



1859

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA**

**ÁREA DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y  
LOS RECURSOS NATURALES NO  
RENOVABLES  
INGENIERIA ELECTROMECAÁNICA**

**TEMA:**

**DISEÑO DE UN CONTROLADOR AUTOMÁTICO  
MEDIANTE MODELADO Y SIMULACIÓN DE LA  
TEMPERATURA PARA EL INVERNADERO DEL  
JARDIN BOTÁNICO “REINALDO ESPINOSA” DE LA  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA**

Tesis de Grado previo a la  
Obtención del Título de  
Ingeniero Electromecánico

**AUTOR:**

**1859**  
**LUIS ROLANDO ZAPATA PAUTE**

**DIRECTOR:**

**ING. JUAN PABLO CABRERA SAMANIEGO**

Loja – Ecuador

2011



## **CERTIFICACIÓN**

Ing. Juan Pablo Cabrera Samaniego.

**CATEDRÁTICO DEL ÁREA DE ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y RECURSOS  
NATURALES NO RENOVABLES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA.**

CERTIFICA:

Haber dirigido, asesorado, revisado y corregido el presente trabajo de investigación, cuyo tema versa “Diseño de un Controlador Automático Mediante Modelado y Simulación de la Temperatura para el Invernadero del Jardín Botánico “Reinaldo Espinosa” de la Universidad Nacional De Loja” previo a la obtención del título de Ingeniero en Electromecánica, realizado por el egresado: Luis Rolando Zapata Paute, el mismo que cumple con la reglamentación y políticas de investigación de la Universidad Nacional de Loja, por lo que autorizo su presentación, sustentación y defensa.

Loja, 02 de Diciembre del 2011

.....

Ing. Juan Pablo Cabrera Samaniego

**DIRECTOR DE TESIS.**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

Este trabajo de investigación, así como ideas, criterios, principios, resultados y citas conceptuales de textos emitidos en el presente proyecto son de exclusiva responsabilidad del autor, quien a su vez autoriza a la Universidad Nacional de Loja; hacer uso del mismo con la finalidad académica que estimen conveniente.

.....

Luis Rolando Zapata Paute

Egdo. Ingeniería Electromecánica

## **AGRADECIMIENTO**

Es necesario dejar constancia de mi imperecedera gratitud a la Universidad Nacional de Loja, al Área de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables especialmente a la Carrera de Ingeniería Electromecánica, quien con su equipo de profesionales y catedráticos nos brindaron sus conocimientos y sabias enseñanzas aportando así a nuestra formación académica.

El agradecimiento de manera especial a mí asesor de tesis Ing. Juan Pablo Cabrera quien con sus conocimientos, asesoramiento y sabios consejos supo guiarme hasta la culminación del presente proyecto.

Agradezco también a los estudiantes de la carrera de electrónica quienes me contribuyeron desinteresadamente con sus conocimientos para el desarrollo de mi tesis. Así mismo al personal del Jardín Botánico Reinaldo Espinosa quienes me permitieron el acceso a las instalaciones y facilitaron información para realizar la investigación.

A mis padres por su apoyo, amor y comprensión; a mis hermanos por sus consejos y sus palabras de aliento y a toda mi familia por creer en mí y apoyarme en todo momento. Así mismo a mis compañeros por su ayuda desinteresada, a mis amigos por su colaboración generosa y por sus muestras de cariño en todo momento, y a todos quienes me supieron orientar y apoyar, para llegar a una feliz culminación de este proyecto de Tesis.

A todos los antes mencionados Muchas Gracias

## **DEDICATORIA**

A DIOS por haberme dado la vida y permitirme llegar a otra etapa de mi vida, iluminándome, protegiéndome y obsequiándome sabiduría para poder culminar mi carrera universitaria.

A mis dos grandes inspiraciones mis padres Vicente y María por ser mi ejemplo de continua superación, por brindarme a lo largo de mis estudios su apoyo incondicional y desinteresado hasta llegar a la culminación de esta etapa de mi vida.

A mis queridos hermanos Marlene, Armando, María, Marcia, Yuly, Rosa, Liliana y Gabriela por sus muestras de cariño y comprensión en todo momento; y a toda mi familia por su colaboración.

Así mismo a la Sta. Vane y a su señora madre quienes me ayudaron de una forma desinteresada en todo momento sin esperar nada a cambio. A mis compañeros y amigos por su apoyo brindado.

## **EL AUTOR.**



## **RESUMEN**

Los cambios climáticos que está sufriendo el planeta ha generado que los cultivos a cielo abierto sean cada vez menos rentables, obligado a las personas a buscar nuevas formas de protección para estos; surgiendo así los invernaderos los cuales son cada vez más tecnificados para garantizar las condiciones adecuadas para un óptimo desarrollo de las plantas. Por esta razón el presente trabajo está enfocado en diseñar un controlador de temperatura para el invernadero de orquídeas del Jardín Botánico “Reinaldo Espinosa” el cual permitirá tener un rango adecuado de temperatura. Para el diseño del controlador se realizó el monitoreo de las siguientes variables: radiación, temperatura y humedad, tanto al interior como al exterior del invernadero; luego se procedió a ordenar y tabular los datos para importarlos al software Matlab donde se pudo obtener un modelo dinámico lineal de autoregresión con variables exógenas aleatorias BJ, presentándose ésta estructura como la mejor opción para el sistema por que se obtuvo una ecuación de segundo grado la cual permite tener un mejor control del sistema. El sistema de control obtenido consiste en un controlador PID con un tiempo de estabilización de 4,76 minutos. También se realizó un modelo algebraico el cual permite reproducir las condiciones ambientales del invernadero con un error de 1.9°C, ya que la reproducibilidad de la temperatura interna del modelo es muy similar a la temperatura real. El método de control que se hace énfasis en este proyecto son las pantallas térmicas por los múltiples beneficios que estas presentan.



## **SUMMARY**

The climate changes the planet is suffering has generated open crops are becoming less profitable, forced people to seek new ways to protect these, emerging and greenhouses which are becoming more technology to ensure the conditions adequate for optimal plant growth. For this reason the present paper is focused on designing a temperature controller for the greenhouse of the Botanical Garden Orchid "Reinaldo Espinosa" which will have a proper temperature range. To design the controller will monitor the following variables: radiation, temperature and humidity, both inside and outside the greenhouse, then proceeded to sort and tabulate the data to import into Matlab software which was able to obtain a dynamic model linear autoregression with exogenous variables BJ random, presenting it as the best structure for the system that obtained a quadratic equation which allows for better control of the system. The control system is obtained with a PID controller settling time of 4.76 minutes. We also performed an algebraic model which allows playback of greenhouse environmental conditions with an error of  $1.9^{\circ}\text{C}$ , and the reproducibility of the internal temperature of the model is very similar to the actual temperature. The method of control are emphasized in this project include heat shields for the multiple benefits that this presents.



## ÍNDICE GENERAL

CERTIFICACIÓN.....	II
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
DEDICATORIA.....	V
RESUMEN.....	VI
SUMMARY.....	VII
ÍNDICE GENERAL.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIV
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIX
INTRODUCCION.....	1
1. REVISION DE LITERATURA.....	7
1.2. Los Invernaderos.....	8
1.2.1. Tipos de Invernaderos.....	8
1.2.1.1. Invernadero Capilla.....	8
1.2.1.2. Invernadero de Doble Capilla.....	9
1.2.1.3. Invernadero Túnel.....	10
1.2.1.4. Invernadero en Diente de Sierra.....	10
1.2.1.5. Invernadero con Techumbre Curva.....	10
1.2.1.6. Invernadero Tipo Parral o Almeriense.....	10
1.2.1.7. Invernadero Holandés.....	11
1.3. El Efecto invernadero.....	11
1.4. Control Climático en Invernaderos.....	12
1.4.1. Variables Climáticas a Controlar en el Interior del Invernadero.....	13
1.4.1.1. Temperatura.....	14
1.4.1.2. Iluminación (Radiación).....	15
1.4.1.3. Humedad relativa.....	16





1.4.1.4. CO <sub>2</sub> .....	17
1.4.1.5. Índice de Superficie Foliar.....	19
1.4.2. Influencia de las Variables Externas o Perturbaciones sobre el Invernadero....	19
1.5. Las Orquídeas.....	20
1.5.1. Cultivo de Orquídeas en Invernaderos.....	22
1.5.2. Requerimientos Climáticos de las Orquídeas.....	22
1.5.2.1. Temperatura.....	22
1.5.2.2. Luz.....	23
1.5.2.3. Ventilación.....	24
1.6. Medición de las Variables que Intervienen en un Invernadero.....	25
1.6.1. Métodos de medición.....	25
1.6.2. Instrumentos para la Medición de Temperatura.....	26
1.6.2.1. Termómetro de Vidrio.....	27
1.6.2.1.1. Criterios en el uso de termómetros de líquido en vidrio.....	27
1.6.2.2. Termómetros de Resistencia.....	28
1.6.2.3. Detectores de Temperatura de Resistencia.....	28
1.6.2.3.1. Criterios en el uso de termómetros con sensores de resistencia.....	29
1.6.2.4. Termistores.....	29
1.6.2.4.1. Termopares.....	29
1.6.2.4.2. Tipos de Termopares.....	30
1.6.2.4.3. Criterios en el uso de termopares.....	31
1.6.3. Instrumentos para medir Humedad Relativa.....	32
1.6.3.1. Psicrómetro.....	32
1.6.3.2. Higrómetro.....	32
1.6.4. Instrumentos para Medir Radiación Solar.....	33
1.6.4.1. Piranómetro.....	33
1.7. Modelado Matemático.....	34
1.7.1. Modelado y Simulación de Sistemas Biológicos.....	34
1.7.2. Relación entre Modelado y Simulación en un Proyecto de Investigación.....	35
1.7.3. Modelo Matemático de Sistemas Físicos.....	37



1.7.4. Modelización del Clima de los Invernaderos.....	37
1.7.4.1. Modelos Estáticos .....	38
1.7.4.2. Modelos Dinámicos.....	39
1.7.4.3. Modelos de Entrada-Salida.....	40
1.7.4.4. Modelos Paramétricos Lineales.....	40
1.7.4.4.1. Modelo ARX (Auto-Regressive with eXogenous inputs).....	41
1.7.4.4.2. Modelo ARMAX (Auto-Regressive Moving Average with eXogenous inputs).....	41
1.7.4.4.3. Modelo OE (Output Error).....	42
1.7.4.4.4. Modelo BJ (Box-Jenkins).....	42
1.7.5. Modelado por Caja Negra.....	44
1.8. Sistemas de Control.....	45
1.8.1. Acciones de Control.....	45
1.8.2. Clasificación de los Controladores.....	46
1.8.2.1. Clasificación de los Controladores Según el Tipo de Acción y Control.....	47
1.8.2.1.1. Acción de dos posiciones o de encendido y apagado (On/Off).....	47
1.8.2.1.2. Acción del Control Proporcional (P).....	48
1.8.2.1.2.1. Controlador Proporcional Electrónico.....	49
1.8.2.1.3. Acción de Control Integral (I).....	50
1.8.2.1.4. Control Derivativo (D).....	51
1.8.2.1.5. Acción de Control Proporcional Integral (PI).....	52
1.8.2.1.5.1. Controlador Proporcional Integral Electrónico.....	53
1.8.2.1.6. Acción de Control Proporcional Derivativo (PD).....	54
1.8.2.1.6.1. Controlador Proporcional Derivativo Electrónico.....	55
1.8.2.1.7. Acción de Control Proporcional Integral Derivativo (PID).....	56
1.9. Método de Control.....	57
1.9.1. Pantalla Térmica.....	58
1.9.2. Pantallas Térmicas Aluminizadas.....	59
1.10. Eficiencia energética en la climatización de invernaderos.....	61
1.10.1. Ahorro Energético en Calefacción.....	61



1.10.2. Ahorro Energético con Pantalla Térmica.....	62
1.11. Software Utilizado en el Diseño del Controlador.....	63
1.11.1. Matlab.....	64
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	66
2.2.CASO DE ESTUDIO.....	66
2.2.1. Jardín Botánico Reinaldo Espinosa.....	66
2.2.2. Características del Invernadero.....	68
2.2.3. Selección de Variables a Monitorear.....	69
2.2.3.1. La radiación solar.....	69
2.2.3.2. Temperatura Interna.....	70
2.2.3.3. Temperatura Externa.....	71
2.2.3.4. Humedad Relativa.....	71
2.3. Variables Climáticas a Controlar.....	71
2.3.1. Sistema de Adquisición de Datos.....	73
2.3.1.1. Primer Monitoreo.....	74
2.3.1.2. Segundo Monitoreo.....	75
2.3.1.2.1. Medición de la Temperatura Interna y Externa.....	75
2.3.1.2.2. Medición de la Radiación.....	77
2.3.1.2.3. Medición de la Humedad Relativa.....	78
2.4. Modelado y Diseño del Controlador.....	78
2.4.1. Modelo matemático.....	79
2.4.1.1. Procedimiento.....	79
2.4.1.2. Estimación de Parámetros y Pre-procesamiento.....	82
2.4.1.2.1. Estabilidad del Sistema.....	90
2.4.1.2.2. Observabilidad y Controlabilidad.....	91
2.4.1.2.2.1. Observabilidad.....	91
2.4.1.2.2.2. Controlabilidad.....	92
2.4.1.2.3. Diagrama de Nyquist del Sistema.....	92
2.4.1.2.4. Sistema de Control con Retroalimentación Negativa.....	93
2.4.2. Controlador del Sistema.....	94



2.4.2.1. Cálculo del Controlador Mediante Sisotool.....	95
2.4.2.1.1. Cálculo con un Controlador Proporcional (P).....	96
2.4.2.1.2. Cálculo con un Controlador Proporcional Derivativo (PD).....	96
2.4.2.1.3. Cálculo con un Controlador Proporcional Integral (PI).....	97
2.4.2.1.4. Función de Transferencia de un Controlador PID.....	98
2.4.2.2. Simulación del Sistema de Control Retroalimentado.....	101
2.4.2.2.1. Simulación con un Escalón Unitario.....	101
2.4.2.2.2. Simulación con un Tren de Pulsos.....	102
2.4.2.3. Cálculos del Controlador Analógico.....	103
2.4.2.3.1. Parte proporcional (P).....	103
2.4.2.3.2. Parte integral (I).....	104
2.4.2.3.3. Parte derivativa (D).....	104
2.4.2.3.4. Función de Transferencia del Controlador PID.....	105
2.4.2.3.5. Cálculo de los Valores de los Elementos del Circuito PID.....	107
2.5. Modelo Algebraico de Temperatura para el Invernadero.....	110
2.5.1. Determinación de la Ecuación del Modelo.....	110
2.5.1.1. Aporte de Energía por Radiación.....	110
2.5.1.2. Pérdida de Energía debido a la Interacción con el Medio Ambiente.....	111
2.5.2. Mejoramiento al Modelo Propuesto.....	112
2.5.2.1. Mejoramiento a la Ecuación.....	112
2.5.2.2. Pre-procesamiento de las Datas de Radiación y Temperatura Externa.....	113
2.5.2.3. Obtención del Modelo Algebraico.....	114
2.6. Análisis del Método de Control.....	116
2.6.1. Accionamiento de la Pantalla Térmica en el Interior del Invernadero.....	119
2.6.2. Estrategias de Control de la Pantalla Térmica.....	120
2.6.2.1. Estrategia 1.....	120
2.6.2.2. Estrategia 2.....	120
2.6.2.3. Estrategia 3.....	120
2.6.2.4. Estrategia 4.....	121
3. RESULTADOS.....	122



3.2.	Adquisición de Datos.....	122
3.3.	Procesamiento de los Datos.....	122
3.3.1.	Datos de Identificación.....	123
3.3.2.	Datos de Validación.....	124
3.4.	Análisis del sistema con las diferentes estructuras con las que cuenta el programa.....	124
3.4.1.	Estructura ARX.....	125
3.4.2.	Estructura ARMAX.....	125
3.4.3.	Estructura OE.....	125
3.4.4.	Estructura BJ.....	126
3.5.	Obtención de una mejor Estructura para Nuestro Sistema.....	126
3.6.	Función de Transferencia del Sistema.....	127
3.7.	Cálculo del Controlador mediante Sisotool.....	127
3.8.	Simulación del Sistema de Control Retroalimentado.....	128
3.9.	Cálculo del Controlador Analógico.....	129
3.10.	Modelo Algebraico.....	130
3.11.	Método de control.....	132
3.12.	Estrategias de Control de la Pantalla Térmica.....	132
4.	DISCUSIÓN.....	134
4.2.	Valoración Económica y Ambiental.....	138
4.2.1.	Valoración Económica.....	138
4.2.2.	Valoración Ambiental.....	139
5.	CONCLUSIONES.....	140
6.	RECOMENDACIONES.....	142
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	143
8.	ANEXOS.....	146



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Invernadero dotado con pantalla térmica para reducir la cantidad de radiación..	16
<b>Figura 2.</b> Variables que influyen sobre un invernadero.....	20
<b>Figura 3.</b> Termómetro de vidrio.....	27
<b>Figura 4.</b> Unión de los dos metales de una Termocupla.....	30
<b>Figura 5.</b> Diversas etapas de un proyecto de modelado y simulación.....	35
<b>Figura 6.</b> Proceso: metodología BOX-JENKINS.....	43
<b>Figura 7.</b> Diagrama de bloques Caja Negra.....	45
<b>Figura 8.</b> Diagrama de bloques de un controlador de encendido y apagado.....	47
<b>Figura 9.</b> Diagrama de bloques de un controlador de encendido y apagado con una brecha diferencial.....	48
<b>Figura 10.</b> Diagrama de bloques de un controlador proporcional.....	49
<b>Figura 11.</b> Controlador proporcional electrónico.....	49
<b>Figura 12.</b> Diagrama de bloques de un controlador integral.....	51
<b>Figura 13.</b> Diagrama de bloques de un controlador proporcional integral.....	53
<b>Figura 14.</b> Diagrama que muestran una entrada escalón unitario y la salida del controlador.....	53
<b>Figura 15.</b> Controlador proporcional integral electrónico.....	54
<b>Figura 16.</b> Diagrama de bloques de un controlador proporcional derivativo.....	55
<b>Figura 17.</b> Diagrama que muestran una entrada rampa unitaria y la salida del controlador.....	55



<b>Figura 18.</b> Controlador Derivativo.....	56
<b>Figura 19.</b> Diagrama de bloques de un controlador proporcional integral derivativo.....	56
<b>Figura 20.</b> Diagrama que muestran una entrada rampa unitaria y la salida del controlador.....	57
<b>Figura 21:</b> Invernadero con sistema de pantallas térmicas.....	58
<b>Figura 22.</b> Pantalla térmica aluminizada.....	60
<b>Figura 23.</b> Logo de Matlab.....	64
<b>Figura 24.</b> Invernadero de orquídeas.....	67
<b>Figura 25.</b> División de la radiación de onda corta al ponerse en contacto con la cubierta..	70
<b>Figura 26.</b> Instrumentos de Medición Utilizados.....	74
<b>Figura 27.</b> Datalogger de Temperatura.....	75
<b>Figura 28.</b> Medición de Radiación.....	78
<b>Figura 29.</b> Ventana principal del Matlab, importación de datos desde Excel.....	80
<b>Figura 30.</b> Obtener los datos en forma de vector.....	80
<b>Figura 31.</b> Ingreso al Control and Estimation Tools Manager.....	81
<b>Figura 32.</b> Importación de los vectores de radiación y temperatura desde el Workspace..	81
<b>Figura 33.</b> Graficas de las variables externas sin procesar.....	82
<b>Figura 34.</b> Interpolación con los Métodos Zoh y Linear.....	83
<b>Figura 35.</b> Eliminación de valores que no sigan la tendencia.....	84
<b>Figura 36.</b> Datas Procesadas de Radiación y de Temperatura.....	85
<b>Figura 37.</b> Importación de Datos al Ident.....	85



<b>Figura 38.</b> Grafica de identificación y de Validación.....	86
<b>Figura 39.</b> Ingreso a la Estimación de Parámetros.....	86
<b>Figura40.</b> Estructura ARX321.....	87
<b>Figura 41.</b> Estructura ARMAX2221.....	87
<b>Figura 42.</b> Estructura OE221.....	88
<b>Figura 43.</b> Estructura BJ22221.....	88
<b>Figura 44.</b> Raíces de la función de transferencia G.....	91
<b>Figura 45.</b> Diagrama de Nyquist del sistema.....	93
<b>Figura 46.</b> Respuesta del sistema a una entrada escalón unitario.....	94
<b>Figura 47.</b> Respuesta del sistema con un controlador Proporcional.....	96
<b>Figura 48.</b> Respuesta del sistema con un controlador PD.....	96
<b>Figura 49.</b> Respuesta del sistema con un controlador PI.....	97
<b>Figura 50.</b> Respuesta del sistema con un controlador PI con Variación de los Parámetros.....	97
<b>Figura 51.</b> Función de transferencia de un controlador PID sin optimización de parámetros.....	98
<b>Figura 52.</b> Respuesta del sistema con un controlador PID.....	99
<b>Figura 53.</b> Función de transferencia de un controlador PID con optimización de parámetros.....	99
<b>Figura 54.</b> Respuesta del sistema con un controlador PID optimizado.....	100
<b>Figura 55.</b> Ubicación de los polos y ceros del controlador y de la planta.....	100





<b>Figura 56.</b> Diagrama de bloques del sistema con escalón unitario.....	101
<b>Figura 57.</b> Respuesta del sistema obtenida en Simulink.....	102
<b>Figura 58.</b> Diagrama de bloques del sistema con un tren de pulsos.....	102
<b>Figura 59.</b> Respuesta del sistema obtenida con un tren de pulsos.....	103
<b>Figura 60.</b> Parte Proporcional.....	103
<b>Figura 61.</b> Parte Integral.....	104
<b>Figura 62.</b> Parte Derivativa.....	104
<b>Figura 63.</b> Circuito equivalente del controlador PID.....	109
<b>Figura 64.</b> Diagrama de la ecuación del primer modelo.....	112
<b>Figura 65.</b> Datas procesadas para el modelo matemático.....	113
<b>Figura 66.</b> Diagrama de bloques que contiene la ecuación del modelo algebraico.....	114
<b>Figura 67.</b> Datos de las constantes del modelo algebraico.....	115
<b>Figura 68.</b> Seguimiento de la temperatura real vs el modelo algebraico.....	115
<b>Figura 69.</b> Data de radiación solar de identificación procesada y sin procesar.....	123
<b>Figura 70.</b> Data de temperatura interna de identificación procesada y sin procesar.....	123
<b>Figura 71.</b> Data de radiación solar de validación procesada y sin procesar.....	124
<b>Figura 72.</b> Data de temperatura interna de validación procesada y sin procesar.....	124
<b>Figura 73.</b> Reproducibilidad de la estructura BJ 22121.....	126
<b>Figura 74.</b> Diagrama de autocorrelación y residuos.....	127
<b>Figura 75.</b> Optimización del controlador PID.....	128



---

<b>Figura 76.</b> Respuesta del controlador PID en el sisotool.....	128
<b>Figura 77.</b> Diagrama de bloques del controlador PID.....	129
<b>Figura 78.</b> Simulación del controlador con escalón unitario.....	129
<b>Figura 79.</b> Diagrama electrónico del controlador PID.....	130
<b>Figura 80.</b> Diagrama de bloques del modelado algebraico.....	131
<b>Figura 81.</b> Comportamiento del modelo algebraico vs temperatura interna real.....	132



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Gases de efecto invernadero.....	12
<b>Tabla 2.</b> Tipos de Termocuplas.....	31
<b>Tabla 3.</b> Rango de temperatura de algunos tipos de orquídeas que se cultivan en el invernadero.....	7
<b>Tabla 4.</b> Datos del monitoreo sin malla polisombra.....	116
<b>Tabla 5.</b> Datos del monitoreo con malla polisombra.....	117
<b>Tabla 6.</b> Mejores coeficientes para nuestro sistema con una estructura ARX.....	125
<b>Tabla 7.</b> Mejores coeficientes para nuestro sistema con una estructura ARMAX.....	125
<b>Tabla 8.</b> Mejores coeficientes para nuestro sistema con una estructura OE.....	125
<b>Tabla 9.</b> Mejores coeficientes para nuestro sistema con una estructura BJ.....	126
<b>Tabla 10.</b> Valoración económica del presente proyecto.....	138

## **INTRODUCCIÓN**

El sector agrario en el país no ha tenido un desarrollo significativo en las últimas décadas, por esta razón se ha visto la necesidad de tecnificar a este sector ya que cada vez son más las exigencias que presentan los mercados globalizados. Siendo este un sector clave para el desarrollo del país se ve la necesidad de bajar costos en producción y mejorar la calidad de los productos para poder competir con países tecnificados que nos llevan la delantera, y de esta manera poder tener una rentabilidad económica.

Como cada especie vegetal necesita de condiciones favorables para aumentar la producción y mejorar la calidad del producto, es recomendable el cultivo bajo invernaderos ya que estos permiten disminuir considerablemente las amenazas que presentan los cultivos a cielo abierto como son, las enfermedades y la influencia directa de las variables climáticas que pueden ser falta o exceso de lluvia, vientos, radiación, entre otras. Para la protección de los cultivos de estas influencias, se cuenta con diversos tipos de invernaderos de acuerdo a las necesidades de cada cultivo y del sector donde este situado el mismo.

En nuestro entorno especialmente en la ciudad de Loja se hace cada vez, más común el uso de invernaderos, pero de ahí la necesidad de dotar a los productores agrícolas de un material informático suficiente para el uso eficiente de estos invernaderos, y si fuese posible involucrarlos en el uso de nuevas tecnologías, que le permitan la implementación de sistemas de control automáticos en sus invernaderos. La implementación de nuevas tecnologías permiten actuar directamente sobre las variables climáticas como son la temperatura, radiación, ventilación, humedad, índice de superficie foliar entre otras.; ya que dentro del invernadero se facilita el control de las variables que intervienen en el microclima, al tratarse de áreas pequeñas, las cuales están cerradas por una cubierta especial.

Con el control del microclima en invernaderos, se trata de dotar a la plantas de las condiciones favorables para un óptimo desarrollo, de esta manera se contribuirá al mejoramiento de la producción y calidad del producto final.



Los sistemas de control automáticos son muy utilizados para el control de microclimas en invernaderos ya que permiten el control de las variables críticas que se encuentran cambiando constantemente en el ambiente. Estos sistemas permiten que las variables a controlar permanezcan en un punto de referencia o en cierto rango aceptable para los requerimientos del cultivo. Esto con el fin de que los invernaderos sean eficientes, logrando de esta manera aumentar y mejorar la producción, además se puede minimizar costos en mano de obra por que se requiere menos personal para el cuidado del cultivo.

Una de las variables más importante en el control de invernaderos es la temperatura, esta es la responsable de una parte del crecimiento y desarrollo de plantas. Al realizar un control de temperatura, también se puede influir de una manera indirecta sobre las demás variables; el porcentaje de control de estas variables dependerá del sistemas escogido para el control de temperatura como pueden ser: el sistema controlado por calefactores y ventiladores, el sistema por nebulizadores, el sistema por pantallas térmicas, etc., o puede ser la combinación de algunos sistemas para el ahorro de energía. El control del microclima de un invernadero en forma manual se hace complicado, fastidioso y poco eficiente, ya que para el ser humano los pequeños cambios climáticos son imperceptibles. En este sentido se hace necesario el uso de técnicas de control automático.

Una herramienta que ha facilitado el estudio de microclimas en invernaderos son los modelos matemáticos, estos han permitido predecir el comportamiento de las variables climáticas que presenta el medio ambiente, ayudando así a tener un mejor manejo del invernadero. Los modelos matemáticos también nos dan una pauta que nos ayuda a escoger el sistema automático de control más apropiado para nuestro invernadero.

Frente al panorama que presenta nuestra región, además con el firme propósito de vincularnos con la colectividad y con el afán de contribuir a la misma, en el presente proyecto se ha planteado realizar el “Diseño de un controlador automático mediante modelado y simulación de la temperatura para el invernadero del Jardín Botánico “Reinaldo Espinosa” de la Universidad Nacional de Loja; con la finalidad de obtener un diseño que permita garantizar un rango de temperatura adecuado para las orquídeas, además se

pretende que este proyecto sirva de base para futuras investigaciones e implementaciones de sistemas automáticos, para controlar microclimas de invernaderos en la región.

En la actualidad los cambios climáticos que está viviendo el planeta debido al calentamiento global ocasionado por la exagerada contaminación al que está expuesto ha ocasionado que la variación del clima sea extremo y poco predecible, debido a esto el país también está sufriendo estos cambios climáticos bruscos; estas variaciones climáticas especialmente la radiación solar, en nuestra ciudad ha provocado la inestabilidad en el microclima de invernaderos provocando así que los parámetros idóneos de temperatura para el desarrollo de los cultivos no sean los adecuados, incluso en algunos casos se ha visto la pérdida de estos cultivos. Con este enfoque el presente proyecto de tesis busca realizar un estudio en un invernadero experimental localizado en el Jardín Botánico “Reinaldo Espinoza” de la Universidad Nacional de Loja, el cual cuenta con una cubierta de polietileno, sus paredes son de hormigón y está destinado para el cultivo de orquídeas.

En nuestro caso al tratarse de un cultivo de orquídeas, el cual necesita de un cuidado especial para que esta planta florezca ya que su principal atractivo es su flor, es necesario tener en el invernadero un rango adecuado de temperatura; teniendo en cuenta también el clima donde se encuentra situado el invernadero. Se ha podido apreciar que el medio donde está ubicado el invernadero es muy diferente al clima natural donde se desarrollan estos tipos de orquídeas, por esta razón es muy importante el desarrollo de este proyecto de investigación; para lo cual con la ayuda del docente guía nos hemos planteado objetivos que nos permitan culminar con éxito el presente proyecto. El objetivo general que persigue esta investigación es “Proporcionar el diseño de un controlador de temperatura para el invernadero efectuando un análisis con la utilización de pantallas térmicas para el cultivo de orquídeas”, para el cumplimiento de este objetivo, el cual es la base principal del proyecto se lo decidió efectuar en tres fases, es decir se planteo tres objetivos específicos los mismos que serán mencionados a continuación.

Primeramente es necesario conocer las condiciones actuales del invernadero para lo cual se estableció el primer objetivo específico que versa de la siguiente manera: “Determinar las características actuales del invernadero que tomaremos como modelo”, este objetivo

permitió tener un conocimiento de la infraestructura actual del invernadero, los materiales del cual está construido, sus características como son: dimensiones, número y tipo de plantas que en él se alojan, etc., además se realizó el monitoreo de algunas variables climáticas tanto al interior como al exterior del invernadero para conocer el comportamiento del clima a lo largo del día, para lo cual nos valimos de los instrumentos necesarios que nos permitan obtener la información que requeríamos.

En la segunda fase se planteó el objetivo específico que versa de la siguiente manera: “Obtener el modelado matemático del sistema”. Con los datos obtenidos del monitoreo se obtuvo un modelo que nos permite predecir el comportamiento de las variables que queremos controlar. El modelo que se desarrolló es del tipo caja negra, el cual resultó la mejor opción para nuestros requerimientos; además cabe mencionar que la estructura BJ (BOX-JENKINS) con variables exógenas, es la que permitió obtener la función de transferencia del modelo más adecuado. El modelo se basa en el balance de masa y energía del ambiente del invernadero, para lo cual la variable de entrada es la radiación solar y la variable a predecir es la temperatura interna del invernadero. Los modelos autoregresivos tienen la ventaja de ser generados rápidamente, ya que se obtienen los datos experimentalmente, al establecer la relación entrada-salida del sistema mediante técnicas de identificación de parámetros. También se realizó un modelo algebraico basado en un autor que permitió la validación del modelo anterior.

Para la última fase del proyecto se planteó el siguiente objetivo específico: “Diseñar el controlador de temperatura”. Con el modelo matemático ya obtenido se procedió a realizar el diseño del controlador con la ayuda del software, obteniendo un controlador del tipo PID, con un tiempo de estabilización del sistema de 4,76 minutos. Además cabe mencionar que el uso de sistemas de control como el PID son los más aplicados en sistemas térmicos, desde la aparición de los Microprocesadores y Microcontroladores en el ámbito industrial.

El proyecto está enfocado en dotar al invernadero con un diseño de un controlador de temperatura que permita mejorar las condiciones climáticas del invernadero de orquídeas, para lo cual se debe tener en cuenta que este tipo de planta tiene unas exigencias muy especiales de temperatura y humedad; dotando de esta manera con características

ambientales similares a las condiciones originales en las que estas plantas se desarrollan. En la actualidad hay una persona encargada de manipular el invernadero con el fin de dotar al mismo de condiciones favorables para las orquídeas, pero al realizarlo de forma manual esto conlleva a que las condiciones no sean las adecuadas, presentando problemas al cultivo; debido a estos problemas es necesario dejar de manipularlo de la manera tradicional, y buscar nuevas alternativas que permitan automatizarlo de una manera que sea accesible y económica.

Para la aplicación de estas nuevas tecnologías se debe tener un gran respeto con el medio ambiente tratando de buscar estrategias de ahorro de energía; factor muy importante que debe ser tomado en cuenta cuando se diseñen sistemas automáticos de control. Para el control del microclima del invernadero, se debe tratar de utilizar en lo mínimo equipos que tengan un gran consumo eléctricos o de combustibles tanto para calefacción, ventilación, nebulización, etc. Se debe tratar de utilizar al máximo las energías renovables como son la energía solar y eólica, ya que estas son las más comunes en un invernadero; para tratar de manipular estas energías dentro de un invernadero en un sistema de control automático se puede optar por diversas alternativas que existen en el mercado como son: transformar una forma de energía en otra, el almacenamiento de energía, el uso de pantallas térmicas, las dobles cubiertas, la manipulación de las ventanas, entre otras. De esta manera contribuiremos a cuidar y preservar el medio ambiente.

Una alternativa muy importante para el control de temperatura es la utilización de las pantallas térmicas ya que retienen el calor, esto lo logran evitando que el aire del invernadero esté en contacto directo con la cubierta, también contribuyen con la disminución de la humedad relativa y por tanto las posibilidades de condensación entre muchas ventajas más, de esta manera permitiendo un ahorro significativo de energía; estas pantallas pueden ser utilizadas en invierno; abiertas durante el día y cerradas durante la noche para almacenar el calor que se acumuló durante el día, en verano se la utiliza a la inversa. En sistemas automáticos se la utiliza para múltiples propósitos, para lo cual el sistema de apertura y cierre debe ser móvil para ser utilizado cuando convenga. Las pantallas térmicas nos permiten una ganancia térmica de unos 2 a 4°C en invernaderos sin





calefacción; también nos permiten dificultar la ventilación, aumentar la higrometría nocturna, disminuir la radiación, etc.; contribuyendo así a mejorar las condiciones climáticas del invernadero como son: calefacción, humidificación, sombreo, fumigación, entre otros. Las pantallas térmicas más eficientes son las aluminizadas, pero aún son poco frecuentes por su elevado costo y su complicada instalación en invernaderos artesanales; según los fabricantes este tipo de pantalla tiene un ahorro de energía de entre un 30 a 50%.

Por todo lo anteriormente mencionado es necesario dotar al sector agrícola de todas las técnicas necesarias que le permitan seguir creciendo, de esta manera permitiéndole a esta importante parte de la población de nuestro país, reducir costos de producción para lograr tener un cultivo rentable que le garantice competir en un mercado globalizado. De ahí el reto para todos los sectores a contribuir con la obtención de sistemas que permitan al sector agrícola seguir creciendo; porque éste sector importante de la población no cuenta con los fondos suficientes que le permitan solventar el costo de la implementación de sistemas de control, debido a que la mayor parte de la población dedicada a la agricultura vive en zonas rurales; si todos contribuimos a buscar nuevas estrategias que le permitan al sector seguir mejorando, se estará garantizando la generación de nuevos empleos para él sector.

## **1. REVISION DE LITERATURA**

### **1.1. Los Invernaderos**

Un invernadero es una construcción especial cerrada que sirve para crear y mantener condiciones ambientales apropiadas para un cultivo específico, además son capaces de proporcionar cosechas fuera de las épocas habituales que se producirían al aire libre.

Conforme transcurre el tiempo se hace cada vez más común el uso de invernaderos formando así parte del proceso productivo involucrando así a especies vegetales. Las grandes empresas dedicadas al cultivo bajo invernaderos se han preocupado por mejorar las condiciones climáticas de los mismos, por esta razón se ha venido mejorando la calidad de la estructura y de la misma manera el material de los diferentes tipos de cubiertas ya que esta es la responsable de proteger al cultivo de las condiciones externas y así mismo del paso de luz y calor.

En el mercado actual hay una gran variedad de materiales para la construcción de invernaderos la elección de los mismos dependerá del tipo de cultivo, además deberemos tener en cuenta la ubicación, la orientación, la forma, el tamaño y la ventilación. Teniendo en cuenta todos estos parámetros mejoraremos las condiciones del invernadero pero no podemos garantizar mantener constantes las condiciones óptimas para un cultivo específico, para tratar de mantener en un rango adecuado el microclima del invernadero se puede realizar la automatización del mismo.

Las principales ventajas del uso de invernaderos son: la aceleración en la obtención de la cosecha, un aumento en la calidad y el rendimiento del producto, la producción fuera de épocas comunes, ahorro de agua y fertilizantes, mejor control de plagas y enfermedades, obtener más ciclos de cultivo al año, entre otras. Los inconvenientes más comunes del uso de invernadero son: su implementación ya que tiene un alto costo en la inversión inicial, además costos de operación y mantenimiento para lo cual necesitamos personal especializado con conocimientos teóricos y prácticos.

### **1.1.1. Tipos de Invernaderos**

Para realizar una clasificación de los tipos de invernaderos hay muchos criterios los cuales toman en cuenta los materiales utilizados para la construcción, las características de la techumbre, etc.; a continuación citamos los más utilizados alrededor del mundo:

- Invernadero Capilla (a dos aguas)
- Invernadero de Doble Capilla
- Invernadero Túnel
- Invernadero en Diente de Sierra
- Invernadero con Techumbre Curva
- Invernadero Tipo Parral o Almeriense
- Invernadero Holandés

Posteriormente se realizará un pequeño análisis de ésta clasificación, haciendo mayor énfasis en el invernadero tipo capilla ya que el invernadero objeto de estudio en el presente proyecto es de este tipo.

#### **1.1.1.1. Invernadero Tipo Capilla**

Los invernaderos de capilla simple son una de las estructuras más antiguas pueden formar en la techumbre uno o dos planos inclinados, variando normalmente entre 15 y 35°, pero se recomienda que ésta sea mayor a los 25° para que no tenga inconvenientes en la evacuación de las aguas lluvia. La anchura que suele darse a estos invernaderos depende del lugar donde van a ser ubicados y estos pueden variar entre los 6 y 16 metros; la altura en cumblera está comprendida entre 3 y 4 metros. Si la inclinación de los planos de la techumbre es mayor a 25° la ventilación es por ventanas frontales y laterales, cuando se trata de estructuras formadas por varias naves unidas la ausencia de ventanas cenitales dificulta la ventilación.

Este tipo de invernadero es muy utilizado, destacando las siguientes ventajas:

- Es de fácil construcción y de fácil conservación.
- Es muy aceptable para la colocación de todo tipo de plástico en la cubierta.

- Tiene grandes facilidades para evacuar el agua de lluvia.
- Permite la unión de varias naves en batería.
- Utilización de materiales de bajo costo según su zona.

Las desventajas que presentan son las siguientes:

- Problemas de ventilación con invernaderos en baterías.
- A igual altura cenital, tiene menor volumen encerrado que los invernaderos curvos.
- Mayor número de elementos por lo que disminuye el paso de la luz.

### **1.1.1.2. Invernadero de Doble Capilla**

Los invernaderos de doble capilla están formados por dos naves yuxtapuestas. Su ventilación es mejor que en otros tipos de invernadero, debido a la ventilación cenital que tienen en cumbre de los dos escalones que forma la yuxtaposición de las dos naves; estas aberturas de ventilación suelen permanecer abiertas constantemente y suele ponerse en ellas malla mosquitera. Además también poseen ventilación vertical en las paredes frontales y laterales. (Copyright Infoagro Systems, 2003)

Este tipo de invernadero no es muy extendido debido a que su construcción es más dificultosa y cara que el tipo de invernadero capilla simple a dos aguas.

Siendo sus principales ventajas:

- Construcción de mediana complejidad.
- Excelente ventilación, siendo muy adecuados para la conformación de baterías.
- Empleo de algunos materiales de bajo costo.

