la etapa de paro. Cuando el controlador recibe una señal de entrada, ésta empieza cada una de sus etapas iniciando desde la inicialización. Cada etapa puede tener o no tener una acción asociada. Una acción son las instrucciones que provocan al controlador ejecutar una actividad específica durante la etapa. Después de ejecutar la etapa pasa por una transición antes de avanzar a la siguiente etapa. La transición puede tomar la forma de una entrada variable, un resultado de una acción de previa acción o una condición. Así que para el ejemplo anterior, el controlador ejecuta la acción 2, solamente que la acción 1 reciba una entrada válida y la transacción 1 ocurra. Después de que el controlador termine la acción 2, esperará la transición que ocurra y seguirá a la siguiente etapa [7].

2.4. Modelo Matemático

Para dimensionar y calcular el comportamiento de un sistema de control es importante conocer la relación entre entrada y salida. A esta función se le expresa como función de transferencia. Existen dos métodos para calcular la función de transferencia del proceso, que son: modelado teórico e identificación experimental [14].

El modelado teórico utiliza las leyes de la física para determinar la función de transferencia. Estas leyes son encontradas normalmente en forma de ecuación diferencial, y es visto del mismo modo la relación entre entrada y salida. La ecuación diferencial que relaciona la entrada y la salida, se puede transformar con apoyo de la transformada de *Laplace* para determinar la función de transferencia. El método de identificación experimental se basa a partir de diferentes experimentos prácticos, y los resultados ayudan a encontrar la función de transferencia del proceso. En ciertos procesos es posible solo basarse en literatura del área de trabajo o solo con el hecho de revisar las hojas de datos. Para algunos procesos es conveniente combinar los dos métodos, ya que, el modelo teórico puede ser muy útil para el análisis de la función de transferencia para algunas partes del proceso, mientras que para otras partes la identificación puede ser una mejor opción. Es importante hacer una comparación del modelo matemático con el modelo experimental, por la razón de que el modelo matemático en ocasiones se hacen suposiciones para que las ecuaciones no sean complicadas, con esto el modelo matemático se aproxima a la realidad [14].

La mayoría de los sistemas físicos son lineales dentro de algún rango, a pesar de esto, todos los sistemas acaban siendo no lineales, si es que sus variables aumentan sin ningún límite. Por lo que cada sistema debe de considerarse el problema de linealidad y el rango de aplicación. Un sistema es definido lineal en términos de su excitación y respuesta. Para un circuito eléctrico, la excitación en la corriente de entrada y la respuesta es el voltaje. Puede determinarse una condición necesaria en función de la excitación y una respuesta. Un sistema representado por la ecuación (2.1) [15]:

$$y = mx + b \quad (2.1)$$

Con las ecuaciones (2.2) y (2.3), se utilizan para encontrar los valores de la ecuación (2.1).

$$x = x_0 + \Delta x \quad (2.2)$$

$$y = y_0 + \Delta y \quad (2.3)$$

La ecuación (2.4) se obtiene sustituyendo las ecuaciones (2.2) y (2.3) en la ecuación (2.1).

$$y_0 + \Delta y = mx_0 + m\Delta x + b \quad (2.4)$$

Los elementos mecánicos y eléctricos, son lineales pero los elementos térmicos y de fluidos no lo son [15].

2.4.1. Sistema térmico

Los sistemas térmicos son los que transfieren energía calorífica de un sistema a otro. Pueden ser procesos químicos, hornos, casas o calentadores de agua. Las señales de entrada y salida son la temperatura, la potencia calorífica y la energía calorífica. El balance de energía de los sistemas térmicos es el cambio de energía calorífica por unidad de tiempo equivale a la potencia inferida menos extraída mostrada en la ecuación (2.5) [14].

$$\Delta E = \Delta P \quad (2.5)$$

Lo que equivale a la ecuación (2,6).

$$\frac{dE}{dt} = P_i - P_e \quad (2.6)$$

Cuando se maneja la relación de balance de energía para sistemas sencillos se puede utilizar la relación de la energía calorífica de una cierta materia con la temperatura T mostrado en la ecuación (2.7) [14]:

$$E = T \cdot V \cdot c \cdot \rho \quad (2.7)$$

donde:

E = energía calorífica de cierta materia

T = temperatura de cierta materia [K]
 V = volumen de cierta materia [m^3]
 c = capacidad térmica [J/Kg K]
 ρ = densidad [Kg/m^3]

Se supone que el volumen, la capacidad y la densidad son constantes, se deduce la ecuación (2.8) [14]:

$$V \cdot c \cdot \rho \cdot \frac{dT}{dt} = P_i - P_e \quad (2.8)$$

La capacidad térmica y la densidad pueden estar en función de la temperatura y que en situaciones especiales existe intercambio de calor entre los gases. Con las ecuaciones anteriormente mencionadas, se obtienen los principios para obtener el modelo matemático del sistema [14].

2.5. Conclusión

Los modelos matemáticos permiten analizar el comportamiento de problemas en el entorno. Y con la formalización para entender los estados de un sistema se va complicando y se deben de recurrir a métodos que proporcionen ayuda en el desarrollo para el análisis del problema. Los controladores, pudiendo ser los *PLC*, se utiliza como una herramienta de procesos de datos para poder controlar sistemas que sean complejos como los descritos por algún modelo matemático calculado. La ventaja de los *PLC* es de tener un sistema de control digital que utiliza los convertidores analógico a digital, o convertidores digital a analógico que procesa los datos del sistema.

Capítulo III

Diseño del prototipo

El diseño del horno se someterá a pruebas de simulación de comportamiento mediante la construcción y la operación de un horno prototipo en el que se realizaron pruebas de sanado de diferentes sustancias adhesivas, como poliuretano o látex, empleadas para adherir las hebras de pasto sobre la capa de soporte primario o “*backing*”. Las pruebas realizadas al prototipo tienen como objetivo obtener información para el análisis de adhesión de las diferentes sustancias al soporte primario y obtener el tiempo de secado y la temperatura requerida para el sanado de los adhesivos. De esta manera se obtiene la velocidad máxima de producción del tapete de pasto sintético, según la sustancia utilizada y la potencia calorífica otorgada.

De acuerdo al *capítulo I* de la presente tesis, el desarrollo de un horno prototipo para el análisis de las sustancias empleadas como adhesivos y de la calidad del tapete de pasto sintético, se presenta en este capítulo. Donde se presenta el control de temperatura y velocidad de sincronía para el sanado de la sustancia. El control para éste prototipo se implementó con un control lógico programable, un método de control industrial explicado en el *capítulo II*.

En este capítulo se muestra el desarrollo del diseño e implementación del control para el prototipo. La primera parte se enfoca al modelo y diseño de la planta para mantener la temperatura, y la segunda cubre el diseño de control de la temperatura. La implementación del control de la planta está dividida en

interconexión de elementos para el control y en la programación para la toma de decisiones del sistema.

En este capítulo se presentará una introducción al diseño del prototipo en la sección 3.1. También se analizará el problema en la sección 3.2. En la sección 3.3 se presenta el diseño del prototipo donde se observan las características necesarias de los componentes del sistema. En 3.4 se muestra como se diseña el diagrama eléctrico del prototipo. En la sección 3.5 el modelo matemático es diseñado para ser implementado en la programación del *PLC* presentado en la sección 3.6. Al final del capítulo se presenta la conclusión.

3.1. Introducción al diseño del prototipo

Para construir sistemas electrónicos de control lógico es necesario combinar el diseño asistido por computadora, que facilita el diseño de los sistemas y métodos que describan el funcionamiento del sistema empleando lenguajes de programación. En la figura 3.1 se presenta un diagrama de operación para la elaboración de las diferentes etapas de un sistema electrónico de control lógico.

Primeramente es necesario elegir el hardware que se necesita, junto con los elementos que constituirán el sistema. A esta etapa también se le puede llamar configuración del control programable. Continuando, según sea la complejidad del control, se debe de elegir un lenguaje de programación; que esté asociado con los métodos de diseño para el programa del control descritos en el *capítulo II* [16].

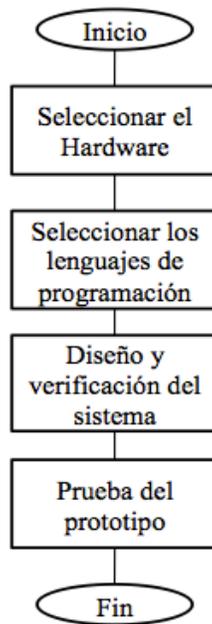


Figura 3.1. Diagrama de etapas del proyecto.

Seguidamente, se utiliza algún programa simulador para verificar el correcto funcionamiento del control propuesto. Por último, se implementa y prueba el prototipo, poniendo en marcha el proceso controlado por el sistema de control [16].

Todos los procesos que se caracterizan por proporcionar una salida con flujo continuo del producto son conocidos como procesos continuos. Este tipo de proceso es caracterizado por proporcionar y recibir salidas analógicas. Los sistemas asociados a este proceso se conocen como sistemas de control de procesos. Estos procesos pueden trabajar con o sin retroalimentación, según requiera su aplicación. La figura 3.2 representa un diagrama de bloques de un sistema de control de procesos. La variable del proceso [VP], cuyo valor se controla, se conecta al sistema de control y constituye una señal de

realimentación (*Feedback signal*). El valor que debe de obtener la variable del proceso está ajustado a un punto de referencia “*Setpoint*” [SP]. El sistema de control ejecuta un algoritmo y genera una variable del controlador [VC]. A través del actuador se manipula la variable [16].

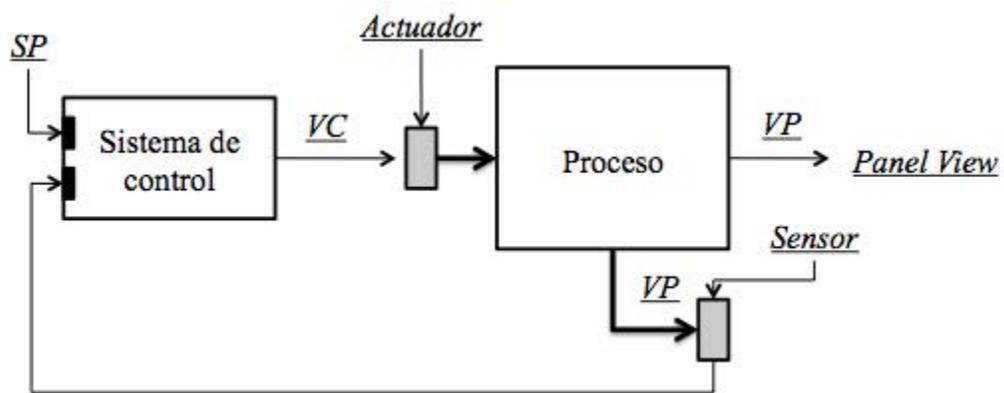


Figura 3.2. Sistema de control del prototipo en diagrama a bloques.

Mencionando las etapas de diseño del proyecto, se inicia con analizar el problema especificado en la tesis.

3.2. Análisis del problema

De acuerdo al *capítulo I*, en el planteamiento del problema; menciona lo siguiente:

“...observa, analiza y desarrolla un prototipo que cumpla la función de un horno, para secar el césped sintético en el proceso de acabado final, controlado por un controlador lógico programable (PLC) y tenga lo elemental de un horno real para el estudio del comportamiento en el horno el césped sintético.”