Sus desventajas más comunes son:

- Sombreo mayor que el de capilla debido a mayor número de elementos.
- A igual altura cenital, tiene menor volumen encerrado.
- Elementos de soportes internos que dificultan los desplazamientos y el emplazamiento de cultivos.

### **1.1.1.3. Invernadero Túnel**

Se caracteriza por la forma de su cubierta y por su estructura totalmente metálica. El empleo de este tipo de invernadero se está extendiendo por su mayor capacidad para el control de los factores climáticos, su gran resistencia a fuertes vientos y su rapidez de instalación al ser estructuras prefabricadas. (Copyright Infoagro Systems, 2003)

### **1.1.1.4. Invernadero en Diente de Sierra**

Son una variación de los invernaderos capilla, que se comenzó a utilizar en zonas con muy baja precipitación y altos niveles de radiación, fueron los invernaderos a una vertiente. Estos invernaderos contaban con una techumbre única inclinada en ángulos que variaban entre 5° y 15° (orientados en sentido este-oeste y con presentación del techo hacia la posición del sol norte para el hemisferio sur). El acoplamiento lateral de este tipo de invernaderos dio origen a los conocidos como dientes de sierra. La necesidad de evacuar el agua de precipitación, determinó una inclinación en las zonas de recogida desde la mitad hacia ambos extremos. (ESTERO, 2004)

### **1.1.1.5. Invernadero con Techumbre Curva**

Este tipo de invernaderos tienen su origen en los invernaderos tipo túnel, por lo común su estructura es de tipo metálico. Dentro de este tipo de invernaderos, pueden encontrarse una gama de alternativas según la forma que adopta el techo como puede ser en: i, e, circulares, semielípticos, medio punto, ojivales etc.

### **1.1.1.6. Invernadero Tipo Parral o Almeriense**

Este tipo de invernadero se utiliza en zonas poco lluviosas, aunque no es aconsejable su construcción. La estructura de estos invernaderos se encuentra constituida por dos partes claramente diferenciadas, una estructura vertical y otra horizontal (Copyright Infoagro Systems, 2003). La pendiente es casi inexistente, o bien en zonas con pluviometría de riesgo se suele dar una inclinación de 10° a 15°.

### **1.1.1.7. Invernadero Holandés**

Son invernaderos de vidrio, estos invernaderos carecen de ventanas laterales en vez de eso tienen ventanas cenitales alternadas en su apertura una hacia un lado y la siguiente hacia el otro.

## **1.2. El Efecto Invernadero**

La energía que nos llega del Sol está constituida por radiación infrarroja, ultravioleta y luz visible, mientras que la atmósfera absorbe la mayor parte de la radiación infrarroja y ultravioleta, la luz visible llega a la superficie de la Tierra.

Como el invernadero está cubierto en su mayor parte de vidrio o plástico los cuales son transparentes y permiten el paso de una parte de la energía que llega a la superficie terrestre, esta energía en forma de luz visible es utilizada por las plantas verdes para producir hidratos de carbono, en un proceso químico conocido con el nombre de fotosíntesis. En este proceso, las plantas utilizan anhídrido carbónico y luz para producir hidratos de carbono y oxígeno. En la fotosíntesis participa únicamente una cantidad muy pequeña de toda la energía que entra en el invernadero, el resto de ésta energía es absorbida por la superficie del invernadero (tierra) que, a su vez, emite gran parte de ella como radiación infrarroja. Esta radiación infrarroja es absorbida por los gases (como el anhídrido carbónico y el vapor de agua los mismos actúan como un filtro en una dirección, es decir, dejan pasar la energía en forma de luz visible, hacia el interior del invernadero, mientras que no permiten que la superficie emita energía al espacio exterior en forma de radiación infrarroja) ya que una gran cantidad de energía se encuentra circulando entre la superficie y la cubierta produciéndose así el efecto invernadero.

Así mismo el invernadero realiza un intercambio de energía entre la parte interna con la externa, este intercambio se realiza por convección siendo realmente simple, cuando el fluido interno está caliente se expande y su densidad disminuye. Esto es lo que hace que el aire frío descienda y el aire caliente ascienda; así mediante la convección se transmite energía térmica por el fluido debido al movimiento del propio fluido.

Los gases más comunes que intervienen en el efecto invernadero se los muestra en la Tabla 1. Como se puede observar en la columna de acción relativa, un gramo de clorofluorocarbono (CFC) produce un efecto invernadero 15.000 veces mayor que un gramo de dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), pero como la cantidad de CO<sub>2</sub> es mucho mayor que la del resto de los gases, la contribución real al efecto invernadero (en porcentaje) es la que señala la columna de la derecha. Otros gases como el oxígeno y el nitrógeno, aunque se encuentran en proporciones mucho mayores, no son capaces de generar efecto invernadero (PROFESOR EN LINEA, 2011).

**Tabla 1.** Gases de efecto invernadero

	<b>Acción Relativa</b>	<b>Contribución Real</b>
CO <sub>2</sub> (dióxido de Carbono)	1 (referencia)	76 %
CFCs	15.000	5 %
CH <sub>4</sub> (metano)	25	13 %
N <sub>2</sub> O (óxido nitroso)	230	6 %

El invernadero tiene la ventaja que su cubierta transparentes permite el paso de la radiación visible procedente del Sol, que calienta los objetos que hay en su interior como la tierra y las plantas. Éstas calientan a su vez el aire que hay en el interior y la radiación infrarroja emitida es absorbida por los cristales, pero la pérdida térmica evitada de este modo es insignificante. El aire caliente del interior del invernadero asciende, al disminuir su densidad, tratando de escapar, pero no puede debido a las paredes siendo reemplazado el aire frío.

### **1.3. Control Climático en Invernaderos**

El cultivo bajo invernadero como se señalo anteriormente ha permitido obtener producciones de mejor calidad y mayor rendimiento, en cualquier época del año, a la vez que permiten alargar el ciclo de cultivo, permitiendo de esta manera producir en las épocas más difíciles del año y obtener así mejores precios para la producción. Por esta razón

siempre se ha tratado de mejorar la estructura del invernadero, los sistemas de riego localizado, los sistemas de gestión del clima, etc., que se reflejan posteriormente en una mejora del rendimiento y calidad del producto final.

### **1.3.1. Variables Climáticas a Controlar en el Interior del Invernadero**

Las plantas necesitan un ambiente favorable en el que sean capaces no sólo de vivir sino también de producir. Con el control del clima en el invernadero se trata de dotar a la planta de estas condiciones favorables, o al menos unas condiciones lo más próximas a las óptimas, de manera que se obtengan buenas cosechas no sólo desde el punto de vista cuantitativo sino también cualitativo. Si el clima del invernadero se vuelve desfavorable para la planta, las plantas se resienten y debilitan haciéndose más vulnerables a enfermedades y originando problemas fisiológicos. (RODRÍGUEZ DÍAZ, 2009)

Los cultivos necesitan, según el estado de crecimiento en el que se encuentren, unos valores determinados de las siguientes variables climáticas:

- Temperatura
- Iluminación (Radiación)
- Humedad relativa (Vapor de Agua)
- Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>).

Estos factores definen el clima del invernadero incidiendo sobre la planta determinando así la tasa de fotosíntesis, respiración y transpiración que a su vez modifican el clima del invernadero. Es necesario comprender la respuesta de la planta al clima del invernadero y su interrelación para proceder a un adecuado control del sistema de producción. Es importante saber en qué estado de desarrollo se hallen el cultivo ya que existen unos valores mínimos y máximos para estas variables en cada etapa del cultivo, si estas se encuentran fuera de los rangos admisibles del cultivo podría cesar su actividad metabólica o incluso pueden morir.



El proceso de producción es complejo y está basado en una serie de subprocesos en los que las variables climáticas son factores determinantes de la eficiencia en la asimilación de carbono (LORENZO, 2002).

El control de microclimas de invernaderos se hace muy difícil ya que las variables externas son muy inestables especialmente en ciertas épocas del año, por ésta razón se debe conocer acerca de las variables climáticas a controlar.

### **1.3.1.1. Temperatura**

La temperatura es el parámetro más importante a tener en cuenta en el manejo del ambiente dentro de un invernadero, ya que es la que más influye en el crecimiento y desarrollo de las plantas; para realizar un correcto manejo de la temperatura es importante conocer las necesidades y limitaciones de la especie cultivada, ya que cada cultivo tiene su temperatura optima, normalmente un rango adecuado es el comprendido entre los 10 y 25°C.

Para realizar una correcta práctica agrícola debemos tener en cuenta las siguientes temperaturas:

*Temperatura mínima letal*; si ésta disminuye aún más produce daños irreversibles en la planta, también se puede decir que es la temperatura tope por debajo de esta muere la planta

*Temperaturas máximas y mínimas biológicas*; estas indican valores por encima o por debajo de las cuales, no es posible que la planta alcance una determinada fase vegetativa, como floración, fructificación, etc.

*Temperaturas nocturnas y diurnas*; indican los valores aconsejados para un correcto desarrollo de la planta.

La temperatura en el interior del invernadero, depende de la radiación solar incidente, comprendida en una banda entre 200 y 4000 nm. El aumento de la temperatura en el interior del invernadero se origina cuando el infrarrojo largo, proveniente de la radiación que pasa a través del material de cubierta, se transforma en calor. Esta radiación es absorbida por las plantas, los materiales de la estructura y el suelo. Como consecuencia de

esta absorción, éstos emiten radiación de longitud más larga que tras pasar por el obstáculo que representa la cubierta, se emite radiación hacia el exterior y hacia el interior, calentando el invernadero.

El calor se transmite en el interior del invernadero por irradiación, conducción, infiltración y por convección, tanto calentando como enfriando. La conducción es producida por el movimiento de calor a través de los materiales de cubierta del invernadero. La convección tiene lugar por el movimiento del calor por las plantas, el suelo y la estructura del invernadero. La infiltración se debe al intercambio de calor del interior del invernadero y el aire fresco del exterior a través de las juntas de la estructura y la radiación, por el movimiento del calor a través de la zona transparente (CALDARI JÚNIOR, 2007).

En lugares muy fríos en los cuales puedan presentarse heladas y estas a su vez producen daños en los tejidos de las plantas es aconsejable que el invernadero tenga doble cubierta y pueda quedar perfectamente cerrado para evitar el frío durante las noches.

### **1.3.1.2. Iluminación (Radiación)**

La radiación solar es la principal fuente de calor en un invernadero, provocando el incremento del nivel térmico de todos sus componentes ya que estos, expuestos al sol, absorben radiación de onda corta, que supone un aumento de su excitación molecular y, por tanto, incremento de su temperatura (RAPOSO LLOBET, 2004).

Así mismo la radiación solar interviene en la iluminación del invernadero, para saber cómo incluye sobre el invernadero debemos tener en cuenta: la posición del sol, las propiedades ópticas de la cubierta, la orientación del invernadero y el sombreado producido por los elementos estructurales y equipamiento.

Si aumenta la luminosidad en el interior del invernadero esta influirá en el aumento de la temperatura, la humedad relativa y el CO<sub>2</sub>, para que la fotosíntesis sea máxima; por el contrario, si la luz disminuye pueden descender las condiciones que necesita el cultivo.

Para mejorar la luminosidad natural se usan los siguientes medios:

- Materiales de cubierta con buena transparencia.
- Orientación adecuada del invernadero.
- Materiales que reduzcan el mínimo las sombras interiores.
- Aumento del ángulo de incidencia de las radiaciones sobre las cubiertas.
- Acolchados del suelo con plástico blanco.

En el verano se presenta un gran incremento en la radiación y por ende en la luminosidad produciendo daños en las plantas para reducir la misma se puede emplear:

- Blanqueo de cubiertas.
- Mallas de sombreo.
- Acolchados de plástico negro en el suelo.

Es interesante destacar el uso de estos materiales como se puede observar en la Figura 1, ya que están elaborados para mejorar el desarrollo del cultivo y el control de la temperatura. La implementación de algunos de estos materiales en un invernadero tiene efectos positivos; pero también estos tienen efectos contradictorios que hay que conocer para hacer un correcto uso.



**Figura 1.** Invernadero dotado con pantalla térmica para reducir la cantidad de radiación.

### **1.3.1.3. Humedad Relativa.**

La humedad es la masa de vapor de agua en unidad de volumen o por unidad de masa de aire. Se produce una relación inversa entre temperatura y humedad, de hecho, cuanto mayor

es la temperatura, mayor es la capacidad de contener vapor de agua en ese aire, y por lo tanto disminuye la humedad relativa. Por el contrario, cuando baja la temperatura del aire, ésta es capaz de contener una menor cantidad de vapor de agua, con lo que aumenta la humedad relativa (RODRÍGUEZ DÍAZ, 2009).

Cuando el aire del invernadero se encuentra saturado y la temperatura desciende, se producen condensaciones o agrupaciones de moléculas de agua formando gotas líquidas. Este fenómeno suele darse con mayor frecuencia en las primeras horas frías del amanecer, aunque también es posible la condensación durante la noche y a la caída de la tarde, cuando la temperatura desciende bruscamente y el invernadero está húmedo por la transpiración (PERALES, PERDIGONES, GARCÍA, & MONTERO, 2003).

Al amanecer, los rayos del sol inciden sobre la planta haciendo que aumente la transpiración y aumentando la humedad absoluta del aire del invernadero. Sin embargo, la temperatura de la planta y de la cubierta aumenta lentamente.

Por ello, al ponerse en contacto el aire del invernadero con estas zonas frías (ya sea en la cubierta o en el propio cultivo), pueden producirse fenómenos de condensación.

La humedad relativa del aire es un factor climático que puede modificar el rendimiento final de los cultivos. Cuando la humedad relativa es excesiva las plantas reducen la transpiración y disminuyen su crecimiento, se producen abortos florales por apelmazamiento del polen y un mayor desarrollo de enfermedades criptogámicas. Por el contrario, si es muy baja, las plantas transpiran en exceso, pudiendo deshidratarse (Copyright Infoagro Systems, S.L., 2003).

El exceso de humedad relativa puede reducirse mediante ventilación, aumentando la temperatura y evitando el exceso de humedad en el suelo. La falta puede corregirse con riegos, pulverizando agua en el ambiente, ventilado, sombreado, etc.

#### **1.3.1.4. CO<sub>2</sub>**

El anhídrido carbónico de la atmósfera es la materia prima imprescindible de la función clorofílica de las plantas. El enriquecimiento de la atmósfera del invernadero con CO<sub>2</sub>,



puede resultar muy interesante en muchos cultivos, tanto en hortalizas como en flores (Copyright Infoagro Systems, S.L., 2003).

La concentración normal de CO<sub>2</sub> en la atmósfera es de 300 ppm. Este límite debería aumentarse hasta valores de 1.000-2.000 ppm cuando los demás factores climáticos de la producción vegetal sean óptimos si se desea aprovechar al máximo la actividad fotosintética del cultivo. Pero hay que controlar los valores máximos, ya que valores superiores a 3.000 ppm resultan tóxicos para los cultivos (RODRÍGUEZ DÍAZ, 2009).

Los niveles aconsejados de dióxido de carbono dependen de la especie o variedad cultivada, de la radiación solar, de la ventilación, de la temperatura y humedad. El óptimo de asimilación de este gas se encuentra entre los 18 y 23°C, descendiendo por encima de los 23-24°C. Cada especie tiene un óptimo de valores de luminosidad y humedad.

En los invernaderos que no se aplique anhídrido carbónico, la concentración de este gas es muy variable a lo largo del día. Alcanza el máximo de la concentración al final de la noche y el mínimo a las horas de máxima luz que coinciden con el medio día. En un invernadero cerrado por la noche, antes de que se inicie la ventilación por la mañana, la concentración de CO<sub>2</sub> puede llegar a límites mínimos de 0,005 - 0,01%, que los vegetales no pueden tomarlo y la fotosíntesis es nula. En el caso que el invernadero esté cerrado durante todo el día, en épocas demasiado frías, esa concentración mínima sigue disminuyendo y los vegetales se encuentran en situación de extrema necesidad en CO<sub>2</sub> para poder realizar la fotosíntesis (Copyright Infoagro Systems, S.L., 2003).

Sin embargo, no se puede hablar de una buena actividad fotosintética sin una óptima luminosidad. La luz es un factor limitante pues la tasa de absorción de CO<sub>2</sub> es proporcional a la cantidad de luz recibida, además depende también de la propia concentración de CO<sub>2</sub> disponible en la atmósfera de la planta. Se puede decir que el periodo más importante para el enriquecimiento carbónico es el medio día, ya que es la parte del día en que se dan las máximas condiciones de luminosidad.

### **1.3.1.5. Índice de Superficie Foliar**

También otro factor muy importante de tener en cuenta en un invernadero es el índice de superficie foliar o leaf area index (LAI) éste se define como unidades de superficie de hoja verde por unidad de superficie de terreno, pudiéndose valorar como total (ambas caras) o proyectada (superficie capaz de interceptar la radiación). La relación entre total y proyectada es de 2 para las especies de hoja ancha y oscila entre 2 y 3 para las hojas en forma de acículas, con valores típicos entre 2.4 y 2.6 (CIFUENTES S. & NAVARRO C., 1999).

El índice de área foliar (IAF) es uno de los parámetros más útiles para caracterizar la vegetación, siendo una variable estructural crítica para entender procesos biofísicos de la vegetación y para cuantificar los procesos de intercambio de energía en cuestiones entre la superficie de la tierra y la atmósfera.

Además el índice del área foliar (IAF) puede efectivamente ser usado como indicador decrecimiento, donde los bajos valores de índice del área foliar indican baja productividad. También IAF está relacionado a otros procesos ecológicos, como la evapotranspiración y el ciclo de nutrientes.

### **1.3.2. Influencia de las Variables Externas o Perturbaciones sobre el Invernadero**

Las principales variables externas que afectan al invernadero son los que le hacen perder calor; como la radiación térmica, el viento y la lluvia. El análisis de éstos problemas requieren la consideración de mecanismos acoplados, involucrando calefacción, masa (de aire y vapor de agua) y balance de CO<sub>2</sub> (TAPIA PERALTA, 2003).

En lo que representa al viento, es uno de los elementos que más incide negativamente en el cultivo bajo invernaderos. En primer lugar, el viento ejerce una acción negativa sobre los elementos estructurales (daños mecánicos). En segundo lugar, influye sobre el coeficiente de pérdida de calor por conducción y también sobre la tasa de renovación de volumen del invernadero (TAPIA PERALTA, 2003).

Según Euroagro, el 60 y 70 % de las pérdidas energéticas se originan a través del techo del invernadero. La reducción de éstas pérdidas se hace a través de la selección de materiales de cobertura y pantalla adecuados como de la correcta aislación. El uso de pantallas o mallas de aislamiento se lo explicara más adelante.

En la Figura 2 podemos observar un invernadero en el cual influyen las condiciones climáticas externas o perturbaciones, así también como las variables a controlar son: la temperatura, radiación, humedad relativa y CO<sub>2</sub>.

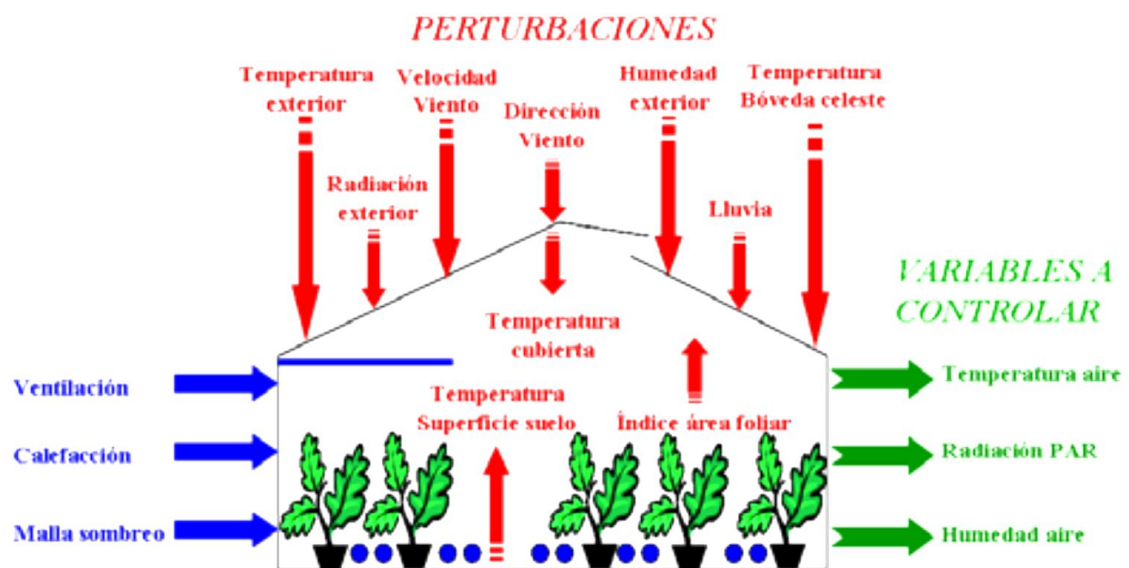


Figura 2. Variables que influyen sobre un invernadero

#### 1.4. Las Orquídeas

Las orquídeas, pertenecen a la familia Orchidaceae, la cual es la más grande de todas las plantas que producen flores. El cálculo fluctúa entre 17.000 y 35.000 especies conocidas de monocotiledoneas, herbáceas y perennes. Se estima, que ésto representa un 10% de todas las plantas superiores; mismas que se agrupan dentro de 650 a 900 géneros (Blogsmadeinspain, 2010).

Existe gran diversidad de orquídeas de todo color con una sola excepción el negro, muy pocas de éstas tienen la flor de un solo color; casi todas presentan colores distribuidos en una cantidad de formas, manchas, parches, matizadas, puntos y rayas, etc. Éstas flores

tienen una diversidad de formas van desde la casi completa simetría radial, hasta la más extrema simetría bilateral, o bien hasta la asimetría de géneros. Algunas flores permanecen abiertas solo un día, mientras otras se mantienen frescas durante unos tres meses. Otro aspecto de las orquídeas es la fragancia de las flores (Blogsmadeinspain, 2010).

Éstas plantas se desarrollan en climas templados y tropicales, la mayor parte de orquídeas que viven en climas templados son plantas terrestres, en tanto que las tropicales suelen vivir sobre árboles o sobre rocas; existiendo incluso un grupo de orquídeas que viven sobre residuos de árboles, en zonas boscosas.

La familia Orchidaceae se divide en dos grupos, dependiendo del tipo de crecimiento básico que presenten, estos dos grandes grupos se dividen en:

- Simpodial
- Monopodial

El Grupo Simpodial consta de los siguientes géneros de orquídeas:

- Cattleya
- Dendrobium
- Cymbidium
- Miltonia
- Oncidium
- Lycaste
- Paphiopedillum

Éste grupo se caracterizan por tener retoños individuales; es decir en los tallos rastreros también llamados rizomas, brotan retoños que se desarrollan en otros tallos y hojas, y que al madurar producen flores. Los tallos de muchas orquídeas simpodiales, se convierten a menudo en órganos de almacenamiento llamados pseudobulbos, que varían mucho de tamaño y forma.

Las orquídeas que pertenecen al grupo monopodial constan con los siguientes géneros:

- Phalaenopsis
- Vanda
- Aerides



El grupo de orquídeas monopodiales, en cambio, tienen un tallo central cuyo extremo crece continuamente, produciendo hojas alternadas e inflorescencias entre las hojas.

Las orquídeas se desarrollan en una gran variedad de climas y condiciones ambientales. Las diferentes especies de orquídeas tienen diferentes requerimientos climáticos. Lo mejor para lograr éxito en el cultivo de estas plantas, es el estudio perseverante de las necesidades en particular. Es decir es necesario conocer el lugar, hábitat y condiciones en que crecen naturalmente (Blogsmadeinspain, 2010).

#### **1.4.1. Cultivo de Orquídeas en Invernaderos**

Son varios los modelos, tipos, tamaños y formas de invernaderos que se puede utilizar para el cultivo de orquídeas, pero los más recomendables son los invernaderos de techo semicircular y el de dos aguas. Estos invernaderos presentan las facilidades para la optimización con alta tecnología, ya que estos cultivos necesitan unas buenas condiciones climáticas para la alta producción de orquídeas.

Las condiciones de mayor cuidado en el control son la humedad y la temperatura; si estos parámetros pueden ser controlados se tendrá una buena producción. Sin embargo, el cultivo de orquídeas es sumamente especial y para lograr un microclima adecuado se necesita conocer perfectamente las exigencias de cada especie y atenderlas.

#### **1.4.2. Requerimientos Climáticos de las Orquídeas**

Obteniendo un microclima favorable para las orquídeas dentro de un invernadero mejoraremos el desarrollo de las mismas de ahí la necesidad de conocer más sobre las temperaturas óptimas, así también como la iluminación, la ventilación entre otros factores.

##### **1.4.2.1. Temperatura**

La temperatura es un factor muy ligado al lugar de origen de la especie. En algunos casos es determinante en la sobrevivencia de las plantas. Los géneros *Cattleya*, *Dendrobium*, *Vanda* y *Oncidium* pueden llamarse géneros tropicales, porque se desarrollan en zonas calientes, con altitudes desde los 0 hasta los 1000 metros sobre el nivel del mar. En

contraste, el género *Phaphiopedilum*, requiere de temperaturas más frescas que se localizan en altitudes de los 800 hasta los 1500 msnm (Blogsmadeinspain, 2010).

Las orquídeas requieren temperaturas diurnas de 13° C a 32° C y temperaturas nocturnas de 10° C a 21° C, dependiendo como antes se dijo de sus necesidades particulares de cada especie cultivada. Las orquídeas en términos generales, se pueden dividir en tres categorías: de clima frío, intermedio y cálido, según donde crecen en su estado natural. Las orquídeas de clima frío, como los *cymbidiums*, *odontoglossums* y algunos *paphiopedilums* se desarrollan en forma óptima con una temperatura nocturna de alrededor de 10° C. Las orquídeas de clima intermedio, como las *cattleyas*, algunos *oncidiums* y una gran variedad de otras especies crecen mejor si la temperatura diurna fluctúa entre 18° C y 24° C, y la nocturna se mantiene entre 13° C y 16° C. Las orquídeas de tierras cálidas, como las *vandas* y *phalaenopsis*, prosperan mejor a temperaturas de 21° C a 30° C de día y 18° C a 21° C de noche (Blogsmadeinspain, 2010).

Es importante que exista un descenso de temperatura de 10° C a 15° C entre el día y la noche, diferencia a la que están acostumbradas las orquídeas en la naturaleza.

La temperatura es un requerimiento muy importante para que ocurra la floración. Bajo nuestras condiciones las mejores temperaturas para la floración son de 19° C – 21° C, siendo mejor 25° C en el día y 15° C en la noche.

#### **1.4.2.2. Luz**

Una orquídea requiere la máxima cantidad de luz sin lesionar la planta. La luz es necesaria para que las orquídeas crezcan y se desarrollen bien. La cantidad de luz que los diferentes géneros de orquídeas pueden tolerar sin lesionarse varía grandemente, siendo importante considerar la etapa de crecimiento en que se encuentra la planta. Así, en el caso de *Phalaenopsis*, cuando son plantas pequeñas, requieren 2500 lux, plantas jóvenes 4000 lux, plantas adultas 8000 lux, próximas a floración de 12000 a 15000 lux. Una *Cattleya*, por ejemplo, prospera con luz intensa, lo cual no toleraría una *Phalaenopsis* y *Cymbidium*, crecerá bien a plena exposición. Es posible determinar la cantidad de luz que la planta necesita, observando lo siguiente: demasiada luz destruye la clorofila (pigmento verde) en



las hojas, y éstas se tornan amarillentas. Por el contrario, poca luz, le daría a las hojas un tono verde oscuro; lo que impediría el desarrollo de la planta y así reduciría o evitaría el florecimiento (Blogsmadeinspain, 2010).

Cuando una planta de orquídea crece bajo condiciones correctas de luz, las hojas presentan una coloración verde claro, usualmente con una superficie brillante en el nuevo crecimiento y además, la planta florece regularmente.

Éste factor está ligado a otros tales como: temperatura, humedad y viento. Así, cuando hay alta humedad relativa y poco viento es mejor una menor cantidad de luz. Cuando se presenta una alta temperatura, es más conveniente disminuir a la mitad o en una tercera parte este factor. Por ello se hace necesario sombrear algunas orquídeas en invernadero, para asegurar que haya disponible la cantidad de luz apropiada para un buen crecimiento (Blogsmadeinspain, 2010).

Otro de los propósitos del sombreado, también es evitar las altas temperaturas. Así mismo si no protegemos las plantas se presentan problema por fotoperiodos y es necesario escoger las flores por estación. En determinados países se requiere de un control riguroso de temperatura y luz para obtener colores en determinadas épocas del año.

### **1.4.2.3. Ventilación**

Las orquídeas necesitan mucho aire a su alrededor, para reducir la posibilidad de enfermedades, que comienzan con invernaderos demasiado cerrados y húmedos, las plantas necesitan de un ambiente en el que en ningún momento se sienta la sensación de encierro o malestar por exceso de humedad (Blogsmadeinspain, 2010).

En la naturaleza, una brisa continua rodea a las orquídeas, lo que contrarresta el calor intenso del sol, reduce la posibilidad de enfermedades fungosas las cuales comienzan por el efecto del aire estancado y húmedo y provee de dióxido de carbono para el proceso de la fotosíntesis. El aire debe ser húmedo y se requiere, proteger las plantas contra vientos calientes y secos (Blogsmadeinspain, 2010).

El aire fresco y vigoroso luego de un aguacero, es lo ideal para la mayoría de las orquídeas. Por lo anterior, se pueden sugerir varias formas para evitar problemas de mala ventilación:

- ✓ Colocar las plantas de modo que no se toquen unas con otras, en un lugar donde corra libremente el viento, evitando espacios estrechos y sofocantes. Así, la superficie de la planta, se seca con relativa rapidez y no penetran los agentes causantes de las enfermedades.
- ✓ Se debe cultivar las orquídeas en canastas, vasijas o troncos de forma que permitan la entrada y salida de aire. Es muy importante que las corrientes de aire no lleguen directamente a las plantas, ya que esto daña sus tejidos y la flor, de aquí la importancia de protegerlas.

## **1.5. Medición de las Variables que Intervienen en un Invernadero**

### **1.5.1. Métodos de Medición**

El método de medición de temperatura ambiental es un método de contacto en el cual, el sensor del termómetro o la parte sensible se pone en contacto térmico con el medio ambiente cuya temperatura se quiere medir (CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA, 2008).

En el caso de la humedad relativa de igual forma se pone en contacto el instrumento con el medio que va a ser medido, dependiendo del instrumento éste va a realizar una medición de diferencias de temperatura o presión.

Para realizar la medición de temperatura ambiental, humedad y radiación solar, se debe tomar un número adecuado de pruebas según sea el requerimiento del proyecto. También debemos tomar en cuenta el medio donde está ubicado el invernadero, se debe indicar la porción del espacio físico sujeto a la medición así como la localización de los instrumentos.

El personal que va a realizar la medición debe conocer los factores que afectan a la medición de temperatura ambiental. Entre estos se encuentran los siguientes:

- Intercambios radiantes
- Calentamiento interno
- Tiempo de respuesta
- Equipos e Instrumentos

Para realizar la medición de las variables que intervienen tanto dentro como fuera de un invernadero escogeremos los equipos que mejor se acondicionen a los requerimientos de nuestro proyecto; para lo cual a continuación citaremos los equipos más utilizados en estas mediciones.

### **1.5.2. Instrumentos para la Medición de Temperatura**

La temperatura es una manifestación del promedio de energía cinética, ondulatoria y de traslación de las moléculas de una sustancia. Cuando un cuerpo se calienta, la velocidad de vibración de sus moléculas aumenta rápidamente. En el caso del medio ambiente ésta energía se almacena en las moléculas y atómicos que están en desorden.

Para realizar una adecuada elección de los instrumentos que se va utilizar en la medición se debe tener en cuenta algunas consideraciones:

- El medio donde va a estar expuesto el instrumento
- Rango de medición
- Escala de medición que puede ser: Fahrenheit ( $^{\circ}\text{F}$ ), Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ), Kelvin ( $^{\circ}\text{K}$ ).
- Exactitud de la medición, entre otras

Los instrumentos que se usan en la medición de temperatura ambiental normalmente son los siguientes:

- Termómetro de líquido en vidrio
- Termómetro con sensor de resistencia
- Termómetro con sensor tipo termistor.
- Termopar con indicador/registrador de temperatura.

Los instrumentos de medición de temperatura ambiente deben seleccionarse de acuerdo a su uso y deben estar calibrados y etiquetados para demostrar su confirmación metrológica.

### **1.5.2.1. Termómetro de Vidrio**

Éste tipo de termómetro es un instrumento que consta de un tubo de vidrio en cuyo interior se aloja otro pequeño tubo hecho generalmente de mercurio o alcohol, que se dilata o expande de acuerdo a los cambios de temperatura que mida. Para poder determinar la temperatura que medimos, el termómetro cuenta con una escala graduada cuidadosamente que está estrictamente relacionada con el volumen que ocupa el mercurio en el tubo; por lo general ésta escala está dada en grados Celsius como se muestra en la Figura 3.



**Figura 3.** Termómetro de vidrio.

Funciona por la dilatación del líquido alojado en el bulbo, que se visualiza en el capilar cuyo pequeño diámetro permite apreciar grandes variaciones de longitud del fluido dilatado para un determinado volumen.

#### **1.5.2.1.1. Criterios en el uso de Termómetros de Líquido en Vidrio.**

A continuación se presentan algunos criterios que se deben seguir cuando se utilizan este tipo de termómetro:

- Se debe colocar el termómetro en posición vertical para minimizar el efecto de separación de la columna de líquido dentro del termómetro por vibraciones o sacudidas.

- Debe evitarse exponer el termómetro a vibraciones o golpes.
- Debe usarse el termómetro con el tipo de inmersión requerida y cuando esto no sea posible realizar las correcciones correspondientes.
- Para la lectura de la temperatura en el termómetro, debe evitarse en lo posible los errores de paralaje del menisco del líquido interno en el termómetro.
- La resolución, para propósitos prácticos, no debe ser menor que la cuarta parte de la división mínima del termómetro cuando las lecturas se realizan a simple vista sin ayuda de ningún aditamento (lupas, telescopios, etc.) (CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA, 2008).

#### **1.5.2.2. Termómetros de Resistencia**

La medición de temperatura utilizando sondas de resistencia va a depender mucho de las características de resistencia del elemento de detección en función de la temperatura a medir. Normalmente el elemento de detección es un arrollamiento de hilo que es muy fino y que está bobinado entre capas de material aislante y cubierto con un revestimiento de vidrio o de cerámica para protegerlo. El hilo que forma el conductor es de un metal puro el cual contiene un coeficiente de resistencia de temperatura positivo bastante constante. El coeficiente de resistencia de temperatura, que es más conocido como coeficiente de temperatura, es la razón de cambio de resistencia al cambio de temperatura. Normalmente los sensores de resistencia están disponibles en tipo PTC (Coeficiente positivo de Temperatura) y NTC (Coeficiente Negativo de Temperatura) (PÉREZ, 2006).

#### **1.5.2.3. Detectores de Temperatura de Resistencia**

El detector de temperatura de resistencia, conocido también como RTD, se basa en el principio de la resistencia que tienen los metales según su temperatura. Los RTD de máxima calidad son hechos de platino, ya que permite realizar medidas más exactas y estables hasta una temperatura de 500 °C, mientras que los más económicos utilizan níquel o aleaciones de níquel, pero no son tan estables ni lineales como los de platino. El problema de utilizar RTD de platino es que son de muy alto costo, además producen un auto calentamiento, esto debido a que para medir la resistencia hay que aplicar una corriente,



que por supuesto, produce una cantidad de calor que distorsiona los resultados de la medida (PÉREZ, 2006).

#### **1.5.2.3.1. Criterios en el uso de Termómetros con Sensores de Resistencia.**

Enseguida se presentan criterios que deben seguirse cuando se utilizan termómetros de resistencia de platino.

- Debe evitarse exponer el termómetro a vibraciones o golpes.
- La resolución del termómetro es la del dígito menos significativo del lector de temperatura cuando el valor de éste dígito sea estable.
- Debe procurarse que el resistor, que es el elemento activo del sensor, esté herméticamente sellado para evitar que entre en contacto con agua o humedad (CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA, 2008).

#### **1.5.2.4. Termistores**

Éstos están hechos por semiconductores electrónicos que tienen un coeficiente de temperatura de resistencia negativo de valor elevado y que presentan una curva característica lineal tensión-corriente siempre que la temperatura se mantenga constante.

La distancia entre el termistor y el instrumento de medida puede ser considerable siempre que el elemento posea una alta resistencia comparada con la de los cables de unión. La corriente que circula por el termistor a través del circuito de medida debe ser baja para garantizar que la variación de resistencia del elemento sea debida exclusivamente a los cambios de temperaturas del proceso. Los termistores encuentran su principal aplicación en la compensación de temperatura, como temporizadores y como elementos sensibles en vacuómetros (PÉREZ, 2006).

#### **1.5.2.4.1. Termopares**

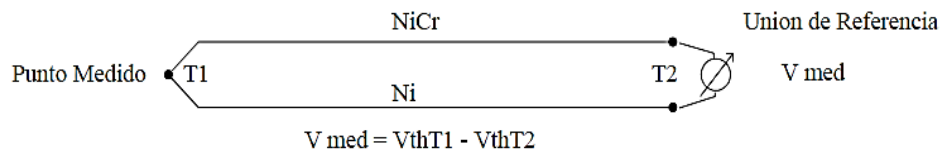
Los termopares se utilizan extensamente, ya que ofrecen una gama de temperaturas mucho más amplia y una construcción más robusta que otros tipos. Además, no dependen de



alimentación de ningún tipo y su reducido precio los convierte en una opción muy atractiva para grandes sistemas de adquisición de datos (PÉREZ, 2006).

Si se unen dos metales distintos por sus extremos y si se someten a temperaturas diferentes, entre las uniones aparecen fuerzas electromotrices generadas que están en función de la diferencia de temperaturas en la unión y del tipo de metal utilizado para fabricar la unión. Si las temperaturas son iguales, la Fem. generada es cero. Entonces al conjunto así descrito se le denomina: "circuito termoeléctrico" y es clásico en la medición de temperaturas (PÉREZ, 2006).

En la Figura 4, se demuestra éste efecto con un termopar que se compone sencillamente de dos hilos de diferentes metales unidos en un extremo y abiertos en el otro, entonces la tensión que pasa por el extremo abierto es una función tanto de la temperatura de la unión como de los metales utilizados en los dos hilos:



**Figura 4.** Unión de los dos metales de una termocupla.

Donde:

$V_{med}$  = Voltaje medido

$V_{thT1}$  = Voltaje en el punto de medición

$V_{thT2}$  = Voltaje en la unión de referencia.

Los termopares son más utilizados a nivel de la industria porque miden solamente temperaturas relativas, mientras que los RTD, termistores y sensores de IC miden temperaturas absolutas.

#### 1.5.2.4.2. Tipos de Termopares

La clasificación de las termocuplas ha sido establecida por la ANSI, tomando en cuenta la respuesta de voltaje versus temperatura, el desempeño en el medio ambiente y la vida útil. En la Tabla 2 se muestra los tipos de termocuplas más utilizados.

**Tabla 2.** Tipos de termocuplas

Tipos de Termocupla	Nombre de los Materiales	Aplicaciones Rango (°F)	mV	NOTAS
<b>B</b>	Platino 30% Rodio (+) Platino 6% Rodio (-)	100-3270	0.007 - 13.499	Contaminado fácilmente Requiere protección
<b>C</b>	Tungsteno 5% Renio (+) Tungsteno 26% Renio (-)	3000-4200	-	No resiste la oxidación
<b>E</b>	Cromel (Cr -Ni) (+) Constantan (Cu - Ni) (-)	32-1800	0 – 75.12	El de mayor voltaje /°C
<b>J</b>	Acero (+) Constantan (-)	-300 -1600	-7.52 – 50.05	Atmósfera reductora. Hierro se oxida a altas temperaturas
<b>K</b>	Cromel (+) Alumel (-)	-300 - 2300	-5.51 – 51.05	Atmósferas Oxidantes
<b>N</b>	Nicrosil (+) Nisil (-)	1200-2300	-	Uso general. Mejor resistencia a oxidación.
<b>R</b>	Platino 13% Rodio (+) Platino (-)	32-2900	0 – 18.636	Atmósfera Oxidante Contaminado fácilmente
<b>S</b>	Platino 10% Rodio (+) Platino (-)	32-2800	0 – 15.979	Contaminado fácilmente Atmósfera Oxidante
<b>T</b>	Cobre (+) Constantan (-)	-300 - 750	-5.28 – 20.80	Estable a temperatur. Cryogénicas Atm. Oxidantes y reductoras

#### 1.5.2.4.3. Criterios en el uso de Termopares.

Enseguida se presentan criterios que deben seguirse cuando se utilizan termopares. Aunque es poco común usar termopares para la medición de temperatura ambiental, se dan las siguientes buenas prácticas:

- Deben seleccionarse alambres de termopar que resistan la oxidación y corrosión debidas a las condiciones ambientales donde se va a medir la temperatura ambiente.
- Debe evitarse que los cables del termopar o los cables de extensión y compensación, atraviesen campos magnéticos o eléctricos intensos.
- Para mediciones en muchos puntos, es aconsejable y económico contar con un rollo (lote) de alambre calibrado y cortar los tramos necesarios para la medición.
- Cuando se utilicen tablas de termopares o funciones de referencia, éstas deben basarse en la Escala Internacional de Temperatura de 1990 (CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA, 2008).

### **1.5.3. Instrumentos para medir Humedad Relativa**

Existe diferentes instrumentos para medir la humedad relativa, como: el Psicrómetro, el Higrómetro, etc.

#### **1.5.3.1. Psicrómetro**

Es un instrumento que consta de dos termómetros, el seco que mide la temperatura real, y el húmedo mide una temperatura en un lugar mojado, es llamado así porque su depósito está rodeado por una muselina humedecida, en la cual, su tela evapora más o menos agua, según que la humedad atmosférica sea menor o mayor respectivamente. Es decir que la evaporación será mayor cuanto menor sea la humedad relativa. Con estas temperaturas el psicrómetro define la humedad relativa (PÉREZ, 2006).

#### **1.5.3.2. Higrómetro**

Una forma de medir en forma directa la humedad relativa es a través de un higrómetro, este instrumento está basado en la propiedad de algunos materiales (cabello humano, algodón, seda, papel, etc.) de cambiar su dimensión física dependiendo de la humedad relativa del aire. Cuando el aire está seco las células del cabello están juntas unas a otras, pero cuando el aire está húmedo los espacios entre las células absorben vapor de agua y el cabello aumenta de grosor y longitud. Este alargamiento es el que se usa para medir la humedad (MERUANE & GARREAUD, 2006).

También, existen higrómetros basados en el uso de componentes electrónicos, que utilizan la capacidad de ciertos materiales de absorber moléculas de vapor de agua a través de su superficie. Este proceso, al modificar las propiedades eléctricas de una componente de un circuito electrónico (resistencia o condensador), permite crear una señal eléctrica que es proporcional a la humedad. Este tipo de sensor se utiliza en estaciones meteorológicas automáticas y en equipos de radiosondeos (MERUANE & GARREAUD, 2006).

#### **1.5.4. Instrumentos para medir Radiación Solar**

Existen varios métodos para medir la radiación solar, ya sea en forma de irradiancia o de irradiación. El método más aceptado comúnmente, es el uso de un piranómetro.

##### **1.5.4.1. Piranómetro**

Un piranómetro, es un instrumento para medir la irradiancia global (directa más difusa), usualmente sobre una superficie horizontal. El tipo más común de piranómetros, consiste en dos sensores de temperatura, uno de ellos expuesto a la radiación solar y ennegrecido y el otro, protegido de la radiación. Si los dos sensores se encuentran en condiciones similares en todo, menos en el hecho de estar expuestos a la radiación, habrá una diferencia de temperatura entre ellos. La hipótesis de trabajo de un piranómetro, es que la irradiancia es directamente proporcional a la diferencia de temperatura entre ambos sensores.

Para evitar ruido en las lecturas, causado por el viento y otros factores meteorológicos, el sensor expuesto a la radiación (y a veces también el otro) suelen estar protegidos por un hemisferio de vidrio. Este hemisferio, de características ópticas adecuadas, permite el paso de la radiación, pero evita el enfriamiento por viento, lo cual alteraría la lectura.

Otros pirómetros de radiación se basan en la ley de Stefan-Boltzman (K), donde la intensidad de energía radiante ( $w$ ) emitida por la superficie de un cuerpo aumenta proporcionalmente a la cuarta potencia de la temperatura absoluta (T) del mismo, es decir:

$$W = KT^4 \quad \text{Ecuación (1.1)}$$



## **1.6. Modelado Matemático**

Un modelo matemático generalmente consiste en ecuaciones algebraicas o diferenciales, que cuantitativamente representan un sistema o el proceso en sí. También podemos decir que es aquel donde la relación entre las diferentes variables en un sistema se formaliza a través de relaciones matemáticas (normalmente ecuaciones). Los modelos matemáticos son generalmente muy informativos, pero en una forma más limitada que los modelos mentales o verbales, puesto que son sólo interpretables desde un punto de vista matemático (SÁNCHEZ).

Los modelos matemáticos pueden adoptar muchas formas distintas. Dependiendo del sistema del que se trate y de las circunstancias específicas, un modelo matemático puede ser más conveniente que otros.

### **1.6.1. Modelado y Simulación de Sistemas Biológicos**

Los sistemas biológicos constan de un elevado número de procesos físicos y químicos capaces de ser descritos matemáticamente. Los modelos matemáticos permiten expresar la evolución temporal de las variables características de sistemas, organismos, poblaciones o células, en función del pH, la temperatura, la intensidad de la luz u otros factores ambientales. Un modelo matemático puede ser tan simple como una ecuación elemental relacionando una variable con otra, o puede incluir la interacción de un gran número de ecuaciones con variables dependientes entre sí. (MUNDO ELECTRÓNICO (Mompín José coordinador), 1988)

Una ecuación o un grupo de ecuaciones por sí mismas pueden no contribuir a la comprensión de un fenómeno particular. Por esta razón es necesario, generalmente, resolver la ecuación para ciertos valores de la variable independiente y presenta en forma grafica la información resultante. Debido al elevado número de datos es muy conveniente la ejecución del modelo matemático en un computador. (MUNDO ELECTRÓNICO (Mompín José coordinador), 1988)

La simulación en su forma más simple consiste en la ejecución en el computador de un modelo matemático para obtener datos simulados. La evaluación del modelo se realiza comparando las variables de salida del modelo matemático con los datos experimentales del sistema real, resultando esencial la simulación en el estudio de sistemas complejos. (MUNDO ELECTRÓNICO (Mompín José coordinador, 1988)

### 1.6.2. Relación entre Modelado y Simulación en un Proyecto de Investigación

El objetivo de cualquier modelo es suministrar un medio para lograr nuevos conocimientos sobre el comportamiento del sistema. La simulación colabora en esta investigación, al permitir una interacción con el modelo, a fin de lograr respuestas validables. (MUNDO ELECTRÓNICO (Mompín, José), 1988).

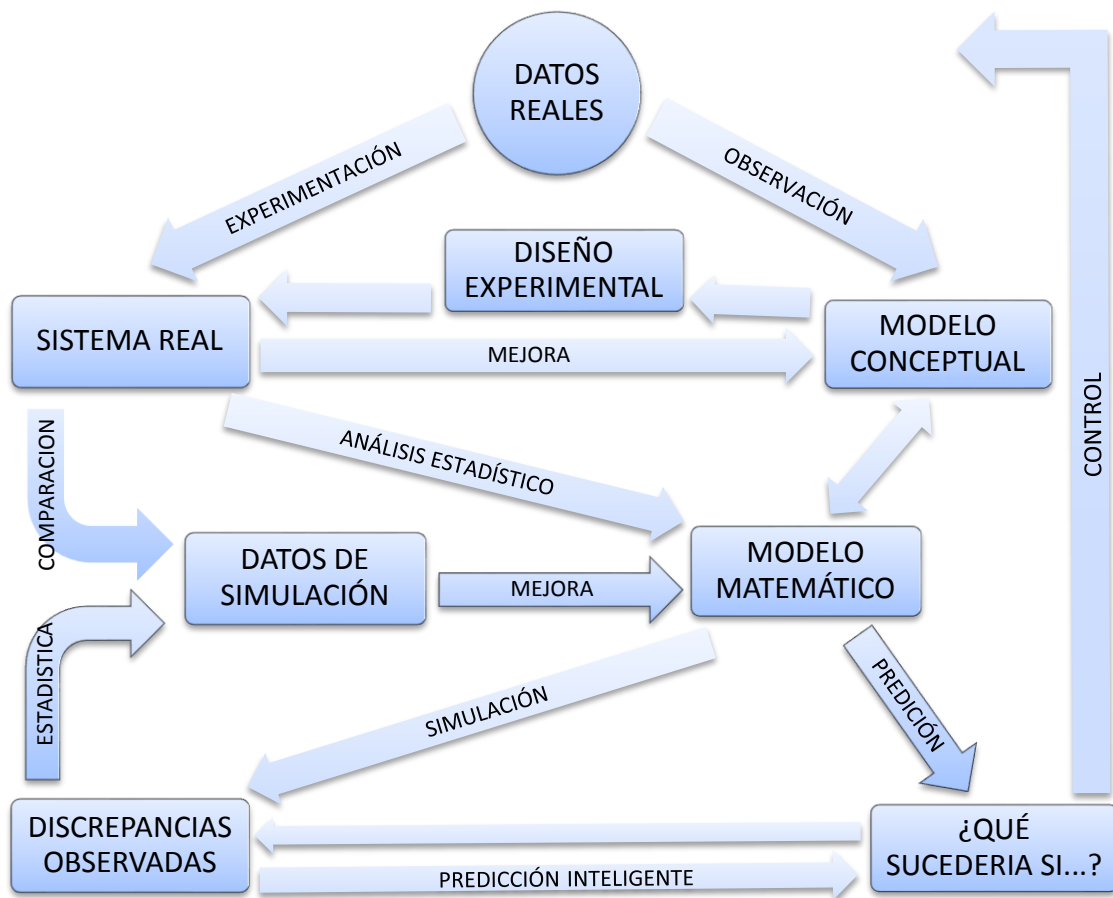


Figura 5. Diversas etapas de un proyecto de modelado y simulación

El diagrama de la Figura 5 muestra algunos de los conceptos usados en las diversas etapas de un proyecto de modelado y simulación.

El sistema real es el objeto del estudio. En cualquier sistema biológico siempre aparece el concepto de “caja negra”. Independientemente de la cantidad de información disponible sobre un determinado sistema biológico, siempre nos quedamos observándolo desde el exterior. Por este motivo, el sistema real se distingue de todos los demás componentes del diagrama representándolo mediante un circuito. Todos los demás bloques representan otras clases de información que, de una u otra forma, se deducen del sistema real. Las flechas representan los procesos mediante los cuales la información se obtiene y manipula (MUNDO ELECTRÓNICO (Mompín, José), 1988).

La formalización en términos cuantitativos del modelo conceptual conduce al modelo matemático, generalmente con una ecuación que describe las variables de salida de sistema en función de las variables de entrada. El modelo matemático también se puede deducir del análisis estadístico de los datos experimentales, o mediante una combinación de ambos métodos. El estudio necesario para la formalización del modelo conducirá muchas veces a una mejora del modelo conceptual, y esta mejora podrá sugerir nuevas experimentaciones a realizar. (MUNDO ELECTRÓNICO (Mompín, José), 1988)

La simulación aumenta las posibilidades del proceso clásico de investigación al utilizar el modelo matemático para generar datos de simulación, compararlos con los datos reales y mostrar las discrepancias. Estas discrepancias indican que existen errores en las hipótesis utilizadas al formular el modelo matemático. Si los errores son importantes requerirá un modelo conceptual totalmente nuevo, y si son de menor importancia se deberán realizar ligeras modificaciones de los parámetros en el modelo matemático (MUNDO ELECTRÓNICO (Mompín, José), 1988).

La principal ventaja de la simulación es que permite realizar pruebas claras y objetivas de los conceptos propuestos en la formulación del modelo matemático y con ello del modelo conceptual. También permite realizar “experimentos” con el modelo para valores de las variables fuera de los márgenes normales de experimentación. La simulación de diversas

estrategias de control con el modelo matemático permite realizar predicciones inteligentes acerca del éxito o fracaso sobre el sistema real (MUNDO ELECTRÓNICO (Mompín, José), 1988).

### **1.6.3. Modelo Matemático de Sistemas Físicos**

El método básico del modelo matemático consiste en escribir ecuaciones, generalmente diferenciales, que describan las relaciones entre las variables de entrada y salida. Las ecuaciones diferenciales que expresan el funcionamiento dinámico de un sistema físico se obtienen principalmente utilizando las leyes físicas de proceso.

### **1.6.4. Modelización del Clima de los Invernaderos**

El objetivo de los modelos sobre el clima de los invernaderos es describir su comportamiento bajo la influencia de un conjunto de factores que van a modificar el estado en que en el invernadero se encuentre. Dicho componente se analiza mediante las variaciones experimentadas por los componentes del proceso del modelo, cuyas variables de estado se van a nombrar como variables de proceso (RAPOSO LLOBET, 2004).

Diversos factores van a influir sobre el comportamiento del invernadero, es decir, sobre los componentes de proceso del modelo. Estos factores pueden ser de dos tipos:

*Parámetros o características propias del invernadero;* como por ejemplo sus dimensiones y localización, el material de cubierta o la morfología del cultivo, entre otros.

*Variables de contorno;* las cuales definen a los denominados componentes de contorno del modelo. Las variables de contorno corresponden con las variables no simuladas por el modelo, las cuales pueden ser ajenas a la mano del hombre, caso de la temperatura y humedad exterior o de la radiación solar, o proceder de una actuación voluntaria, como la calefacción o la ventilación.

Los modelos climáticos de invernaderos se pueden clasificar, en primer lugar, en modelos de ajuste o empíricos y en modelos formales o analíticos. En los modelos de ajuste la relación entre las variables de proceso y contorno no se formula mediante la descripción de



los procesos físicos involucrados sino con funciones de transferencias del sistema, obtenidas mediante técnicas de identificación (RAPOSO LLOBET, 2004).

Los modelos climáticos formales se dividen en dos tipos fundamentalmente en modelos estáticos y modelos dinámicos, atendiendo a las distintas consideraciones sobre la capacidad de respuesta del invernadero a los cambios producidos en las variables de contorno. A su vez, cada uno de éstos tipos se pueden subdividir en otros dos, modelos simples y modelos complejos, según el número de procesos físicos considerados (RAPOSO LLOBET, 2004).

Los modelos formales estáticos establecen que todos los componentes de los invernaderos responden instantáneamente (velocidad de respuesta elevada) a los cambios en las variables de contorno, por lo que las ecuaciones de balance energético de los componentes de proceso se expresan como:

$$\text{Calor ganado} - \text{calor perdido} = 0 \quad \text{Ecuación (1.2)}$$

Por lo contrario, los modelos formales dinámicos consideran que la velocidad de respuesta de todos o parte de los componentes del invernadero a los flujos de transferencia de energía es menor (mayor constante de tiempo), lo que equivale a dotarles de una elevada capacidad térmica, obteniéndose así las ecuaciones de balance energético de los componentes del proceso, expresadas como:

$$\text{Calor Ganado} - \text{Calor Perdido} = \text{Calor Almacenado} \quad \text{Ecuación (1.3)}$$

Esto implica que el equilibrio térmico de los componentes del proceso del modelo, sea expresado mediante ecuaciones diferenciales, lo cual complica su resolución matemática respecto a la de los modelos estáticos (RAPOSO LLOBET, 2004).

#### **1.6.4.1. Modelos Estáticos**

Los modelos estáticos simples son utilizados para determinar las necesidades térmicas globales de los invernaderos, siendo su objetivo más común el dimensionamiento del

sistema de calefacción o la optimización del control de los invernaderos (RAPOSO LLOBET, 2004).

Modelos estáticos complejos, con la condición de varios componentes de proceso y elevado número de flujos térmicos, también han sido formulados para calcular las pérdidas energéticas de invernaderos alcanzándose niveles de precisión (alrededor del 10%) en la estimación de dichas pérdidas comparables con los de los modelos dinámicos complejos. Éstos modelos también son normalmente usados en la calibración de invernaderos, pudiéndose determinar, con una exactitud satisfactoria, los coeficientes de transferencia de calor y agua del invernadero (RAPOSO LLOBET, 2004).

Pero la aplicación en la que los modelos estáticos superan a los dinámicos y para la que son mucho más empleados, es en el análisis del comportamiento de distintas tecnologías, además de la calefacción, en el acondicionamiento ambiental de invernaderos.

#### **1.6.4.2. Modelos Dinámicos**

El análisis del invernadero desde un punto de vista dinámico es necesario cuando se considera que su respuesta a las variables de contorno no es instantánea. El invernadero se va comportar de esta forma cuando, en el modelo que lo describe, se incluye el componente suelo, cuya elevada capacidad de almacenamiento térmico hace aumentar su tiempo de repuesta. Por ello, los modelos dinámicos son necesarios cuando se pretende estudiar la aplicación de diferentes algoritmos de control en invernaderos, por la importancia que, en este caso, tiene el análisis de los tiempos de respuesta y de las constantes de tiempo del sistema (RAPOSO LLOBET, 2004).

Diversos modelos dinámicos se utilizan para el análisis de invernaderos, la mayoría de los cuales son complejos. En los modelos complejos el invernadero se suele dividir en cuatro componentes de proceso: suelo, cultivo, cubierta y aire interior. En ocasiones se considera un quinto componente, que corresponde al medio de cultivo o parte de la superficie cubierta del invernadero ocupada por las plantas o a la cubierta exterior del invernadero, como si ésta fuese doble. La consideración de varios componentes de proceso implica que los modelos dinámicos complejos se definan mediante un sistema de ecuaciones diferenciales.

Éste hecho, unido a la gran potencia de procesamiento de los modernos ordenadores, determina que dichos modelos sean resueltos fundamentalmente por métodos numéricos (RAPOSO LLOBET, 2004).

Un aspecto tradicionalmente estudiado en modelos complejos, fundamentalmente dinámicos, es su sensibilidad. Respecto del análisis de la sensibilidad ante determinadas variables de contorno.

### **1.6.4.3. Modelos de Entrada-Salida**

Un modelo de entrada-salida describe un sistema dinámico basándose en los datos de entrada y de salida. Éste tipo de modelos supone que la salida del sistema puede ser predicha a partir de las entradas y salidas pasadas del sistema. Si el sistema se supone, además determinista, invariante en el tiempo, de una entrada-una salida (SISO), el modelo de entrada-salida es:

$$y(k) = f(y(k-1), y(k-2), \dots, y(k-n), u(k-1), u(k-2), \dots, u(k-m)) \text{ Ecuación (1.4)}$$

Donde  $u(k)$ ,  $y(k)$  representa el par de entrada-salida en el tiempo  $k$ . Los enteros positivos  $n$  y  $m$  son el número de salidas pasadas (también llamado el orden del sistema) y el número de entradas pasadas. En la práctica  $m$  es, normalmente, menor o igual que  $n$ .  $f$  puede ser cualquier función no-lineal definida desde el espacio de entradas y salidas pasadas hasta el espacio de salidas futuras (GARRIDO BULLÓN, 1999). Si el sistema es lineal,  $f$  es una función lineal y la ecuación anterior puede ser reescrita como:

$$y(k) = a_1 y(k-1) + a_2 y(k-2) + \dots + a_n y(k-n) + b_1 u(k-1) + b_2 u(k-2) + \dots + b_m u(k-m) \text{ Ecuación (1.5)}$$

### **1.6.4.4. Modelos Paramétrico Lineales**

Estos modelos se basan en la predicción del error (la diferencia entre la salida del proceso y la predicción hecha por el modelo). El criterio de mínimos cuadrados es uno de los métodos usados.

El estado actual de la estimación de parámetros en la identificación de sistemas corresponde a la teoría clásica de la regresión. Es una necesidad para el futuro de la identificación de sistemas comprender en profundidad los relevantes desarrollos estadísticos en análisis de la regresión (GARRIDO BULLÓN, 1999).

Algunos de los modelos lineales más conocidos son:

#### **1.6.4.4.1. Modelo ARX (Auto-Regressive with eXogenous inputs)**

Son modelos matemáticos dinámicos derivados de la teoría de identificación de Sistemas. Además son la primera elección en un procedimiento de identificación de sistemas lineales. Su expresión es

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t-nk) + e_k \quad \text{Ecuación (1.6)}$$

Que puede ser visto como una manera de determinar el siguiente valor de la salida, dadas las entradas. Aquí  $A(q^{-1})$  y  $B(q^{-1})$  son polinomios en el operador desplazamiento hacia atrás  $q^{-1}$  y  $y(t)$  son las salidas,  $u(t)$  las entradas y  $e(t)$  el ruido. El ruido  $e(t)$  es una sucesión aleatoria normalmente distribuida de media cero y varianza  $\sigma^2$  CITATION GAR99 \l 2058 (GARRIDO BULLÓN, 1999).

#### **1.6.4.4.2. Modelo ARMAX (Auto-Regressive Moving Average with eXogenous inputs)**

Éste modelo nos permite modelar piezas determinista y estocástica del sistema de forma independiente; utilizado cuando la regresión lineal no puede ser usada para estimar los parámetros del modelo, describe el error en la ecuación como un promedio móvil. Cuya expresión es:

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t-nk) + C(q^{-1})e(t) \quad \text{Ecuación (1.7)}$$

En éste modelo la expresión  $A(q^{-1}) y(t) = e(t)$  representa la auto-regresión,  $y(t) = C(q^{-1})e(t)$  representa la media móvil de ruido blanco, mientras que  $B(q^{-1})u(t)$  representa

la entrada externa. Otros modelos pueden ser usados, como por ejemplo la representación en el espacio de estados o el modelo de ceros y polos (GARRIDO BULLÓN, 1999).

#### 1.6.4.4.3. Modelo OE (Output Error)

Es un modelo ARMAX con relación in/out sin perturbación más ruido blanco aditivo en la salida. Su expresión es

$$y(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})} u(t - nk) + e(t) \quad \text{Ecuación (1.8)}$$

Con la fuente de error  $e(t)$  que es la diferencia (error) entre la salida real y la salida libre de ruido (teórica).

#### 1.6.4.4.4. Modelo BJ (Box-Jenkins)

Los modelos Box-Jenkins que también se les denomina modelos ARIMA parten del hecho de que la serie temporal que se trata de predecir es generada por un proceso estocástico cuya naturaleza puede ser caracterizada mediante un modelo. Para efectuar la estimación de un modelo ARIMA se requiere de una serie temporal de datos que cuente con un elevado número de observaciones. Básicamente, la metodología Box-Jenkins consiste en encontrar un modelo matemático que represente el comportamiento de una serie temporal de datos, y permita hacer previsiones únicamente introduciendo el período de tiempo correspondiente.

En los modelos ARIMA univariantes se explica el comportamiento de una serie temporal a partir de las observaciones pasadas de la propia serie y a partir de los errores pasados de previsión. La notación compacta de los modelos ARIMA es la siguiente:

$$ARIMA(p, d, q)$$

Dónde  $p$  es el número de parámetros autorregresivos,  $d$  es el número de diferenciaciones para que la serie sea estacionaria, y  $q$  es el número de parámetros de medias móviles. El modelo Box- Jenkins ARMA ( $p, q$ ) viene representado por la siguiente ecuación:

$$Y_t = \phi_0 + \phi_1 y_{t-1} + L + \phi_p y_{t-p} + a_t - \theta_1 a_{t-1} - L - \theta_q a_{t-q} \quad \text{Ecuación (1.9)}$$

La parte autorregresiva (AR) del modelo es  $\phi_1 y_{t-1} + L + \phi_p y_{t-p}$ , mientras que la parte de medias móviles del modelo (MA) es  $\theta_1 a_{t-1} - L - \theta_q a_{t-q}$ . Los coeficientes de los parámetros  $\phi_0, \phi_1, L, \phi_p, \theta_1, L, \theta_q$  son determinados a partir de los datos, a través de cualquier método estadístico consistente.

El método Box-Jenkins proporciona predicciones sin necesidad de la existencia de ningún tipo de condición previa, además de ser parsimonioso respecto a los coeficientes. Además, una vez encontrado el modelo, se pueden efectuar de manera inmediata predicciones y comparaciones entre datos reales y estimados para observaciones pertenecientes al pasado. Sin embargo, además de requerir un elevado número de observaciones, la estimación e interpretación de sus coeficientes es compleja, y proporciona peores resultados en previsiones a largo plazo (JIMENEZ, GAZQUEZ, & SANCHEZ, 2006).

El método Box-Jenkins posee diferentes clases de modelos para escoger además de un acercamiento sistemático para elegir el modelo correcto. Incluye tanto pruebas estadísticas para la validación de modelos, así como también mediciones estadísticas para pronosticar incertidumbre. En contraste, los modelos de pronóstico tradicionales ofrecen un número limitado de modelos relativos debido al comportamiento complejo de muchas series de tiempo, con escasas pautas y pruebas estadísticas para la verificación de la validez del modelo seleccionado.

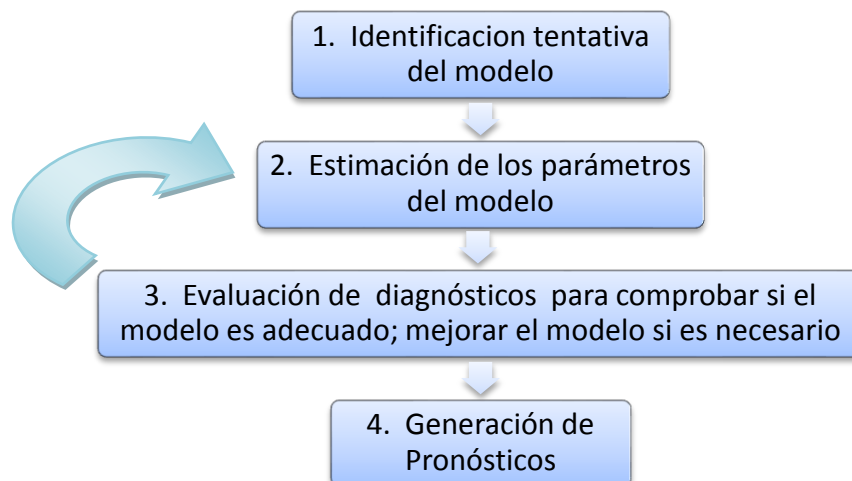


Figura 6. Proceso: metodología BOX-JENKINS

En la Figura 6 se ilustra la metodología que se debe seguir para la estimación de un modelo Box-Jenkins. Generalmente se investigan tres patrones: autoregresión, promedios móviles y tendencias. También pueden existir observaciones erráticas ocasionales, o disturbios que deben ser eliminados o corregidos. El procedimiento requiere una secuencia de cuatro pasos:

- Identificación, en el que se ensayan los diferentes modelos citados.
- Estimación, en el que se registran en una secuencia temporal los valores estimados de los coeficientes.
- Diagnóstico, en el que se verifica la conveniencia del ajuste para ver si es el adecuado. Si es insuficiente, el procedimiento se vuelve a comenzar.
- Generación de pronósticos.

#### **1.6.5. Modelado por Caja Negra**

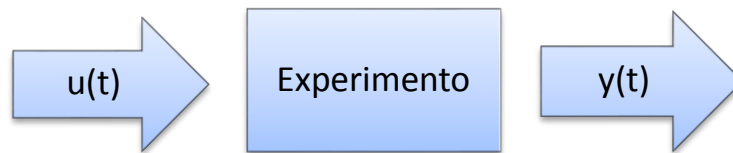
Es un sistema muy complejo en el que los datos son procesados de acuerdo a reglas determinadas. Al usuario no le interesa conocer la estructura interna del proceso propiamente dicho, sino sus resultados.

Los modelos por caja negra se diseñan enteramente a partir de datos, sin tener en cuenta la interpretación de los parámetros que lo definen. La base del modelo se selecciona a partir de núcleos estimadores cuya estructura se conoce que es muy flexible y que ha dado resultados en aplicaciones pasadas; los parámetros de estos modelos por lo general no tienen significado físico y se ajustan para reproducir los datos observados tan bien como sea posible (SÁNCHEZ).

La teoría de identificación de sistemas define a la Caja Negra como una entidad reconocible a la cual llegan diferentes entradas y de la cual salen una o varias salidas. El funcionamiento de ésta consiste en que la entrada que llega sea procesada dentro de la caja, y la salida que proporcione sea la transformación de dicha entrada. Esto significa que no nos preocupamos por lo que sucede dentro del sistema, por la forma en que operan los mecanismos y procesos internos del sistema mediante los cuales se producen esas salidas.

Este método permite identificar claramente las entradas y salidas y estudiar las relaciones que existen entre ellas, permitiendo así maximizar la eficiencia de los sistemas sin tener que introducirnos en los procesos complejos que se encuentran dentro. Excepto cuando se presentan problemas es decir cuando hay anomalías en las relaciones entre entrada y salida, entonces nos vemos obligados a abrir la Caja Negra y estudiar ese subsistema en forma más precisa.

Este método tiene su razón de ser, pues, la mayoría de las personas dan prioridad a los resultados, pero destruye la saludable curiosidad de saber el funcionamiento y el por qué de las cosas.



**Figura 7.** Diagrama de bloques caja negra

Son modelos en los que sólo se reproduce la entrada y salida del fenómeno como se puede ver en la Figura 7, sin preocuparse de lo que pase en el interior.

## **1.7. Sistemas de Control**

El motivo principal del uso de un sistema de control es mantener cierta variable o variables de algún tipo, en un valor, o rango de valores previamente definidos. A través de los componentes de un sistema de control, en lazo abierto, o en lazo cerrado, o la configuración necesaria, según sea la necesidad de las personas o procesos de producción (TOLEDO CHOJOLÁN, 2007).

### **1.7.1. Acciones de Control**

Un control automático compara el valor efectivo de la salida de una planta con el valor deseado, determina la desviación (error) y produce una señal de control que reduce el error a cero o a un valor pequeño la forma en que el control automático produce la señal de control recibe el nombre de acción de control (TAPIA PERALTA, 2003).



La determinación del control en el diseño de un sistema de control automático determina la regulación del sistema cuando exista la presencia de cualquier perturbación, es decir el controlador produce una señal que se opone al efecto de la perturbación (TAPIA PERALTA, 2003).

### **1.7.2. Clasificación de los Controladores**

Los principales controladores se clasifican de la siguiente manera:

- Según el tipo de acción y control:
  - ✓ Controlador de dos posiciones o de encendido y apagado (on/off)
  - ✓ Controlador proporcional (P)
  - ✓ Controlador integral (I)
  - ✓ Controlador proporcional – integral (PI)
  - ✓ Controlador proporcional – derivativo (PD).
  - ✓ Controlador proporcional – integral – derivativo (PID).
  
- Según la fuente de energía empleada:
  - ✓ Controlador neumático.
  - ✓ Controlador hidráulico.
  - ✓ Controlador eléctrico o electrónico.
  
- Según la forma de la señal de la salida:
  - ✓ Controlador continuo o analógico
  - ✓ Controlador discontinuo o discreto

Casi todos los controladores industriales emplean como fuente de energía la electricidad o un fluido presurizado, tal como el aceite o el aire. El tipo de controlador que se usa debe decidirse con base en la naturaleza de la planta y las condiciones operacionales, incluyendo consideraciones tales como seguridad, costo, disponibilidad, confiabilidad, precisión, peso y tamaño (OGATA, 1984).

En éste proyecto se ha utilizado un controlador proporcional – integral – derivativo (PID) por esta razón se hará mayor énfasis en controladores según el tipo de acción y control que realizan.

### 1.7.2.1. Clasificación de los Controladores según el Tipo de Acción y Control

A continuación analizaremos los detalles de las acciones básicas de control que se utilizan en los controladores analógicos industriales.

#### 1.7.2.1.1. Acción de dos Posiciones o de Encendido y Apagado (On/Off)

En un sistema de control de dos posiciones, el elemento de control final sólo tiene dos posiciones fijas que es, en muchos casos, encendido o apagado.

En el control de dos posiciones, la señal de salida,  $u(t)$  permanece en un valor ya sea máximo o mínimo, dependiendo de si la señal de error,  $e(t)$ , es positiva o negativa. De éste modo:

$$u(t) = U_1, \quad e(t) > 0$$

$$u(t) = U_2, \quad e(t) < 0$$

En donde  $U_1$  y  $U_2$  son constantes. Es común que los controladores de dos posiciones sean dispositivos eléctricos, en cuyo caso se usa extensamente una válvula eléctrica operada por solenoides (OGATA, 1984)

En las Figura 8 se muestran los diagramas de bloques para los controladores de dos posiciones.

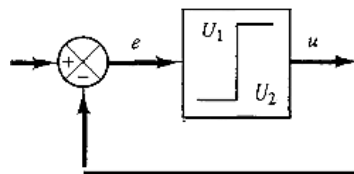
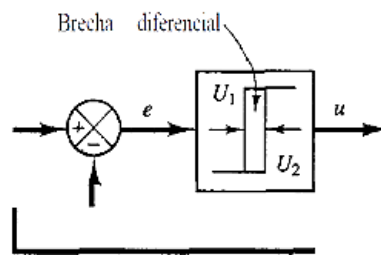


Figura 8. Diagrama de bloques de un controlador de encendido y apagado

El rango en el que debe moverse la señal de error antes de que ocurra la conmutación se denomina brecha diferencial. En la Figura 9 se señala una brecha diferencial. Tal brecha provoca que la salida del controlador  $u(t)$  conserve su valor presente hasta que la señal de error se haya desplazado ligeramente más allá de cero. En algunos casos, la brecha diferencial es el resultado de una fricción no intencionada y de un movimiento perdido; sin embargo, con frecuencia se provoca de manera intencional para evitar una operación demasiado frecuente del mecanismo de encendido y apagado.



**Figura 9.** Diagrama de bloques de un controlador de encendido y apagado con una brecha diferencial

#### 1.7.2.1.2. Acción de Control Proporcional (P)

El controlador de tipo continuo más simple utilizado en los sistemas realimentados es el controlador proporcional (P). Con un controlador proporcional la acción correctiva, o acción de control, es proporcional al error del proceso, es decir, proporcional a la diferencia entre la referencia y la variable medida (TOLEDO CHOJOLÁN, 2007).

Para un controlador con acción de control proporcional, la relación entre la salida del controlador  $u(t)$  y la señal de error  $e(t)$  es:

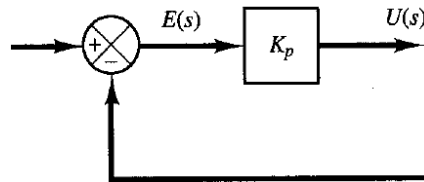
$$u(t) = K_p e(t) \quad \text{Ecuación (1.10)}$$

O bien, en cantidades transformadas por el método de Laplace,

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad \text{Ecuación (1.11)}$$

En donde  $K_p$  se considera la ganancia proporcional. Cualquiera que sea el mecanismo real y la forma de la potencia de operación, el controlador proporcional es, en esencia, un amplificador con una ganancia ajustable (OGATA, 1984).

En la figura se presenta un diagrama de bloques de tal controlador.



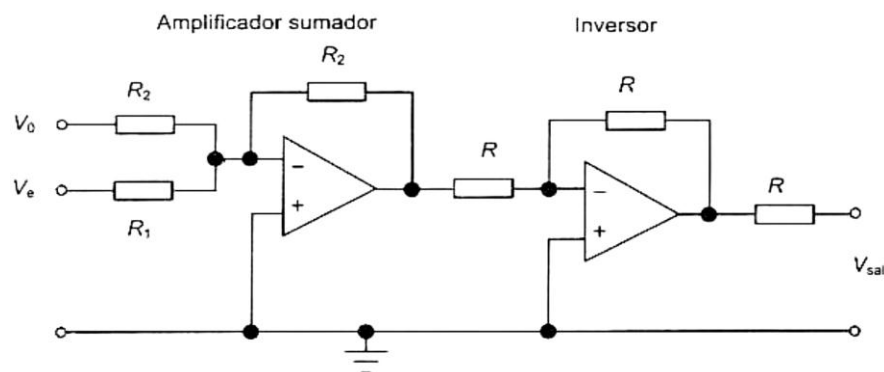
**Figura 10.** Diagrama de bloques de un controlador proporcional

El controlador proporcional no puede eliminar completamente el error del proceso. Esto se debe a que para mantener la señal de salida del controlador con un valor dado, se requiere un error de régimen. Generalmente, a éste error se le llama desviación proporcional o error en estado estacionario, y representa la principal desventaja de los controladores proporcionales.

Se puede ayudar a hacer mínimo el error en estado estacionario, aumentando en lo posible la ganancia proporcional. Lamentablemente, incrementando la ganancia proporcional, también se aumenta la tendencia hacia la inestabilidad. En realidad, cuando la ganancia es muy elevada, el controlador presenta oscilaciones alrededor de la referencia. Por lo tanto, aumentar la ganancia proporcional no es una solución ideal para eliminar el error de estabilidad de un proceso (TOLEDO CHOJOLÁN, 2007).

#### 1.7.2.1.2.1. Controlador Proporcional Electrónico

Las funciones de un controlador proporcional se pueden obtener mediante un amplificador operacional sumador con un inversor como se muestra en la Figura 11.



**Figura 11.** Controlador proporcional electrónico

$$V_{sal} = -R_f \left( \frac{V_o}{R_2} + \frac{V_e}{R_1} \right) \quad \text{Ecuación (1.12)}$$

La entrada al amplificador sumador presente en  $R_2$  es el voltaje correspondiente a un error de cero  $V_o$ , es decir, el valor predeterminado, y la entrada presente en  $R_1$  es la señal de error  $V_e$ . Si la resistencia de retroalimentación  $R_f = R_2$ , la ecuación se convierte en:

$$V_{sal} = -\frac{R_2}{R_1} V_e - V_o \quad \text{Ecuación (1.13)}$$

Si la salida del amplificador sumador pasa por un inversor, es decir por un amplificador operacional cuya resistencia de retroalimentación es igual a la resistencia de entrada, entonces:

$$V_{sal} = \frac{R_2}{R_1} V_e + V_o$$
$$V_{sal} = K_p V_e + V_o \quad \text{Ecuación (1.14)}$$

Donde  $K_p$  es la constante de proporcionalidad. El resultado es un controlador proporcional (BOLTON s.f.).

### 1.7.2.1.3. Acción de Control Integral (I)

La acción integral nos permite corregir el error en estado estacionario, con ciertas limitaciones, tales como la tendencia a oscilaciones o inestabilidad, si se agrega demasiada ganancia integral a nuestro regulador.

En un controlador con acción de control integral, el valor de la salida del controlador  $u(t)$  se cambia a una razón proporcional a la señal de error  $e(t)$ . Es decir,

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i e(t) \quad \text{Ecuación (1.15)}$$

O bien

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad \text{Ecuación (1.16)}$$

En donde  $K_i$  es una constante ajustable. La función de transferencia del controlador integral es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad \text{Ecuación (1.17)}$$

Si se duplica el valor de  $e(t)$ , el valor de  $u(t)$  varía dos veces más rápido. Para un error de cero, el valor de  $u(t)$  permanece estacionario. En ocasiones, la acción de control integral se denomina control de reajuste (reset). La Figura 12 muestra el diagrama de bloques de éste controlador (OGATA, 1984).

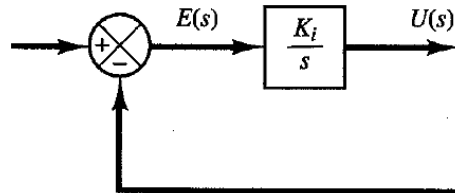


Figura 12. Diagrama de bloques de un controlador integral.

#### 1.7.2.1.4. Control Derivativo (D)

El control derivativo nunca se utiliza solo ya que no es capaz de producir una salida cuando hay una señal de error constante, por lo que, no es posible una corrección del mismo.

En un control con acción derivativa se hace una corrección que es proporcional a la derivada del error respecto al tiempo.

$$u(t) = K_P \frac{de(t)}{dt} \quad \text{Ecuación (1.18)}$$

Donde:  $de(t)/dt$  es un cambio en el error,  $K_P$  es la ganancia del control derivativo.