Explicando lo anterior, se desarrolla un horno prototipo que traslade una banda transportadora, compuesta por un tapete de pasto sintético, y concentre calor sobre la superficie inferior del tapete con dos lámparas infrarrojas. Se tiene en cuenta la lista de variables de entradas y salidas mostrada en la tabla 3.1:

Tabla 3.1. Lista de entradas y salidas al sistema de control.

Actuador / Sensor	Tipo	Lectura / Escritura
Sensor	Temperatura	Entrada
Actuador	Lámparas por radiación infrarroja	Salida
Actuador	Motor para traslado del tapete de césped sintético	Salida

De la tabla 3.1, se obtienen las variables de entrada y salida del sistema. Con estos datos se inicia el diseño para el control del horno.

3.3. Diseño del horno prototipo

Según el problema a resolver, es necesario desglosar las etapas del diseño del prototipo. Como se requiere calentar la superficie del “*backing*” del tapete de pasto sintético, es necesario considerar que se requiere manejar altas temperaturas, y como es un proceso continuo se considera una banda transportadora del tapete. Por lo que es necesario realizar un bosquejo para analizar la idea sobre la planta del horno prototipo, mostrado en la figura 3.3 se muestra en un plano bidimensional el bosquejo del prototipo.

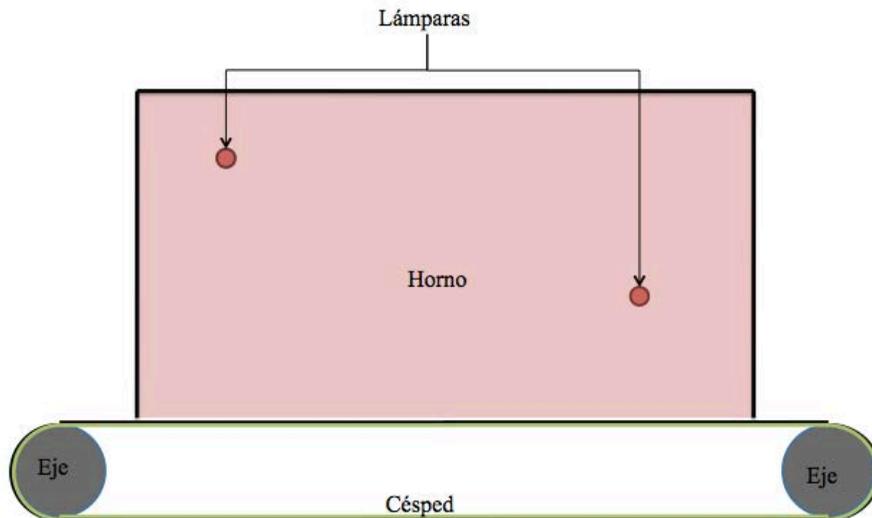


Figura 3.3. Prototipo para horno de acabado final.

Se muestra como el tapete de pasto sintético gira entre dos ejes. Y la parte del “*backing*” (la parte oscura) está hacia afuera, debido a que es la parte que es manipulada. Éste gira con una velocidad lineal medida en metros por minuto. La sustancia sobre la superficie del “*backing*” es vertida manualmente, ya que el objetivo de esta tesis es crear el sistema del horno, por motivos de objetivos de tesis no se estudia como adherir la sustancia sobre la superficie.

3.3.1. Características del horno

Normalmente en las industrias que producen tapete de césped sintético, utilizan hornos con lámparas de radiación infrarroja de onda corta a lo largo de un recorrido de *25 metros* dentro para completar el proceso de producción del tapete. Las lámparas dentro del horno están a una altura de *30 centímetros* sobre el tapete de césped sintético y según el fabricante la separación entre las lámparas varía, dependiendo de la potencia que se utilice. Un tapete de pasto sintético puede ser de ancho de *12 ó 15 ft.* y para poder manipular ambos, el ancho del horno industrial debe de ser de al menos de *15 ft. ó 4.5 metros*. Estos datos son obtenidos por los fabricantes de pasto sintético, referenciado a la empresa *GroeniTurf*.

Para elaborar un horno prototipo que proporcione información que ayude a mejorar la producción del pasto, es necesario hacer una simulación a pequeña escala dentro para un análisis más rápido. En este caso para una mejor maniobra del tapete de pasto, se reduce el ancho del pasto a *5 ft.* o más bien a *1.5 metros* y se reduce el largo del horno a *1.5 metros* el que dará ventaja a un espacio reducido para poder elaborar pruebas.

Normalmente las empresas productoras de césped sintético producen a una velocidad promedio de *5 metros por minuto*; y según la sustancia utilizada elevan la temperatura del horno según se requiera. Se propone que el sistema del horno prototipo alcance una temperatura de hasta *170 °C* y una velocidad de hasta *8 metros por minuto*, para así proporcionar mediciones con diferentes

variantes. Se elije este rango de temperatura ya que el punto de ebullición del agua es de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (el compuesto principal del *látex*) y a $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ es el punto de ebullición del poliuretano [23]. Y se elije la velocidad de *8 metro por minuto* para obtener datos por encima de lo que se utiliza en la producción real.

Para el control del sistema, se utiliza un *PLC* para que el sistema manipule a toda la planta y se le integra al *PLC* un control *ON/OFF* para controlar las lámparas que están dentro del horno.

Tabla 3.2. Comparación del sistema real al sistema de prototipo.

Datos	Real	Prototipo
Medidas del horno L x A x H	25 m. x 4.5 m. x 0.3 m.	1.5 m. x 1.5 m. x 0.8 m.
Temperatura interna	Hasta $140\text{ }^{\circ}\text{C}$	Hasta $170\text{ }^{\circ}\text{C}$
Velocidad de Producción	Hasta 5 m/min	Hasta 8 m/min
Control de temperatura	ON/OFF	ON/OFF
Control del sistema	PLC	PLC

De estos datos como referencia se parte para obtener un horno prototipo que pueda resolver el planteamiento del problema descrito anteriormente. La tabla 3.2 muestra la comparación del horno de fábrica con respecto al horno prototipo.

3.3.2. Características de los componentes del horno

Los componentes integrados para el funcionamiento del horno, son indispensables para el funcionamiento correcto del sistema. El sistema de control está integrado por un *PLC* y visualizado con un *Interfaz Máquina Humano (HMI)*. El sistema tiene de entrada un sensor de temperatura, con lazo de corriente; para calentar el producto, se utilizan lámparas infrarrojas de onda corta, además se utiliza un motor para controlar el movimiento de la banda transportadora compuesta por tapete de pasto sintético.

Las características comprendidas para integrar el sistema de control se identifican a continuación para el desarrollo del sistema de la misma manera se menciona la explicación de los componentes.

3.3.2.1. Lámparas

La función del horno es calentar la sustancia impregnada sobre el tapete de pasto sintético, para adherir las hebras con el soporte primario. Con las formas para calentar el material, se encuentran la transferencia de calor por radiación, conducción y convección. La más útil para este proceso es la transferencia de calor por radiación, ya que no se necesita contacto para transferir calor, ni agentes intermedios como el aire; y según su longitud de onda, la transferencia de calor penetra más al material procesado. Las lámparas de radiación infrarroja son una herramienta para transferir calor a objetos. Con la transmisión de la energía a través de radiación emitida por las lámparas, la eficiencia de la transmisión calorífica está influenciada por varios factores como la temperatura del objeto que calienta, la capacidad de absorción de calor del objeto calentado, la posición, proximidad y forma del objeto calentado respecto a la fuente irradiada [17].

Cumpliendo con las especificaciones del prototipo mencionadas al inicio de esta sección se hicieron pruebas de las lámparas de diferentes potencias. La potencia de las lámparas infrarrojas corresponde a su largo es de *86 Watts por pulgada*, como se requiere *1.5 metros*, se calcula cada lámpara de *5,000 Watts* de potencia [17]. Se observan los datos de medición de transferencia de energía calorífica de las lámparas en el *capítulo IV* en la figura 4.2, donde se concluye que se necesitan al menos 2 lámparas para abarcar toda el área de la superficie del tapete dentro del prototipo.

3.3.2.2. Sensor de temperatura

El sistema tiende a elevar la temperatura dentro del horno a alta temperatura, utilizado para pegar la sustancia impregnada sobre la base del pasto sintético. Pero si la temperatura es demasiado alta, el producto se puede dañar, o de otro modo, si la temperatura es muy baja, la calidad de adhesión de la sustancia sobre la base sería mala. Por lo que se tiene que mantener una temperatura óptima dentro del horno. Existen varias maneras de medir la temperatura de la superficie manipulada, sin hacer contacto con el material medido, ya que la sustancia está aun líquida, pudiendo dañar al sensor y la base del tapete, también la medición de temperatura es más lenta si el tipo de sensor de temperatura es por contacto. Para evadir estos inconvenientes mencionados, se maneja un sensor infrarrojo de medición de temperatura. Este sensor infrarrojo proporciona mediciones de temperatura de la superficie sin contacto, lo que da como ventaja la rápida medición y no dañar ni el producto ni el mismo sensor.

En el sistema, se opera hasta con *170 °C*, el sensor requiere operar dentro de este rango de temperatura. Existen diversos tipos de salidas en la recaudación de información por medio de los sensores, pudiendo ser lecturas de voltaje o corriente, para ambas existen diversas aplicaciones, en este caso se selecciona un sensor de temperatura con salida de *4 a 20 mA*, ya que la distancia

del cable para su lectura puede ser larga, lo que da ventaja tener una recaudación de datos por corriente y no voltaje [12].

3.3.2.3. Relevador de estado sólido (*SSR*)

Los relevadores de estado sólido (*Solid State Relay, SSR*) son interruptores electrónicos que conmutan el paso de corriente eléctrica para encender dispositivos eléctricos de alta potencia, cuando se aplique corriente en sus terminales de control. Con este actuador, permite el encendido o apagado de dispositivos de alta potencia con controladores de baja potencia. Tomando como referencia las especificaciones utilizadas de las lámparas, se necesita un actuador que tolere la potencia suministrada a las lámparas [6].

3.3.2.4. Motor para transportar el pasto

Para mover una banda conformada por el tapete de pasto sintético, dentro del diseño del horno, es necesario un motor eléctrico para moverlo.

La carga es la que define la potencia y velocidad del motor. Se debe de detallar el momento de inercia. En este caso se utiliza una banda constituida por dos ejes como se observa en la figura 3.3, donde el motor hace girar a uno de los ejes y con la banda tensionada provocará el movimiento del segundo eje, con lo que se consigue un movimiento en una misma trayectoria.

Para determinar la potencia del motor, es necesario iniciar con los datos preliminares referente al prototipo, en este caso se opera con una velocidad de hasta *8 metros por minuto* y los rodillos se elijen de *2.5 pulgadas* de diámetro y conociendo el largo de la banda que es de *3.16 metros* con un

ancho de 1.5 metros y un peso de 1.1 N/m^2 . Con los datos de la banda se calcula la potencia y el reductor del motor.

Primeramente, se calcula el perímetro del rodillo como se muestra en la ecuación (3.1).

$$P = 0.0635\pi m \quad (3.1)$$

Como la velocidad que se requiere es de hasta 8 m/min , se calcula las vueltas necesarias del rodillo para recorrer 8 metros , como se muestra en la ecuación (3.2)

$$\text{Velocidad}\left(\frac{m}{\text{min}}\right) = \text{rpm} * \text{perímetro} \quad (3.2)$$

$$\text{rpm} = \frac{\text{Velocidad}\left(\frac{m}{\text{min}}\right)}{\text{perímetro}} = \frac{8 \text{ m/min}}{0.0635\pi m} = 40.1 \text{ rpm} \quad (3.3)$$

Como se calculó en la ecuación (3.3), el rodillo debe de girar a $40.1 \text{ revoluciones por minuto}$ para alcanzar la velocidad de $8 \text{ metros por minuto}$.

La velocidad de $40.1 \text{ revoluciones por minuto}$ es muy pequeña para conectar a un motor. Basado de la figura 3.4, se observa que a revoluciones bajas la tensión que puede soportar el motor es baja aproximadamente a 70% y operar a frecuencias por debajo a 10 Hz no es práctico. Es conveniente utilizar un reductor de velocidad para operar correctamente el sistema. Para las revoluciones de giro del motor se determina a través de los polos que tiene el

motor. Como se muestra en la tabla 3.3 las revoluciones de giro del motor según el número de polos que tiene el motor [18].

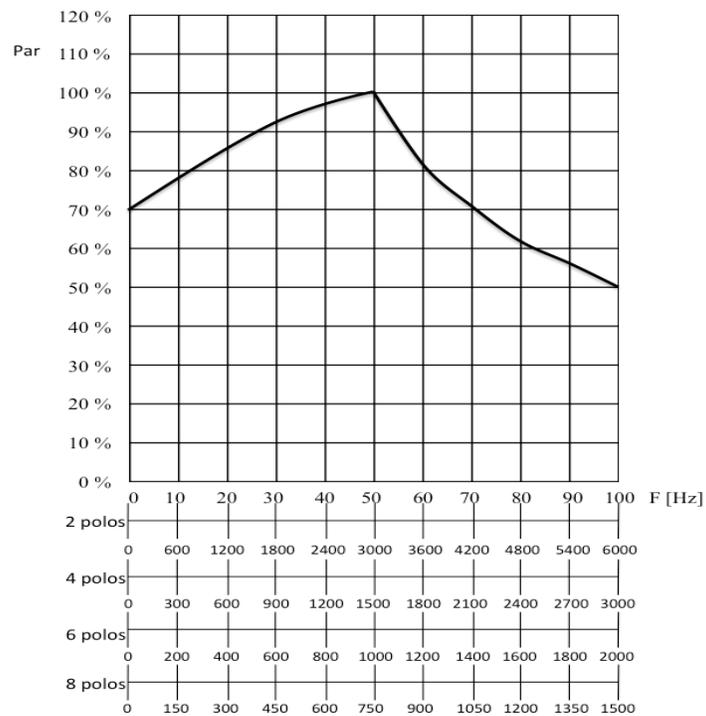


Figura 3.4. Curva de capacidad de carga del motor.

Tabla 3.3. Velocidad síncrona.

No. De Polos	Rotación síncrona por minuto	
	50 Hz	60 Hz
2	3,000	3,600
4	1,500	1,800
6	1,000	1,200
8	750	900

Relacionando a figura 3.4 y la tabla 3.3 se calcula un reductor de 40:1 ó 20:1 el primero para un motor de 4 polos y el segundo para un motor de 8 polos, pero por ahorro de presupuesto se elige el de 4 polos con reductor de 40:1 [18]. Se determina que el motor gira a 1800 rpm a 60 Hz y a 1500 rpm a 50 Hz.

Para el cálculo de la potencia del motor se mide el momento de inercia de carga de giro. Primeramente se calcula el peso total que cargará el motor, iniciando con el cálculo de los metros cuadrados de tapete de pasto sintético que se utiliza como se muestra en la ecuación (3.4).

$$A = Base * Altura = \left(1.5 m + 1.5 m + \frac{0.0635\pi}{2} m + \frac{0.0635\pi}{2} m\right) (1.5 m) = 4.8 m^2 \quad (3.4)$$

El peso del tapete se obtiene el peso total que cargará el motor como se muestra en la ecuación (3.5).

$$F = \frac{\text{Peso del tapete}}{\text{Área del tapete}} = \left(\frac{\text{Área del tapete}}{\text{cuadrado del tapete}}\right) \left(\frac{\text{Peso por metro}}{\text{cuadrado del tapete}}\right) = (4.8 m^2) \left(1.1 \frac{N}{m^2}\right) = 5.28 N \quad (3.5)$$

Obteniendo la tensión máxima a 8 metros por minuto, que equivalen a 0.133 metros por segundo se calcula en la ecuación (3.6).

$$T = F * d = 5.28 N * 0.133 m = 0.704 Nm \quad (3.6)$$

Dado que la potencia del motor se expresa en *kilowatts* y la velocidad en *revoluciones por minuto*. Se calcula la potencia del motor dado en la ecuación (3.7).

$$P[Kw] = \frac{T[Nm]*n[rpm]}{9550} = \frac{0.704 Nm*1800 rpm}{9550} = 0.133 Kw \quad (3.7)$$

$$P = 0.133Kw = 133 Watts = .178 HP \approx 0.25 HP \quad (3.8)$$

Con la ecuación (3.8) el motor puede operar el sistema completo sin dificultad con una potencia de $\frac{1}{4}$ HP, el motor es seleccionado con 4 polos para que opere con una velocidad síncrona de 1,800 revoluciones por minuto [19].

3.3.2.5. Variador de Frecuencia (VFD)

Un variador de frecuencia (*Variable Frequency Drive, VFD*), se puede decir que es un actuador inteligente, ya que este hace toda la operación para el control de velocidad, dirección de giro, potencia enviada y algunas secuencias para el control de motores de corriente alterna.

En este trabajo, se utiliza un motor de $\frac{1}{4}$ HP a 220 V_{ac} de tres fases y se debe de incorporar un variador de frecuencia que soporte la potencia requerida para el motor. El prototipo debe de mantener una velocidad de hasta 8 metros por minuto, para poder mantener velocidades más bajas, se utiliza el variador de frecuencia para bajar las revoluciones del motor. En la sección 3.5.2, se menciona como el PLC interpreta la frecuencia que el variador va a controlar.

3.3.2.6. Conmutador de red (*Switch*)

La función de un *Switch* es interconectar varios dispositivos en una red de comunicación. Para interconectar todos los componentes de la red de trabajo, los cuales son para este caso, el *PLC*, el *HMI*, el variador de frecuencia y una computadora para programar todos estos dispositivos mencionados se hace a través de un *Switch*. Con un protocolo de comunicación seleccionado que es la red *EtherNet/IP* que usa el estándar *Ethernet* y *TCP/IP*; también tiene una aplicación abierta llamada Protocolo Industrial Común (*Common Industrial Protocol, CIP*). Cada dispositivo nombrado anteriormente tiene una dirección de *IP* para poder intercomunicarse entre sí [20]. En la tabla 3.4, se muestran las direcciones *IP* que se les asignan a cada uno de los componentes que requieren de una dirección *IP* que es el *HMI*, *PLC* y el *VFD*. Con estas direcciones otorgadas a los componentes, es posible con el software de programación de los dispositivos mencionados, programar y ajustar sus parámetros de programación para su manipulación [21].

Tabla 3.4. Dirección de *IP* de los dispositivos del proyecto.

Dispositivo	Dirección <i>IP</i>
PLC	192.168.1.250
HMI	192.168.1.251
Variador de frecuencia	192.161.1.252

Las direcciones *IP* identifican cada dispositivo en el sistema conectado a la red. Cada dispositivo *TCP/IP* en la red debe de tener una dirección *IP* única. Como se observa cada dirección *IP* es de 32 *bits* [21].

3.3.2.7. Controlador Lógico Programable (*PLC*)

Para elegir el controlador lógico programable para el sistema se toman en cuenta varios aspectos del mismo sistema. Primeramente se toma en cuenta las entradas y salidas el sistema debe de utilizar para ser controlado, considerando sí son analógicas o de tipo digital. Se recomienda tener un margen mayor para las futuras modificaciones del sistema. A mayor cantidad de entradas y salidas mayor será la capacidad que deberá de ser guardada en la memoria del *PLC* , por lo que se tiene que analizar el tamaño del programa que se desarrolla [6].

El sistema deberá de tener un protocolo de comunicación, por lo que el *PLC* deberá de comunicarse con otros dispositivos para que el sistema sea más eficiente. El protocolo de comunicación normalmente utilizado es el protocolo *EtherNet/IP*. Es también importante tomar en cuenta que software se utilizará para la programación del *PLC*, esto con el fin de comparar costos y fiabilidad de operación del sistema. El prototipo cuenta con una entrada principal que es la lectura del sensor de temperatura y una salida al control de encendido y apagado del *SSR*, para que encienda las lámparas de radiación infrarroja. Con el protocolo de comunicación, tendrá en la red al *HMI* con el que se le indicará el modo de operación del sistema y al *VFD* para que este controle e inicie con el encendido o apagado del motor y su velocidad. Todos estos parámetros serán programados dentro del *PLC* para la toma de decisiones del sistema [20].

3.3.2.8. Interfaz Máquina Usuario (*HMI*)

Cuando la máquina de un proceso sencillo, controlada por un *PLC*, el operador no necesita enviar ni recibir información de ella. Pero cuando la máquina debe interactuar con el operador, se debe facilitar la modificación de parámetros de entrada y salida del sistema. Como el sistema de un horno, donde se puede modificar el parámetro de la temperatura a controlar, o la velocidad de una banda, donde se modifica la velocidad de giro del motor para una mayor producción dependiendo de la situación. El interfaz anterior mencionado para la modificación del parámetro es llamado *HMI*, como se explicó en el *capítulo II*.

La unidad *HMI* utilizada en este trabajo es una pantalla táctil. Una pantalla táctil también puede ser conocido por sus siglas en inglés *TP (Touch Panel)* utilizan una pantalla gráfica que posee sensores sensibles al tacto. De esta forma la pantalla tiene entradas y salidas al sistema.

La pantalla *HMI*, es un complemento del control del *PLC*, para que pueda ejecutar su programa. Pero dependiendo de la programación, el *PLC* toma la decisión final de que ejecutar y que no ejecutar. Como programador, la regla más importante en la industria, es la seguridad del operador y de las personas que están alrededor de la planta de trabajo, por lo que es muy importante tomar en cuenta varias consideraciones de seguridad en el trabajo [22]. En esta ocasión solo es un prototipo, y se dejaron a un lado sensores y relevadores de seguridad. Pero sí se tiene un paro inmediato del sistema que el operador puede realizar. Es importante tener en claro que el *PLC* es el que toma las decisiones para ejecutar el programa de modo automático. La función del *HMI* es solamente para poder modificar parámetros de operación y dar los estatus del sistema. También tiene el uso para que el operador pueda mandar señales al *PLC* para que pueda cambiar de actividad, si el operador lo requiere.

Existen diferentes plataformas para desarrollar y ejecutar aplicaciones de interfaz máquina humano *HMI*. Éste es diseñado para el monitoreo y el control de procesos o de alguna máquina.

Como se muestra en la figura 3.5 se muestra la pantalla principal del sistema para tener el estatus del sistema en tiempo real con el usuario y mantenga constante monitoreo de las variables controladas.