El controlador derivativo es útil porque responde a la rapidez de cambio del error y puede producir una corrección significativa antes de que la magnitud real del error sea grande. Por esta razón se dice, a veces, que el control derivativo se anticipa al error y de esta manera inicia una prematura corrección del error, sin embargo, a pesar de su utilidad no puede usarse solo, porque no responde a un error en estado estable, por lo tanto, debe usarse en combinación con otras acciones de control (TOLEDO CHOJOLÁN, 2007).

*Características:*

- Tiene efecto únicamente en la parte transitoria, por eso disminuye las oscilaciones, estabilizándose más rápido “se anticipa al error”.
- Se basa en la pendiente del error.
- En estado estable nunca actúa y por eso nunca se encuentra un control derivativo solo.

**1.7.2.1.5. Acción de Control Proporcional Integral (PI).**

El método por el cual se consigue eliminar el error en estado estacionario que se da, en un sistema de control que cuenta únicamente con un controlador proporcional; es incluir un término que varía de acuerdo al tamaño y duración del error, es utilizar una acción integral, la cual nos permite acumular la diferencia existente entre la variable de proceso y la referencia durante el tiempo que dura el error.

La acción de control de un controlador proporcional-integral (PI) se define mediante:

$$u(t) = K_P e(t) + \frac{K_P}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad \text{Ecuación (1.19)}$$

O la función de transferencia del controlador es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_P \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \quad \text{Ecuación (1.20)}$$

En donde  $K_P$  es la ganancia proporcional y  $T_i$  se denomina tiempo integral. Tanto  $K_P$  como  $T_i$  son ajustables. El tiempo integral ajusta la acción de control integral, mientras que un cambio en el valor de  $K_P$  afecta las partes integral y proporcional de la acción de control.

El inverso del tiempo integral  $T_i$  se denomina velocidad de reajuste. La velocidad de reajuste es la cantidad de veces por minuto que se duplica la parte proporcional de la acción de control. La velocidad de reajuste se mide en términos de las repeticiones por minuto. La Figura 13 muestra un diagrama de bloques de un controlador proporcional más integral (OGATA, 1984).

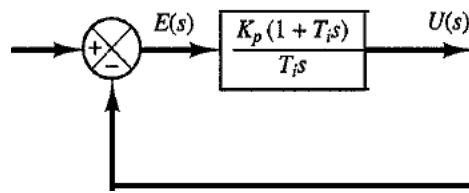


Figura 13. Diagrama de bloques de un controlador proporcional integral

Si la señal de error  $e(t)$  es una función escalón unitario, como se aprecia en la Figura 14, la salida del controlador  $u(t)$  se convierte en lo que se muestra en la segunda figura.

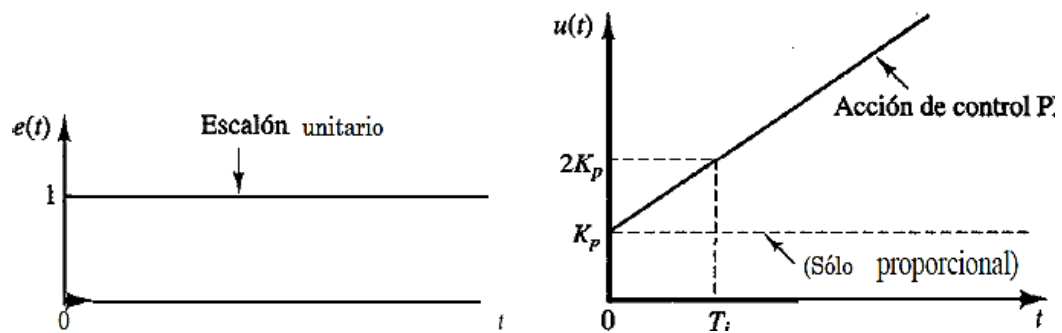


Figura 14. Diagramas que muestran una entrada escalón unitario y la salida del controlador.

Éste método para eliminar el error del proceso funciona para una carga dada. Si ésta cambia, ese error no es más nulo. Por lo tanto, éste método se puede emplear en los sistemas de control de procesos en que el valor medio de la carga es constante.

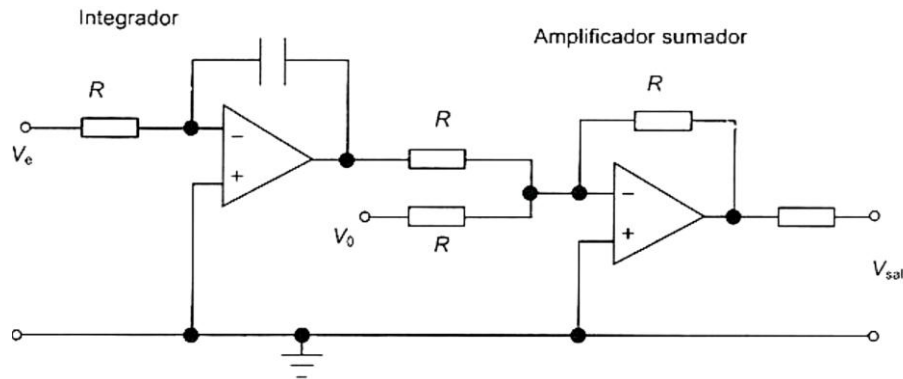
Ahora debemos incluir un término que se encargue del tiempo que dura éste error (para generar un reset automático). Si hacemos que un número varíe de acuerdo con el tamaño y el tiempo que dure el error, entonces podríamos sustituir al reset manual (TOLEDO CHOJOLÁN, 2007).

Por cada unidad de tiempo, agregamos una pequeña cantidad a nuestro valor el cual equivale al área formada entre el tiempo y el error.

#### 1.7.2.1.5.1. Controlador Proporcional Integral Electrónico

La Figura 15 muestra el circuito electrónico utilizado como controlador integral. Consta de un amplificador operacional conectado como integrador seguido de otro amplificador operacional configurado como sumador y en el cual la salida del integrador se añade a la señal del controlador correspondiente al instante cero.





**Figura 15.** Controlador proporcional integral electrónico

$$I_{sal} - I_o = K_i \int_0^t e(t) dt \quad \text{Ecuación (1.21)}$$

Donde:

$$K_i = 1/R_1 C$$

#### 1.7.2.1.6. Acción de Control Proporcional Derivativo (PD)

La acción de control de un controlador proporcional derivativa (PD) se define mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad \text{Ecuación (1.22)}$$

Y la función de transferencia es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p(1 + T_d s) \quad \text{Ecuación (1.23)}$$

En donde  $K_p$  es la ganancia proporcional y  $T_d$  es una constante denominada tiempo derivativo. Tanto  $K_p$  como  $T_d$  son ajustables. La acción de control derivativa, en ocasiones denominada control de velocidad, ocurre donde la magnitud de la salida del controlador es proporcional a la velocidad de cambio de la señal de error. El tiempo derivativo  $T_d$  es el intervalo de tiempo durante el cual la acción de la velocidad hace avanzar el efecto de la acción de control proporcional. La Figura 16 muestra un diagrama de bloques de un controlador proporcional-derivativo (OGATA, 1984).

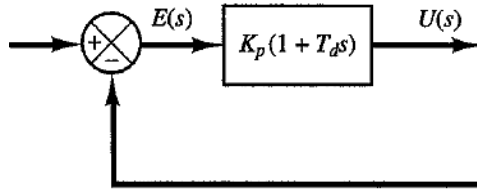


Figura 16. Diagrama de bloques de un controlador proporcional derivativo

Si la señal de error  $e(t)$  es una función rampa unitaria como se aprecia en la Figura 17, la salida del controlador  $u(t)$  se convierte en la que se muestra en la segunda figura.

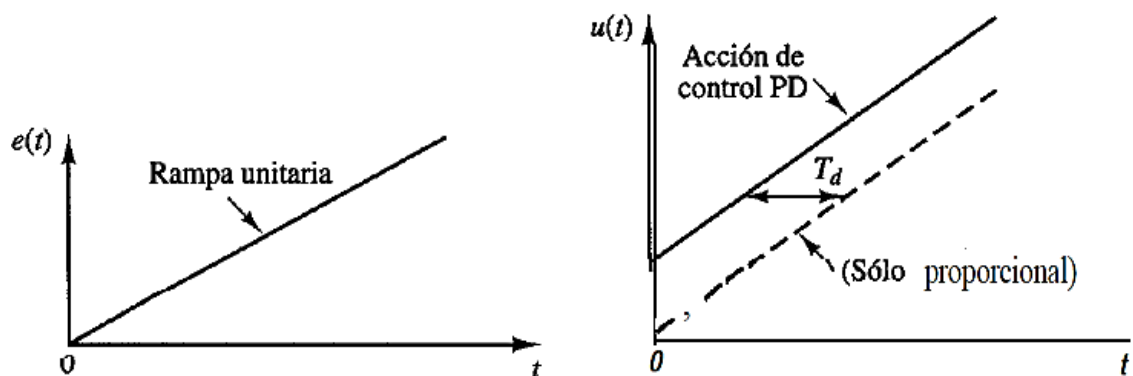


Figura 17. Diagramas que muestran una entrada rampa unitaria y la salida del controlador.

La acción de control derivativa tiene un carácter de previsión. Sin embargo, es obvio que una acción de control derivativa nunca prevé una acción que nunca ha ocurrido. Aunque la acción de control derivativa tiene la ventaja de ser de previsión, tiene las desventajas de que amplifica las señales de ruido y puede provocar un efecto de saturación en el actuador. Observe que la acción de control derivativa no se usa nunca sola, debido a que solo es eficaz durante periodos transitorios.

#### 1.7.2.1.6.1. Controlador Proporcional Derivativo Electrónico

La Figura 18 muestra el circuito de un controlador derivativo electrónico, el cual cuenta con un amplificador operacional configurado como diferenciador, seguido de otro amplificador operacional configurado como inversor. El tiempo de derivación,  $K_D$  es igual a  $R_2C$ .

$$I_{sal} - I_o = K_D \frac{de}{dt} \quad \text{Ecuación (1.24)}$$

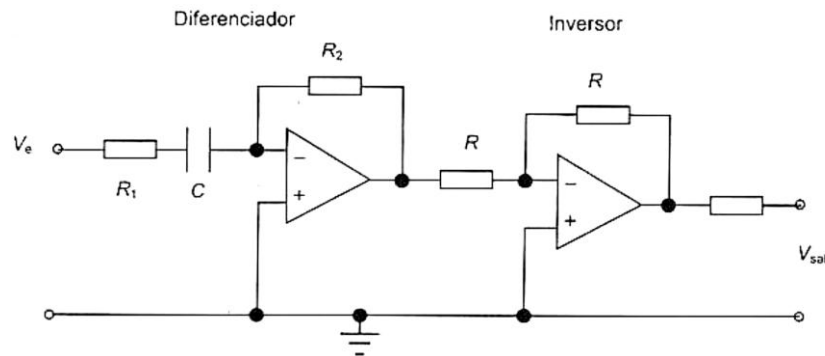


Figura 18. Controlador proporcional derivativo electrónico

### 1.7.2.1.7. Acción de Control Proporcional Integral Derivativo (PID).

Se le denomina de esta forma a un proceso controlado por un sistema de compensación en lazo cerrado, basado en un regulador de acciones proporcional, integral y derivativa o PID, de tal forma que se logran características dinámicas estables, o dicho de otra forma se logra que el sistema responda a cambios en sus variables en una forma estable

La combinación de una acción de control proporcional, una acción de control integral y una acción de control derivativa se denomina acción de control proporcional integral derivativa (PID). Esta acción combinada tiene las ventajas de las tres acciones de control individuales. La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante

$$u(t) = K_P e(t) + \frac{K_P}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_P T_d \frac{de(t)}{dt} \quad \text{Ecuación (1.25)}$$

O la función de transferencia es

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_P \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad \text{Ecuación (1.26)}$$

En donde  $K_P$  es la ganancia proporcional,  $T_i$  es el tiempo integral y  $T_d$  es el tiempo derivativo. El diagrama de bloques de un controlador PID aparece en la Figura 19.

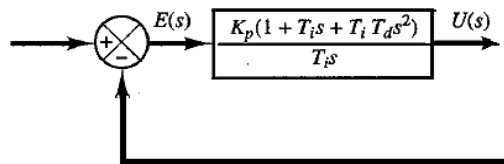
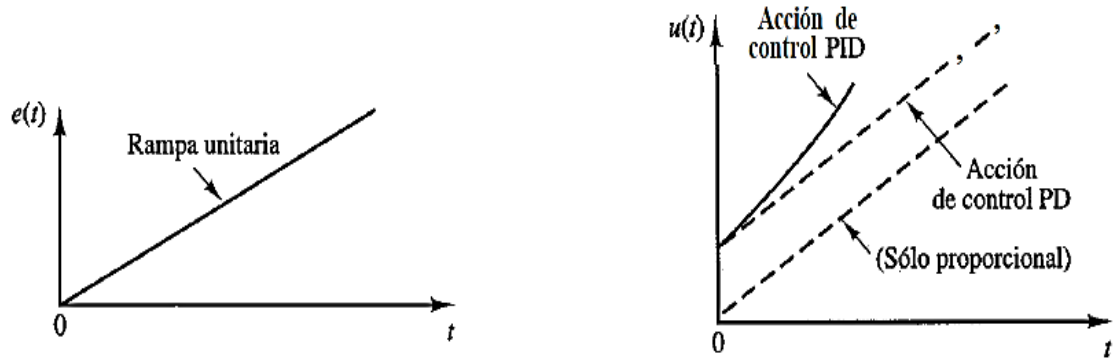


Figura 19. Diagrama de bloques de un controlador proporcional integral-derivativo

Si  $e(t)$  es una función rampa unitaria, como la que se observa en la Figura 20, la salida del controlador  $u(t)$  se convierte y esta se puede ver en la segunda figura.



**Figura 20.** Diagramas que muestran una entrada rampa unitaria y la salida del controlador.

El regulador PID (Proporcional, Integral y Derivativo) es parte de un sistema de control realimentado, cuyo propósito es hacer que el error en estado estacionario, entre la señal de referencia y la señal de salida del proceso, sea cero de manera asintótica en el tiempo, lo que se logra mediante el uso de la acción integral. Además el controlador tiene la capacidad de anticipar el futuro a través de la acción derivativa que tiene un efecto predictivo sobre la salida del proceso (TOLEDO CHOJOLÁN, 2007).

Los controladores PID son suficientes para resolver el problema de control de muchas aplicaciones en la industria, particularmente cuando la dinámica del proceso lo permite (En general, procesos que pueden ser descritos por dinámicas de primer y segundo orden).

### 1.8. Método de Control

En el presente proyecto el método de control al cual se va hacer referencia son las pantallas térmicas ya que estas presentan múltiples beneficios.

En los invernaderos destinados al cultivo de plantas, la función de la pantalla térmica es facilitar al agricultor la creación de un microclima adecuado con el objeto de incrementar el rendimiento y mejorar la calidad del producto.

Pero cabe recalcar que las pantallas térmicas es sólo uno de los elementos que componen un sistema de control climático para los cultivos. Por lo tanto este método de control debe ser combinado con otros sistemas para lograr tener un control total del sistema.

La pantalla hermética es especialmente adecuada para a las condiciones climáticas invernales, y está destinada fundamentalmente a reducir la pérdida de calor dentro del invernadero. El ahorro de energía durante la calefacción es significativo, debido a que dentro de la pantalla existen franjas de material reflectante. (Eleazar (Zari) Gal)

### **1.8.1. Pantalla Térmica**

Las pantallas térmicas son tejidos prefabricados mediante filamentos de aluminio, acrílicos y polímeros plásticos. El empleo de las pantallas térmicas permite el control de las temperaturas en el interior del invernadero tanto cuando las temperaturas en el exterior son elevadas como bajas, lo cual se traduce en un importante ahorro con respecto otros sistemas artificiales.

Los sistemas de pantallas térmicas evitan cambios bruscos de temperatura y son capaces de variar el balance radiactivo tanto desde el punto de vista fotosintético como calorífico como se muestra en la Figura 21.



**FIGURA 21:** Invernadero con sistema de pantallas térmicas

Durante el día reduce los aportes de energía radiante; idealmente, esta deberá ser transparente a la radiación solar visible (parte fotosintéticamente activa) y reflectante y/o

absorbente a la radiación infrarroja de origen solar. Esto que permite simultáneamente producir un sombreado y evitar elevaciones de temperaturas demasiado fuertes. (TAPIA PERALTA, 2003)

La radiación infrarroja emitida por los objetos, las plantas y el suelo afectan el techo del invernadero, lo cual en última instancia influye sobre la radiación o sobre su filtración hacia arriba. Una pantalla térmica que contenga elementos reflectantes cumple también la función de barrera contra la radiación infrarroja. Al mismo tiempo, de manera similar a un espejo, dirige el calor de los rayos infrarrojos tanto hacia las plantas como hacia otros elementos dentro del invernadero. Las pantallas térmicas permiten reducir los gastos de energía requeridos para la calefacción. Los principales factores que influyen sobre el incremento de la humedad relativa del ambiente dentro de un invernadero son la evaporación de las plantas, y el descenso de la temperatura del aire.

Durante la noche es necesario tomar medidas para la conservación de la energía creada por el aire caliente acumulado dentro del invernadero durante el día actuando con pantallas térmicas sobre las radiaciones infrarrojas, además se presentan como una resistencia complementaria a las pérdidas de energía por conducción y convección, también es necesario implementar un sistema de calefacción para mayor seguridad. Ya que el aire caliente se filtra a través de aperturas y ranuras hacia el exterior, o se eleva hacia el techo y desde allí hacia afuera, a través del material de la cubierta.

Dependiendo de la cantidad de luz y el ahorro energético que se quiera obtener se puede elegir entre las diferentes clases de pantallas tanto para pantallas internas, pantallas externas y pantallas enrollables.

### **1.8.2. Pantallas Térmicas Aluminizadas**

Este tipo de pantalla térmica es la más eficiente, pero aun es poco frecuente dado a su elevado costo y lo complicado de su instalación dentro de un invernadero artesanal. Para obtener una radiación adecuada durante el día dentro del invernadero, estas deben ser móviles para permitir su retirada y plegado cuando convenga. Además pueden dificultar la ventilación y aumentar la higrometría nocturna; la ganancia térmica que suministran en

invernaderos sin calefactor oscila entre los 2 y los 4°C, y en general, la mejora térmica no compensa la pérdida de luz cuando son fijas.

La idea es la colocación de pantallas móviles de ahorro de energía y sombreo. Consiste en cintas de aluminio y cintas de poliéster entretejidas entre sí con hilo de acryl como se muestra en la Figura 22. En un estado de pantallas extendidas no dejan entrar calor de radiación o convección. De esta manera se ahorra mucha energía. Al mismo tiempo, las pantallas reflejan una parte de la radiación solar por lo que el cultivo esta protegido de una radiación intensa y una temperatura elevada. El resultado es un crecimiento uniforme y un mejor clima de trabajo.



**Figura 22.** Pantalla térmica aluminizada

Estas pantallas tienen una estructura muy flexible y se pueden manejar muy fácilmente, por lo que al recogerlas la entrada de luz es máximo. Su estructura entretejida de las cintas finas, en combinación con los hilos especiales de poliéster permite la entrada de suficiente vapor de agua.

Estos tipos de pantallas se suelen colocar en invernaderos con sistemas de calefacción, porque, como ya se ha dicho, permiten ahorro energético, ya que en función de la estanqueidad del invernadero se puede llegar (según fabricantes) a un ahorro energético de un 30 a 50 %. (RAPOSO LLOBET 2004)



## **1.9. Eficiencia energética en la climatización de invernaderos**

Las técnicas de acondicionamiento climático en invernaderos suelen estar asociadas a algunas estrategias de ahorro de energía, de manera que se pueda minimizar el impacto del consumo de combustible sobre la rentabilidad del cultivo, al tiempo que mantiene el cultivo en condiciones óptimas.

### **1.9.1. Ahorro Energético en Calefacción**

La producción en invernaderos permite cultivar en condiciones climáticas favorables para las plantas. Para ello, los invernaderos están equipados con tecnologías cada vez más sofisticadas de calefacción y refrigeración; sin embargo, suele ocurrir que estos equipos no consiguen los valores óptimos de clima para una buena productividad y calidad, a pesar de que estas condiciones óptimas suelen ser teóricamente conocidas. El problema, en ocasiones, consiste en decidir cómo utilizar estos equipos, es decir, como controlar su encendido y apagado para conseguir un clima óptimo en el interior del invernadero, y si es posible, un gasto mínimo de agua y energía.

El valor de referencia en calefacción es la temperatura del aire que se quiere obtener en cada momento, valor que se denomina temperatura de consigna. En los invernaderos se ha utilizado tradicionalmente una temperatura de consigna nocturna y otra diurna. Una tendencia moderna es aumentar la consigna de forma automática durante el día, en función de la luz, para incrementar la fotosíntesis al aumentar a la vez la radiación y la temperatura.

Para el control de la calefacción se usan uno o varios sensores de temperatura en el interior del invernadero; si se usan dos en el mismo punto, la comparación de valores permite detectar averías. Se suelen colocar los sensores en un punto representativo del invernadero, normalmente a 1.5 m de altura. La medida del sensor o sensores se compara con el valor de consigna para actuar sobre el equipamiento existente.

Si definimos la temperatura de consigna y el diferencial de temperatura que suele ser de 3 a 4°C el equipamiento funciona de la siguiente manera: se conectan cuando la temperatura del aire, medida con el sensor, desciende por debajo de la temperatura de consigna; se



desconecta cuando la temperatura del aire asciende por encima de la temperatura de consigna más el diferencial. Con la utilización del diferencial disminuimos el número de arranques y paradas del equipo aumentando la vida útil

### **1.9.2. Ahorro Energético Con Pantalla Térmica**

Un primer escalón para introducir tecnologías de ahorro de energía es la colocación de pantalla térmica.

El objeto de las pantallas térmicas es distinto en invierno y en verano. En invierno se extiende de noche y se recoge durante el día, para ahorrar energía en calefacción; en verano se recoge en la noche y se extienden en el día, para sombrear y reducir la radiación y la temperatura. El control de las pantallas puede ser temporizado, con un control horario en invierno y otro distinto en verano. Algunos equipos de control pueden calcular la hora de salida y puesta del sol, información que se puede utilizar para el control; si esto no existe se puede establecer cada mes una hora de recogida y otra hora de extensión de la pantalla. La alternativa al control temporizado es utilizar un sensor de temperatura en combinación con el horario de actuación; a combinar un sensor de temperatura y uno de radiación solar. En cualquiera de los casos, la salida del controlador actúa sobre los relés o contactores de los motores que accionan la pantalla térmica (RAPOSO LLOBET 2004).

A continuación se presenta algunas estrategias para el control de las pantallas en el interior del invernadero:

- ❖ Si se combina la actuación del sensor de temperatura con un horario (marcado por un temporizador o introducido periódicamente por el usuario), el control puede ser todo/nada con un diferencial:

Si es de día y la temperatura supera la consigna, se extiende la pantalla; si cae por debajo de la consigna menos el diferencial, se recoge. La consigna de las pantallas para sombreo debería ser superior a la consigna de las ventanas, de forma que las ventanas actúen primero. Hay que tener en cuenta que la malla resta radiación solar y puede disminuir la producción.

Si es de noche y la temperatura cae por debajo de la consigna, se extiende la pantalla; si supera la consigna más el diferencial, se recoge. Esta consigna nocturna, cuyo objetivo es el ahorro energético, será distinta de la diurna, en la que el objetivo es la ventilación y refrigeración.

- ❖ Si se utilizan sensores de temperatura interna y radiación exterior, el control puede ser también todo/nada con diferencial, tanto en temperatura como en radiación, con las siguientes premisas:

Si la radiación solar exterior supera la consigna de radiación se extiende la pantalla térmica para sombrear; si desciende por debajo de la consigna menos el diferencial, se recoge.

Si la radiación solar exterior es próxima a cero el control de la pantalla térmica se realiza en función de la temperatura. Si la temperatura del invernadero desciende por debajo de la consigna de temperatura se extiende la pantalla para disminuir las pérdidas de energía; si aumenta por encima de la consigna más el diferencial se recoge. La consigna de la pantalla térmica para ahorro de energía debería ser superior a la de los sistemas de calefacción para que primero actúe la pantalla y después la calefacción.

Los invernaderos holandeses utilizan técnicas de control específicas para las pantallas. En invierno, recomiendan recoger gradualmente la pantalla térmica por las mañanas, si el sistema de control lo permite, para evitar cambios bruscos de temperatura. Durante la noche recomiendan medir la humedad relativa en el interior de la pantalla y abrir unos centímetros la pantalla si la humedad se aproxima a la saturación, para ventilar y evitar condensaciones. Este último problema se debe a que las pantallas utilizadas normalmente en el norte de Europa son continuas y no permiten el paso de vapor de agua, mientras que las utilizadas en zonas mediterráneas son discontinuas y si permiten el intercambio gaseoso.

### **1.10. Software Utilizado en el Diseño del Controlador**

Para realizar el modelado, diseño y simulación del controlador se utilizó el software Matlab, el mismo que se ajusta a nuestros requerimientos.

### **1.10.1. Matlab**

Es un entorno de computación y desarrollo de aplicaciones totalmente integrado orientado para llevar a cabo proyectos en donde se encuentren implicados elevados cálculos matemáticos y la visualización gráfica de los mismos. MATLAB integra análisis numérico, cálculo matricial, proceso de señal y visualización gráfica en un entorno completo donde los problemas y sus soluciones son expresados del mismo modo en que se escribirían tradicionalmente, sin necesidad de hacer uso de la programación tradicional. Matlab es un lenguaje de alto nivel y un ambiente interactivo creado por MathWorks. Está diseñado para realizar rápida y eficientemente tareas matemáticas computacionalmente intensivas; al programa se lo puede identificar con el logo que se muestra en la Figura 23.



**Figura 23.** Logo de matlab

Matlab integra la computación matemática con funciones de visualización y un lenguaje de gran eficacia a fin de ofrecer un entorno flexible para la realización de computación técnica. La arquitectura abierta facilita el uso de Matlab y de los productos acompañantes para explorar datos, crear algoritmos y herramientas a medida que permitan obtener de manera rápida la información y confieran ventajas competitivas.

Profesionales técnicos de todo el mundo confían en Matlab para acelerar su investigación, reducir el tiempo invertido en el análisis y desarrollo y reducir los costos del proyecto, además de generar soluciones efectivas. El entorno Matlab estimula la creatividad y permite comprobar y comparar rápidamente múltiples alternativas, permitiendo así es la obtención de mejores soluciones.



Matlab dispone de herramientas para:

- Adquisición de datos
- Exploración y análisis de datos
- Visualización y procesado de imágenes
- Prototipaje y desarrollo de algoritmos
- Modelado y simulación
- Programación y desarrollo de aplicaciones

Una de las herramientas más poderosas de MATLAB es Simulink, un entorno gráfico para modelar, simular y analizar sistemas dinámicos tanto en tiempo continuo como discreto.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1. CASO DE ESTUDIO**

El lugar donde se realizará el presente proyecto queda ubicado dentro del Jardín Botánico Reinaldo Espinosa, del cual haremos referencia a continuación

#### **2.1.1. Jardín Botánico Reinaldo Espinosa**

El Jardín Botánico Reinaldo Espinosa es considerado como un laboratorio natural ya que alberga a 1385 especies vegetales inventariadas entre nativas, exóticas y endémicas además cuenta con una considerable fauna asociada a ésta vegetación; fue fundado en el año 1949 por el distinguido Botánico Reinaldo Espinosa con el fin de impulsar la investigación y conservación ambiental. Está ubicado a 5 Km de la ciudad de Loja en la vía Loja - Vilcabamba, a 2140 m.s.n.m., con una precipitación anual de 900 mm y una temperatura media de 15,3 °C; cuenta con un área aproximada de 7 hectáreas en las que se ha tratado de reunir en categorías las plantas más sobresalientes del Sur del país; en el Anexo 1 se puede observar cómo está distribuido el Jardín Botánico.

El Jardín Botánico Reinaldo Espinosa es el más antiguo del Ecuador y el único ubicado en el nudo de convergencia de las corrientes bioclimáticas cálidas húmedas de la Amazonía y cálidas secas de la vertiente del Pacífico, situación que da origen a una diversidad florística única de la hoya y provincia de Loja. Esta administrado por la Universidad Nacional de Loja y se halla inscrito en la Organización Internacional para la Conservación de los Jardines Botánicos (BGCI). La información que citamos sobre el Jardín Botánico es tomada de sus propias fuentes bibliográficas.

En este jardín se puede encontrar una gran variedad de plantas, que pertenecen a las provincias de Loja, Zamora Chinchipe, el Oro y otras latitudes; entre estas plantas se pueden encontrar: arboles nativos de la provincia, colecciones de orquídeas, una colección de bonsáis, colecciones de plantas de suelos especiales, cultivos andinos, plantas medicinales y ornamentales entre otras.

En el orquidiario natural se ha tratado de asemejar las condiciones en las que se desarrollan las orquídeas en su estado natural, se puede apreciar orquídeas nativas pero también se ha introducido especies valiosas como: *Oncidium*, *Epidendrum*, *Stanophea*, *Stelis*, *Masdevallia*, *Nanodes*, *Sobralia*, *Catleya*, *Heliconias*, *Bromélias*, *Guzmania* *Conifera*. También se dispone de invernaderos en los que se ha tratado de asemejar aun más las condiciones climáticas para algunas especies.

En el invernadero de orquídeas tropicales se ha tratado de asemejar lo máximo posible las condiciones climáticas que necesitan estos tipos de orquídeas ya que normalmente el lugar donde está ubicado el Jardín Botánico es frío; estas orquídeas necesitan de unas condiciones óptimas para florecer, para lo cual, para mejorar el microclima dentro del invernadero se realizó el diseño de un controlador automático de temperatura que nos permita controlar la temperatura interna principalmente.

La finalidad de este proyecto es realizar el diseño del control automático de temperatura para el invernadero utilizando pantallas térmicas o de sombreado como regulador de temperatura interna y de radiación; estas nos permiten el ahorro energético, en el caso que utilice sistemas eléctricos y electrónicos para calefacción y ventilación trataremos de optar por las energías alternativas, y esto nos conllevará a mejorar la producción de orquídeas.



**Figura 24.** Invernadero de orquídeas

### **2.1.2. Características del Invernadero**

El invernadero en el cual realizaremos los estudios de este proyecto se encuentra ubicado en el Jardín Botánico Reinaldo Espinosa el cual pertenece al Área Agropecuaria y de los Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional de Loja.

Este invernadero es del tipo capilla simple a dos aguas con paredes rectas de hormigón de 37 cm de espesor, sus medidas son 10,87 m de largo y 3,78 m de ancho; tiene una altura de cumbrera de 3,07 m y una altura de hombros de 2,26 m. Con una área interna disponible de  $30,87 m^2$  y un área total cubierta de  $41,09 m^2$ .

Las paredes del invernadero están construidas de ladrillo, la pared lateral derecha cuenta con 4 ventanas, mientras que la izquierda cuenta con 3 ventanas para mejorar la ventilación cuando aumente demasiado la temperatura, la cual es realizada de forma manual; en la pared frontal se encuentra ubicada una puerta de madera, en la pared posterior se encuentra abierta una puerta pero la misma está cubierta por una plancha plástica. La cubierta está conformada de estructura metálica y el material que la recubre es plástico de polietileno, así mismo las ventanas están construidas en su parte estructural de madera y el material que las recubre es el mismo utilizado en la cubierta. Al invernadero se lo podrá observar en el Anexo 2.

La base del invernadero se encuentra sumergido 94 cm en la superficie terrestre, el invernadero está destinado exclusivamente para el cultivo de orquídeas de clima de tropical, las mismas se encuentran cultivadas en macetas. También podemos destacar que el invernadero no cuenta con ningún sistema de control, además las ventanas y puertas con las que cuenta el invernadero están en malas condiciones ya que hay muchas fugas de calor.

A continuación se detallará algunas condiciones del alcance del proyecto:

*Calefacción:* Para la regulación de esta variable se propone realizar por medio de pantallas térmicas, combinado con otro sistema para tener un control completo, este sistema va a conseguir regular las perturbaciones que se presenten, tratando que la magnitud física a regular sea igual al valor de consigna deseado. Como el invernadero no cuenta con un



sistema de calefacción, se utilizara la radiación del sol como principal sistema de calefacción. Con la pantalla térmica se tratara de conservar el calor y regular el paso de la radiación y de esta manera controlar la temperatura; para mantener el calor cuando el medio este frio especialmente durante la noche el sistema permanecerá cerrado, para no permitir que el aire caliente esté en contacto directo con la cubierta.

*Ventilación:* Para el sistema de ventilación el invernadero cuenta con siete ventanas en las paredes laterales las misas que deben ser manipuladas para este fin; cabe recalcar que el presente proyecto no se va a tomar en consideración este sistema.

### **2.1.3. Selección de Variables a Monitorear**

Como ya mencionamos anteriormente el invernadero es un lugar cerrado donde la diferencia entre el clima interior y exterior es más notoria en la cubierta, pues en ésta parte del invernadero hay una mayor intercambio de energía debido a la radiación solar y los mecanismos del estancamiento de aire. Sabiendo que las variables externas influyen directamente sobre el invernadero y de acuerdo a los requerimientos, hemos creído conveniente realizar la medición de las siguientes variables.

- Radiación Solar
- Temperatura Externa
- Temperatura Interna
- Humedad Relativa

Debemos mencionar que las variables que se citan anteriormente se escogieron de acuerdo a las necesidades de nuestro proyecto, además cabe mencionar que hay muchas más variables que influyen directamente como son: el viento, el índice de área foliar, la temperatura de la superficie del suelo, la lluvia, etc. Si se desea realizar más adelante un modelo más preciso es necesario tomar en cuenta la mayor cantidad de variables que intervienen en el sistema. A continuación realizaremos un análisis de cómo influyen las variables seleccionadas sobre el caso de estudio:

#### **2.1.3.1. La radiación solar**

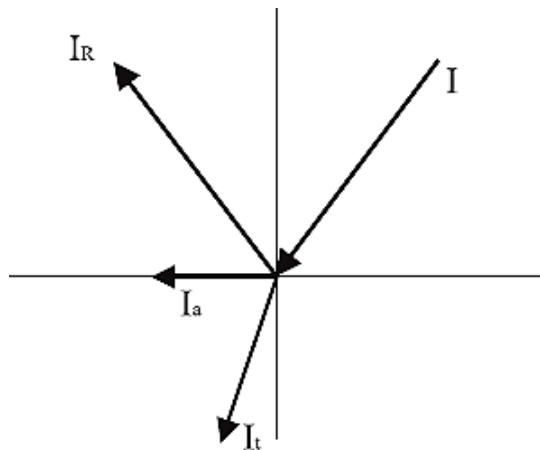
La radiación solar influye directamente sobre la temperatura interna debido a que hay un aporte de energía al invernadero por parte de ésta variable. La radiación está compuesta de



dos componentes de ondas cortas y ondas largas; la radiación de onda corta proviene directamente del sol como radiación directa o del cielo como radiación difusa, la longitud de onda varía entre 0,2 y 5  $\mu\text{m}$ ; las ondas largas provienen de la emisión del suelo, de las plantas y de la transmisión de la cubierta.

Tanto la producción, como el clima en los invernaderos, dependen mucho de la interacción de onda corta con la cubierta. La radiación de onda corta tiene características espectrales y geométricas diferentes; la geometría de la radiación directa depende de la posición del sol y naturalmente de las condiciones del día y del tiempo. La transmisión depende del tipo de cubierta y del impacto que tenga la radiación sobre la misma, esta radiación puede dividirse en tres partes al ponerse en contacto con la cubierta como se ve en la Figura 25; siendo estas:

- ✓ Radiación Reflejada ( $I_R$ )
- ✓ Radiación Absorbida ( $I_A$ )
- ✓ Radiación Transmitida ( $I_T$ )



**Figura 25.** División de la radiación de onda corta al ponerse en contacto con la cubierta

El intercambio de energía radiante del medio externo con la parte interna del invernadero puede ser por convección y conducción.

### 2.1.3.2. Temperatura Interna

La temperatura interna del invernadero depende de los siguientes factores:

*La calefacción* del invernadero dependerá exclusivamente de la radiación solar.

*La ventilación* es la encargada de reducir la temperatura del invernadero. Ésta depende de la diferencia de temperatura que hay entre el interior y el exterior del invernadero, así también de la transmisión a través de la cubierta. Para controlar la temperatura interna nos vamos a valer de las pantallas térmicas tanto para controlar la radiación como para guardar el calor especialmente por las noches. También el invernadero cuenta con puertas y ventanas que pueden ser utilizadas para la ventilación, cuando aumenta demasiado la temperatura, pero ésta se realiza en forma manual por lo cual no puede ser controlada; además cabe mencionar que estas puertas y ventanas no están en buenas condiciones por lo que presentan fugas de aire.

*La temperatura del suelo* influye mucho sobre la temperatura interna del invernadero pues ésta proporciona energía al mismo.

### **2.1.3.3. Temperatura Externa**

La temperatura externa depende de muchos factores externos como la radiación térmica, el viento, la lluvia; el viento es el elemento que más incide negativamente sobre la temperatura. Esta variable realiza una transferencia de energía con el interior del invernadero a través de la cubierta por medio de convección y conducción.

### **2.1.3.4. Humedad Relativa**

La humedad interna influye directamente sobre el microclima del invernadero ya que ésta variable se encuentra relacionada con la temperatura, el sistema de riego, la transpiración de las plantas, la ventilación, etc.; aportando ésta directamente al microclima del invernadero.

## **2.2. Variables Climáticas a Controlar**

La variable a controlar en el invernadero directamente es la temperatura interna, por lo tanto para realizar el diseño del controlador se va tomar como variable de entrada a la radiación solar y como salida la temperatura interna, el método de control que se propone para lograr nuestro objetivo son las pantallas térmicas, las mismas que permitirán regular el



paso de radiación hacia el cultivo y el almacenamiento de energía. Se propone realizar el control de esta variable a través de pantallas de sombreo porque éstas permiten un control de radiación y temperatura de entre un 30 a un 60 %, dependiendo del tipo que se desee utilizar según los requerimientos del invernadero, además porque contribuyen con un ahorro de energía al no consumir ningún tipo de energía que no sea la radiación solar; como se utilizan en otros sistemas de calefacción y ventilación; solo se utilizará energía eléctrica para la apertura y cierre de la pantalla si se lo implementa éste sistema automático.

Se ha creído conveniente controlar directamente la temperatura interna, controlando ésta variable se podrá controlar inversamente la radiación solar y otras variables en menor porcentaje, debido a los problemas que se han sucedido con las orquídeas, como el amarillamiento de las plantas, la elevada condensación, etc.

La temperatura adecuada para algunos tipos de orquídeas que en este invernadero se cultivan se muestra en la Tabla 3; para establecer una temperatura de consigna hemos establecido una temperatura media para todo el invernadero tomando en cuenta los diferentes tipos de orquídeas.

**Tabla 3.** Rango de temperatura de algunos tipos de orquídeas que se cultivan en el invernadero

<b>TIPO DE ORQUIDEA</b>	<b>TEMPERATURA DIURNA</b>	<b>TEMPERATURA NOCTURNA</b>
Catasetum	25 °C	18-21 °C
Cymbidium	27 °C	10 °C
Oncidium	27 °C	10 °C
Masdevallia	27 °C	10 °C
Miltonia	27 °C	10 °C
Paphiopedilum	27 °C	10 °C
Odontoglossum	27 °C	10 °C
Cattleya	30 °C	13 °C
Dendrobium	30 °C	13 °C
Laelia	30 °C	13 °C
Epidendrum	30 °C	13 °C
Brassavola	30 °C	13 °C
Phalaenopsis	32 °C	15 °C
Vanda	32 °C	15 °C
Dendrobium	25°	10° - 12°
Phalaenopsis	18 y los 30°	Inferior a15-16°.
Paphiopedilum	30°C de máxima	14 - 15°C mínima
<b>Temperatura Media</b>	<b>30 °C</b>	<b>13 °C</b>

### **2.2.1. Sistema de Adquisición de Datos**

Para realizar las diferentes mediciones se presentaron algunos inconvenientes, ya que al tratarse de un jardín botánico alrededor del invernadero se encuentran algunos árboles los mismos que producen sombra al invernadero y no permiten que la radiación solar llegue directamente hacia la cubierta, esto ocasiona que no haya un aporte uniforme de energía.