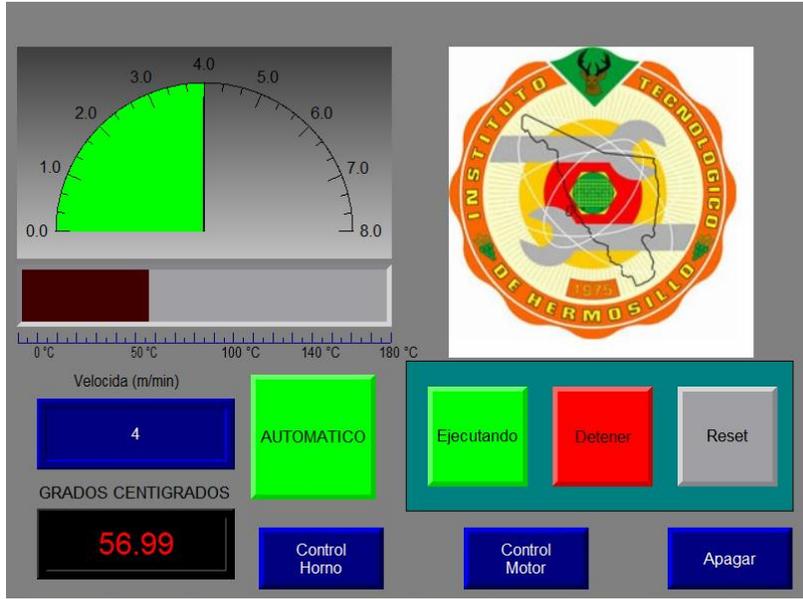


Figura 3.5. Pantalla de monitoreo del sistema de control.

3.4. Diseño del diagrama eléctrico

Es sumamente importante observar en que área de trabajo se va a instalar el prototipo. En este caso se cuenta una terminal de 220 V_{ac} trifásico. Por lo que se deben de identificar los dispositivos de alta potencia a utilizar, como se muestra en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Lista de parámetros de los dispositivos de alta potencia

Dispositivo de alta potencia	Parámetros de instalación
Lámparas de radiación infrarroja	5,000 Watts 480 V_{ac} monofásicos
Motor de corriente alterna	1/4 HP 220 V_{ac} Trifásico

Como en las instalaciones se tiene una entrada de alimentación de 220 V_{ac} trifásicos, es necesario instalar un transformador aumentador con al menos 10 kW de potencia, ya que se manejan dos lámparas de 480 Volts de 5,000 Watts cada lámpara. Para encender las dos lámparas a su máxima potencia es necesario proporcionar al menos 10 kW de potencia. El acondicionamiento para el área de trabajo es necesario para poder realizar los objetivos establecidos.

Iniciando con estos datos, se inicia la selección del dispositivo de control. Como se plantea utilizar una lógica de control secuencial, se selecciona un controlador lógico programable para el sistema de control.

El sistema es controlado es por un PLC, normalmente estos sistemas tienen salidas de baja potencia. Para poder controlar un sistema de alta potencia con un PLC, deben de utilizarse actuadores que permitan esta manipulación. Teniendo varias opciones disponibles de actuadores, se selecciona la tecnología de relevadores de estado sólido, para poder encender las lámparas de 480 V_{ac} con señales de control de 24 V_{dc} .

Una gran ventaja de seleccionar una plataforma en común con los dispositivos es de que proporciona funciones, tanto de PLC como de variadores de frecuencia para el control de motores de corriente alterna de tres fases. Procediendo a identificar un variador de frecuencia que cumpliera con estas características para poder controlar la velocidad y la dirección del motor, con el fin de poder hacer diferentes tipos de estudios al sistema.

En la tabla 3.6 se enlistan los equipos utilizados para el control del sistema.

Tabla 3.6. Listado de los componentes físicos para el control del sistema.

No.	Objeto	Descripción de utilidad
1	<i>PLC</i>	Para el control total del sistema
2	<i>HMI</i>	Para visualizar el estado del sistema y ajustar los parámetros.
3	Variador de frecuencia	Controlar la velocidad el motor de <i>1/4 Hp</i>
4	Relevador de estado solido	Poder encender y/o apagar las lámparas de alta potencia con el <i>PLC</i>
5	Sensor de Temperatura	Poder leer la temperatura de la superficie y ser procesada con el <i>PLC</i>
6	<i>Switch</i> de comunicaciones	Poder interconectar el variador de frecuencia, el <i>PanelView</i> , el <i>PLC</i> y el programador con el sistema.
7	Fuente de alimentación	Alimentar al <i>PLC</i> , <i>PanelView</i> , <i>Switch</i> y sensor de temperatura.

El diseño y desarrollo del circuito de control es para el horno prototipo. Se diseñó el circuito eléctrico de control con software especializado en diseño de diagramas eléctricos. En la figura 3.6 se muestra el diagrama a bloques del diagrama eléctrico del sistema de control, donde se observa como

se interconectan los componentes para que el sistema ejecute su función de control. Como se observa en la figura 3.6, el sistema está alimentado con una misma fuente de voltaje que este mismo, convierte a su vez a la tensión necesaria que requiera cada componente para operar. También se observa como cada uno de los componentes principales están interconectados para comunicarse entre si por medio de un *Switch*.

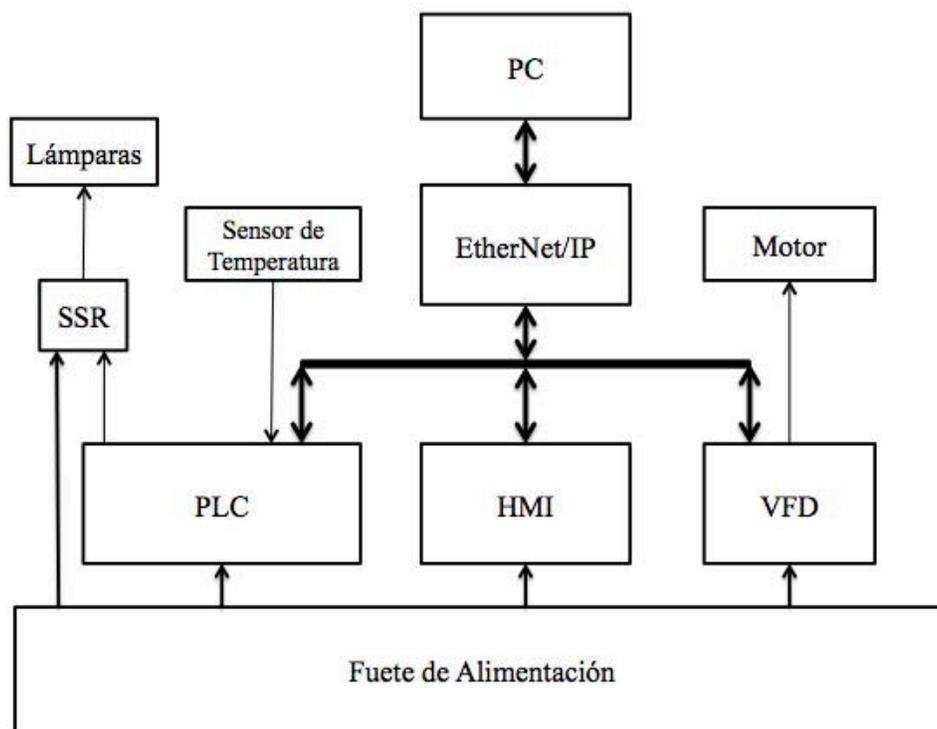


Figura 3.6. Diagrama a bloques del diagrama eléctrico del sistema de control.

La programación del sistema, es una herramienta para que el hardware pueda realizar sus ejecuciones de manera correcta para el control del sistema

cumpla el objetivo. Para que el sistema trabaje de manera eficaz, se implementa un diseño matemático para interpretar los datos de entradas de los componentes físicos del sistema, como es el sensor de temperatura con salida de 4 a 20 mA y el cálculo matemático para convertir la frecuencia estipulada a velocidad lineal para el motor trifásico.

3.5. Desarrollo matemático para el control del sistema

Antes de implementar el sistema, es importante saber qué es lo que se va a controlar. Para este prototipo, se controlará temperatura y la velocidad del motor de $\frac{1}{4}$ HP, mostrados en la tabla 3.7.

Tabla 3.7. Variables a controlar en el proceso.

Control	Descripción	Unidades utilizadas
Temperatura del Horno	Con el sensor de temperatura se toma lectura de la temperatura dentro del horno. Ésta temperatura es manipulada con dos lámparas infrarrojas, por medio de un relevador de estado sólido.	Grados Celsius y Fahrenheit.
Velocidad del giro de la banda	El motor de $\frac{1}{4}$ HP, será controlado por un variador de frecuencia, con el fin de controlar su velocidad por medio de la frecuencia, para controlar la velocidad lineal de la banda.	Metros/minuto

Las variables antes mencionadas en la tabla 3.7, proporcionan información para el algoritmo de control del horno prototipo. Para poder utilizar estos componentes, son necesarias las hojas de datos de los componentes, de los fabricantes para la manipulación de sus componentes.

3.5.1. Función de transferencia de la variable temperatura

Como se mencionó en la sección 3.4, se utiliza un sensor que tiene un rango de -18 a 204 °C con salida de 4 a 20 mA de corriente con el fin de poder mantener los parámetros que se desean medir dentro del rango. Se obtiene la siguiente tabla 3.8. que muestra la equivalencia respecto a la entrada con la salida del sensor

Tabla 3.8. Equivalencias de temperatura y corriente de salida.

Rango de temperatura del sensor	
Corriente de salida	Rango de temperatura
4 mA	-18 °C
20 mA	204 °C

Desarrollando una ecuación con un comportamiento lineal del sensor se tiene la ecuación (3.9), utilizada para el control de temperatura.

$$T_c(i) = m * i + b \quad (3.9)$$

donde:

$T_c(i)$ es la función de transferencia de la temperatura en grados Celsius en función de la corriente.

m es la pendiente.

i es la corriente.

b es el origen cuando $i = 0$.

Para encontrar la pendiente se utiliza la ecuación (3.10).

$$m = \frac{Temp_1 - Temp_2}{intensidad_1 - intensidad_2} = \frac{(-18 \text{ } ^\circ\text{C}) - (204 \text{ } ^\circ\text{C})}{(4 \times 10^{-3} \text{ A}) - (20 \times 10^{-3} \text{ A})} = 13,875 \left[\frac{^\circ\text{C}}{\text{A}} \right] \quad (3.10)$$

Para encontrar b se da un valor a la función de transferencia para $i = 20 \times 10^{-3}$, $T_c(20 \times 10^{-3}) = 204$ mostrada en la ecuación (3.11).

$$b = (204 \text{ } ^\circ\text{C}) - 13,875 \left[\frac{^\circ\text{C}}{\text{A}} \right] * 20 \text{ A} = -73.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.11)$$

Por lo que la función de transferencia quedaría mostrada en la ecuación (3.12).

$$T_c(i)[^{\circ}C] = 13,875 \left[\frac{^{\circ}C}{A} \right] * i[A] - 73.5 \text{ } ^{\circ}C \quad (3.12)$$

Como la ecuación (3.12) su unidad de medida es en grados Celsius, y para poder interpretarla con unidades Fahrenheit se convierte la ecuación (3.12) a grados Fahrenheit como se muestra en la ecuación (3.13).

$$T_f(T_c)[^{\circ}F] = \frac{9}{5} \left[\frac{^{\circ}F}{^{\circ}C} \right] T_c[^{\circ}C] + 32^{\circ}F \quad (3.13)$$

Adelantando un poco en la interpretación de los datos con el *PLC*; en la entrada analógica, donde se toma lectura del sensor de temperatura, el *PLC* interpreta esta lectura de diferentes formas (dependiendo de la selección), en este caso se seleccionó la escala *PID*, donde tiene un rango de 4,000 a 20,000 unidades. Como se está utilizando un sensor de 4 mA a 20 mA, significa que cuando la corriente esté a 4 mA el *PLC* interpretara eso como 4,000 unidades, o de igual manera si el sensor tiene una salida de 20 mA hacia el *PLC*, entonces el *PLC* lo interpreta como 20,000 unidades. A lo anterior se le conoce como escala *PID* interpretado por el *PLC*.

De esta manera con la ecuación (3.12) y con los datos mencionados en el párrafo anterior, se obtiene la ecuación (3.14), que ayuda para la programación del *PLC*, con escala *PID*.

$$T_{C_PLC}(i_{escala_PID})[^{\circ}C] = 0.013875 \left[\frac{^{\circ}C}{U} \right] * i_{escala_PID}[U] - 73.5 \text{ } ^{\circ}C \quad (3.14)$$

Y en grados Fahrenheit interpretada con escala *PID* del *PLC* se sustituye la ecuación (3.14) en la ecuación (3.13), y se obtiene la ecuación (3.15).

$$T_{f_PLC}(T_{c_PLC})[^{\circ}F] = \frac{9}{5} \left[\frac{^{\circ}F}{^{\circ}C} \right] T_{c_PLC}[^{\circ}C] + 32[^{\circ}F] \quad (3.15)$$

Mostrada la función de transferencia de la temperatura, ahora se analiza la función de transferencia de la velocidad del motor.

3.5.2. Función de transferencia de la velocidad del giro de la banda

Para obtener la medida de giro del motor, en base a metros por minuto, controlado con por la frecuencia. Como se mencionó en la subsección 3.3.2.4, el motor es de *4 polos*, por lo que gira nominalmente a *1,800 rpm* a *60 Hz*. También es necesario tener en cuenta el diámetro del eje a utilizar, la relación del reductor, y dos parámetros de giro del motor que estén dados en revoluciones por minuto (*rpm*) equivalente a frecuencia (*Hz*), la obtención de estos datos se dan en la tabla 3.9.

Tabla 3.9. Parámetros del motor a utilizar.

Parámetros	equivalencia
Reductor	40:1 <i>Vueltas</i>
Giro del motor (1)	1800 <i>rpm</i> / 60 <i>Hz</i>
Giro del motor (2)	1500 <i>rpm</i> / 50 <i>Hz</i>
Diámetro del eje	6.35 <i>cm</i>

Con los datos mostrados en la tabla 3.9, se puede hacer una función de transferencia del sistema de velocidad lineal de la banda del pasto sintético. Como el variador de frecuencia manipula la frecuencia, y se quiere controlar la velocidad lineal entonces la función de transferencia utilizada será en función de la frecuencia para tener una salida de velocidad lineal. Se requiere una función basada en $\frac{m/min}{Hz}$. Pero antes de llegar a esa función, se requiere una velocidad angular en *rpm*.

Tabla 3.10. Relación de frecuencia y revoluciones por minuto del motor de $\frac{1}{4}$ HP.

Frecuencia (<i>Hz</i>)	Revoluciones por minuto (<i>rpm</i>)
60 <i>Hz</i>	1800 <i>rpm</i>
50 <i>Hz</i>	1500 <i>rpm</i>

En la tabla 3.10, se tiene la relación del motor en *rpm* a *Hz*. Por ejemplo, si la frecuencia transmitida por el variador de frecuencia es de 60 *Hz*,

el motor proporcionará una velocidad angular de 1800 rpm . El motor integrado al prototipo, tiene un reductor de $40:1$, que actúa entre el eje y el motor, con el fin de reducir las revoluciones a 40 veces su giro. Con este reductor, debe de considerarse para la velocidad angular de salida del motor. Se obtiene la nueva tabla 3.11 que sustituirá la tabla 3.10.

Tabla 3.11. Relación de frecuencia y revoluciones por minuto del motor con reductor $40:1$.

Frecuencia	Revoluciones por minuto con reductor $40:1$	Revoluciones por minuto totales
60 Hz	$\frac{1800 \text{ rpm}}{40}$	45 rpm
50 Hz	$\frac{1500 \text{ rpm}}{40}$	37.5 rpm

Con datos obtenidos de la tabla 3.11, se obtiene la función de transferencia de la velocidad angular del giro del motor. Desarrollando la ecuación, se tiene que la ecuación (3.16), es la que se utiliza para calcular la velocidad del motor con respecto a sus polos [19].

$$v_{\phi}(f) = \frac{120 f}{P} [\text{rpm}] \quad (3.16)$$

donde:

$v_{\phi}(f)$ es la función de transferencia de la velocidad angular en función de la frecuencia en revoluciones por minuto (*RPM*).

p es el número de polos del motor.

f es la frecuencia.

Simplificando la ecuación (3.16) dando valor a la variable $p = 4$, por el número de polos del motor utilizado se obtiene la ecuación (3.17).

$$v_{\phi}(f)[rpm] = \frac{120 f[Hz]}{4} = 30 * f[Hz] \quad (3.17)$$

El sistema cuenta con un reductor de velocidad de *40:1* con lo que la ecuación (3.17) se debe de agregar esta relación mostrado en (3.18).

$$v_{\phi_reductor}(f)[rpm] = \frac{30 * f[Hz]}{40} \quad (3.18)$$

Por lo que la función quedaría mostrada en la ecuación (3.19).

$$v_{\phi_reductor}(f)[rpm] = 0.75 * f[Hz] \quad (3.19)$$

Como la velocidad anterior está en revoluciones por minuto, es decir es velocidad angular; para mayor comodidad y fácil lectura tanto de producción

como visualización, se convierte la velocidad angular a velocidad lineal con la ecuación (3.20), mostrada a continuación.

$$Velocidad\ lineal\ \left[\frac{m}{min}\right] = Velocidad\ Angular[rpm] * Perimetro[m] \quad (3.20)$$

Para obtener el perímetro del eje sobre el que gira el tapete de pasto sintético, se recurre de un dato de la tabla 3.10, donde se encuentra con el diámetro del eje es $D = 0.0635\ m$. Con ayuda de la fórmula del perímetro del círculo se obtiene el dato deseado mostrado en la ecuación (3.21).

$$P[m] = \pi * D[m] = \pi * 0.0635[m] = 0.1994\ m \quad (3.21)$$

Sustituyendo la ecuación (3.19) y la ecuación (3.21) en la ecuación (3.20), se obtiene la ecuación (3.22) que representa la velocidad lineal.

$$v_L(f)\left[\frac{m}{min}\right] = (0.75 * f[Hz])(0.0635\pi [m]) \quad (3.22)$$

donde:

$v_L(f)$ es la función de transferencia de la velocidad lineal en función de la frecuencia.

f es la frecuencia.

Como en el sistema, la variable de entrada será la velocidad lineal de producción, y ésta emitirá una frecuencia para que el variador de frecuencia envíe la frecuencia de trabajo al motor para cumplir con la velocidad deseada, entonces se debe despejar la frecuencia (f) de la ecuación (3.22), y quedaría la ecuación (3.23).

$$f[Hz] = \frac{v_L \left[\frac{m}{min} \right]}{0.75 * 0.0635\pi} = \frac{v_L \left[\frac{m}{min} \right]}{0.1496} = 6.68 * v_L \left[\frac{m}{min} \right] \quad (3.23)$$

Obteniendo la ecuación (3.23), ahora se describe cómo es que el *PLC* interpreta el dato de la frecuencia calculada.

El *PLC*, tiene una unidad de memoria especializada en otorgar la frecuencia deseada al variador de frecuencia, para que éste controle las revoluciones por minuto del motor. Para entender mejor lo anterior, se muestra en la tabla 3.12 unos ejemplos de cómo interpreta los datos el *PLC* y cómo los interpreta el variador de frecuencia.

Tabla 3.12. Ejemplos de interpretación de la frecuencia según el *PLC* y el variador de frecuencia.

Frecuencia de lectura o escritura del PLC	Frecuencia de lectura o escritura del variador de frecuencia
0	00.00
1	00.01
10	00.10
100	01.00
1000	10.00
10000	100.00
50000	500.00
Mayores a 50000	500.00

El variador de frecuencia tiene un rango de frecuencia de salida de 0 a 500 Hz, con dos unidades decimales, como por ejemplo 500.00 Hz, 250.51 Hz, 12.25 Hz, 60.00 Hz etc. Si el PLC, quiere enviar un dato al variador de frecuencia, el PLC lo envía sin números decimales pero sus dos últimos dígitos enteros serán interpretados por el variador de frecuencia como dos números decimales, es decir si el PLC envía el número 45, el variador de frecuencia recibe este dato como 00.45 Hz, o si el PLC envía el dato 1225, el variador de frecuencia lo recibe como 12.25 Hz.

De esta manera se puede interpretar que el variador de frecuencia divide entre 100 el dato entero enviado por el PLC. Lo que demuestra la ecuación (3.24). Y del mismo modo, si el PLC envía un dato mucho mayor al de 50000, el variador de frecuencia lo ajusta para dar su frecuencia máxima en este caso a 500.00 Hz.

$$f_{\text{variador_frecuencias}}[\text{Hz}] = \begin{cases} f_{\text{PLC}}/100 & 0 \leq f_{\text{PLC}} \leq 50000 \\ 500 & f_{\text{PLC}} > 50000 \end{cases} \quad (3.24)$$

Para la interpretación del PLC; y manipular la velocidad lineal, se emplea el despeje de (3.24) mostrado en (3.25) y se sustituye en (3.23) para obtener (3.26) que es la frecuencia interpretada del PLC según se desee.

$$f_{\text{PLC}} = f_{\text{variador_frecuencias}}[\text{Hz}] * 100 \quad (3.25)$$

Ecuación (3.25) sustituida en ecuación (3.23), se obtiene (3.26).

$$f_{PLC} = \left(6.68 * v_L \left[\frac{m}{min} \right] \right) * 100 \quad (3.26)$$

La ecuación (3.26) es la utilizada para desarrollar el programa en el *PLC*. Ya teniendo estos datos se prosiguió con la programación del *PLC*.

3.6. Programación del *PLC*

Como se describió en el *capítulo II*, se conocen diferentes lenguajes de programación para el *PLC* según la *IEC-61131-3*. El lenguaje más popular para el *PLC* es el lenguaje en diagrama escalera o también conocido como *Ladder Diagram (LD)*. Según la lógica de programación y la complejidad del mismo, se cuenta con más lenguajes de programación como se indicó en el capítulo anterior. Se muestra un diagrama a flujo en la figura 3.7 para analizar la lógica de programación de sistema que se utilizó en el sistema de control del prototipo.

El sistema inicia con la lectura de temperatura dentro del horno; hasta obtener la señal de encendido por medio del interfaz gráfico de usuario, el sistema de control inicia la ejecución de lo que se le ordena, como mantener la medida de la temperatura a un nivel deseado y una velocidad lineal de la banda. El sistema inicia con el control de temperatura y con el giro de la banda, hasta que se le ordene detener su función.