Para efectuar el análisis de la radiación que llega en forma directamente a la cubierta durante las diferentes horas del día, se dividió a la superficie de la cubierta en cuatro secciones y se llegó a las siguientes consideraciones:

De 7H00 a 10H00 la cubierta se encuentra sombreada en un 75%

De 10H00 a 11H00 la cubierta se encuentra sombreada en un 50%

De 11H00 a 14H00 la cubierta se encuentra sombreada en un 25%

De 14H00 a 14H30 la cubierta se encuentra sombreada en un 50%

De 14H30 a 15H00 la cubierta se encuentra sombreada en un 75%

De 15H00 a hasta al anochecer la cubierta se encuentra sombreada en un 100%

Es necesario tener en cuenta que este análisis se lo hizo por simple inspección, tomando en cuenta sola la distribución de la radiación sobre la cubierta del invernadero.

Teniendo en cuenta estas observaciones, para la medición de las variables involucradas en este proyecto se procedió a realizar un diseño experimental para mejorar la medición. Los instrumentos utilizados para la adquisición de datos son:

- Un Datalogger de temperatura de tres puntos con termocuplas tipo K
- Cuatro termómetros de vidrio
- Dos pirómetros
- Un higrómetro - termómetro digital
- Entre otros materiales como: metro, lupa, etc.



**Figura 26.** Instrumentos de medición utilizados

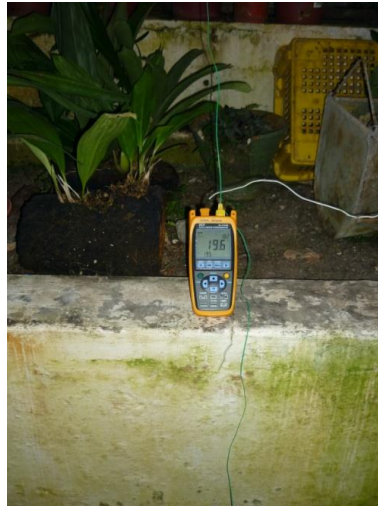
Para realizar el presente proyecto se realizó dos mediciones; las mismas que nos permitieron conocer el comportamiento del microclima del invernadero.

### **2.2.1.1. Primer Monitoreo**

La primera medición se la realizó por un periodo de ocho días, cuatro de estos días se efectuó un monitoreo con malla polisombra negra con un sombreado del 50 %; se tomó datos cada 10 minutos tanto de radiación como de temperatura, para ésta medición se utilizó el datalogger de temperatura y los dos piranómetros. El datalogger de temperatura fue colocado en el centro del invernadero como se muestra en la Figura 27, ubicando las termocuplas en tres puntos a alturas diferentes, la primera a 20 cm del piso que es la parte más baja donde podemos encontrar orquídeas, la segunda a 1 m del piso que es lugar donde podemos encontrar la mayoría de las macetas y la tercera 1,90 m del piso que es la parte más alta donde se puede encontrar orquídeas; estos puntos están dentro de la zona útil del invernadero.

Los dos piranómetros se colocaron en la cubierta, el primero se colocó donde la radiación llega directamente, el segundo se colocó en la parte donde se presenta la radiación difusa.

Los datos adquiridos en éste primer monitoreo no permitieron la obtención de un modelo adecuado que permita realizar el control de la temperatura interna, pero si se logró conocer el comportamiento del microclima del invernadero, los datos de este monitoreo se encuentran en el Anexo 3.



**Figura 27.** Datalogger de temperatura

### **2.2.1.2. Segunda Monitoreo**

El segunda monitoreo se lo realizó cada minuto para garantizar aun más la fiabilidad de los datos, ya que al variar considerablemente la radiación puede variar la temperatura en periodos cortos de tiempo, en éste segundo monitoreo se hará mayor énfasis ya que los datos del primer monitoreo no permitieron encontrar el controlador. Con éste monitoreo se pretende obtener datos mucho más confiables que permitan realizar el controlador de temperatura de mejor manera. Estos datos se encuentran en el Anexo 4.

#### **2.2.1.2.1. Medición de la Temperatura Interna y Externa**

La segunda medición se realizo de forma manual debido a que se utilizó termómetros de vidrio para tener una mayor veracidad de los datos, para medir la temperatura interna se utilizo tres termómetros los cuales fueron ubicados a 1,30 m del piso y en línea recta a lo largo del invernadero con una separación entre ellos de 2,53 m y con la misma medida con separación de la pared.

Con respecto a la medición de la temperatura externa el termómetro de vidrio fue ubicado en la parte frontal del invernadero cerca de la puerta de ingreso a una altura de 1,5 m se escogió esta altura, porque contribuye a la ventilación al ser esta altura la parte media de las puertas y ventanas.



El monitoreo se lo realizó cada minuto de 9H00 a 16H00 ya que durante este lapso de tiempo hay un mayor aporte de energía al invernadero por parte de la radiación, se obtuvo 421 mediciones por día, las mismas que nos permiten interpretar de mejor manera el comportamiento del invernadero. La temperatura interna como se menciono anteriormente fue medida en tres puntos, pero para obtener una sola se saco una media de las tres mediciones.

Para utilizar los termómetros de vidrio se tuvo en cuenta las siguientes consideraciones:

- ✓ Se debe colocar el termómetro en posición vertical para minimizar el efecto de separación de la columna de líquido dentro del termómetro por vibraciones o sacudidas.
- ✓ Debe evitarse exponer el termómetro a vibraciones o golpes.
- ✓ Para obtener una lectura más precisa de la temperatura en el termómetro, se debe evitarse en lo posible errores, para minimizar estos errores se debe utilizar un termómetro de alta precisión es decir que el rango o las divisiones sean lo más amplias posibles, cuando se realicen las lecturas se recomienda utilizar una lupas, telescopios, etc. para mejorar la visibilidad.
- ✓ Se debe colocar el termómetro en un lugar donde el bulbo del termómetro no esté en contacto con la radiación; ya que los invernaderos por su material transparente puede transmitir la radiación en forma directa. Se puede utilizar algún material que evite que el bulbo este en contacto directo con la radiación solar para evitar posibles interferencias en la lectura del termómetro, en nuestro caso utilizamos papel.

También se analizó el tiempo de respuesta de los termómetros, ésta información la proporcionan los fabricantes y esta variable se llama constante de tiempo. La constante de tiempo de un termómetro de líquido de vidrio depende de la longitud, del diámetro interno del tubo capilar y del volumen del bulbo. Los termómetros de mercurio de vidrio tienen una respuesta rápida por la incomprensibilidad del mercurio en comparación con los termómetros de gas.

En cambio, en los sensores de resistencia y los termopares la constante de tiempo depende únicamente del intercambio térmico entre el fluido y el sensor. Los valores de la constante de tiempo, varían para cada tipo de sensor y para diferentes condiciones de fluido, pero ésta constante o intervalo de tiempo tarda unas fracciones de minuto o algunas unidades de minuto (CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA 2008).

La razón por lo que no se utilizó el datalogger de temperatura utilizado en el primer monitoreo es porque el instrumento utiliza una termocupla tipo K y estas no son recomendables para medir temperatura ambiente, por lo tanto ésta presenta algunos inconvenientes en la medición debido a que:

- ✓ Al tratarse de equipos electrónicos estos están alimentados por energía eléctrica, y al estar mucho tiempo encendidos esto produce un calentamiento interno en el termómetro, produciendo así un error en la medida.
- ✓ Al tratarse de la temperatura interior de un invernadero el medio ambiente es muy corrosivo ya que existe mucha humedad afectando esta a los alambres del termopar.
- ✓ Las termocuplas son muy sensibles a la radiación, además cada tipo tiene ya establecido el rango de medición.

#### **2.2.1.2.2. Medición de la Radiación**

Para realizar la medición de ésta variable, se utilizó dos piranómetro al igual que en el primer monitoreo uno para la radiación directa que incide sobre la cubierta como se muestra en la Figura 28, y el otro para los lugares donde la radiación directa es interrumpida por los arboles es decir donde hay sombra, al igual que la temperatura se realizo el monitoreo de 9H00 a 16H00, la unidad de media con la que realizamos el monitoreo es el  $W/m^2$ . Para realizar la medición de radiación solar se debe tener en cuenta algunos parámetros para garantizar la fiabilidad de los datos, el principal parámetro a tener en cuenta es la posición del sensor, el cual debe estar dirigido siempre hacia la posición del sol y se debe evitar tener alguna interferencia, es decir que la radiación no esté en contacto directo con el sensor.





**Figura 28.** Medición de radiación

### **2.2.1.2.3. Medición De La Humedad Relativa**

La adquisición de los datos de humedad relativa se la realizó con un higrómetro el mismo que fue instalado en el centro del invernadero a una altura de 1,20 m y se obtuvo datos cada cinco minutos. Para obtener una correcta medición de humedad el instrumento debe ser ubicado en un lugar donde los sensores no tenga contacto con ningún material esto podría evitar la recirculación del aire; tampoco debe estar cerca del suelo, plantas o nebulizadores ya que en estos lugares es mayor la humedad.

## **2.3. Modelado y Diseño de Controlador**

Para realizar el diseño del control para el invernadero se utilizó un modelo; un modelo es una representación simplificada de un sistema o de una parte del mismo que viene dada por una serie de ecuaciones matemáticas.

En un invernadero se pueden distinguir dos grupos de modelos: físicos, que se centran en el microclima del invernadero en función del clima exterior, y los fisiológicos, que se centran en la planta y en su relación con el microclima del invernadero.

Los modelos de simulación pueden ser de cualquier tipo, desde el más simple al más complejo, y son de gran utilidad si están bien concebidos y validados para simular diversas situaciones reales con bajo costo. La utilización de modelos en el diseño y manejo de sistemas de control ha sido muy amplia y positiva.

Un aspecto muy importante es la elección del algoritmo de control adecuado, además es necesario ajustar la estrategia de control a las condiciones locales, para alcanzar un manejo óptimo del invernadero incrementando así la eficiencia del mismo.

En el presente proyecto se va a realizarlo un modelo físico es decir basado solo en los factores climáticos como son el microclima interno y la influencia de los factores externos.

Este modelo está basado en un algoritmo de control de la temperatura adaptado a las necesidades locales y a las condiciones climáticas.

### **2.3.1. Modelo matemático**

#### **2.3.1.1. Procedimiento**

Para encontrar el mejor modelo para el sistema se utilizó el modelado matemático por caja negra el cual consiste en que la variable de entrada es procesada en la caja, y a la salida de la misma proporciona la función de transferencia del sistema, sin preocuparnos por lo que sucede dentro de la caja, es decir la forma en la que operan los mecanismos y procesos internos del sistema. Este método permite identificar claramente las entradas y salidas para estudiar la relación que existen entre ellas, permitiendo así maximizar la eficiencia de los sistemas sin tener que introducirnos en los procesos complejos que se encuentran dentro.

*A continuación se describe el procedimiento que se realizó para encontrar el mejor modelo para nuestro sistema:*

Los datos del segundo monitoreo se empleó para realizar el modelo, se tomó en cuenta las 421 mediciones de radiación directa ya que ésta es la que aporta con la energía al invernadero en forma directa la cual será la variable de entrada, y la temperatura interna que depende de los factores climáticos externos es decir tiene un intercambio de energía con su medio es la variable de salida. Para éste modelo se necesitó un conjunto de datos para la identificación del sistema y otro para la validación estos datos fueron organizados en excel para posteriormente importarlas al Workspace de Matlab; a través del icono Import Data como se muestra en la Figura 29.

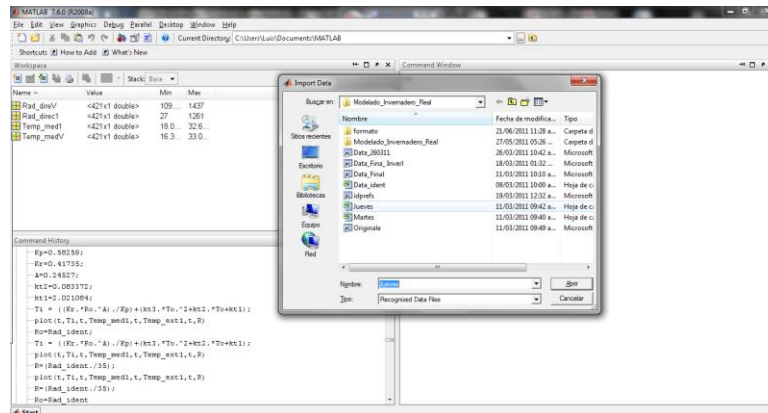


Figura 29. Ventana principal del Matlab, importación de datos desde excel

Los datos fueron importados al Matlab en forma de vector, los mismos que nos permiten trabajar en el programa sin ningún inconveniente, el workspace cuenta con un asistente para importar datos, para convertir los datos en vector seleccionamos la segunda opción, que nos permite crear vectores separados de los datos ingresados como se puede observar en la Figura 30.

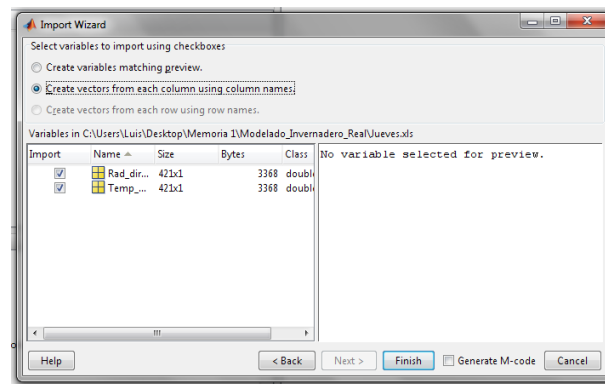


Figura 30. Obtener los datos en forma de vector

Se exporto cuatro datas, dos de radiación y dos de temperatura ya que una data de radiación y una de temperatura servirán para la identificación del sistema y las otras dos para validación. También se creó un vector tiempo el cual debe contar el mismo número de datos que los vectores de radiación y temperatura; éste vector representara el lapso de tiempo que se estimo para el modelo que es de siete horas, pero éste intervalo de tiempo debe estar representado en segundos por lo cual el vector empezara en los 0 segundos y

terminara el los 25 200 segundos, con un intervalo entre cada dato de 60 segundos, ya que el monitoreo se realizo cada minuto.

Posteriormente se utilizó la herramienta Parameter Estimation para el pre-procesamiento de las datas. Para ingresar podemos utilizar el ejemplo “spe\_engine\_throttle1” después de esto vamos a la pestaña Tools para ingresar como se puede ver en la Figura 31.

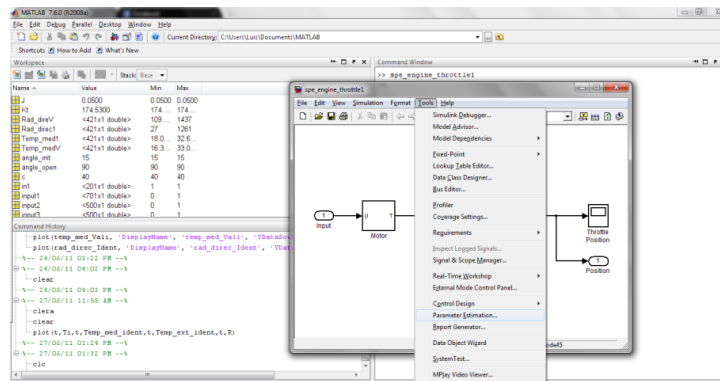


Figura 31. Ingreso al Control and Estimation Tools Manager

La ventana Control and Estimation Tools Manager permite crear un nuevo proyecto, este archivo contendrá las datas originales y procesadas. Para lo cual se importa los vectores desde el Workspace de radiación, temperatura y tiempo. En el icono Input Data se importa la variable de entrada que en éste caso es la radiación y el vector tiempo; y en el icono Output Data se importa la variable de salida que en éste caso es la temperatura interna y el vector tiempo como se muestra en la Figura 32.

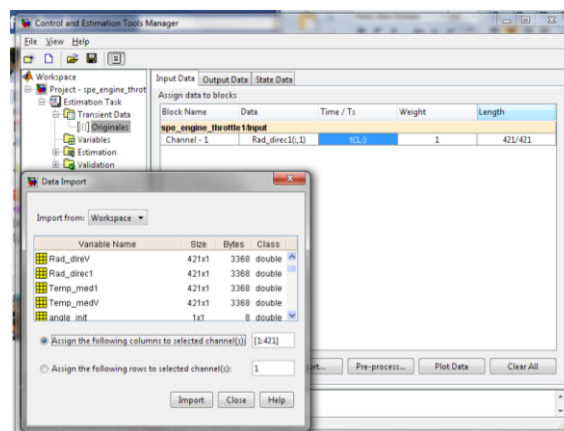
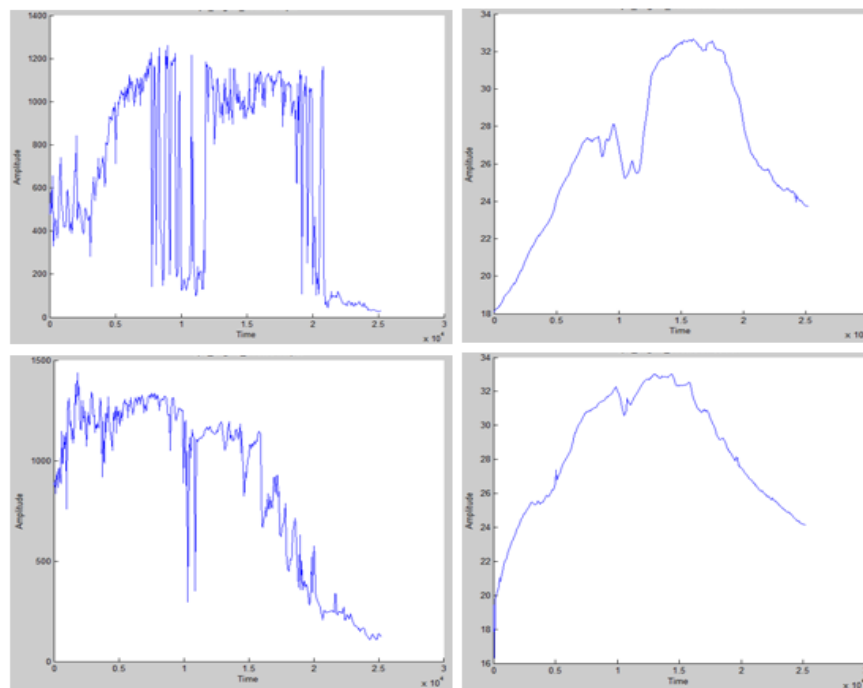


Figura 32. Importación de los vectores de radiación y temperatura desde el Workspace

El pre-procesamiento se efectuó tanto a los datos de identificación como a los de validación como ya menciono anteriormente tomando como entrada la radiación solar y como salida la temperatura interna. En la Figura 33 se puede observar las graficas de las variables climáticas del modelo sin procesar; la grafica que se ve a la izquierda de la parte superior es la data de la radiación solar de identificación, mientras que la grafica de la derecha representa a la temperatura interna de identificación; así mismo la grafica de la derecha de la parte inferior es la data de radiación solar de validación mientras que la grafica de la izquierda representa a la temperatura interna de validación del invernadero.



**Figura 33.** Graficas de las variables externas sin procesar.

### **2.3.1.2. Estimación de Parámetros y Pre-procesamiento.**

El pre-procesamiento permite eliminar gráficamente los datos que presentaban muchas variaciones y estos en la obtención del modelo presentan errores, en los dos vectores se recortó las mediciones que no seguían una tendencia, luego se interpolaron los datos eliminados con las dos opciones que contiene el programa como son Linear y Zoh los cuales se pueden observar en la Figura 34. En el proyecto se utilizó los dos métodos de interpolación por esta razón a continuación se hará una breve explicación de estos métodos:

### Interpolación Lineal

La interpolación lineal es un caso particular de la Interpolación general de Newton. Con el polinomio de interpolación de Newton se logra aproximar un valor de la función  $f(x)$  en un valor desconocido de  $x$ . El caso particular, para que una interpolación sea lineal es en el que se utiliza un polinomio de interpolación de grado 1, y se denota de la siguiente manera:

$$f(x|x_1; x_2) = f(x_1) + \frac{f(x_2) - f(x_1)}{(x_2 - x_1)}(x - x_1)$$

### Interpolación Zoh

La interpolación Zoh es un modelo matemático para la reconstrucción de una señal. Es decir, se describe el efecto de convertir una señal discreta en el tiempo a una señal de tiempo continuo mediante la celebración de cada valor de muestra para un intervalo de la muestra.

Un mantenedor de orden cero reconstruye la forma de onda siguiente en tiempo continuo a partir de una secuencia de muestras  $x[n]$ , asumiendo una muestra por el tiempo intervalo  $T$ :

$$x_{ZOH}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] * \text{rect}\left(\frac{t - T/2 - nT}{T}\right)$$

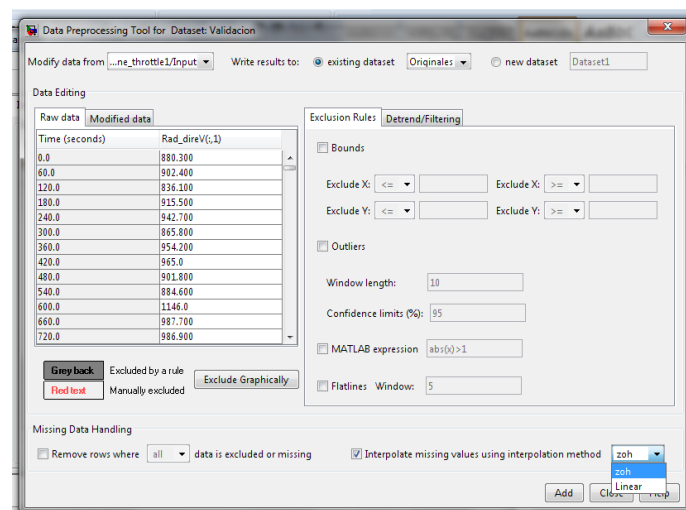
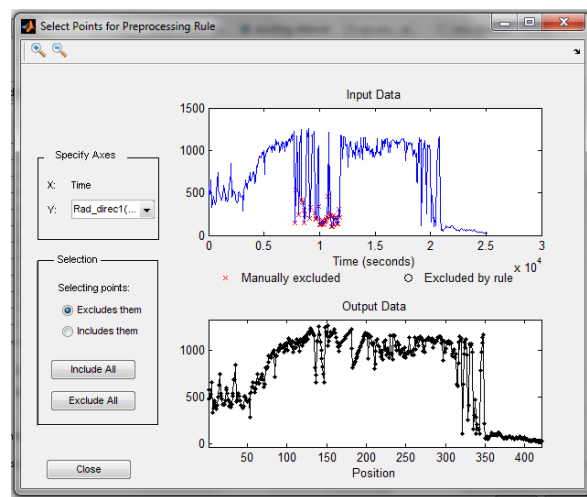


Figura 34. Interpolación con los métodos Zoh y Linear

La interpolación de datos es decir la eliminación de valores que no sigan la tendencia marcada de la curva se hizo directamente en la grafica como se ve en la Figura 35. Se comenzó interpolando los datos que pueden producir un mayor error, estos valores en el grafico están de color rojo y como se puede ver es una zona donde hay una mayor variación es decir no sigue la tendencia de la curva, la interpolación de estos valores se hizo atreves de los dos métodos ya antes mencionados tanto para las datas de identificación como para las de validación.



**Figura 35.** Eliminación de valores que no sigan la tendencia

Al momento de tener las datas ya procesadas, las cuales deben tener ya una tendencia marcada se procedía a exportarlas de nuevo al workspace para poder trabajar directamente en la ventana principal del programa.

En la Figura 36 se podrá observar las curvas de radiación y temperatura tanto de identificación como las de validación ya procesadas las cuales están ubicadas de la siguiente manera: la grafica superior izquierda es la curva de radiación solar de identificación, mientras que la grafica de la derecha parte superior es la curva de la temperatura interna de identificación; mientras que las graficas de la parte inferior son las datas de validación, la grafica izquierda representa la data de radiación solar mientras que la derecha representa la temperatura interna.

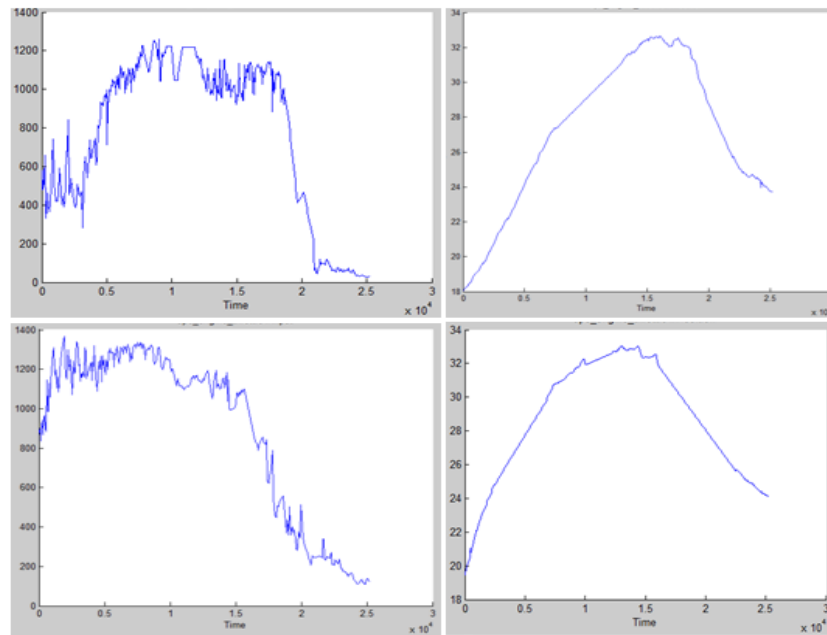


Figura 36. Datos procesadas de radiación y de temperatura

Para linealizar el sistema procedemos a importar las datas ya procesadas tanto de identificación como de validación al System Identification Tool para lo cual lo abrimos escribimos el comando "ident" en el comand window, las datas serán importaremos en dominio del tiempo. Para la importación de las datas de identificación se importara a la radiación como entrada y a la temperatura como salida como se muestra en la Figura 37, para la importación de las datas de validación se realizará el mismo procedimiento.

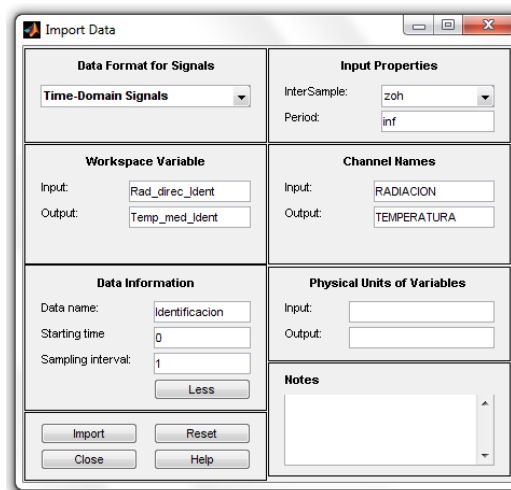


Figura 37. Importación de datos al Ident



Con las datas ya importadas en el System Identification Tool, estas pueden ser observadas tanto la temperatura en función del tiempo, como la radiación en función del tiempo, como se puede observar en la Figura 38, los datos de identificación están representados por el color azul y los de validación por el color verde.

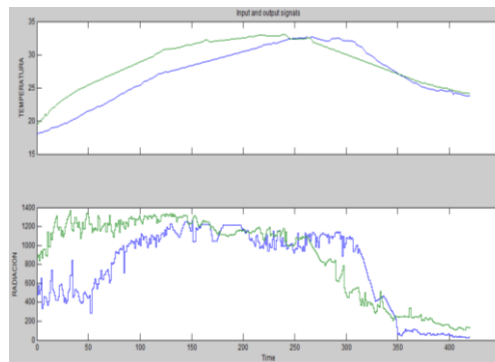


Figura 38. Grafica de identificación y de validación

Para linealizar el modelo del sistema ingresa a Linear Parametric Models donde se puede buscar la mejor opción entre las diferentes estructuras con las que cuenta el programa como se muestra en la Figura 39.

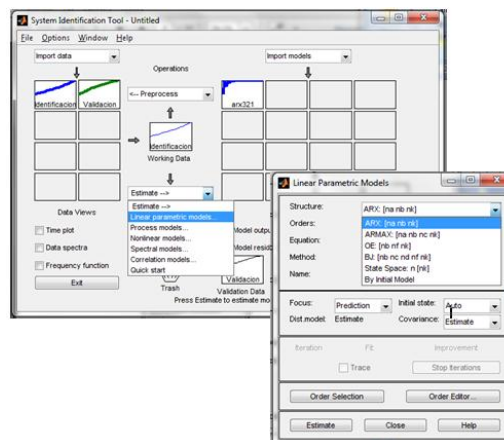
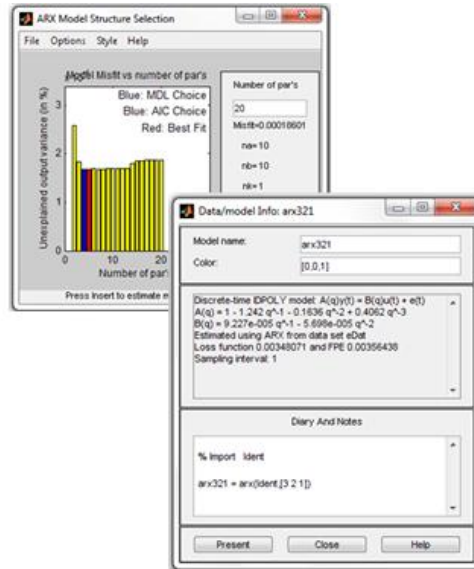


Figura 39. Ingreso a la estimación de parámetros

Primeramente se define la estructura con la que se desea linealizar el modelo, para éste caso se comenzó a comprobar el sistema con la estructura ARX la cual es la primera opción que presenta el programa, el programa también cuenta con una opción que permite buscar la mejor alternativa entre los diferentes coeficientes con los que cuenta la estructura, pero esta no es siempre la mejor alternativa para el modelo que estamos buscando por lo que

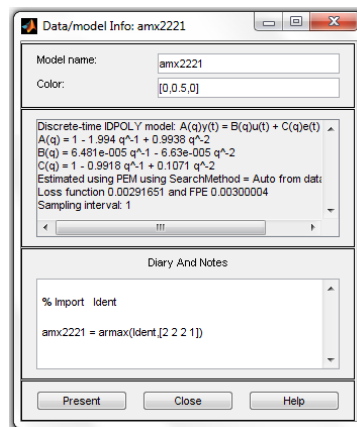
tenemos que buscar el coeficiente más apropiado para el modelo. Como resultado el Best Fit para esta estructura es un ARX  $n_a = 3; n_b = 2; n_k = 1$  como se muestra en la Figura 40.



**Figura40.** Estructura ARX321

La estructura ARX con un coeficiente 321 tiene las siguientes características: una función de pérdida de 0.00348071, un factor de error de 0.00356438; pero su coeficiente de reproducibilidad del sistema es del 26.01%.

Con una estructura ARMAX con los coeficientes  $n_a=2; n_b=2; n_c=2; n_k=1$ ; el coeficiente de reproducibilidad alcanza el 69.95%, con una función de pérdida de 0.00291651 y un factor de error de 0.00300004 como se muestra en la Figura 41.



**Figura 41.** Estructura ARMAX2221

La estructura de linealización OE con coeficientes  $n_b=2$ ;  $n_f=2$ ;  $n_k=1$ ; tiene un coeficiente de reproducibilidad del 80.08%, con una función de pérdida de 0.513476 y un factor de error de 0.52328 como se puede apreciar en la Figura 42.

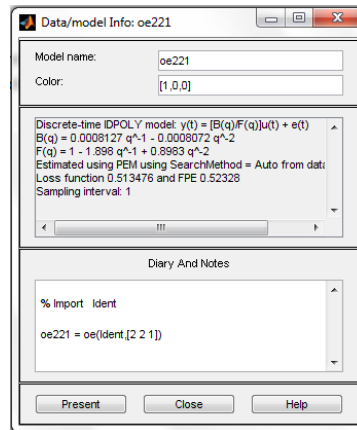


Figura 42. Estructura OE221

Las mejores opciones para el sistema se presentaron con la estructura BJ, con el coeficientes  $n_b=2$ ;  $n_c=2$ ;  $n_d=2$ ;  $n_f=2$ ;  $n_k=1$ ; se obtuvo las siguientes características: coeficiente de reproducibilidad del 80.08%, función de pérdida de 0.00493386 y un factor de error de 0.005125. La mejor opción para el sistema la presento la estructura BJ22221 porque ésta nos permite obtener una ecuación de segundo grado. Teniendo una función de transferencia de segundo orden ésta permite tener un mejor control del sistema como se mencionará más adelante; además el coeficiente de reproducibilidad y el análisis de residuos están dentro de los límites permitidos como se puede ver en la Figura 43.

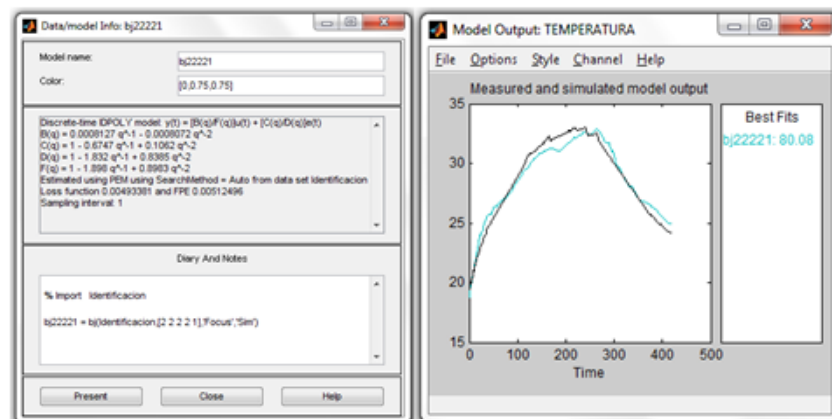


Figura 43. Estructura BJ22221



Ya habiendo encontrado la mejor opción para el modelo, la cual describe de una forma adecuada el comportamiento del sistema real, se procedió a exportar el coeficiente de la estructura al Command Window obteniendo el siguiente polinomio:

Discrete-time IDPOLY model:  $y(t) = [B(q)/F(q)]u(t) + [C(q)/D(q)]e(t)$

$B(q) = 0.0008127 (+-0.0002526) q^{-1} - 0.0008072 (+-0.0002502) q^{-2}$

$C(q) = 1 - 0.6747 (+-0.06011) q^{-1} + 0.1062 (+-0.05199) q^{-2}$

$D(q) = 1 - 1.832 (+-0.0371) q^{-1} + 0.8385 (+-0.03666) q^{-2}$

$F(q) = 1 - 1.898 (+-0.03617) q^{-1} + 0.8983 (+-0.03611) q^{-2}$

Estimated using PEM using SearchMethod = Auto from data set Identificacion

Loss function 0.00493381 and FPE 0.00512496

Sampling interval: 1

Como se puede observa el polinomio anterior es de segundo orden el mismo que va a ser sometido a algunas pruebas.

A la función de transferencia del sistema se la encontró en el Command Window de Matlab, ejecutó el siguiente procedimiento:

- ✓ Primeramente se creó un vector que contenga primero la variable salida y luego la variable de entrada, en éste caso el vector se llama final primero ingresamos la variable de salida es decir la temperatura interna y luego la variable de entrada es decir la radiación solar. Luego se almacenó la estructura en el Workspace, para finalmente presentarlo; el resultado será el mismo que se obtuvo cuando se presentó anteriormente en el Command Window con la diferencia que ya se encuentra en el Workspace y se puede trabajar sin ningún problema. Los comandos utilizados se los presenta a continuación:
  - `final = [Temp_med_Ident Rad_direc_Ident];`
  - `th = bj(final,[2 2 2 2 1],'Focus','Sim');`
  - `present (th)`



- ✓ A continuación se procedió al muestreo de th con el comando sett, con un intervalo de 60 segundos ya que cada muestras fue tomada cada minuto y así mismo se presentó al igual que el paso anterior. En éste paso no se presentan mayores cambios, los comandos que se utilizaron son los siguientes:
  - th = sett(th,60);
  - present (th)
- ✓ Luego de esto se encontró la función de transferencia para lo cual thc grabará la función de transferencia de discreta a continua, para lo cual se utilizó los siguientes comandos:
  - thc = thd2thc(th);
  - [numc,denc] = th2tf(thc);
  - printsys(numc,denc,'s');

La siguiente ecuación representa la función de transferencia que determina el comportamiento dinámico del invernadero:

$$\frac{1.436e-005s+1.6203e-009}{s^2+0.001788s+2.8744e-008} \quad \text{Ecuación (2.1)}$$

Antes de proceder al control, es necesario conocer la estabilidad del sistema, así como también si el sistema es de observabilidad y controlabilidad completa.

#### 2.3.1.2.1. Estabilidad del Sistema

Para saber si el sistema es estable se utilizo los siguientes comandos:

- num = [1.424e-005 1.62e-009];
- den = [1 0.001788 2.874e-008];
- roots(den)
- rlocus(num,den)

Como resultado se obtuvo  $x = -0.0018$ ,  $y = -0.0000$ ; por lo tanto se concluyó que el sistema es de tipo estable, pues los polos de la función de transferencia se encuentran en el semiplano negativo, como se muestra en la Figura 44.

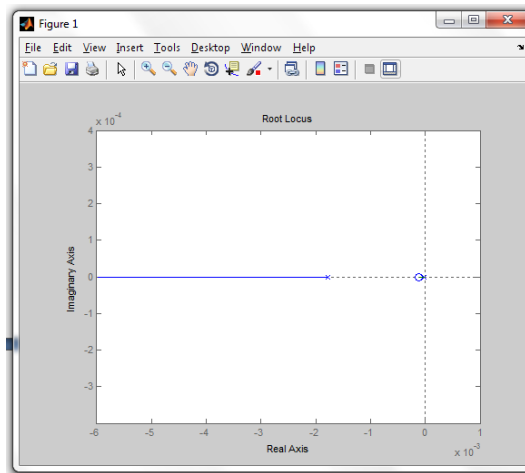


Figura 44. Raíces de la función de transferencia G.

### 2.3.1.2.2. Observabilidad y Controlabilidad

Para proceder a realizar el análisis de observabilidad y controlabilidad del sistema procedemos a obtener la representación matricial de la función de transferencia en Matlab, para lo cual se utilizó los siguientes comandos.

- num=[1.424e-005 1.62e-009];
- den=[1 0.001788 2.874e-008];
- [A,B,C,D]=tf2ss(num,den)

Obteniendo como resultado las siguientes matrices:

$$A = \begin{bmatrix} -0.0018 & -0.0000 \\ 1.0000 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = 1.0e - 004 * [0.1424 \quad 0.0000]$$

$$D = [0]$$

#### 2.3.1.2.2.1. Observabilidad

Para saber si el sistema es de observabilidad completa, se calcula la matriz de observabilidad del sistema para lo cual se utilizó los siguientes comandos:



- $M = \text{obsv} ( A, C )$

$$M = 1.0e - 004 * \begin{bmatrix} 0.1424 & 0.0000 \\ -0.0002 & -0.0000 \end{bmatrix}$$

- $\text{rank} (M)$

$$\text{ans} = 2$$

Como el rango de la matriz de observabilidad es igual al orden de la función de transferencia del sistema, entonces podemos concluir que el sistema es de observabilidad completa.

#### 2.3.1.2.2.2. Controlabilidad

Para conocer si el sistema es de controlabilidad completa, tenemos que calcular la matriz de controlabilidad, para lo cual se valió de los siguientes comandos:

- $Q = \text{ctrb} ( A, B )$

$$Q = \begin{bmatrix} 1.0000 & -0.0018 \\ 0 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

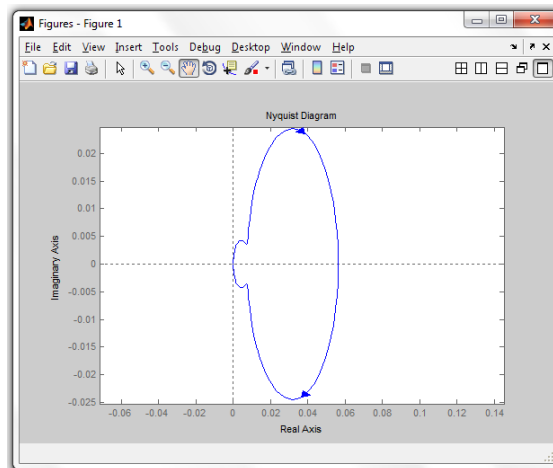
- $\text{rank} (Q)$

$$\text{ans} = 2$$

Con éste resultado se puede concluir que el sistema es de controlabilidad completa ya que el rango de la matriz de controlabilidad es igual al orden de la función de transferencia del sistema.