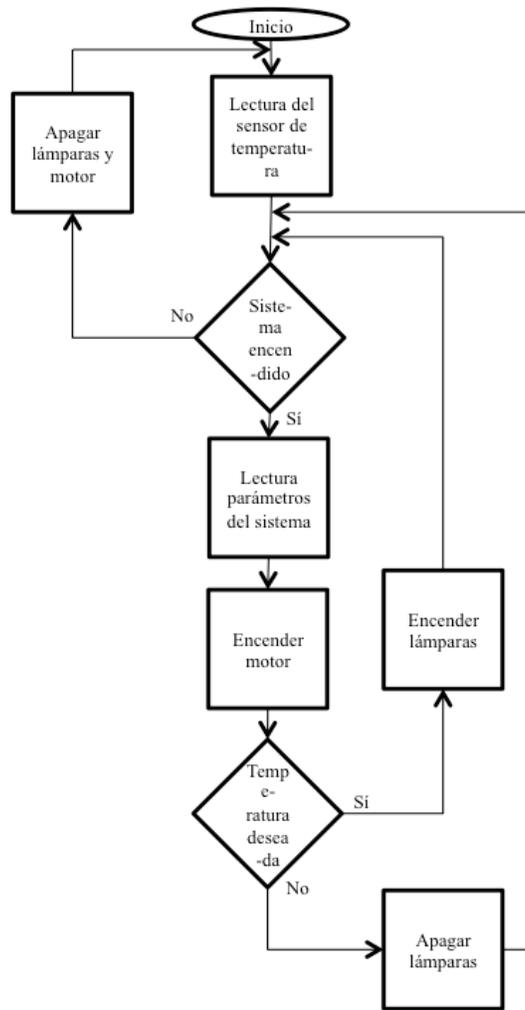


Figura 3.7. Diagrama a flujos del programa del sistema de control.

En la presente tesis se utilizó el diagrama escalera (*Ladder*). Algunas de las plataformas de programación, proporcionan una herramienta útil para la elaboración de instrucciones personalizadas llamadas “*Add-On Instruction*”.

3.6.1. Diagrama escalera para la programación del *PLC*

El lenguaje de diagrama escalera, como se indicó en el *capítulo II*, está identificado por contactos gráficos. Tiene como ventajas las siguientes características:

- Facilita la modificación de un sistema de control lógico implementado por relevadores, de un sistema automatizado.
- Desarrollar fácilmente el diseño de sistemas sencillos de control lógicos programables a los técnicos acostumbrados a diseñar sistemas de control lógico programables.

Caracterizado por simbolizar las variables lógicas mediante la bobina de un relevador y los contactos afiliados a él.

Se diseñan los diagramas escaleras como escalones de una escalera y se colocan instrucciones en cada escalón. Existen dos diferentes tipos de instrucciones básicos para el lenguaje de programación de diagrama escalera mostrados en la figura 3.8.

- **Instrucción de entrada:** Instrucción que compara, checa o examina una condición específica en el proceso.
- **Instrucción de salida:** Instrucción que toma una acción, como encender o apagar un dispositivo o copiar o calcular algún dato.

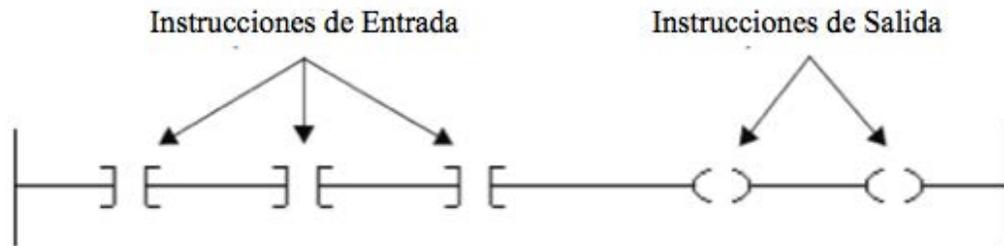


Figura 3.8. Instrucciones en un escalón en el lenguaje de programación diagrama escalera.

Pero sobre un escalón de instrucciones, también se le pueden incorporar ramas para el proceso. El concepto de rama se interpreta como dos o más instrucciones en paralelo como se muestra en la figura 3.9.

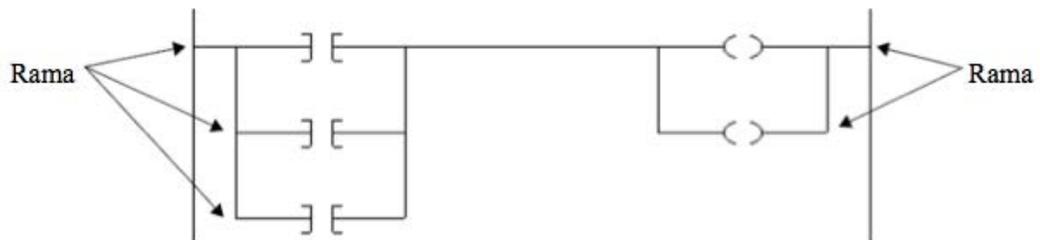


Figura 3.9. Dos o más instrucciones en paralelo es una rama.

Se utilizan las ramas para poder hacer la función "OR" en la programación.

3.6.2. Instrucciones personalizadas

Con las instrucciones “*Add-On*”, se pueden crear nuevas instrucciones personalizadas y de uso repetido por el usuario. Éstas intentan encapsular las funciones comúnmente usadas de los dispositivos de control. Los beneficios de utilizar esta instrucción son los siguientes:

- Para reutilizar instrucciones repetitivas en uno o varios proyectos para el control de un dispositivo o dato en específico.
- Para mejorar la fácil lectura del programa.
- Prevenir que otros usuarios intenten modificar el código.
- Simplificar el mantenimiento del programa. Permite tener programas más simples y posibilita cambios pequeños para alguna corrección.

El sistema propuesto, solamente se utiliza un motor y un sensor de temperatura, pero si se desean agregar más de estos componentes en el sistema de control, para futuras modificaciones, en la programación, se recurren a los “*Add-On Instruction*” para integrarlos a la lógica de programación.

En las ecuaciones (3.14) y (3.26), serán utilizadas para el desarrollo de instrucciones personalizadas “*Add-On*”. Se integran las ecuaciones (3.14) y (3.26) a las instrucciones personalizadas, con el fin de tener herramientas para futuras modificaciones, ya sean agregar varios sensores o varios motores sin necesidad de volver generar el algoritmo de programación. En la figura 3.10, se muestra el diagrama a flujo del la instrucción de la lectura de la temperatura, y en la figura 3.11 es presentado el diagrama a flujo para el control de velocidad del motor. Estos elementos son utilizados para la programación del sistema de control, la lógica de los elementos es como se muestran en las siguientes figuras.

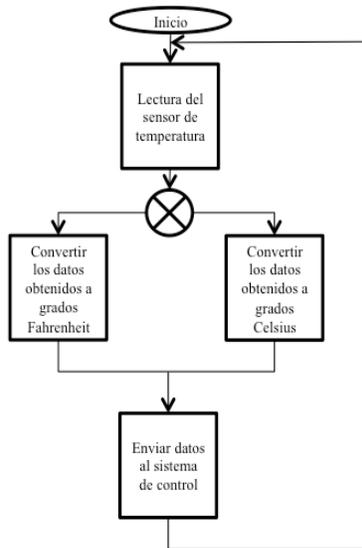


Figura 3.10. Diagrama a flujo para la lectura de la temperatura del sistema.

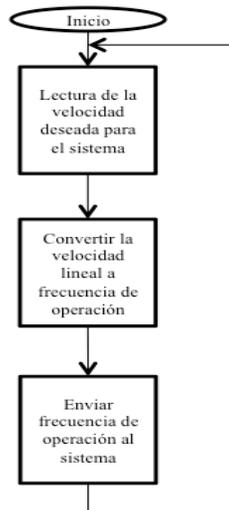


Figura 3.11. Diagrama a flujo el control de velocidad del motor del sistema.

3.7. Conclusión

Combinar diseños asistidos por computadora para poder implementar diferentes componentes en un solo sistema es importante para poder analizar un diseño eficaz que permita desarrollar todos los requisitos necesarios para poder controlar el sistema completo. Los componentes utilizados en este proyecto son seleccionados para el uso necesario de esta aplicación. Para cualquier otra aplicación es necesario utilizar los diferentes componentes y calcular los parámetros para determinar los componentes de cada aplicación.

Capítulo IV

Resultados

Esta tesis originó en un problema de producción de pasto sintético. Tiene como objetivo el diseño de un prototipo que simule el horno para el acabado final del pasto sintético, para el análisis y así para resolver el problema. En este capítulo se presentan resultados experimentales obtenidos del prototipo. Se muestra como los componentes interconectados pueden desarrollar tareas complejas como la ejecución del sistema de horno prototipo para el acabado final de pasto sintético.

El *capítulo IV* está dividido en 6 secciones para presentar los resultados del horno prototipo, en la sección 4.1 muestra la planta del sistema, así como la forma en que se colocan las lámparas y la banda transportadora. En la sección 4.2 está constituido por el control implementado al sistema. Para que el usuario tenga una interacción en la máquina se presenta la sección 4.3, que muestra el *HMI* del sistema. La ejecución del proceso se presenta en la sección 4.4, para después mostrar todo el prototipo terminado en la sección 4.5.

4.1. Planta del sistema

En el *capítulo III*, se mencionan las medidas físicas de construcción del horno prototipo, descritas en la tabla 3.2.

El horno fue aislado con lámina para mantener almacenada la energía calorífica radiada por las lámparas, con el fin de que la temperatura interna no se vea afectada por la temperatura ambiente. Dentro del horno de almacenamiento de la energía calorífica radiada se encuentran las lámparas infrarrojas de 5,000 *Watts* con un largo de 1.5 *metros lineales* y un diámetro de 10 *mm*.

Dentro del horno, pasa la banda de pasto sintético por la parte inferior, solo para que se exponga la base “*backing*” del tapete a la radiación infrarroja producida por las lámparas. Como se muestra en la figura 3.3 del *capítulo III*, es como están distribuidas las lámparas y como circula la banda dentro del horno prototipo.

En la figura 4.1, se muestra el horno prototipo real, armado con una estructura de aluminio, y con dos ejes mostrados.

Como se aprecia en la figura 4.1, se encuentra el motor de $\frac{1}{4}$ HP, que hace girar un eje para el movimiento circular de la banda.



Figura 4.1. Planta del horno prototipo.

4.1.1. Lámparas radiando energía calorífica

Dentro del horno, como se describe en la figura 3.3 en el capítulo anterior, se encuentran dos lámparas de radiación infrarroja de 5,000 Watts cada una.

Tomando en cuenta el tipo de sustancia que se usa para adherir las hebras cosidas con la base, se tiene como rango de temperatura dentro del horno entre los 70 °C y 150 °C. Se realizaron pruebas a las lámparas para poder determinar la distancia entre ellas y la altura que deben de quedar sobre el tapete de pasto sintético.

La forma que se determinó la distancia que deben de tomar las lámparas para su instalación fue prendiendo una de las lámparas sometiéndola a 440 *Vac* y no a 480 *Vac*, con el fin de probar condiciones por debajo de las especificadas para la instalación, y así asegurar datos por encima de los mínimos.

Tabla 4.1. Temperatura radiada de la lámpara a una distancia desde el centro.

Distancia del centro de la lámpara	Temperatura medida.
300 <i>mm</i>	172 °C
400 <i>mm</i>	138 °C
500 <i>mm</i>	116 °C
650 <i>mm</i>	78 °C
850 <i>mm</i>	59 °C

Se instala la lámpara en una zona cerrada que se igualen a las de un proceso real. Y se enciende y se mide la temperatura a distancias radiales de su centro. En la figura 4.2, se muestra como la temperatura disminuye conforme se aleja del centro de la lámpara. En la tabla 4.1, se muestran los datos medidos correspondientes a la figura 4.2.

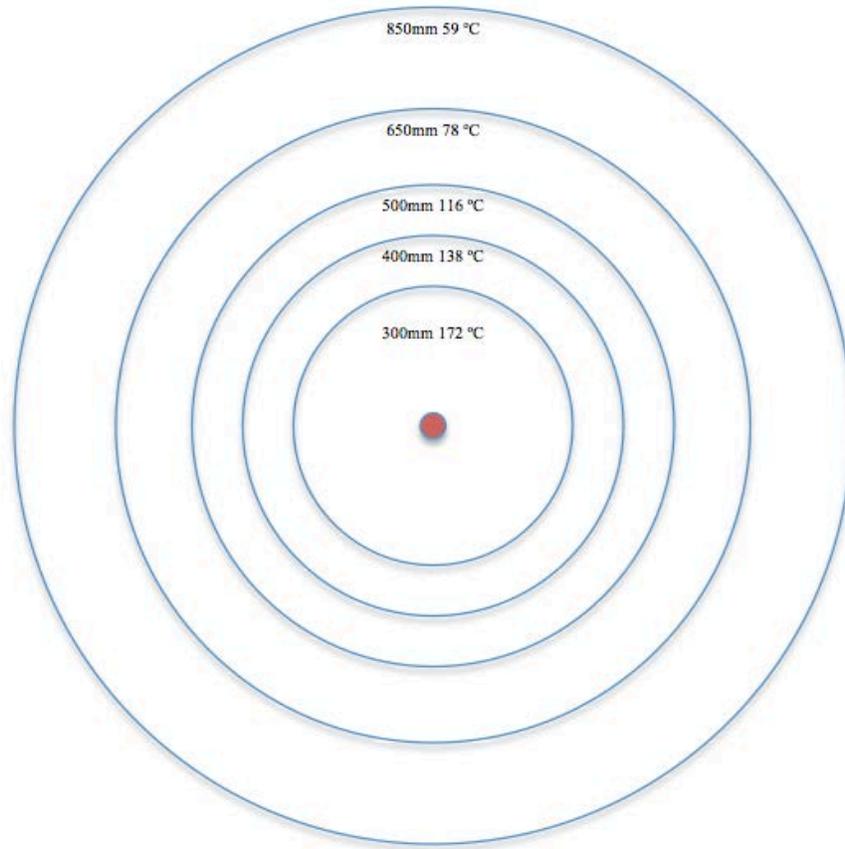


Figura 4.2. Temperatura emitida por la lámpara infrarroja.

Con estos datos se pueden observar que para generar elevar la temperatura a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ se tiene que estar entre una distancia de 300 mm y 400 mm . Y para elevar la temperatura a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ se tiene que estar en una distancia entre 650 mm y 850 mm . Con los resultados anteriores se obtuvieron las distancias que generan la distribución de las lámparas, como se muestran en la figura 4.3.

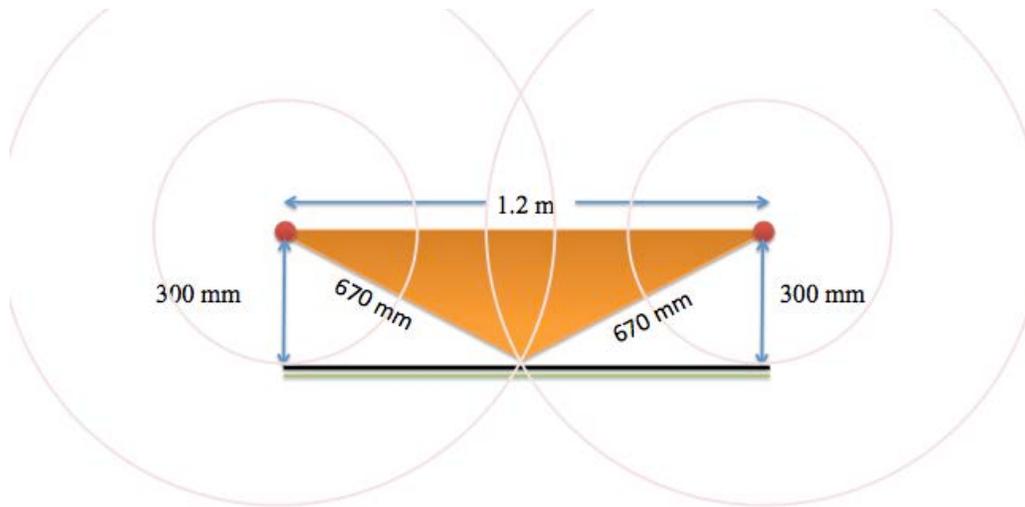


Figura 4.3. Resultados de colocación de las lámparas en el horno prototipo.

Tomando en cuenta la posición de las lámparas como se muestra en la figura 3.3 del *capítulo III*, se puede rediseñar la forma en que se colocan las lámparas de manera alternada. Esto se hace con el fin de que pueda dar varias opciones de cómo se puedan colocar las lámparas. Siguiendo el diseño descrito en el *capítulo III*, el posicionamiento de las lámparas es el mostrado en la figura 4.4.

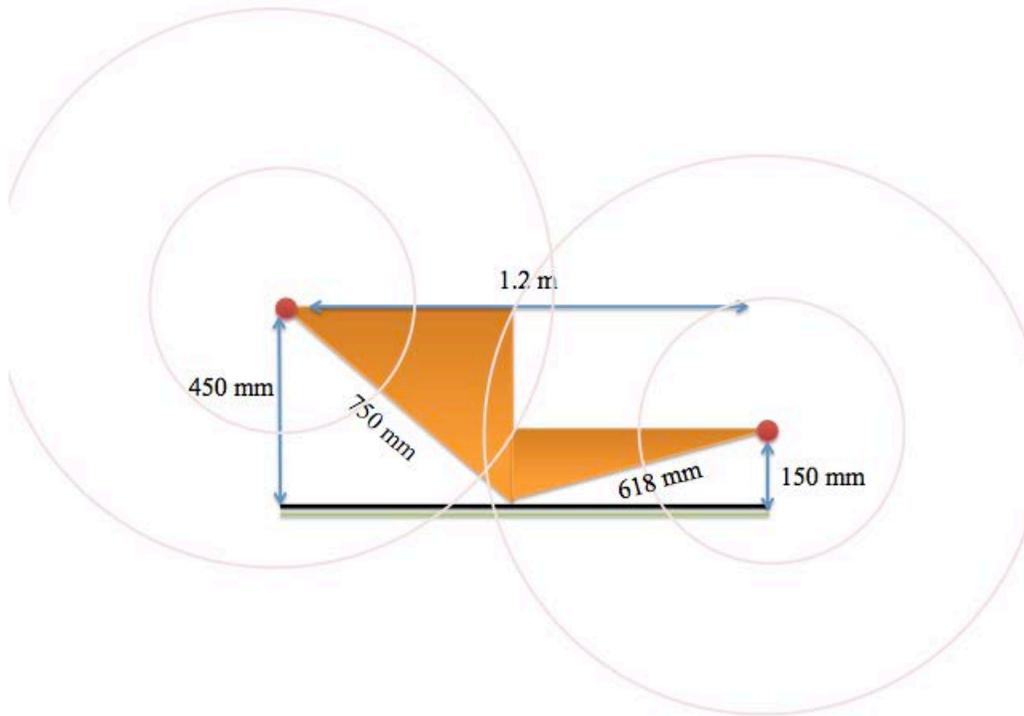


Figura 4.4. Posición de las lámparas dentro del horno.

Comparando el sistema de la figura 4.4, con las mediciones de la tabla 4.1, se puede decir que las temperaturas establecidas en el rango de operación, se encuentran dentro de las dimensiones con respecto a la radiación emitida por las lámparas.



Figura 4.5. Lámparas colocadas dentro del horno.

Se tomó como referencia la figura 4.4 para armar el prototipo y quedó como se ve en la figura 4.5.

Como se muestra en la figura 4.5, las lámparas radian energía calorífica para calentar el producto. De esta manera se trabajara para futuros análisis del comportamiento de la sustancia impregnada sobre el “backing” del el pasto sintético.

4.1.2. Banda de pasto sintético

Para que el horno pueda hacer su función, tiene que transportarse la banda de pasto sintético, sobre la radiación emitida por las lámparas de radiación infrarroja.

En el *capítulo III* se mencionaron las medidas del horno prototipo. Entre los centros de los ejes, hay una distancia de *1.5 metros*, y estos ejes tienen un diámetro de *2 pulgadas* que equivalen a *6.35 cm*, se tiene como distancia de recorrido de *1599.7 mm*. El giro es entre dos ejes por lo que la banda tiene una trayectoria circular, entonces el recorrido se duplica, donde se tendría un recorrido de *3199.4 mm*.

En un horno real, la distancia que recorre el tapete de césped sintético para ser procesado dentro del horno es de *25 metros*, y se mueve a una velocidad de $4 \frac{m}{min}$. Se calcula que el tiempo de exposición dentro del horno real es de *6 minutos y 15 segundo*. Para mantener este tiempo en el prototipo, se debe de ajustar la velocidad de giro a $0.24 \frac{m}{min}$.



Figura 4.6. Banda de tapete de pasto sintético en rodillo sobre el eje del motor.

En la figura 4.6, se muestra la banda de pasto sintético sobre el eje de giro del motor.

4.2. Sistema de control implementado

En el *capítulo III*, se enlistan los componentes a utilizar para el control de la planta. Donde se muestra como es la lógica de programación del sistema.

Con todos los componentes interconectados, con los puertos de comunicación interconectados con el *Switch* de comunicaciones. Se obtiene un sistema de control para el horno prototipo de acabado final para la producción de pasto sintético.

En la figura 4.7 se presenta el circuito armado del sistema de control del prototipo.

El *SWITCH*, utiliza protocolo *IP/TCP* para ser el medio de comunicación entre el *PLC*, *HMI*, el variador de frecuencia y la *PC*.

Para controlar el motor de $\frac{1}{4}$ *HP*, se utiliza el variador de frecuencia. Controlado por el *PLC*, por medio de comunicación *IP/TCP*. Encender las lámparas, utilizando un relevador de estado sólido *SCR*. Como las lámparas se deben de alimentar con *440 Vac*, se debe de utilizar un transformador para uso exclusivo de las lámparas.

Para obtener datos de temperatura se utilizó un sensor de temperatura infrarrojo de *4 a 20 mA* conectado a una entrada analógica del *PLC*. El *PLC* toma datos del sensor para controlar el encendido y apagado de las lámparas, dependiendo de la programación y los parámetros deseados.



Figura 4.7. Sistema de control para el horno prototipo.

Una vez ya armado el circuito electrónico de control y programados los dispositivos (*PLC*, *HMI* y Variador de frecuencia) se conecta la alta potencia al relevador para encender las lámparas y al variador de frecuencia se conecta el motor y la alimentación para encenderlo cuando éste sea ordenado.