#### 2.3.1.2.3. Diagrama de Nyquist del Sistema.

Se puede determinar la estabilidad del sistema también de acuerdo al criterio de Nyquist.; de acuerdo a este criterio se puede decir que el sistema es de tipo estable, ya que la gráfica rodea al cero sin atravesarlo, como se aprecia en la Figura 45.



**Figura 45.** Diagrama de Nyquist del sistema.

También se puede determinar cómo se comporta el sistema a un lazo cerrado con una ganancia como se muestra a continuación:

#### 2.3.1.2.4. Sistema de Control con Retroalimentación Negativa.

La característica principal de los sistemas de control automático es el lazo de retroalimentación que se le da a la función de transferencia de la planta, para realizar este proceso se utilizó los comandos que se muestran a continuación:

- $G=tf(numc,denc);$
- $M=feedback(G,1,-1)$

Teniendo como resultado la función de transferencia del sistema:

$$\frac{1.424e-005s+1.62e-009}{s^2+0.001788s+2.874e-008} \quad \text{Ecuación (2.2)}$$

También se comprobó cómo se comporta el sistema a un lazo cerrado con una ganancia uno como se ve en la Figura 46.

*Respuesta del Sistema con una Entrada Tipo Escalón Unitario.*

La señal de entrada más utilizada para validar y calcular un controlador en los sistemas de control es la entrada escalón unitario. La Figura 46 muestra la respuesta del sistema con una



ganancia uno, en la cual podemos observar que tiene un valor de estabilización bastante bajo, por lo tanto es necesario realizar el cálculo del controlador para mejorar la repuesta del sistema. El comando que se utilizo para tener la respuesta del sistema fue:

- `ltiview(M)`

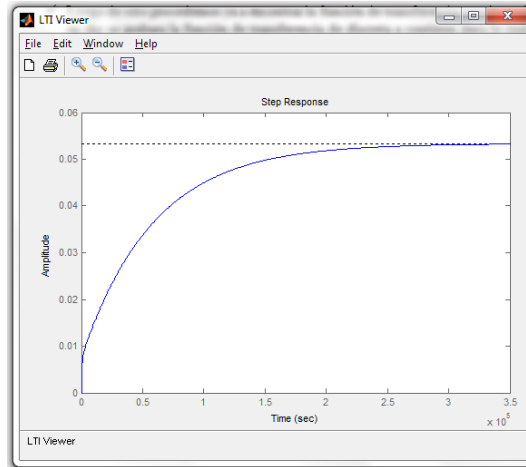


Figura 46. Respuesta del sistema a una entrada escalón unitario.

### 2.3.2. Controlador del Sistema

Para proceder a realizar el cálculo del controlador en SISOTOOL es importante tener en cuenta las características de cada uno de los diferentes controladores, como son P, I, D y de la combinación de los mismos.

#### *Acción del Controlador Proporcional.*

El controlador proporcional es esencialmente un controlador anticipativo, así mismo, éste tendrá efecto sobre el error en estado estable, pero sólo si el error varía con respecto al tiempo.

La parte proporcional no considera el tiempo, por tanto la mejor manera de solucionar el error permanente es hacer que el sistema contenga alguna componente que tenga en cuenta la variación con respecto al tiempo incluyendo y configurando las acciones integral y derivativa.

### *Acción del Controlador Integral.*

El modo de control integral tiene como propósito disminuir y eliminar el error en estado estacionario provocado por el modo proporcional.

El error es integrado, lo cual tiene la función de promediarlo o sumarlo por un periodo de tiempo determinado, luego es multiplicado por una constante  $I$ ;  $I$  representa la constante de integración. Posteriormente, la respuesta integral es adicionada al modo proporcional para formar el control Proporcional Integral con el propósito de obtener una respuesta estable del sistema sin error estacionario, debido a que al incorporar un polo en lazo abierto en el origen, se desplaza el lugar geométrico de las raíces del sistema hacia el semiplano derecho de  $s$ . Por esta razón, en la práctica la acción integral suele acompañarse por otras acciones de control.

### *Acción del Control Derivativo.*

La acción derivativa se manifiesta cuando hay un cambio en el valor absoluto del error; (si el error es constante, solamente actúan los modos proporcional e integral). El error es la desviación existente entre el punto de medida y el valor de consigna, o "set point".

La función de la acción derivativa, es mantener el error al mínimo corrigiéndolo proporcionalmente con la velocidad misma que se produce, de esta manera evita que el error se incremente.

Se deriva con respecto al tiempo y se multiplica por una constante  $D$  y luego se suma a las señales anteriores (P+I). Es importante gobernar la respuesta de control a los cambios en el sistema, ya que una mayor acción derivativa corresponde a un cambio más rápido y el controlador puede responder adecuadamente.

#### **2.3.2.1. Cálculo del Controlador Mediante Sisotool.**

Para obtener el controlador del sistema se realizó el cálculo con cada una de las acciones de control teniendo los siguientes resultados.

### 2.3.2.1.1. Cálculo con un Controlador Proporcional (P)

Primeramente se realizó un análisis solo incrementándole la ganancia el resultado más óptimo lo encontramos con una ganancia 10000 como se muestra en la Figura 47.

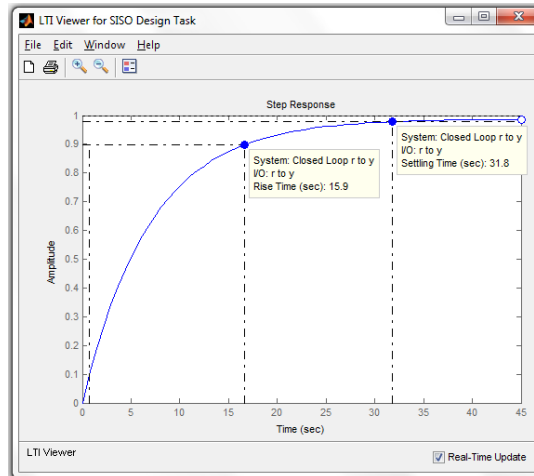


Figura 47. Respuesta del sistema con un controlador Proporcional.

### 2.3.2.1.2. Cálculo con un Controlador Proporcional Derivativo (PD)

Así mismo se ejecutó el análisis con una acción de control PD la cual con una ganancia de 10000 se ve que el sistema se estabiliza en 18,3 segundos pero como la ganancia es muy alta no es recomendable su utilización. La respuesta del controlador se puede observar en la Figura 48.

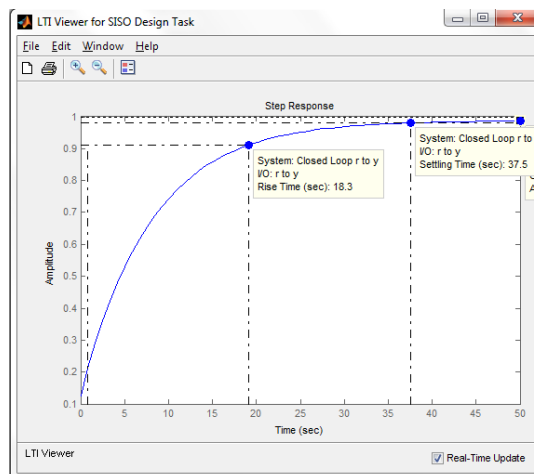


Figura 48. Respuesta del sistema con un controlador PD

### 2.3.2.1.3. Cálculo con un Controlador Proporcional Integral (PI)

Luego procedimos a efectuar el análisis con un controlador proporcional integral, para lo cual se procedió a dar una ganancia de 1000 y sin variar los demás parámetros teniendo el resultado lo que se muestra en la Figura 49.

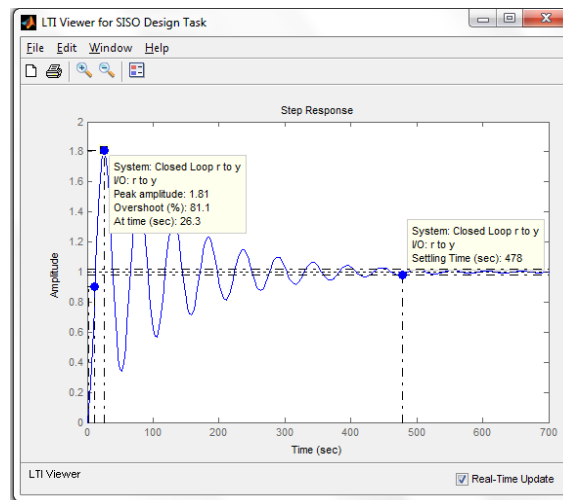


Figura 49. Respuesta del sistema con un controlador PI

También se realizó un análisis disminuyendo la ganancia a 100 y variando los demás parámetros teniendo un mejor resultado como se puede observar en la Figura 50.

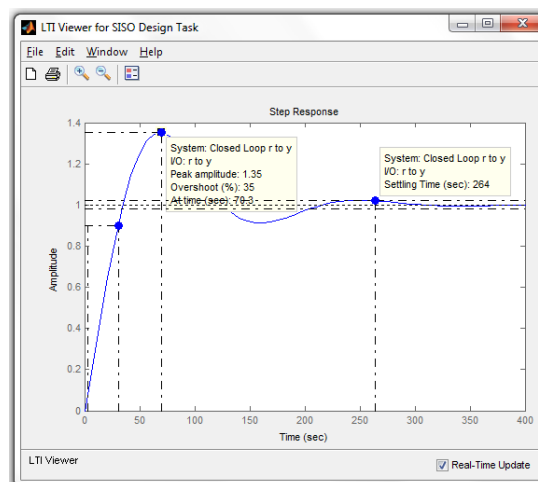


Figura 50. Respuesta del sistema con un controlador PI con Variación de los Parámetros

El mejor resultado que se presentó para el sistema es con una acción de control PID por esta razón haremos mayor énfasis en éste sistema de control.

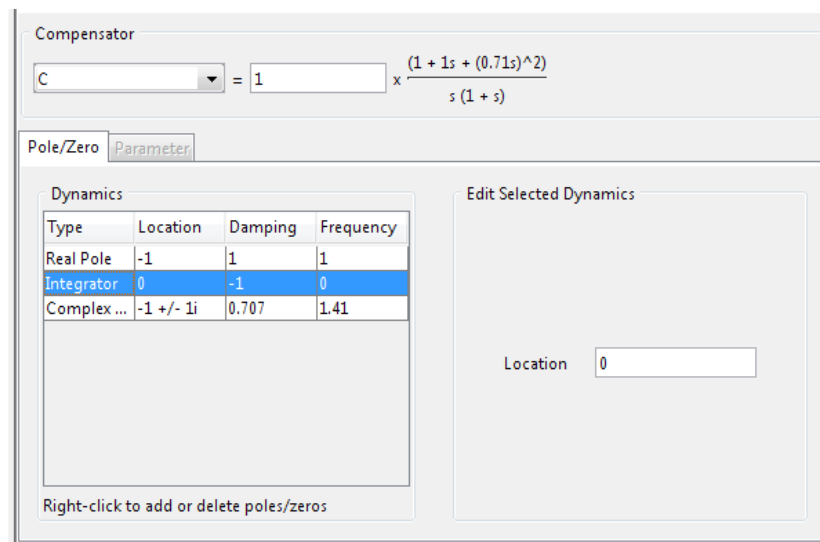
#### 2.3.2.1.4. Función de Transferencia de un Controlador PID.

La función de transferencia del controlador PID que se utilizó en el presente proyecto es:

$$C(s) = \frac{As^2 + Bs + C}{s(s+D)} \quad \text{Ecuación (2.3)}$$

Para esta función de transferencia se obtendrán los parámetros A, B, C y D a través del SISOTOOL, analizando siempre la mejor respuesta del sistema, para posteriormente calcular el controlador analógico.

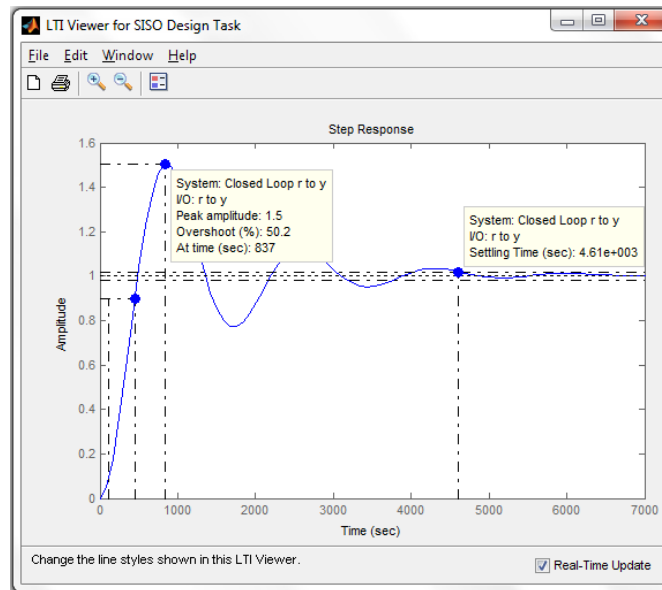
Para lograr obtener la función de transferencia del controlador PID en el SISOTOOL, se debe añadir un polo real, un integrador y un cero complejo, como se puede observar en la Figura 51.



**Figura 51.** Función de transferencia de un controlador PID sin optimización de parámetros.

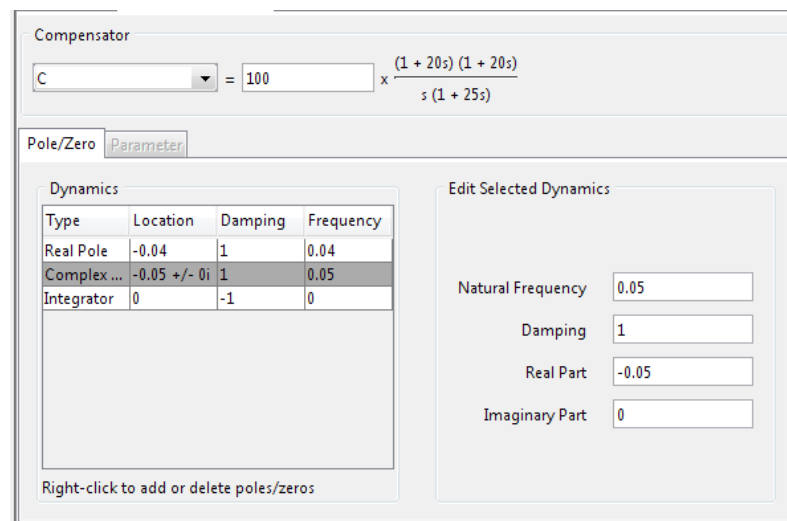
Con la función de transferencia del controlador PID que se puede apreciar en la Figura 56, la respuesta del sistema ha mejorado mucho, pero todavía presentan algunos inconvenientes como son:

- ✓ El tiempo de estabilización es de 4610 segundos (que equivalen a 76 .83 minutos), es decir, el sistema es demasiado lento.
- ✓ También presenta un sobre impulso del 50.2%, el cual es necesario disminuir.



**Figura 52.** Respuesta del sistema con un controlador PID

Para lograr optimizar estos parámetros se utilizó el método del lugar geométrico de las raíces para la función de transferencia del controlador, hasta lograr obtener el mejor comportamiento del sistema; los cambios efectuados se muestra en la Figura 53.



**Figura 53.** Función de transferencia de un controlador PID con optimización de parámetros.

Al variar los valores de los parámetros del controlador, se logró que el sistema se estabilice en 286 segundos (es decir 4.77 minutos), que en control de microclimas para invernaderos es un tiempo aceptable, con un sobreimpulso del 41.6%, como se puede apreciar en la Figura 54.

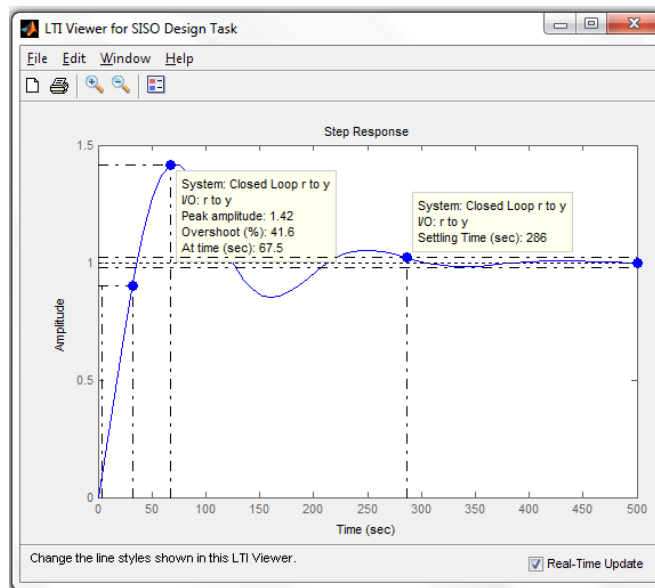


Figura 54. Respuesta del sistema con un controlador PID optimizado

La Figura 55 muestra la ubicación de los polos y ceros tanto de la función de transferencia, como del controlador de la planta.

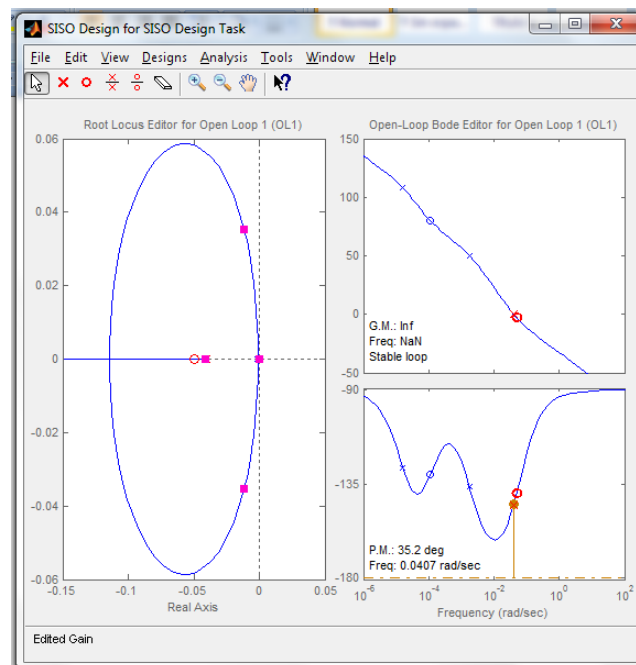


Figura 55. Ubicación de los polos y ceros del controlador y de la planta.

Para comprobar el controlador obtenido en el Sisotool, se procedió a la simulación del sistema en el Simulink de Matlab.

### 2.3.2.2. Simulación del Sistema de Control Retroalimentado.

Para realizar la simulación del sistema se procedió a efectuarlo en el Simulink de Matlab, para el proyecto se obtuvo un sistema de lazo cerrado como se muestra en la Figura 56, cada componente del diagrama de bloques representa lo siguiente:

- ❖ El bloque C corresponde a la función de transferencia del compensador, cargado con la función de transferencia obtenida en el SISOTOOL.
- ❖ El bloque G corresponde a la función de transferencia de la planta (invernadero).
- ❖ El bloque H es el bloque de retroalimentación negativa cuyo valor no se ha modificado, por lo tanto este valor es de 1.
- ❖ El bloque F es un pre filtro que se utilizan en algunas aplicaciones, en este caso no se ha modificado su valor, por lo tanto su valor es 1.
- ❖ La entrada es un señal tipo escalón unitario de acuerdo al siguiente diagrama de bloques.

#### 2.3.2.2.1. Simulación con un Escalón Unitario

Primeramente se realizo la simulación con un solo escalón para darnos cuenta el tiempo que tarda en estabilizarse el sistema

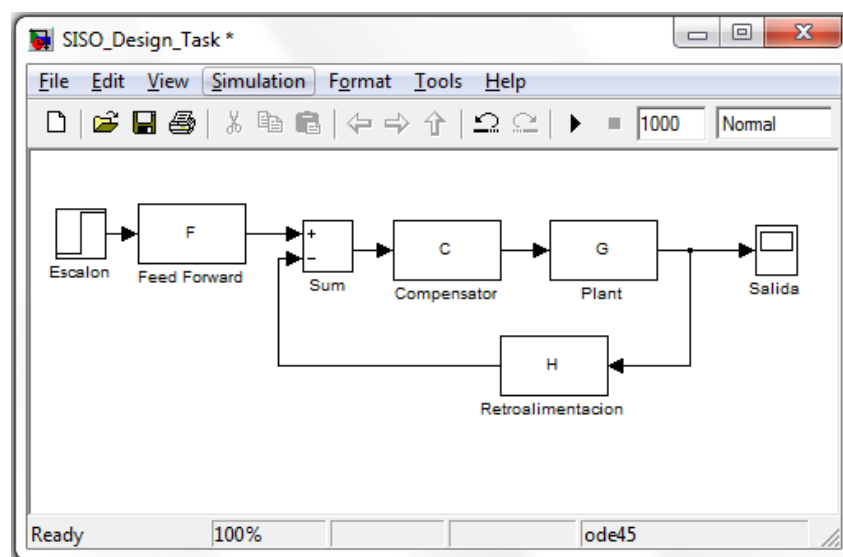


Figura 56. Diagrama de bloques del sistema con escalón unitario.



El resultado de esta simulación se muestra en la Figura 57, donde se puede apreciar que el resultado es el igual al obtenido en el SISOTOOL, esto representa que el sistema es adecuado.

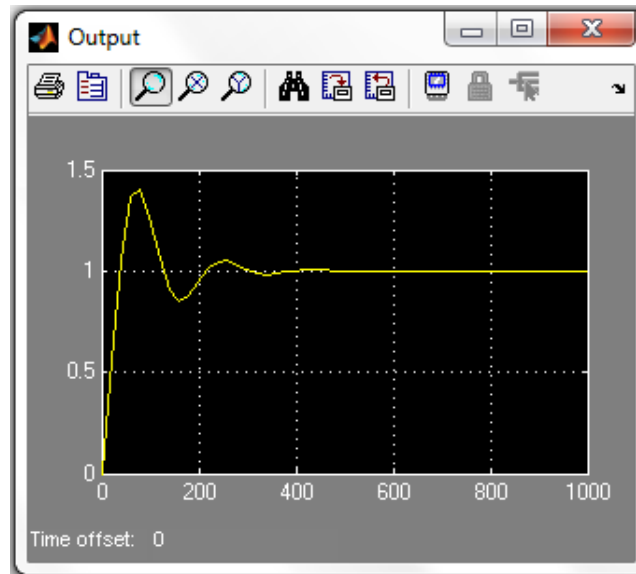


Figura 57. Respuesta del sistema obtenida en Simulink.

### 2.3.2.2.2. Simulación con un Tren de Pulsos

También se realizó una simulación con un tren de pulsos para analizar cómo se comporta el sistema a lo largo del tiempo, al diagrama de bloques de la Figura 58 solo se cambia la señal de entrada, en este caso se coloca un generador de pulsos.

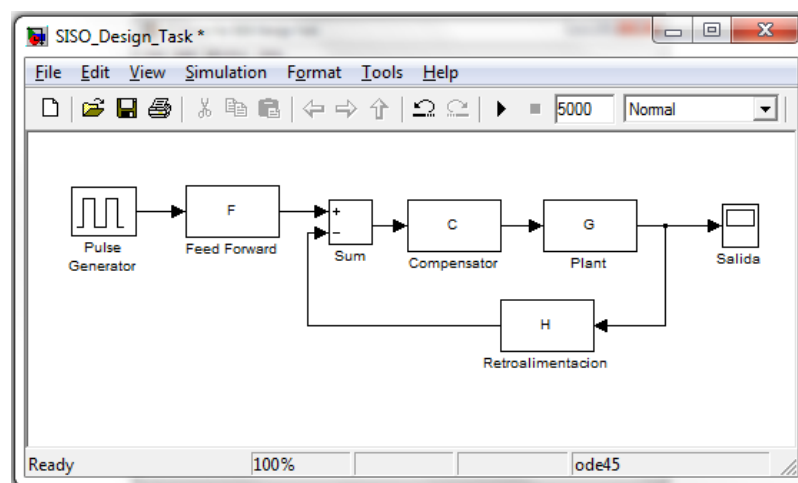


Figura 58. Diagrama de bloques del sistema con un tren de pulsos.

El resultado de la simulación se muestra en la Figura 59 como podemos observar cuando el sistema sufre alguna modificación, esta varía hasta estabilizarse de nuevo y así estará a lo largo del tiempo cuando algún parámetro de temperatura sufra algún cambio.

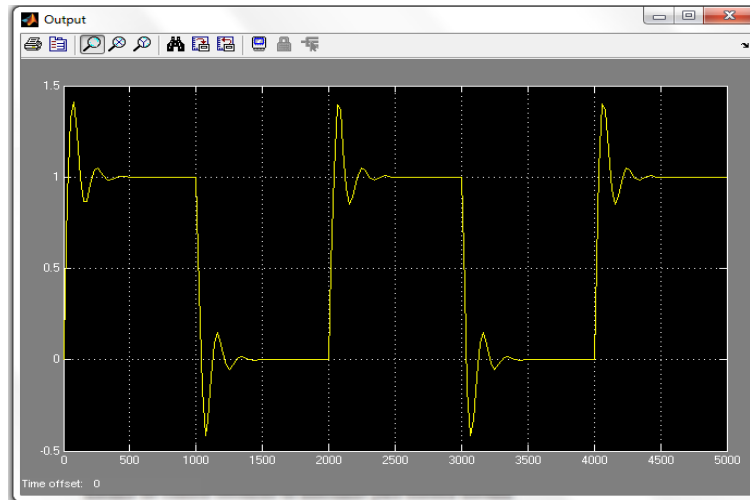


Figura 59. Respuesta del sistema obtenida con un tren de pulsos

### 2.3.2.3. Cálculos del Controlador Analógico

#### 2.3.2.3.1. Parte Proporcional (P)

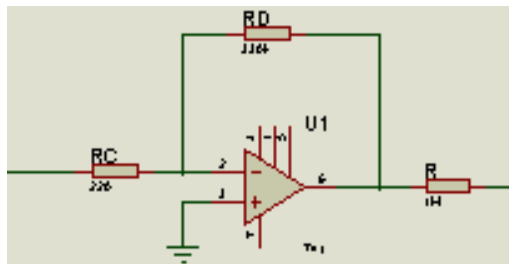


Figura 60. Parte proporcional

$$\frac{V_i - 0}{R_c} = \frac{0 - V_{o1}}{R_d} \quad \text{Ecuación (2.4)}$$

$$\frac{V_i}{R_c} = \frac{-V_{o1}}{R_d}$$

$$\frac{V_{o1}}{V_i} = -\frac{R_d}{R_c}$$

$$V_{o1}(s) = -\frac{R_d V_i(s)}{R_c} \quad \text{Ecuación (2.5)}$$

### 2.3.2.3.2. Parte Integral (I)

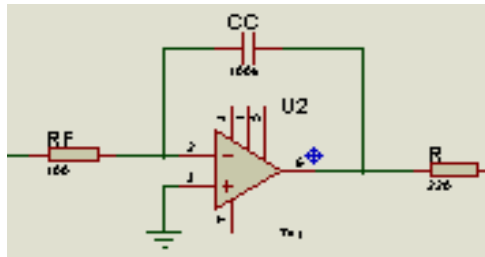


Figura 61. Parte integral

$$\frac{V_i - 0}{R_f} = \frac{0 - V_{O2}}{C_c} \quad \text{Ecuación (2.6)}$$

$$\frac{V_i}{R_f} = \frac{-V_{O2}}{C_c}$$

$$\frac{V_i(s)}{R_f} = -C_c V_{O2}(s) S$$

$$V_{O2}(s) = -\frac{V_i(s)}{R_f C_c S} \quad \text{Ecuación (2.7)}$$

### 2.3.2.3.3. Parte derivativa (D)

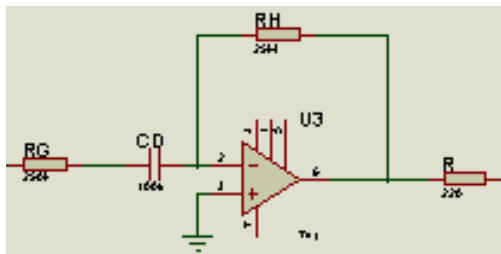


Figura 62. Parte derivativa

$$\frac{V_i - 0}{(R_g + C_d)} = \frac{0 - V_{O3}}{R_h} \quad \text{Ecuación (2.8)}$$

$$\frac{V_i}{R_g + C_d} = \frac{-V_{O3}}{R_h}$$

$$V_{O3} = -\frac{R_h V_i}{R_g + C_d}$$

$$V_{O3}(s) = -\frac{R_h V_i(s)}{R_g + \frac{1}{c_d s}}$$

$$V_{O3}(s) = -\frac{RhCdVi(s)S}{1+RgCdS} \quad \text{Ecuación (2.9)}$$

#### 2.3.2.3.4. Función de Transferencia del Controlador PID

En base al circuito de las figuras y a los valores hallados en cada una de las etapas, procedemos a obtener  $\frac{Vo}{Vi}$ , el cual va a ser la función de transferencia del PID análogo, C(s).

$$\frac{Vo1(s)-0}{R} + \frac{Vo2(s)-0}{R} + \frac{Vo3(s)-0}{R} = \frac{0-Vo(s)}{R} \quad \text{Ecuación (2.10)}$$

$$Vo1(s) + Vo2(s) + Vo3(s) = -Vo(s) \quad \text{Ecuación (2.11)}$$

Reemplazados la ecuación (2.5), (2.7) y (2.9) en (2.11)

$$-\frac{RdVi(s)}{Rc} - \frac{Vi(s)}{RfCcS} - \frac{RhCdVi(s)S}{1+RgCdS} = -Vo(S)$$

$$\frac{Vo}{Vi}(S) = \frac{Rd}{Rc} + \frac{1}{RfCcS} + \frac{RhCdS}{1+RgCdS}$$

$$\frac{Vo}{Vi}(S) = \frac{Rd(RfCcS)(1+RgCdS) + Rc(1+RgCdS) + RhCdS(Rc)(RfCcS)}{RC(RfCcS)(1+RgCdS)}$$

$$\frac{Vo}{Vi}(S) = \frac{RdRfCcS + RdRfRgCcCdS^2 + Rc + RcRgCdS + RcRfRhCcCdS^2}{RcRfCcS(1+RgCdS)}$$

$$\frac{Vo}{Vi}(S) = \frac{(RdRfRgCcCd + RcRfRhCcCd)s^2 + (RdRfCc + RcRgCd)S + Rc}{RcRfCcRgCdS(S + \frac{1}{RgCd})}$$

$$\frac{Vo}{Vi}(S) = \frac{\left(\frac{RdRfRgCcCd}{RcRfRgCcCd} + \frac{RcRfRhCcCd}{RcRfRgCcCd}\right)S^2 + \left(\frac{RdRfCc}{RcRfRgCcCd} + \frac{RcRgCd}{RcRfRgCcCd}\right)S + \left(\frac{Rc}{RcRfRgCcCd}\right)}{S(S + \frac{1}{RgCd})}$$

$$\frac{Vo}{Vi}(S) = \frac{\left(\frac{Rd}{Rc} + \frac{Rh}{Rg}\right)S^2 + \left(\frac{Rd}{RcRgCd} + \frac{1}{RfCc}\right)S + \frac{1}{RfRgCcCd}}{S(S + \frac{1}{RgCd})}$$

$$C_S = \frac{\left(\frac{Rd}{Rc} + \frac{Rh}{Rg}\right)S^2 + \left(\frac{Rd}{RcRgCd} + \frac{1}{RfCc}\right)S + \frac{1}{RfRgCcCd}}{S(S + \frac{1}{RgCd})} \quad \text{Ecuación (2.12)}$$

Para hallar los valores de los elementos del circuito PID, aplicamos el método de igualación de términos de ambos controladores.

$$A_1 = \frac{R_d}{R_c} + \frac{R_h}{R_g} \quad \text{Ecuación (2.13)}$$

$$B_1 = \frac{R_d}{R_c R_g C_d} + \frac{1}{R_f C_c} \quad \text{Ecuación (2.14)}$$

$$C_1 = \frac{1}{R_f R_g C_c C_d} \quad \text{Ecuación (2.15)}$$

$$D_1 = \frac{1}{R_g C_d} \quad \text{Ecuación (2.16)}$$

Debido a que se cuenta con un sistema de 4 ecuaciones y 7 incógnitas, es necesario asumir un valor de componente por etapa del circuito del PID, para así calcular los demás parámetros del circuito.

En este caso se asume, valores de condensadores y resistencia para  $C_c$ ,  $C_d$  y  $R_c$ :

- ✓  $C_c=100\mu\text{f}$  Componente de la etapa integral
- ✓  $C_d=100\mu\text{f}$  Componente de la etapa derivativa
- ✓  $R_c=220\Omega$  Componente de la etapa proporcional

Se procede a despejar  $R_g$  de la ecuación (2.16)

$$R_g = \frac{1}{D_1 C_d} \quad \text{Ecuación (2.17)}$$

Se despeja  $R_f$  de la ecuación (2.15), y se reemplaza en esta, la ecuación (2.17)

$$R_f = \frac{1}{C_1 R_g C_c C_d} \quad \text{Ecuación (2.18)}$$

$$R_f = \frac{D_1 C_d}{C_1 C_c C_d}$$

$$R_f = \frac{D_1}{C_c C_1} \quad \text{Ecuación (2.19)}$$

Se despeja  $R_d$  de la ecuación (2.14) y se reemplaza en (2.17) y (2.18)

$$R_d = \left( B_1 - \frac{1}{R_f C_c} \right) R_c R_g C_d$$

$$Rd = \left( B1 - \frac{CcC1}{D1Cc} \right) \frac{RcCd}{D1Cd}$$

$$Rd = \frac{B1Rc}{D1} - \frac{C1Rc}{D1^2}$$

$$Rd = \left( B1 - \frac{C1}{D1} \right) \frac{Rc}{D1} \quad \text{Ecuación (2.20)}$$

Se despeja Rh de la ecuación (2.13), y se reemplaza en esta la ecuación (2.17) y (2.20)

$$Rh = \left( A1 - \frac{Rd}{Rc} \right) Rg$$

$$Rh = \left( A1 - \frac{\left( B1 - \frac{C1}{D1} \right) \frac{Rc}{D1}}{Rc} \right) \frac{1}{D1Cd}$$

$$Rh = \left( A1 - \left( \frac{B1}{D1} - \frac{C1}{D1^2} \right) \right) \frac{1}{D1Cd}$$

$$Rh = \left( A1 + \frac{C1}{D1^2} - \frac{B1}{D1} \right) \frac{1}{D1Cd} \quad \text{Ecuación (2.21)}$$

### 2.3.2.3.5. Cálculo de los Valores de cada Elemento del Circuito PID

En las ecuaciones (2.21) y (2.20)

$$Rh = \left( A1 + \frac{C1}{D1^2} - \frac{B1}{D1} \right) \frac{1}{D1Cd}$$

$$Rd = \left( B1 - \frac{C1}{D1} \right) \frac{Rc}{D1}$$

En las partes  $\left( A1 + \frac{C1}{D1^2} - \frac{B1}{D1} \right)$  y  $\left( B1 - \frac{C1}{D1} \right)$  se observa que el controlador hallado en la sisotool, debe cumplir con dos condiciones para que las resistencias Rd y Rh den valores reales o que se puedan conseguir en el mercado; ya que hasta el momento no se consiguen resistencias negativas.

*Condición 1* para que Rd sea positiva:  $Rd > \frac{C1}{D1}$

*Condición 2* para que Rh sea positiva:  $A1 + \frac{C1}{D1^2} > \frac{B1}{D1}$

Para comprobar esto empleamos el siguiente procedimiento:



Condiciones que se deben cumplir en el compensador para que los valores de las resistencias  $R_d$  y  $R_h$  sean reales

- $[n2,d2]=tfddata(G,'v');$
- $A1=numer(1,1);$
- $B1=numer(1,2);$
- $C1=numer(1,3);$
- $D1=denom(1,2);$
- $con1=(B1-C1)/D1$

$$con1 = 3900$$

- $con2=A1+(C1/D1^2)-(B1/D1)$

$$con2 = 100$$

Función del Compensador PID con operacionales

- ❖  $(R_d/R_c+R_h/R_g)S^2+(R_d/(R_cR_gC_d)+1/(R_fC_c))S+1/(R_fR_gC_cC_d)$
- ❖  $C(s)= S*(S+1/(R_gC_d))$

Se expresa de ésta forma la función del PID con operacionales

- ❖  $A2*S^2+B2*S+C2$
- ❖  $C(s)= S*(S+D2)$

Se asigna un valor, solo a un componente de cada parte del circuito

- $cc=100e-6;$
- $cd=100e-6;$
- $rd=(B1-C1/D1)*rc/D1$
- $rc=220;$
- $rd=(B1-C1/D1)*rc/D1$

$$rd = 330000$$

$$\diamond rf = D1 / (C1 * cc)$$

$$rf = 100$$

$$\diamond rg = 1 / (D1 * cd)$$

$$rg = 2.5000e + 005$$

$$\diamond rh = (A1 + (C1 / D1^2) - (B1 / D1)) / (D1 * cd)$$

$$rh = 2.5000e + 007$$

Los valores finales de los elementos que conforman el controlador PID se los muestra a continuación:

$$rd = 330e + 003 \Rightarrow 330K \Omega$$

$$rf = 100 \Rightarrow 100\Omega$$

$$rg = 250e + 003 \Rightarrow 250K\Omega$$

$$rh = 25e + 006 \Rightarrow 25M\Omega$$

Función de transferencia del controlador

$$G(S) = \frac{1600S^2 + 160S + 4}{S^2 + 0.04S}$$

Ecuación (2.22)

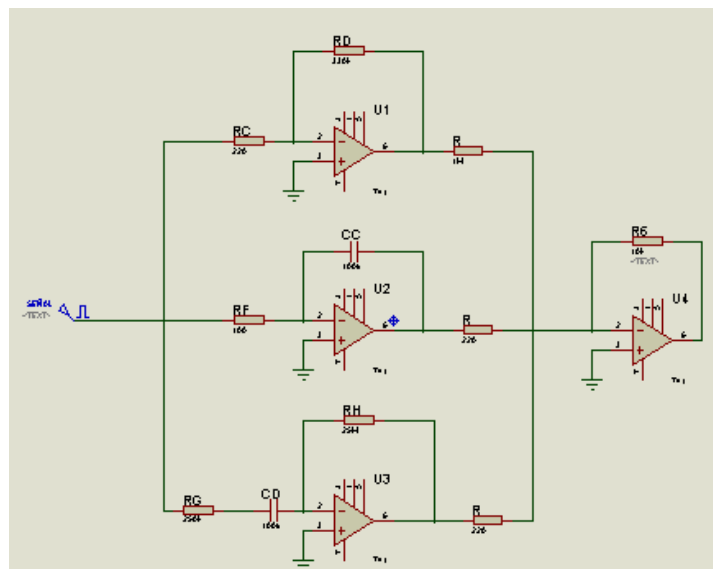


Figura 63. Circuito equivalente del controlador PID



Con los datos obtenidos en el monitoreo, se puede apreciar que la temperatura dentro del invernadero no varía drásticamente en periodos cortos de tiempo; en el control de microclimas para invernaderos a la temperatura se la considera una variable lenta ya que influyen muchos parámetros para que esta varíe. Estos sistemas no pueden ser controlados de una forma inmediata ya que contienen volúmenes grandes de aire, también dependen de los factores externos e internos que rodean al invernadero entre otros factores, por lo cual el sistema de control obtenido es adecuado para este sistema.

## 2.4. Obtención de un Modelo Algebraico de Temperatura para el Invernadero

Para realizar el modelo algebraico del sistema se ha tomado como referencia el modelo realizado por el Instituto de Automática de la Universidad Nacional de San Juan; adecuándolo a las necesidades del sistema que se va a realizar para el invernadero.

### 2.4.1. Determinación de la Ecuación del Modelo

Para la obtención del modelo algebraico de temperatura del invernadero experimental, se tomo en consideración los aportes de energía con los que cuenta el invernadero y se planteo el siguiente balance energético:

$$E_R = E_p \quad \text{Ecuación (2.23)}$$

Donde:

$E_R$ : Es la energía aportada por la radiación solar.

$E_p$ : Es la energía perdida por la interacción del medio ambiente.

La ecuación del balance energía del proceso está representada como la suma de los aportes de energía debe ser igual a la suma de las pérdidas de energía.

#### 2.4.1.1. Aporte de Energía por Radiación

El aporte de energía al interior del invernadero debido a la radiación solar se considera proporcional a la radiación global media en el exterior del invernadero ( $R_o$ ), y está descrita en la siguiente ecuación:

$$E_R = K_R \cdot R_o \quad \text{Ecuación (2.24)}$$

#### 2.4.1.2. Pérdida de Energía debido a la Interacción con el Medio Ambiente.

Esta pérdida de energía puede ser expresada como un valor proporcional al salto térmico entre el interior y el exterior del invernadero, ésta pérdida se la describe con la siguiente ecuación:

$$E_p = (T_i - T_o)K_p \quad \text{Ecuación (2.25)}$$

Reemplazando las anteriores expresiones en la ecuación del balance energético del sistema tenemos:

$$K_R \cdot R_o = (T_i - T_o)K_p \quad \text{Ecuación (2.26)}$$

Como la variable a controlar es la temperatura interna se procede a despejarla:

$$K_R \cdot R_o = (T_i - T_o)K_p$$

$$\frac{K_R \cdot R_o}{K_p} = (T_i - T_o)$$

$$\frac{K_R \cdot R_o}{K_p} = (T_i - T_o)$$

$$T_i = \frac{K_R \cdot R_o}{K_p} + T_o \quad \text{Ecuación (2.27)}$$

La ecuación 2.27 describe el comportamiento de la temperatura interna del invernadero en régimen estacionario de acuerdo a las condiciones del entorno. Para dar valores a los parámetros de la ecuación se tomo los datos que en el anterior modelo se utilizo para la identificación.

Para encontrar los valores de las constantes  $K_p$  y  $K_R$  se realizo el diagrama de la ecuación en el Simulink como se muestra en la Figura 64; luego se procedió a realizar el análisis del modelado. Para este análisis se tomo las datas procesadas del primer modelo para evitar que no haya muchas variaciones de las variables y estas sigan una tendencia marcada y así poder reducir el error.

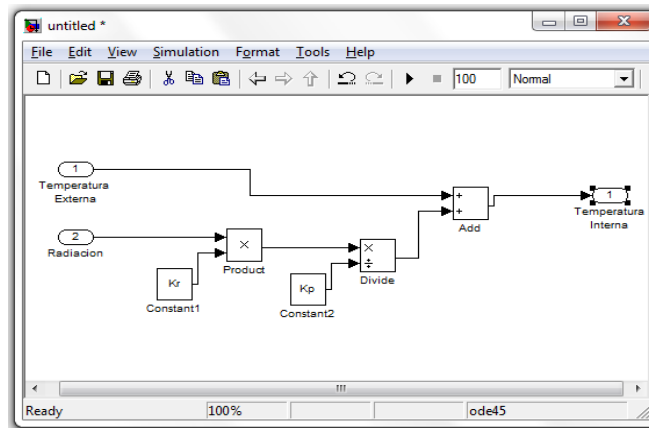


Figura 64. Diagrama de la ecuación del primer modelo.

Luego de haber obtenido el modelo se procedió a sacar el error con la formula que se citara más adelante; el error de este modelo es muy grande, por lo que no es aconsejable utilizarlo para predecir la temperatura interna del invernadero. Para mejorar el modelo propuesto se debe trabajar más sobre las variables y la optimización de la ecuación.

## 2.4.2. Mejoramiento al Modelo Propuesto

Con el fin de obtener un modelo más adecuado para el sistema, se realizó unas modificaciones a la ecuación, además se trato de dar una mejor linealización a las datas de las variables que intervienen en el proceso.

### 2.4.2.1. Mejoramiento a la Ecuación

Para la modificación de la ecuación se utilizó el método de los mínimos cuadrados con lo que se pretende obtener una función que se ajuste lo mejor posible a los valores experimentales.

Para la temperatura externa se utilizó una función polinómica de segundo orden, ya que esta función es la que más se ajusta a los datos experimentales del modelo, quedando el polinomio de la siguiente manera:

$$P(T_o) = kt3.T_o^2 + kt2.T_o + kt1 \quad \text{Ecuación (2.28)}$$

Como en el modelo planteado la temperatura interna es directamente proporcional a la radiación solar, esto produce que la temperatura aumente considerablemente, esto provoca

que el sistema no concuerde con la realidad; ya que las variaciones de radiación son muy grandes por lo cual las variaciones de temperatura también serán grandes. Por esta razón se propone realiza una modificación a la ecuación que describe el aporte energético por radiación.

Esta modificación consiste en elevar a una potencia la variable radiación solar ( $R_o^\alpha$ ), con una condición que el exponente debe ser menor a uno ( $\alpha < 1$ ); teniendo como resultado la siguiente ecuación:

$$E_R = K_R \cdot R_o^\alpha \quad \text{Ecuación (2.29)}$$

Realizando las modificaciones pertinentes a la ecuación que describe el comportamiento del modelo tenemos:

$$T_i = \frac{K_R \cdot R_o^\alpha}{K_P} + (kt3 \cdot T_o^2 + kt2 \cdot T_o + kt1) \quad \text{Ecuación (2.30)}$$

#### 2.4.2.2. Pre-procesamiento de las Datas de Radiación y Temperatura Externa

Para procesar las datas de las variables que intervienen en el modelo, se utilizó los mismos métodos que el modelo anterior es decir el método Linel y el método Zoh; en este caso se trató de eliminar al máximo las variaciones, tratando de tener una tendencia continua de las variables muestra en la Figura 65. En la figura izquierda se puede observar la trayectoria de la radiación, mientras que la figura derecha muestra como varia la temperatura externa.

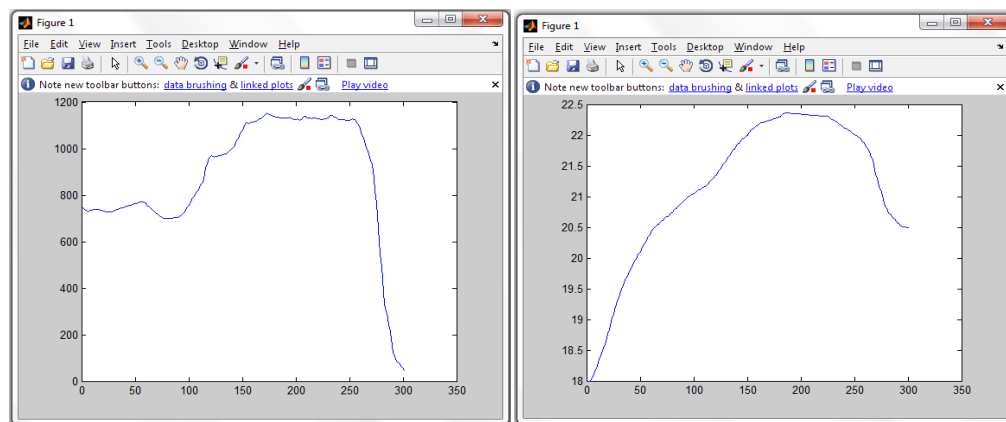
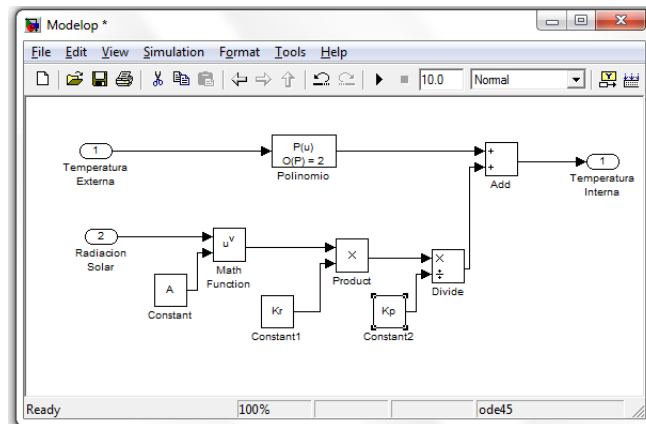


Figura 65. Datas procesadas para el modelo matemático

### 2.4.2.3. Obtención del Modelo Algebraico

Ya habiendo mejorado el modelo anterior, se procedió a realizar el análisis del nuevo sistema para lo cual primeramente se represento la ecuación modificada en el diagrama de bloque del Simulink, este diagrama se lo muestra en la Figura 66.



**Figura 66.** Diagrama de bloques que contiene la ecuación del modelo algebraico

Luego de esto procedemos a la estimación de las constantes en el Control and Estimation Tools Manager de Matlab; para lo cual realizamos el siguiente procedimiento:

- ✓ Primeramente importamos las datas desde el Workspace quedando estas de la siguiente manera: como entradas la radiación solar y la temperatura externa y como salida la temperatura interna
- ✓ A continuación de esto procedemos a seleccionar los parámetros que vamos a estimar en este caso seleccionamos todas las constantes como son: A, kp, kr, kt1, kt2 y kt3
- ✓ Luego procedemos a seleccionar la data que vamos a utilizar en la estimación que puede ser la de Identificación o la de Validación.
- ✓ Posteriormente escogemos las graficas que queremos visualizar cuando se realice el proceso.
- ✓ Como último paso se inicia la estimación; en nuestro caso teniendo como resultado lo que se muestra en la Figura 67.

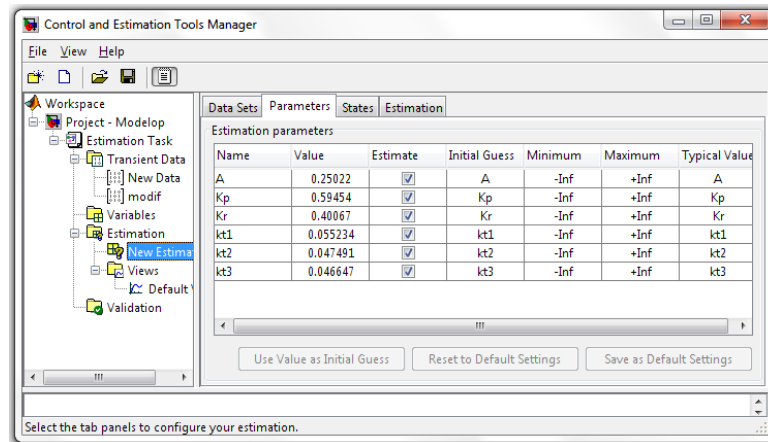


Figura 67. Datos de las constantes del modelo algebraico

Con los valores de las constantes ya establecidos se procedió a realizar el cálculo de la temperatura interna del modelo para posteriormente comparar con los datos reales. Para lo cual ingresamos la fórmula del modelo en el Command Window y la calculamos.

Obtenido ya el valor de la temperatura interna del modelo, procedemos a compararla con la temperatura interna real del invernadero experimental, esta comparación podemos observarla en la Figura 68.

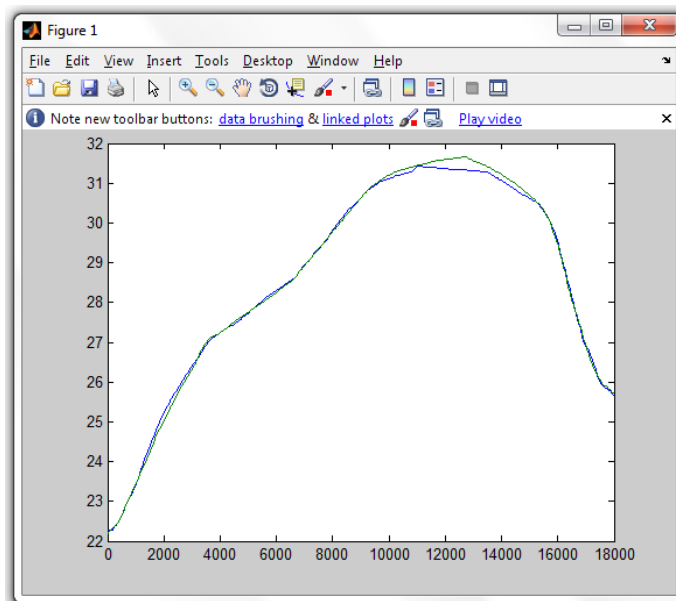


Figura 68. Seguimiento de la temperatura real vs el modelo algebraico

En la Figura 68, la línea azul representa la temperatura interna del modelo, mientras que la verde es la temperatura real del sistema; como se puede observar la temperatura interna del



modelo obtenido sigue la tendencia del sistema real por lo que se puede considerar que el sistema es aceptable.

Para saber si este modelo algebraico es recomendable para nuestro sistema, procedimos a calcular el error mediante la siguiente ecuación:

$$error = \sqrt{\sum(T_{im} - T_i)^2} \quad \text{Ecuación (2.31)}$$

$$error = 1.911343$$

El error que nos presenta el modelo obtenido con respecto al sistema real es de 1.91 °C por lo cual podemos decir que este modelo nos permite predecir de una manera correcta la temperatura interna del invernadero.

## 2.5. Análisis del Método de Control

Para realizar el análisis del método de control tomamos como referencia los datos obtenidos en el primer monitoreo; las variables que se tomara en cuenta para este análisis son la temperatura interna y la radiación solar tanto al interior como al exterior del invernadero; los datos que se tomó como referencia son de dos clases, es decir con características diferentes, los cuales fueron seleccionados tomando en cuenta el aporte de energía. La Tabla 4 contiene datos de un día de monitoreo sin tener extendida la malla polisombra, también se tomó el lapso de tiempo en el cual hay mayor aporte de energía.

**Tabla 4.** Datos del monitoreo sin malla polisombra

Hora	Temperatura 1	Temperatura 2	Temperatura 3	Temperatura Media	Redición Externa	Radiación Interna
10:00:00	20.1	19.1	19.2	19.47	265	147
10:10:00	20.4	19.5	19.4	19.77	271.8	151
10:20:00	20.8	20	19.5	20.10	314.7	166
10:30:00	21.1	20.2	19.8	20.37	344.6	198.4
10:40:00	21.5	20.4	19.9	20.60	448.8	250
10:50:00	22.7	21.1	20.2	21.33	635.1	346
11:00:00	23.8	21.8	20.6	22.07	636.3	348
11:10:00	24.4	22.2	21.1	22.57	713.9	351
11:20:00	25	22.7	21.4	23.03	653.7	277
11:30:00	24.9	22.7	21.5	23.03	518.9	256



11:40:00	24.5	23.1	21.4	23.00	485.4	309
11:50:00	25	23.4	21.8	23.40	550.2	307
12:00:00	25.9	23.9	22.2	24.00	593.2	233
12:10:00	25.3	23.4	21.6	23.43	440.9	188
12:20:00	24.8	22.8	21.3	22.97	320.8	308
12:30:00	26	24.1	22.2	24.10	621.3	330
12:40:00	26.6	24.5	22.7	24.60	615.9	325
12:50:00	26.5	24.6	23	24.70	594.7	280
13:00:00	25.3	23.3	22.3	23.63	254.8	128
13:10:00	24.5	23.3	21.9	23.23	280.1	128
13:20:00	24.6	23.3	22.2	23.37	284.2	133
13:30:00	25.5	24	22.7	24.07	406.6	203
13:40:00	25.2	23.6	22.5	23.77	349.5	161
13:50:00	25.1	23.8	22.8	23.90	373.8	183
14:00:00	24.5	23.3	21.8	23.20	302.7	141

También cabe mencionar que se utilizó malla polisombra para el monitoreo, debido a que en el mercado local no se pudo encontrar pantalla térmica, esta malla es utilizada principalmente para reducir la radiación que llega al cultivo repercutiendo también en la temperatura interna, esta malla tiene algunas características que se asemejan a la pantalla térmica; pero cabe recalcar que la pantalla térmica presenta muchos más beneficios. Los datos del monitoreo con este tipo de malla que tiene un sombreado del 50 % se los presenta en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Datos del monitoreo con malla polisombra

Hora	Temperatura 1	Temperatura 2	Temperatura 3	Temperatura Media	Redición Externa	Radiación Interna
10:00:00	21.6	20.1	19.4	20.37	137.9	58
10:10:00	22.2	20.3	19.7	20.73	1107	245
10:20:00	23.1	21.2	20.2	21.50	1148	265
10:30:00	23.9	21.4	20.2	21.83	1097	270
10:40:00	24.1	22.1	20.6	22.27	1086	290
10:50:00	25	22.4	20.8	22.73	1101	295
11:00:00	25.4	23.1	22.2	23.57	1092	305
11:10:00	26	23.3	21.4	23.57	1102	307
11:20:00	26.2	23.8	21.7	23.90	1142	310
11:30:00	26.6	24	23.3	24.63	1098	322





11:40:00	27.3	24.1	22.7	24.70	1162	324
11:50:00	27.9	25.1	23.2	25.40	1107	310
12:00:00	28.5	27.6	23.2	26.43	1169	303
12:10:00	29.8	28.7	23.9	27.47	1152	290
12:20:00	30.4	29.1	24.4	27.97	1125	320
12:30:00	31.1	29.5	24	28.20	1162	330
12:40:00	31.2	29.6	24.4	28.40	1173	322
12:50:00	30.1	28.8	24.2	27.70	203.7	270
13:00:00	28.9	27.8	23.3	26.67	889.4	236
13:10:00	29.3	28	23.3	26.87	436.9	114
13:20:00	29.8	29.8	25.3	28.30	1143	315
13:30:00	30.3	29.2	25.4	28.30	1000	150
13:40:00	30.9	29.9	25	28.60	1165	166
13:50:00	31.3	30.7	25.2	29.07	1102	250
14:00:00	30.7	30.7	25	28.80	1111	204

Con los datos del primer monitoreo se realizó una comparación de la radiación que llega al interior del invernadero tanto con malla polisombra como sin ella; con éste análisis se constato que con la utilización de malla polisombra se tuvo una reducción significativa en la radiación, de ésta manera también se redujo la temperatura interna, beneficiando así a la plantación de orquídeas, debido a que éste tipo de planta no necesita de radiaciones altas debido a que algunas de estas especies se desarrollan en la sombra en su hábitat natural.

El análisis realizado también consistió en saber cómo se comporta la temperatura interna en estas dos circunstancias; para lo cual, en el primer caso sin la utilización de la malla polisombra se tomo una radiación que no sobrepase los  $800 \text{ W/m}^2$ ; para el segundo caso se trato de tomar un grupo de datos que estos sobre los  $1000 \text{ W/m}^2$ , pero estos datos son de un día de monitoreo con malla polisombra, con la finalidad de analizar el aporte de energía hacia el interior del invernadero tanto en radiación como en temperatura. La temperatura con radiación baja se pudo observar que se mantuvo en unos  $23 \text{ }^\circ\text{C}$  con cambios frecuentes. Mientras que la temperatura con radiación alta y con malla polisombra se pudo observar que sigue un ascenso constante y con menos variaciones de temperatura. Otro punto que hay que tomar en cuenta es que con una radiación que esta sobre los  $1000 \text{ W/m}^2$  la

temperatura no llega a sobrepasar los 30 °C lo que si sucedo cuando no se utiliza malla polisombra que llega a los 33 °C cuando se tiene temperaturas altas.

Realizando diferentes análisis con las datas adquiridas en el primer monitoreo se puede concluir que con la utilización de malla polisombra se tuvo una mejor estabilidad de la temperatura del invernadero, también nos presento la ventaja de poder disminuir la radiación contribuyendo al cultivo ya que este tipo de plantas no necesita de radiaciones muy altas. Conociendo las ventajas obtenidas con la malla polisombra en el interior del invernadero y al saber que la pantalla térmica presenta muchos más beneficios que la malla utilizada; podemos decir que el control de temperatura con pantalla térmica es un buen método de control que al ser combinarlo con otro, se podrá obtener un buen control de temperatura.

### **2.5.1. Accionamiento de la Pantalla Térmica en el Interior del Invernadero**

Una vez obtenido el modelo, con un análisis realizado a los datos obtenidos en el monitoreo y con el estudio realizado sobre las pantallas térmicas se cree conveniente plantear algunas estrategias para el accionamiento de la pantalla térmica. A continuación se presenta algunos parámetros para el accionamiento de la pantalla.

Para la calefacción, como durante el día necesitamos una temperatura de 30 °C, entonces si la temperatura disminuye por debajo de la temperatura establecida la pantalla térmica se recoge y si aumenta por encima de la temperatura establecida ésta se extiende. Para la noche será al inverso, la temperatura que se necesita es 13 °C entonces si la temperatura está por encima de la temperatura establecida la pantalla térmica se recoge y si baja por debajo de la temperatura ya establecida ésta se extiende. También se puede establecer un rango de temperatura para el extendido y recogido de la pantalla térmica que puede ser de unos dos grados de temperatura para evitar que el sistema esté constantemente prendiéndose o apagándose para aumentar la vida útil del sistema.

Para el accionamiento de la pantalla térmica vamos a proponer unas estrategias de control para el invernadero de orquídeas.

## **2.5.2. Estrategias de Control de la Pantalla Térmica**

Para el control de la temperatura interna del invernadero se plantea algunas estrategias para la manipulación de la pantalla térmica de acuerdo a las necesidades y requerimientos que necesitamos.

### **2.5.2.1. Estrategia 1**

*Accionamiento de la pantalla térmica por interruptor, horario en función de la radiación solar.*

Es un caso muy sencillo en el que para controlar la pantalla térmica solo dispongamos de un interruptor horario, el cual debe ser ajustado para invierno y para verano.

Para ajustar los valores que se va a dar al reloj es necesario saber el comportamiento de la radiación solar, tanto en invierno como en verano ya que en estas dos estaciones se presentan situaciones diferentes y para evitar el exceso de radiación es necesario bloquear la radiación durante las horas más críticas.

### **2.5.2.2. Estrategia 2**

*Accionamiento de la pantalla térmica por termostato, en función de la temperatura interna.*

Para este modelo suponemos que solo disponemos de un termostato para accionar la pantalla térmica; es decir la pantalla térmica se accionara en función de la temperatura interna del invernadero.

Para éste caso se debe establecer el periodo de cambio de pantalla térmica de acuerdo a la temperatura interna requerida, también se debe tener en cuenta las dos estaciones del año tanto invierno como verano, y tener siempre presenta la radiación necesaria para el cultivo.

### **2.5.2.3. Estrategia 3**

*Accionamiento de la pantalla térmica por dos condiciones simultáneas: horario y temperatura, equipos de control autómatas programables.*

Para este modelo se supone que se dispone de un autómata con señal de temperatura para accionar la pantalla térmica; es decir la pantalla térmica se accionara a unas horas determinadas y además en función de la temperatura interna del invernadero.

Para esta estrategia se propone tener un horario de extendida y recogida de la pantalla térmica de acuerdo a invierno y verano, pero simultáneo a éste horario tener una temperatura interna establecida para el accionamiento de la pantalla si es necesario.

#### **2.5.2.4. Estrategia 4**

*Accionamiento de la pantalla térmica por dos condiciones simultaneas temperatura y radiación solar. Equipo de control autómata programable, ordenador o programador con termostato e interruptor.*

Para este modelo se supone que se dispone de un programador al que le conectamos en dos entradas, los valores obtenidos en un termostato interior u los valores obtenidos al medir la radiación. Ambas condiciones deben ser similares y por es necesario un pequeño programador que accione la pantalla térmica; también puede ser un autómata programable o un ordenador.

Para ésta estrategia se debe establecer la radiación y temperatura interna requerida en el interior del invernadero para el accionamiento de la pantalla térmica.

### **3. RESULTADOS**

Para encontrar el modelo y posteriormente el diseño del controlador de temperatura se realizó el siguiente proceso:

#### **3.1. Adquisición de datos**

Para obtener los datos necesarios para elaborar nuestro proyecto se realizó un monitoreo de las siguientes variables:

- ❖ Temperatura Interna
- ❖ Temperatura Externa
- ❖ Radiación Solar
- ❖ Humedad

Este monitoreo se lo realizó desde las nueve de la mañana hasta las cuatro de la tarde ya que durante estas horas hay más aporte de energía en forma de radiación al invernadero, durante las otras horas restantes hay un mínimo aporte de energía porque el invernadero se encuentra dentro de un jardín botánico lo que evita que la radiación llegue al invernadero por perturbación de los árboles. Los datos del monitoreo se encuentran en el anexo 3 y 4.

Pero los datos que se tomaron en consideración para encontrar el modelo se encuentran en el anexo 4 en el cual se tomó dos datos una que nos sirva para la identificación del sistema y otra para la validación. Las variables que intervienen en primer modelo son:

- ❖ La radiación solar como variable de entrada.
- ❖ La temperatura interna como variable de salida.

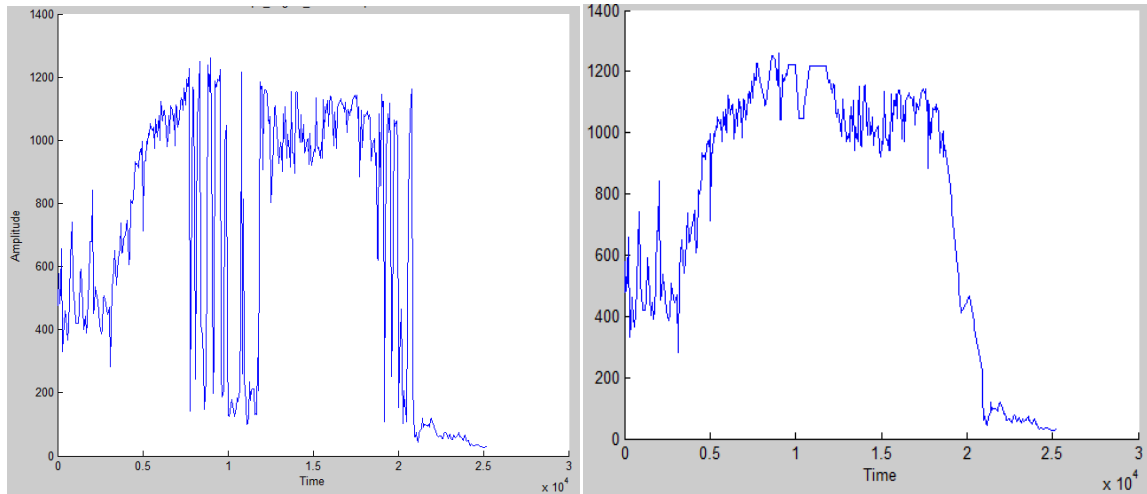
#### **3.2. Procesamiento de los Datos**

El procesamiento de los datos se lo realizó con la opción que nos presenta el Matlab; el cual se lo realizó de una forma gráfica eliminando las mayores perturbaciones que pueden presentar errores, siguiendo siempre la tendencia de la curva. Los métodos que se utilizaron para la interpolación de los datos son LINEAL y ZOH.

A continuación se presentara las datas procesadas y sin procesar de las variables que interviene en el primer modelo.

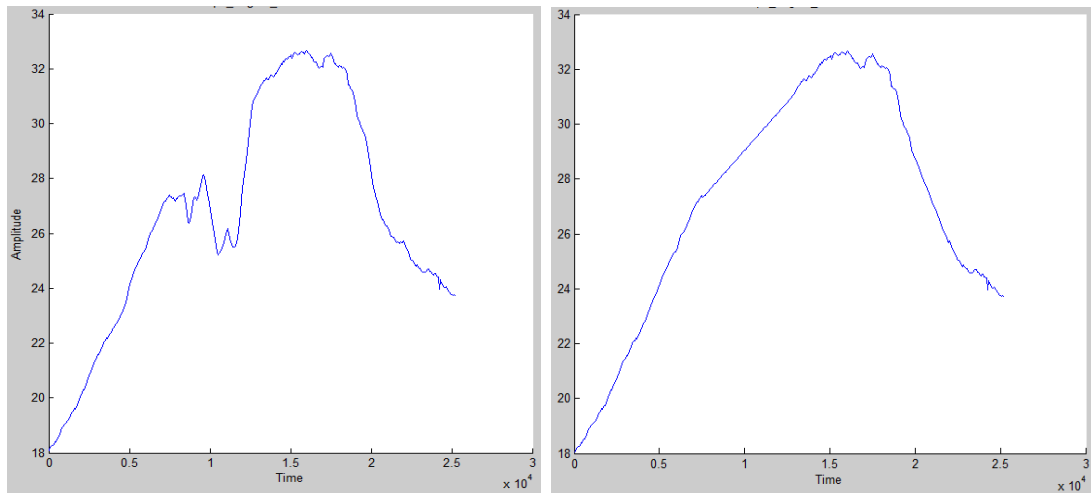
### 3.2.1. Datos de Identificación

#### *Radiación solar*



**Figura 69.** Data de radiación solar de identificación procesada y sin procesar

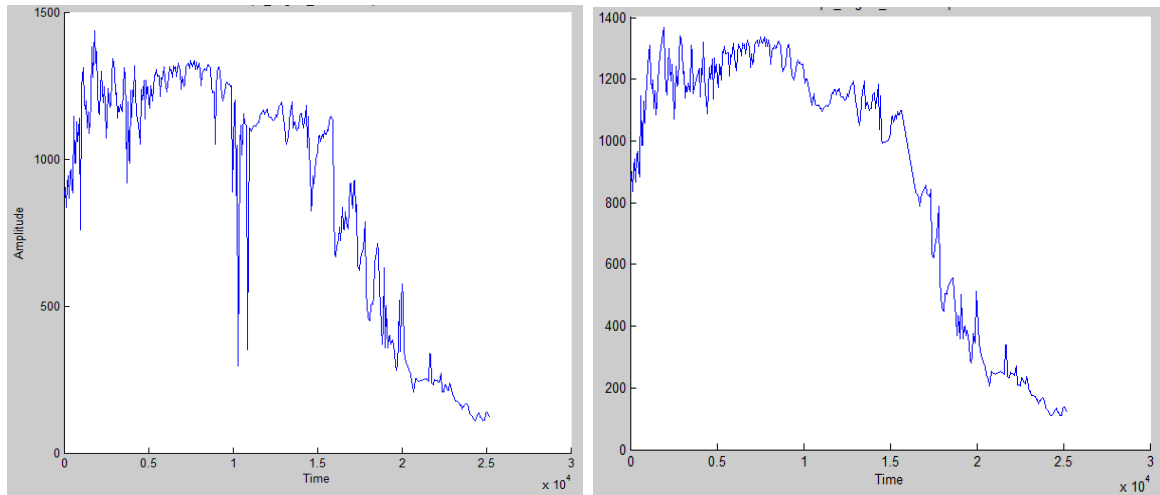
#### *Temperatura Interna*



**Figura 70.** Data de temperatura interna de identificación procesada y sin procesar

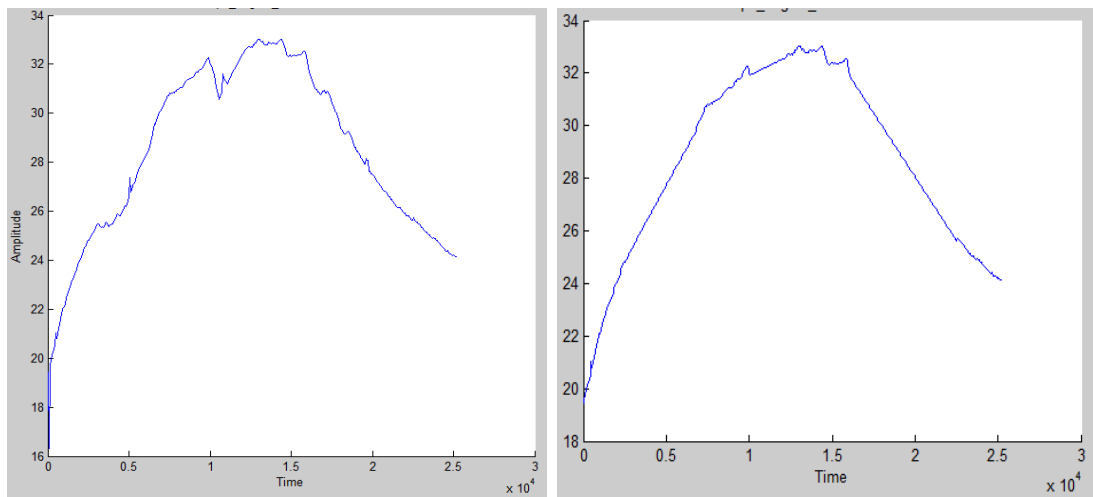
### 3.2.2. Datas de Validación

#### *Radiación solar*



**Figura 71.** Data de radiación solar de validación procesada y sin procesar

#### *Temperatura Interna*



**Figura 72.** Data de temperatura interna de validación procesada y sin procesar

### 3.3. Análisis del sistema con las diferentes estructuras con las que cuenta el programa.

Para obtener la mejor opción para nuestro sistema se realizó un detallado análisis con todas las estructuras con las que cuenta el programa teniendo el siguiente resultado:



### 3.3.1. Estructura ARX

Tabla 6. Mejores coeficientes para nuestro sistema con una estructura ARX

Estructura ARX	COEFICIENTES			Función de Pérdida	Factor de Error	Factor de Reproducibilidad
	na	nb	nk			
	4	4	1	0.815959	0.84757	73.18
	4	4	2	0.81615	0.0359029	72.2
	4	3	1	0.081192	0.0839377	66.21
	5	4	1	0.79294	0.827583	68.45

### 3.3.2. Estructura ARMAX

Tabla 7. Mejores coeficientes para nuestro sistema con una estructura ARMAX

Estructura ARMAX	COEFICIENTES				Función de Pérdida	Factor de Error	Factor de Reproducibilidad
	na	nb	nc	nk			
	2	2	2	1	0.00291651	0.00300004	70.66
	2	2	2	2	0.00294387	0.00302839	71.26
	3	2	2	1	0.00291232	0.0030173	70.66
	2	3	2	1	0.00289905	0.00299591	71.12

### 3.3.3. Estructura OE

Tabla 8. Mejores coeficientes para nuestro sistema con una estructura OE.

Estructura OE	COEFICIENTES			Función de Pérdida	Factor de Error	Factor de Reproducibilidad
	nb	nf	nk			
	2	2	1	0.513476	0.52328	80.08
	2	2	2	0.541377	0.551738	79.67
	3	2	1	0.541377	0.551738	91.22
	2	3	1	0.506273	0.518356	79.18



### 3.3.4. Estructura BJ

Tabla 9. Mejores coeficientes para nuestro sistema con una estructura BJ

Estructura BJ	COEFICIENTES					Función de Pérdida	Factor de Error	Factor de Reproducibilidad
	nb	nc	nd	nf	nk			
	2	2	2	2	1	0.00493386	0.166609	80.08
	2	2	2	9	1	0.00626817	0.179759	89.15
	3	2	2	2	1	0.554939	0.579183	91.27
	2	2	2	9	2	0.00492805	0.00514335	87.31

### 3.4. Obtención de la Mejor Estructura Para Nuestro Sistema

Luego de haber analizado las opciones anteriormente encontradas se pudo establecer que la mejor opción es la estructura BJ con el coeficientes  $nb= 2$ ;  $nc= 2$ ;  $nd= 2$ ;  $nf= 2$ ;  $nk= 1$ ; con un coeficiente de reproducibilidad del 80.08% como se muestra en la Figura 73, con una función de pérdida de 0.00493386 y un factor de error de 0.005125.

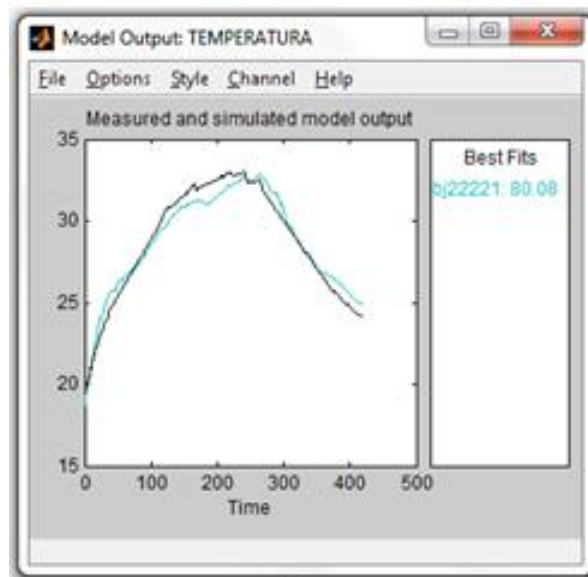


Figura 73. Reproducibilidad de la estructura BJ 22221

Para haber selecciona a esta estructura como la mejor opción también se analizó el diagrama de auto correlación y residuos donde estos deben estar dentro de los niveles establecidos como se puede observa la Figura 74.

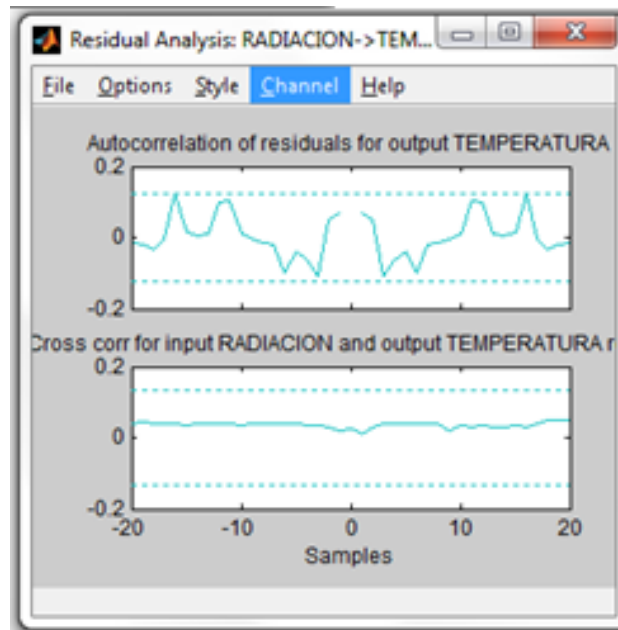


Figura 74. Diagrama de autocorrelación y residuos.

### 3.5. Función de Transferencia del Sistema.

La estructura anteriormente mencionada resultó la mejor opción, debido a muchos factores entre uno de ellos es que nos permito encontrar una función de transferencia segundo orden, ya que al tratarse de una ecuación de segundo grado ésta permite tener un mejor control del sistema; esto quiere decir que mientras la función de transferencia tiene un mayor grado es más complejo su control. La función de transferencia obtenida se la presenta a continuación:

$$\frac{1.436e-005s+1.6203e-009}{s^2+0.001788s+2.8744e-008} \quad \text{Ecuación (3.1)}$$

### 3.6. Calculo del Controlador Mediante Sisotool

Para obtener el mejor controlador para nuestro sistema, se calculo el mismo con cada una de las acciones de control; resultando la mejor opción para nuestro sistema un controlador PID. Las características del controlador se muestran en la Figura 75.

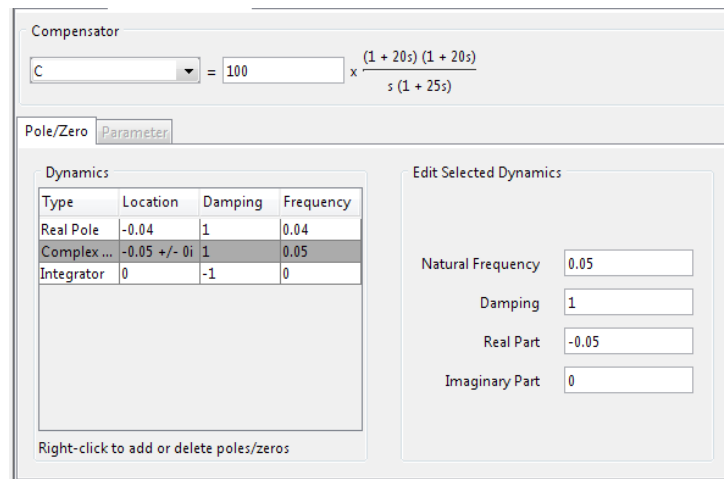


Figura 75. Optimización del controlador PID

Estas características permiten que el controlador se estabilice en 286 segundo esto equivale a 4,7 minutos; además tiene un sobre impulso del 41,6 % ya que se busca que el sistema sea lo más suave posible como se muestra en la Figura 76.