4.3. Interfaz entre el usuario y la máquina

En el *HMI* como el de la figura 4.8 da la opción de modificar los parámetros del control de temperatura, la escala de medición de temperatura, la histéresis del control *ON-OFF* la velocidad lineal del movimiento de la banda mostrados en la tabla 4.2.



Figura 4.8. *GUI* del sistema de control para el interfaz máquina-usuario *HMI*.

Tabla 4.2. Parámetros que se pueden modificar por medio del *HMI*.

Parámetro	Valores
Velocidad lineal	$0 \frac{m}{min}$ a $8 \frac{m}{min}$
Escala de temperatura	Grados Celsius o Grados Fahrenheit
<i>Setpoint</i> de temperatura en escala Celsius del horno	0 °C a 180 °C
<i>Setpoint</i> de temperatura en escala Fahrenheit del horno	32 °F a 356 °F
Histéresis del control <i>ON-OFF</i>	0 % a 100 %
Modo de operación	Automático o Manual

4.4. Ejecución del proceso

Para la obtención de los resultados de funcionamiento del horno prototipo se sigue con la siguiente metodología:

- Alimentar al sistema para encender los dispositivos y componentes implementados.
- Programar el *PLC* y el variador de frecuencia por medio de la computadora.
- Programar el *HMI*.
- Probar el sistema para el observar el desempeño y eficiencia de programación.
- Obtener conclusiones del empeño del sistema.

Con la metodología mencionada anteriormente, se queda activa la máquina para que personal con experiencia en la producción de pasto sintético pueda analizar diferentes formas de producir césped sintético.

4.5. Presentación del horno prototipo

Uniendo todo el contenido de los capítulos anteriores, se demuestra como el funcionamiento de la máquina puede dar varios resultados en el análisis del procesamiento de pasto sintético.

En la figura 4.9, se observa el horno prototipo en la parte izquierda, en el centro se observa la pantalla *HMI* y a la izquierda, se observa todo el circuito electrónico de control, el que recibe una carga de *10 kWatts* de potencia para el encendido de las lámparas y de *186 Watts* para el encendido del motor.

Con los componentes para el control total del prototipo tienen que ser ideales para que puedan soportar la potencia administrada a los actuadores, en este caso los actuadores son las lámparas y el motor.

La velocidad del giro de la banda es de hasta $8 \frac{m}{min}$, lo que da como ventaja analizar como se comporta el material a mayor velocidad, comparado con las que comúnmente se utilizan en la industria de producción de pasto que van entre $3 \frac{m}{min}$ y $5 \frac{m}{min}$.



Figura 4.9. Prototipo armado.

El césped sintético es utilizado como una banda, el cual puede transportarse y así este prototipo pueda ser igual a la realidad de las máquinas productoras de pasto sintético. Con la velocidad de giro, se simula la velocidad de producción. Y el tiempo en el que estará dentro del horno.

El horno prototipo, funciona de manera correcta, con la integración del PLC y el HMI.

4.6. Conclusión

Los componentes utilizados para el desarrollo del sistema de control, son un complemento para que el sistema pueda ejecutar sus funciones de manera correcta. Por lo que es necesario diseños previos para el correcto funcionamiento del sistema. A medida que se estuvo armando el horno prototipo, existen reajustes de diseño por motivos de espacio o por motivos que no se percatan al momento de su ensamble. Con una planta y un diseño sistema que lo controle, se puede manipular los parámetros establecidos para su diseño.

Capítulo V

Conclusiones

La presente tesis tuvo como objetivo

“Diseñar e implementar un sistema prototipo, aplicando métodos de programación estructurada para el control de velocidad y temperatura que sincronice un proceso simulador de la etapa de acabado final. Solo siendo enfocado en la etapa del horno, o secado de la sustancia impregnada sobre el soporte primario del tapete de pasto sintético.”

Para cumplir con el objetivo general, se tuvo que seguir el proceso establecido en el *capítulo III* . Con esta herramienta se determinó la viabilidad de construir de forma más eficiente el sistema completo que comprendió el horno prototipo y un sistema de control operado por un controlador lógico programable y con una interfaz máquina-humano para el reajuste de parámetros de control al sistema. El *PLC* y el *HMI*, integran en sistema para poder manipular un motor por medio de un variador de frecuencias y poder leer un sensor de temperatura. Con estos componentes principales integrados al sistema anteriormente mencionados, se programan de manera que se especialice en el control de procesos para la producción de tapete de pastos artificial. En este caso, se especializa solamente en el horno de la etapa de acabado final para este producto.

5.1. Conclusiones generales

En la tesis se desarrollaron varios diseños para poder determinar un solo sistema de control. Desde el desarrollo de las fórmulas matemáticas hasta la programación de un sistema complejo para su funcionamiento. Utilizando programas *CAD*, para el diseño eléctrico del sistema, y el análisis técnico para un ensamble correcto de los componentes.

En este proyecto la experiencia en el ámbito industrial favorece para la creación de sistemas complejos. La *IEC 61131-3* otorga la información necesaria para estandarizar todos los programas de controladores automáticos. Y con esta herramienta de *IEC 61131-3*, ayuda a que todo programador de sistemas automáticos tenga un conocimiento estandarizado de cómo funciona el sistema, y de qué manera se puede leer su lenguaje de programación. El hardware utilizado, facilita la tarea de implementar todos los dispositivos para implementar un solo sistema.

Utilizando varios conocimientos de electrónica, electricidad, control y desarrollo técnico, el diseño de los sistemas se hace más sofisticado para el entorno en el que se instalan.

El sistema favorece para futuros análisis en investigaciones que enriquecen al estudio de seguir mejorando el proceso del desarrollo de tapete de pasto sintético. Con esta herramienta, futuras instituciones obtendrán parámetros de producción para este tipo de producto.

5.2. Aportaciones

Las contribuciones que se presentan en esta tesis son las siguientes:

- Incorporación de varios componentes en un solo sistema de control automático.
- Modelos matemáticos para el control de velocidad lineal de un motor trifásico por medio del *PLC*, y el modelo para la lectura del sensor de temperatura para el *PLC*.
- Máquina para el análisis técnico de los productores de pasto sintético.
- Desarrollo de un sistema de control para el estudio de transferencia de calor dinámico.
- Control *ON-OFF* de temperatura con sensores de corriente y con actuadores que irradian energía calorífica en un ancho de banda de luz infrarroja.
- Control de velocidad lineal en función a la frecuencia.

5.3. Recomendaciones a trabajos futuros

Para poder operar el horno prototipo aquí descrito se recomienda lo siguiente:

- Utilizar una sola marca para un sistema completo para la comunicación de los dispositivos principales.
- Conocer las especificaciones técnicas de todos los componentes agregados al sistema. El conocimiento de cada uno de los componentes nombrados en esta tesis, ayuda para que el sistema no se dañe para futuras modificaciones.

- Tener una computadora que tenga la plataforma para poder manipular el controlador automático y la pantalla de interfaz máquina-humano.
- Tener conocimientos básicos de programación escalera para poder programar el *PLC*, y el aprender a programar el *HMI*.

Por último, se recomienda las siguientes mejoras para complementar este trabajo:

- Incorporar una tarjeta con salidas de estado sólido al *PLC*. Para tener repuestas más rápidas de lo convencional, y así poder tener una salida *PWM* para el control de las lámparas.
- Incorporar un algoritmo al *PLC* que desarrolle un control *PWM*.
- Controlar las lámparas de radiación infrarroja con un control *PID* con la ayuda de la tarjeta recomendada de estado sólido con salida *PWM*.

Bibliografía

- [1] J. Karl-Heinz and M. Tiegelkamp, “IEC 61131-3: Programming Industrial Automation Systems,” *PhD Propos.*, vol. 1, 1995.
- [2] “Breve historia del control automático,” 2016. [Online]. Available: [http://www.esi2.us.es/~fsalas/asignaturas/CA3II/Breve historia del control autom%Eltico](http://www.esi2.us.es/~fsalas/asignaturas/CA3II/Breve_historia_del_control_autom%Eltico).
- [3] “Historia del pasto o césped artificial,” 2016. [Online]. Available: <http://www.gameturf.com.mx/descargas/Historia.pdf>.
- [4] R. V. Rosas Ovando, “Proyecto de una multicancha tipo, con terminación de césped sintético para la ciudad de Valdivia,” 2009.
- [5] Q.-Q. José Carlos, F.-G. Ernesto, Q.-A. Víctor, and B.-L. Jorge, “Diseño e implementación de un sistema de control y monitoreo basado en HMI-PLC para un pozo de agua potable,” *Ing. Investig. y Technol.*, vol. 15, no. 1, pp. 41–50, 2014.
- [6] M. P. G. Juan Carlos Martín, *Automatismos industriales*, no. I. 2009.
- [7] A. Tapia Borgo, “Implementación de un algoritmo de control predictivo en un PLC utilizando el estándar de programación IEC 61131-3,” 2013.
- [8] R. C. Bassanezi and M. Salett Biembengut, “Modelación matemática:

Una antigua forma de investigación-un nuevo método de enseñanza.” pp. 13–25, 1997.

- [9] R. Hernández Gaviño, *Introducción a los sistemas de control: Conceptos, aplicaciones y simulación con MATLAB*, vol. 1. 2010.
- [10] W. Bolton, “Control Engineering,” in *Addison Wesley Longman Limited*, 2da Edición., 2001, p. 397.
- [11] K. j. Aström and B. Wittenmark, *Computer Controlled Systems*, vol. 53, no. 9. 1997.
- [12] T. J. Maloney, *Electrónica industrial moderna*, 5th ed. 2006.
- [13] E. R. Alphonsus and M. O. Abdullah, “A review on the applications of programmable logic controllers (PLCs),” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 60, pp. 1185–1205, 2016.
- [14] R. Navarro, *INGENIERÍA DE CONTROL Analógica y digital*. 2004.
- [15] R. C. Dorf and R. H. Bishop, *Sistemas de control moderno*, 10th ed. 2005.
- [16] E. Mandado Perez, J. M. Acevedo, C. Fernández Silva, and J. I. Armesto Quiroga, *Autómatas programables y sistemas de automatización*, Segunda Ed. 2009.
- [17] “heliosquartz,” 2016. [Online]. Available: <http://www.heliosquartz.com/prodotti/tecnologia-ir/?lang=es>.

- [18] “Motores Eléctricos Guía de Especificación,” 2016. [Online]. Available: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-guia-de-especificacion-50039910-manual-espanol.pdf>. [Accessed: 12-May-2016].
- [19] ABB, “Dimensionado de un sistema de accionamiento.” [Online]. Available: https://library.e.abb.com/public/3c8c6aeae757c113c1256d28004110e1/Technical_Guide_No_7.pdf. [Accessed: 12-May-2016].
- [20] P. Brooks, “EtherNet/IP: Industrial Protocol White Paper,” 2001. [Online]. Available: http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/enet-wp001_-en-p.pdf. [Accessed: 12-May-2016].
- [21] Allen-Bradley and R. Automation, “Ethernet Design Considerations,” 2013. [Online]. Available: http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/rm/enet-rm002_-en-p.pdf. [Accessed: 12-May-2016].
- [22] R. Dahl-skog, “Introducción a la Programación controladores lógicos,” pp. 1–43, 2012.
- [23] O. A. Jaramillo, “Notas de Físico-Química,” *Univ. Nac. Autónoma México*, vol. 2, no. 6, pp. 1–35, 2008.