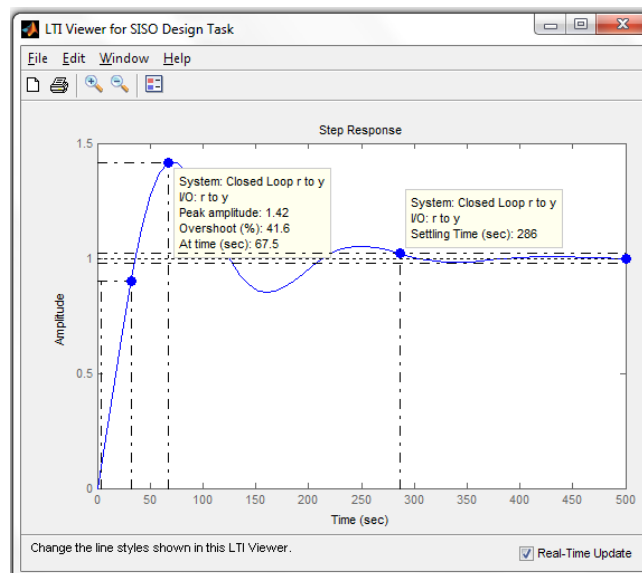


Figura 76. Respuesta del controlador PID en el sisotool

### 3.7. Simulación del Sistema de Control Retroalimentado

Ya obtenido el controlador en el Sisotool se procede a pasarlo al Simulink como diagrama de bloques para poder simularlo desde aquí. El controlador del sistema representado en diagrama de bloques se lo muestra en la Figura 77.

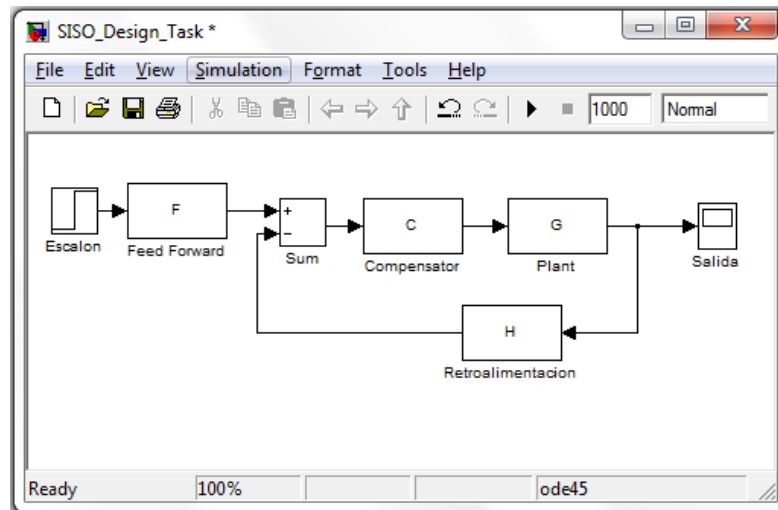


Figura 77. Diagrama de bloques del controlador PID

El resultado de la simulación del sistema en el sisotool se lo muestra en la Figura 78, en el cual se puede observar que el resultado obtenido es igual al encontrado en el sisotool.

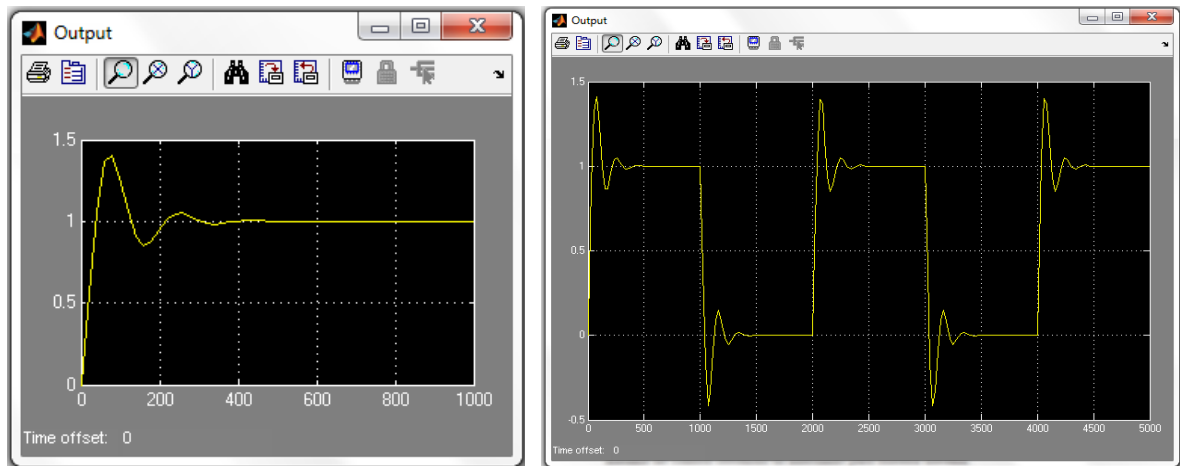


Figura 78. Simulación del controlador del sistema

### 3.8. Cálculo del Controlador Analógico

Para obtener el controlador analógico PID, primeramente se realizó por separado el cálculo de cada una de las acciones de control para posteriormente reemplazar estas en la función de transferencia del controlador PID; el diagrama del controlador se muestra en la Figura 79. Así mismo se calculo los valores de los elementos que conforman el circuito PID. Como resultado se obtuvo la función de transferencia final del controlador del sistema la cual se muestra a continuación:

$$G(S) = \frac{1600S^2 + 160S + 4}{S^2 + 0.04S}$$

Ecuación (3.2)

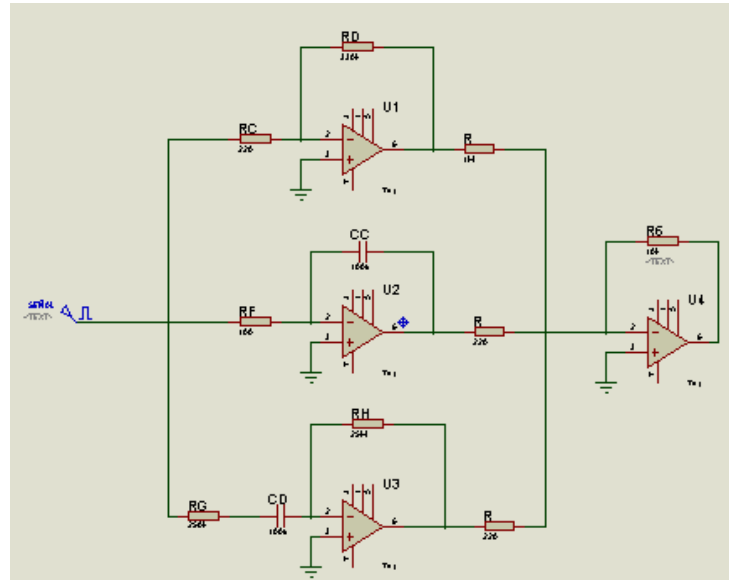


Figura 79. Diagrama electrónico del controlador PID

### 3.9. Modelo Algebraico

Los datos que se tomaron para el modelo algebraico son los mismos utilizados en el primer modelo, con la diferencia que en éste modelo ya se tomo en consideración otra variable que interviene en el microclima del invernadero.

- ❖ Como variables de entrada la radiación solar y la temperatura externa.
- ❖ Como variable de salida la temperatura interna del invernadero.

Se realizó el modelo algebraico del sistema tomando en consideración el balance energético que interviene en el invernadero.

La radiación solar es la variable que aporte significativamente con energía al invernadero, la cual está representada en la siguiente ecuación:

$$E_R = K_R \cdot R_o \quad \text{Ecuación (3.3)}$$

Las pérdidas de energía debido a la interacción con el medio ambiente, están descritas por la siguiente ecuación:

$$E_P = (T_i - T_o)K_P \quad \text{Ecuación (3.4)}$$

Con la ecuación de balance térmico y con algunas modificaciones que se realizó para mejorar el sistema se obtuvo la ecuación del modelo que se la describe a continuación:

$$T_i = \frac{K_R \cdot R_o^\alpha}{K_P} + (kt3 \cdot T_o^2 + kt2 \cdot T_o + kt1) \quad \text{Ecuación (3.5)}$$

Para encontrar el valor de las constantes es necesario a la ecuación representarla en un diagrama de bloques como se muestra en la Figura 80.

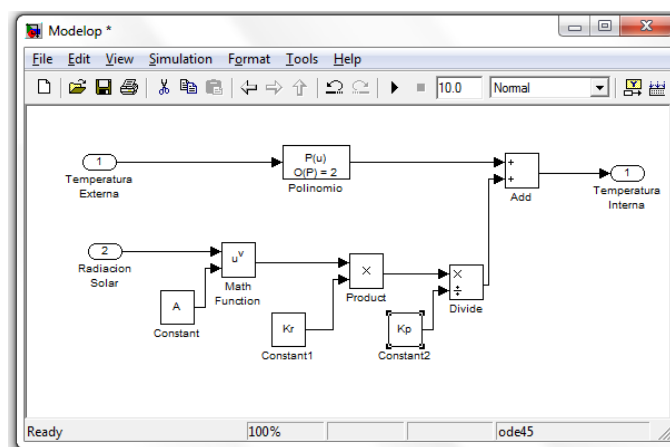


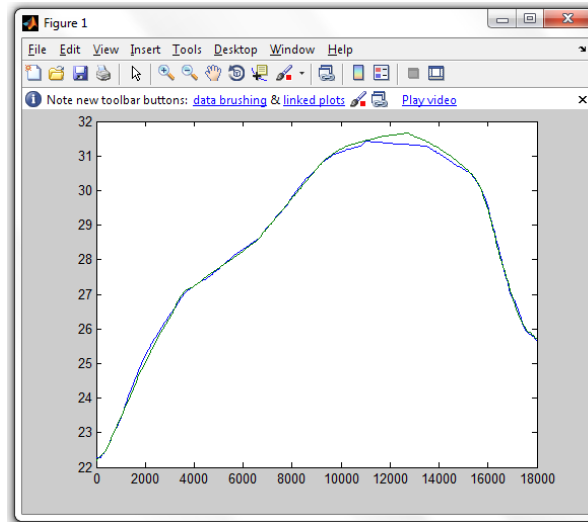
Figura 80. Diagrama de bloques del modelado algebraico.

Con la estimación de los parámetros se pudo encontrar el valor de las constantes, quedando los valores establecidos de la siguiente manera:

- ❖  $A=0.25022$
- ❖  $K_p=0.59454$
- ❖  $K_r=0.40067$
- ❖  $K_{t1}=0.055234$
- ❖  $K_{t2}=0.047491$
- ❖  $K_{t3}=0.046647$

$$T_i = \frac{(0.40067) \cdot R_o^{0.25}}{0.59454} + (0.046647 * T_o^2 + 0.047491 * T_o + 0.055234) \quad \text{Ecuación (3.6)}$$

Luego de esto se procedió a calcular la temperatura interna del modelo para realizar una comparación con la temperatura interna real del invernadero, esta evaluación se la muestra en la Figura 81.



**Figura 81.** Comportamiento del modelo algebraico vs temperatura interna real

Para saber si el modelo es aceptable se realizó el cálculo del error; teniendo como resultando un error de  $1.91^{\circ}\text{C}$  por lo que se determino que el modelo es aceptable.

### 3.10. Método de control

Con los resultados obtenidos del análisis realizado con malla polisombra, y con el estudio realizado sobre las pantallas térmicas creemos conveniente que con éste método de control asociado con otro sistema permitirá tener un mejor control del microclima del invernadero de orquídeas.

### 3.11. Estrategias de Control de la Pantalla Térmica

Para el control de la temperatura interna del invernadero se plantea algunas estrategias de control para el accionamiento de la pantalla térmica de acuerdo a las necesidades y requerimientos que se necesita en el interior del invernadero de orquídeas teniendo en cuenta las dos variables que afectan más al cultivo como son la radiación solar y la temperatura.

### *Estrategia 1*

Accionamiento de la pantalla térmica por interruptor, horario en función de la radiación solar.

### *Estrategia 2*

Accionamiento de la pantalla térmica por termostato, en función de la temperatura interna.

### *Estrategia 3*

Accionamiento de la pantalla térmica por dos condiciones simultáneas: horario y temperatura, equipos de control autómatas programables.

### *Estrategia 4*

Accionamiento de la pantalla térmica por dos condiciones simultáneas temperatura y radiación solar. Equipo de control autómatas programables, ordenador o programador con termostato e interruptor.



#### **4. DISCUSIÓN**

En el invernadero de orquídeas del Jardín Botánico “Reinaldo Espinosa” se han venido presentando algunos inconvenientes como son: el amarillamiento de las hojas, la falta de florecimiento de las orquídeas, la presencia de algunas enfermedades en las plantas, entre otros; debido a las altas y bajas temperaturas, así como a la alta radiación solar; por estas razones se tomo como modelo experimental este invernadero para realizar el estudio y posterior diseño de un controlador de temperatura, para su futura implementación si es posible. Controlando la temperatura interna del invernadero también se puede controlar en parte las demás variables que intervienen en el microclima del invernadero.

Con el monitoreo realizado se pudo obtener al valor más alto de temperatura que alcanza el invernadero durante el día que es de 33 °C y la temperatura más baja durante la noche que es de 16 °C; donde se pudo constatar que el valor de temperatura requerido durante el día para las orquídeas sobrepasa, ya que es necesaria una temperatura máxima de 30 °C, en el caso de la temperatura nocturna se pudo constatar que ésta alcanza el valor deseado que es 13 °C. Con los datos adquiridos en el primer monitoreo no se pudo encontrar un controlador que sea eficiente para el sistema, por lo cual se tuvo que realizar un segundo monitoreo donde se tomo en cuenta algunos aspectos que no fueron considerados en el primer monitoreo, principalmente el rango de medición.

Los principales aspectos tomados en consideración para el segundo monitoreo son: realizar lo desde las 9 de la mañana hasta las 4 de la tarde ya que en éste lapso de tiempo hay un mayor aporte de energía por parte de la radiación solar; la recolección de datos se la realizara cada minuto ya que en rangos más grandes hay una mayor variación y est no permite que los datos sean confiables, cambiar el equipo de medición de temperatura porque el equipo utilizado en el primer monitoreo no es recomendable para medir temperatura ambiente de invernaderos.

Para el procesado de las datas, el método más utilizado para la interpolación de datos es el lineal, pues éste permite tener mejor seguimiento de las variables, también no se trato de hacer una limpieza exhaustiva de las variables para que las datas sean lo más reales.



Para la selección del modelo matemático a utilizar se tuvo en cuenta los parámetros con los cuales se contaba, por lo que el modelado por caja negra nos resulto la mejor opción ya que este sistema es autoregresivo, lo que permite partir de los datos ya obtenidos en el modelo real para luego encontrar la función de transferencia. Para escoger la estructura más adecuada para nuestro modelo se tomo en consideración algunos aspectos que nos permitan tener un controlador adecuado para el sistema. La estructura escogidas para el sistema es la BJ 22221, ésta estructura nos resulto la mejor opción debido a que: tiene un nivel de reproducibilidad del 80, 08% que es aceptable para un modelo, el error que nos presenta es de 0,167 éste es permitido debido a el error tiene que ser menor a uno cuando el error es mayor la estructura no puede utilizada, también se analizo el diagrama de auto correlación y residuos y se pudo observar que esta estructura esta dentro de los niveles permitidos, un aspecto muy importante es que esta estructura presenta un polinomio de segundo grado el cual permite tener un mejor control del sistema. También se realizó el análisis de estabilidad, observabilidad y controlabilidad completa donde se pudo apreciar que la función de transferencia cumple con todos estos requerimientos.

En el sisotool se analizó la función de transferencia con todas las acciones de control, donde se pudo establecer que el controlador más apropiado para nuestro sistema es el PID debido a que fue una de las mejores opciones junto al controlador PI, no se escogió el controlador PI debido a que no es recomendable para sistemas térmicos como si lo es el controlador PID; ésta controlador puede ser controlado con una ganancia pequeña, por lo tanto el sistema puede ser utilizado en los diferentes equipos electrónicos que se utilizan para control automático. Así mimo el controlador es de lazo cerrado lo cual nos permita que el sistema sea predictivo, esto quiere decir que el sistema hace una diferencia entre la señal de entrada y la de salida, para obtener un diferencial y así predecir lo que va a suceder instantes más adelante y controlarlo.

En la simulación del sistema se pudo observar que el tiempo que requiere el controlador para estabilizar el sistema es de 4,8 minutos lo cual es aceptable debido a que se trata de un sistema para el control de la variable temperatura del microclima del invernadero. En el control de microclimas de invernaderos no se necesita que el sistema se inmediato debido a



que se trata volúmenes grandes de aire, además la estabilización de la temperatura depende mucho de las demás variables que interviene en el proceso, por lo que para tener un cambio de temperatura también tenemos que tener un cambio de las demás variables; por lo que el controlador diseñado es adecuado para nuestro sistema.

Para la realización del modelo algebraico se tomo como referencia un modelo ya realizado, el cual fue acoplado a los requerimientos de nuestro sistema de acuerdo a las datos obtenidos en el monitoreo, en la ecuación de balance de energía intervienen las variables de radiación solar, temperatura interna y externa; donde las variables de entrada son la radiación solar y la temperatura externa, mientras que la variable de salida es la temperatura interna. A la ecuación obtenida se le realizó algunos cambios para asemejarla al comportamiento del microclima del invernadero con algunos métodos matemático, hasta obtener la ecuación final del sistema. En el Simulink se la represento en diagrama de bloques a la ecuación y además con la ayuda del Control and Estimation Tools Manager se pudo encontrar las constantes de la ecuación del sistema, para luego reemplazadas en la ecuación final. Luego se procedió a calcular el error donde se obtuvo un error de 1.91 °C, lo cual quiere decir que a lo largo de las seis horas que se realizó el análisis tiene un error bajo, también se efectuó el análisis grafico de las curvas de temperatura interna tanto la calculada con el modelo, como la real medida en el interior del invernadero; donde se pudo apreciar que la temperatura calculada con el modelo tiene un adecuado seguimiento a la temperatura real, presentándose la parte más critica al medio día que no sobrepasa los 0.5 °C. Por lo que podemos concluir que el modelo es adecuado por lo que nos permite tener una reproducibilidad adecuada del sistema, además al tratarse del microclima de un invernadero no es necesario alta precisión como sí es necesario en otros sistemas de control. También cabe recalcar que en sistemas de control siempre se deja un diferencial de temperatura para garantizar la duración del equipo.

También en el presente proyecto se analizó el método de control haciendo énfasis en las pantallas térmicas las cuales presentan múltiples beneficios, uno de ellos es el control de temperatura de entre 2 a 4 °C con un ahorro energético del 30 al 50 % dependiendo del tipo de pantalla utilizada, si se asocia con otro sistema de control se puede tener un control del

100 % con un gran ahorro energético; las pantallas de bloqueo de luz solar tienen la ventaja de no consumir ni energía eléctrica ni ningún combustible para el control solo tienen la capacidad de almacenar la energía adquirida de la radiación solar, y solo se utiliza otro tipo de energía para extender o recoger la pantalla térmica.

Para la comprobación de las ventajas que presenta la pantalla térmica se realizó un estudio con malla polisombra ya que estas presentan algunas características semejantes a la pantalla de bloqueo de luz solar. Se efectuó éste análisis con éste tipo de malla debido a que en el mercado nacional no se pudo adquirir la pantalla térmica, teniendo como resultado de éste estudio un mejoramiento de algunos factores que influyen en el interior del invernadero como son: una mayor estabilidad de la temperatura interna ya que se redujeron las variaciones de temperatura, la temperatura máxima llegó a los 30 °C la cual se redujo con respecto a la temperatura obtenida en el monitoreo sin pantalla térmica que fue de 33 °C, la radiación interna se redujo considerablemente lo cual es una ventaja para el cultivo.

Además contamos con una variedad de pantallas térmicas las cuales pueden ser seleccionadas de acuerdo a los requerimientos del cultivo, también dependerá del equipo que se utilice para el control. Para el accionamiento de la pantalla se plantean algunas estrategias de control de acuerdo al equipamiento a utilizar que puede ser un sistema con autómatas programables o es un simple sistema de on/off.

#### 4.1. Valoración Económica y Ambiental

A continuación haremos una valoración del presente proyecto tomando en cuenta que solo se realizó el diseño del controlador

##### 4.1.1. Valoración Económica

La valoración económica del trabajo se desarrollado al culminar el presente caso de estudio el cual no será muy elevado debido a que solo se realizó el diseño, pero la ejecución del proyecto se utilizó algunos equipos y gastos que se citan en la Tabla 10, los cuales permitieron obtener el diseño del controlador.

**Tabla 10.** Valoración económica del presente proyecto

<b>Descripción</b>	<b>Valor Total (USD)</b>
Para realizar el monitoreo se necesitó de una serie de equipos, parte de éste fue proporcionado por el Área de Energía, las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables, el resto se lo adquirió como: Termómetros de vidrio, higrómetro, etc.	200,00
Para la parte correspondiente a la realización del modelo matemático y al diseño del controlador se hizo necesario la adquisición de una laptop, capacitación, adquisición de software, etc.	1000,00
Costos adicionales	100,00
<b>Costo Total del Proyecto</b>	<b>1300,00</b>

Si se desea la implementar el sistema es necesario realizar un estudio profundo de los equipos que se desea utilizar ya que la implementación de un sistema automático para el control de microclimas en invernaderos es bastante costoso. En el mercado hay muchas alternativas que se puede utilizar para controlar el microclima del invernadero, por esta razón en el presente proyecto se hace una sugerencia de un método de control como las pantallas térmicas aluminizadas las cuales tienen un costo considerable para la implementación pero presentan muchas ventajas una de las cuales es que no consumen

energía eléctrica ni combustibles como si lo hacen otros instrumentos de control, por lo cual tendremos un gran ahorro energético y no representas mayores costo después de ser implementadas como si presentan otros equipos.

#### **4.1.2. Valoración Ambiental**

El problema frecuente que presentan algunos proyectos es la falta de protección del medio ambiente, presentando ésta consecuencias negativas para el hombre, por lo cual éste factor ha adquirido una importancia social muy grande, ya que la contaminación no solo amenaza a la salud del hombres, sino la existencia de toda la humanidad.

El presente proyecto no presenta mayores agentes contaminantes debido a que solo se realizo el diseño del controlador, pero durante toda la ejecución del proyecto se tuvo en consideración la conservación del medio ambiente, por esta razón éste proyecto hace énfasis en la utilización de energías alternativas principalmente la radiación solar ya que es la que aporta con energía al invernadero en su mayor parte. Por esta razón el método de control que se propone son las pantallas térmicas debido a que estas no consumen energías contaminantes, simplemente absorben calor de la radiación solar de esta manera contribuyendo con el medio ambiente por su gran ahorro energético.

Una de las energías renovables que día a día va tomando mayor fuerza es el aprovechamiento de la energía solar térmica que no genera contaminación directa y constituye una alternativa válida y sus reservas son prácticamente inagotables para cubrir las necesidades energéticas a nivel mundial.



## 5. CONCLUSIONES

- ❖ La variable que aporta directamente con energía al invernadero es la radiación solar, debido a que el invernadero no cuenta con ninguna clase de automatización, todas las labores son realizadas de manera manual.
- ❖ Las variables climáticas fueron seleccionadas de acuerdo a las necesidades del modelo, tomando en cuenta las variables que más influyen en la ganancia o pérdida de energía del invernadero.
- ❖ El modelado matemático por caja negra permitió la obtención de la función de transferencia de la planta a partir de los datos censados ya que es un método regresivo el cual parte de los resultados del sistema para posteriormente encontrar la ecuación que describan el comportamiento del sistema.
- ❖ La selección de la estructura utilizada se la realizó tomando en consideración el grado de reproducibilidad, el error, así también como el grado del polinomio que nos brinda la estructura, los niveles de auto correlación y residuos, analizando siempre que estos parámetros estén dentro de los niveles permitidos, pues para nuestro proyecto se encontraron estructuras con un mayor grado de reproducibilidad que no cumplían con los requerimientos del sistema.
- ❖ La estructura BJ es la mejor opción para el sistema debido a que el factor de reproducibilidad del sistema con un coeficiente llegó al 91.27 %, pero su función de transferencia es de orden nueve por lo que resulta complicado su control con técnicas de control clásicas, por lo que se buscó otro coeficiente el cual permita tener una función de orden menor, teniendo como resultado el coeficiente 22121 el mismo que presenta una función de transferencia de orden dos, un coeficiente de reproducción del sistema del 80.07 % y cumple con todos los parámetros, por lo que es la mejor elección para el sistema.
- ❖ La función de transferencia del sistema cumple con los parámetros de estabilidad, controlabilidad y observabilidad completa.



- ❖ Con la acción de control PID obtuvimos el mejor lazo de control para nuestro sistema, el cual nos permitió una estabilización en un tiempo de 4,8 minutos lo que es aceptable en el control de microclimas de invernaderos.
- ❖ El controlador obtenido es de lazo cerrado lo que permite que el sistema de control sea automático y además predictivo.
- ❖ Los sistemas con realimentación permiten que la señal obtenida a la salida sea ingresada de nuevo al principio con la finalidad de realizar una diferencia que nos permita tener un ajuste del sistema, reduciendo de esta manera el error.
- ❖ El modelo algebraico obtenido es adecuado para el sistema ya que ha sido corroborados con los datos experimentales del invernadero, en el cual se pudo observar que hay un seguimiento adecuado del modelo algebraico con los datos obtenidos en el invernadero experimental.
- ❖ Uno de los métodos de control de temperatura más económicos y utilizados para sistemas de control donde no se cuenta con equipamiento electrónico son las pantallas térmicas ya que estas no consumen grandes cantidades de energía para el control contribuyendo así con la eficiencia energética.
- ❖ El método de control con pantallas térmicas no cubren con el cien por ciento del control por lo que tienen que estar asociados a otro sistema para poder tener un control completo del sistema.
- ❖ El tipo de pantalla térmica más eficiente en la actualidad son las pantallas aluminizada por sus múltiples características, permiten un control de temperatura de un 30 a un 50 %, sin ningún otro sistema de control.
- ❖ El método de control que se plantea para éste proyecto son las pantallas térmicas combinadas con otro sistema, ya que se realizó un análisis con malla polisombra teniendo como resultado el mejoramiento de las condiciones climáticas del invernadero de orquideas.





## **6. RECOMENDACIONES**

- ❖ Para realizar el censado se debe ubicar los equipos en una posición adecuada dentro y fuera del invernadero también se debe tomar en cuenta las recomendaciones que nos da el fabricante de los equipos, para garantizar la fiabilidad de los datos.
- ❖ En el monitoreo utilizar equipos que sean adecuados para la medición de las variables a censar, para no tener inconvenientes durante el monitoreo.
- ❖ Al momento de procesar los datos obtenidos es recomendable no filtrarlos o trabajarlos demasiado debido a que se pierde la fiabilidad de los datos, alejándose del comportamiento real del sistema.
- ❖ Si se realiza un nuevo modelo se recomienda tener en cuenta la mayor cantidad de variables que intervienen en el microclima del invernadero para que el modelo sea lo más exacto posible.
- ❖ Al momento de realizar un modelo matemático buscar la mejor alternativa de entre los diferentes tipos de modelo el cual se ajuste a nuestras necesidades, para así garantizar la fiabilidad del modelo.
- ❖ Si es posible utilizar funciones de transferencia de grados bajos para poder tener un mejor control de sistema.
- ❖ Cuando se realice el diseño de sistemas de control automático utilizar en la mayoría energías renovables como sea posible.
- ❖ Cuando se implementen o diseñen sistemas de control para microclimas de invernaderos, utilizar las pantallas térmicas como una parte del método de control por su gran ahorro de energético.

## 7. BIBLIOGRAFIA

### LIBROS:

- ✓ BOLTON, W. *Mecatronica (Sistemas de Control Electrónico en Ingeniería Mecánica y Eléctrica)*. Alfaomega.
- ✓ OGATA, Katsuhiko. *Ingeniería de control moderna*. (Tercera Edición) La Habana - Cuba: Prentice-Hall, 1984.

### TESIS:

- ✓ GARRIDO BULLÓN, Luis Santiago. *Identificación, estimación y control de sistemas No lineales mediante RGO*. (Tesis Doctoral) Leganés - Madrid - España: Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática, 1999.
- ✓ PÉREZ, Carlos Roberto. *Diseño para el control automático de temperatura y humedad en un invernadero de plantas ornamentales a través de un módulo programable*. (Tesis de Ingeniería Eléctrica) Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, 2006.
- ✓ RAPOSO LLOBET, Cecilia. *Evaluación experimental y modelización del control de la pantalla térmica en invernaderos*. (Tesis Doctoral) Madrid - España: Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Departamento de Ingeniería Rural, 2004.
- ✓ RODRÍGUEZ DÍAZ, Ana. *Métodos de predicción y técnicas de control de la condensación en invernaderos*. (Tesis Doctoral) Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Departamento de Ingeniería Rural, 2009.
- ✓ TAPIA PERALTA, Darwin Geovanny. *Control de temperatura y humedad relativa en un invernadero*. (Tesis de Ingeniería) Loja - Ecuador: Universidad Nacional de Loja, Área de Energía, Industrias y Recursos Naturales No Renovables, 2003.



- ✓ TOLEDO CHOJOLÁN, Steeve Erasmo. *Diseño de controladores PID en tiempo discreto, y análisis de respuesta utilizando herramientas computacionales*. (Tesis de Ingeniería) Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, 2007.

## REVISTAS:

- ✓ CALDARI JÚNIOR, Pedro. *Manejo de la luz en Invernaderos. Los beneficios de Luz de Calidad en el cultivo de Hortalizas*. Mexico: Simposio Internacional de Invernaderos, 2007.
- ✓ CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA. *Guía técnica sobre trazabilidad e incertidumbre en la medición de temperatura ambiental en laboratorios de ensayo*. 30 de Abril de 2008.
- ✓ JIMENEZ, José, Juan GAZQUEZ, y Raquel SANCHEZ. «La capacidad predictiva en los métodos Box-Jenkins y Holt-Winters: una aplicación al sector turístico.» *Revista Europea de Dirección y Economía de la Empresa*, vol. 15, núm. 3 (Universidad de Almería), 2006: 185-198.
- ✓ LAPILLI, S; FULLANA, R; SCHUGURENSKY, C; PUCHETA, J. Instituto de Automática, Universidad Nacional de San Juan. *Modelo algebraico de temperatura de un invernadero experimental*. San Juan, Argentina.
- ✓ LORENZO, Pilar. «Efectos de las variables climáticas sobre los cultivos de producción en invernaderos.» *El control del clima en invernaderos, El clima en la horticultura intensiva*. El Ejido, Almería, 2002.
- ✓ MERUANE, Carolina, y René GARREAUD. *Determinación de humedad en la atmósfera*. Abril de 2006.
- ✓ MUNDO ELECTRÓNICO (Mompín Jose coordinador). *Introducción a la bioingeniería*. Barcelona - España: MARCOMBO, S.A., 1988.
- ✓ PERALES, A., A PERDIGONES, J.L. GARCÍA, y J.I. Y ANTÓN, A. MONTERO. «El control de la condensación en invernaderos.» *Revista Horticultura*, 2003.

## PÁGINAS WEB:

- ✓ ESTERO, Santiago. *Tipos de invernaderos: Agrobot.* 2004. [http://www.agrobot.com/Info\\_tecnica/alternativos/horticultura/al\\_000010ho.htm](http://www.agrobot.com/Info_tecnica/alternativos/horticultura/al_000010ho.htm) (último acceso: 2011 de Marzo de 08).
- ✓ Copyright Infoagro Systems, S.L. *Control climático en invernaderos (1ª parte).* 2003. [http://www.infoagro.com/cond\\_climat/control\\_climatico.htm](http://www.infoagro.com/cond_climat/control_climatico.htm) (último acceso: 11 de Abril de 2011).
- ✓ *Tipos de invernaderos: Agroinformación.* 2003. [http://www.infoagro.com/tipo\\_invernaderos4.asp.htm](http://www.infoagro.com/tipo_invernaderos4.asp.htm) (último acceso: 08 de Marzo de 2011).
- ✓ Blogsmadeinspain. *Invernaderos Agrícolas: Manual para el cultivo de orquideas.* Octubre de 2010. <http://www.invernaderos-agricolas.blogspot.com/manual-para-el-cultivo-de-orquideas.html> (último acceso: 08 de Marzo de 2011).
- ✓ CIFUENTES S., Víctor Juan, y María Rafael NAVARRO C. *Determinación del índice de superficie foliar en masas forestales.* Noviembre de 1999. <http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp.htm> (último acceso: 11 de Abril de 2011).
- ✓ SÁNCHEZ, Omar. *Modelos, control y sistema de visión.* <http://omarsanchez.net/tipos.aspx> (último acceso: 04 de Abril de 2011).
- ✓ Eleazar (Zari) Gal, Departamento Agrícola. *www.polysack.com.* (último acceso: 4 de Julio de 2010).
- ✓ PROFESOR EN LINEA. *Efecto Invernadero: profesorenlinea.cl.* 04 de Abril de 2011. [http://www.profesorenlinea.cl/Ciencias/Efecto\\_invernadero.htm](http://www.profesorenlinea.cl/Ciencias/Efecto_invernadero.htm) (último acceso: 10 de Abril de 2011).



## **8. ANEXOS**





## **Anexo 1**



## **Anexo 2**





### Anexo 3

#### Datos del Primer Monitoreo

#### Monitoreo Sin Malla Polisombra

MIERCOLES 19 DE ENERO DEL 2011						
HORA	TEMPERATURA (°C)				RADIACION (W/m <sup>2</sup> )	
	T. Punto 1	T. Punto 2	T. Punto 3	T. Media	R. Directa	R. Difusa
08:00	18	18	20	18.67	113.6	38.7
08:10	19	18	20	19.00	150.4	57.6
08:20	17	18	17	17.33	621.5	125.9
08:30	18	18	17	17.67	784.6	144.3
08:40	19	18	18	18.33	662.3	90.1
08:50	18	18	17	17.67	602.3	204.9
09:00	19	18	18	18.33	772.4	250.7
09:10	27	18	18	21.00	674	92.7
09:20	20	19	18	19.00	786	307.5
09:30	20	20	19	19.67	904	342.1
09:40	21	20	19	20.00	952.8	360.5
09:50	22	20	19	20.33	806.8	111.6
10:00	22	21	20	21.00	162.7	108.2
10:10	22	21	19	20.67	169.4	95.8
10:20	21	20	19	20.00	141.7	41.7
10:30	23	21	20	21.33	997.3	119.9
10:40	25	23	20	22.67	1023	164.5
10:50	26	24	21	23.67	1108	119.9
11:00	27	25	21	24.33	1073	164.3
11:10	29	27	22	26.00	1167	164.7
11:20	24	23	20	22.33	103.6	29.1
11:30	24	23	20	22.33	176.1	53.4
11:40	28	28	22	26.00	1064	152.3
11:50	27	24	21	24.00	197.6	68.5
12:00	24	23	21	22.67	99.9	29.2
12:10	23	23	20	22.00	64.8	55
12:20	23	22	20	21.67	90	32.2
12:30	23	23	21	22.33	172.2	69.5
12:40	25	23	21	23.00	266	87.5
12:50	30	27	24	27.00	854.2	184
13:00	28	27	23	26.00	621.9	179.8



13:10	29	28	24	27.00	321.3	154.5
13:20	27	25	22	24.67	228.4	111
13:30	26	25	22	24.33	180.9	108.2
13:40	25	24	22	23.67	154.8	96.8
13:50	24	23	21	22.67	153.2	95.7
14:00	23	23	21	22.33	79.3	65.1
14:10	23	23	21	22.33	168.6	102.1
14:20	24	23	21	22.67	231.6	112
14:30	23	23	21	22.33	166.7	82.3
14:40	23	23	21	22.33	220.7	94.6
14:50	23	23	21	22.33	147.2	61.9
15:00	22	22	21	21.67	47.7	23.8
15:10	22	21	21	21.33	125.2	65.3
15:20	22	21	21	21.33	200.9	90.2
15:30	22	22	21	21.67	170.4	84.5
15:40	22	22	21	21.67	110.2	59
15:50	22	22	21	21.67	101.7	57.3
16:00	22	22	20	21.33	97.3	54
16:10	22	22	20	21.33	59.2	41.4
16:20	22	22	20	21.33	59.1	41.4
16:30	21	22	20	21.00	62.5	37.7
16:40	21	22	20	21.00	51.2	31.9
16:50	21	22	20	21.00	72.8	39.5
17:00	21	22	20	21.00	28	16.8
17:10	21	22	20	21.00	26.8	15.2
17:20	21	22	20	21.00	16.9	10.4
17:30	20	22	20	20.67	19.5	9.3
17:40	20	22	20	20.67	11	6.6
17:50	20	22	20	20.67	5.3	3.8
18:00	19	22	20	20.33	3.1	2.8



JUEVES 20 DE ENERO DEL 2011							
HORA	TEMPERATURA (°C)				RADIACION (W/m <sup>2</sup> )		
	T. Punto 1	T. Punto 2	T. Punto 3	T. Media	R. Directa	R. Difusa	R. Interna
08:00	16	16	17	16.33	112	63	-
08:10	16	17	17	16.67	96	35	-
08:20	16	17	17	16.67	45	27.3	-
08:30	17	17	18	17.33	37	22.5	-
08:40	17	17	18	17.33	52.8	34.5	-
08:50	17	18	18	17.67	79.4	47.8	-
09:00	18	18	18	18.00	137.5	76	-
09:10	19	19	18	18.67	165.6	92.4	-
09:20	19	18	18	18.33	118.9	59.6	-
09:30	19	18	18	18.33	72.6	36.3	-
09:40	18	18	18	18.00	132	65.1	-
09:50	19	18	18	18.33	122.5	80.1	-
10:00	19	19	18	18.67	173.2	77.6	-
10:10	19	19	18	18.67	64.6	37.9	-
10:20	18	18	18	18.00	885	40.7	-
10:30	19	18	18	18.33	107.1	50.7	-
10:40	19	19	18	18.67	129.1	70.4	-
10:50	19	19	19	19.00	171.8	76.2	-
11:00	20	19	19	19.33	151.4	65.4	65.5
11:10	19	19	19	19.00	119.2	72.5	52.6
11:20	19	19	19	19.00	132.2	69.5	62.1
11:30	20	19	19	19.33	150.4	76.5	72.3
11:40	20	19	19	19.33	181.5	82.1	95.6
11:50	20	20	19	19.67	173.4	98.2	72.6
12:00	20	20	19	19.67	233.3	113.6	130.9
12:10	21	20	19	20.00	256.9	119.3	131.2
12:20	21	20	19	20.00	216.5	114.9	105.3
12:30	21	20	19	20.00	208.8	105.1	100.3
12:40	21	20	19	20.00	183.4	98.3	103.3
12:50	20	20	19	19.67	78.5	40.9	45.3
13:00	20	20	19	19.67	71.2	44.1	33.5
13:10	20	19	19	19.33	54.1	33.2	33.7
13:20	20	19	19	19.33	99	45.1	45.4
13:30	20	19	19	19.33	80.7	48.5	41.5
13:40	19	19	19	19.00	52.8	32.8	23.3
13:50	19	19	19	19.00	60.5	32.6	27.9
14:00	19	19	19	19.00	43.1	26	18.5



14:10	19	19	19	19.00	31	17.4	16.1
14:20	19	19	19	19.00	38.7	19.4	17
14:30	19	19	19	19.00	40.5	19.3	15.7
14:40	19	19	19	19.00	45.9	24.3	17.6
14:50	18	19	19	18.67	59.8	32.4	28
15:00	19	19	19	19.00	48	32.2	25.8
15:10	19	19	19	19.00	57	36.5	30.8
15:20	19	19	19	19.00	46.6	27	33.7
15:30	19	19	19	19.00	60.9	34.9	33.3
15:40	19	19	19	19.00	61.1	34	35
15:50	19	19	19	19.00	37.4	20	19.5
16:00	19	19	19	19.00	33.9	20.1	19.1
16:10	19	19	19	19.00	55.3	29.3	28.4
16:20	19	19	19	19.00	80.5	44.7	44.3
16:30	19	18	18	18.33	67.2	31.4	33.5
16:40	19	19	19	19.00	20.9	12.1	12.1
16:50	19	19	19	19.00	26	12.9	10.4
17:00	18	18	18	18.00	17.6	8.5	8.8
17:10	18	18	18	18.00	6	3.7	2.7
17:20	18	18	18	18.00	13.9	8.2	6.3
17:30	18	18	18	18.00	7.5	4.4	2.7
17:40	18	18	18	18.00	3.4	2.4	1.5
17:50	18	18	18	18.00	3.1	2	0.9
18:00	18	17	17	17.33	2.7	2.1	0.6

VIERNES 21 DE ENERO DEL 2011							
HORA	TEMPERATURA (°C)				RADIACION (W/m <sup>2</sup> )		
	T. Punto 1	T. Punto 2	T. Punto 3	T. Media	R. Directa	R. Difusa	R. Interna
08:00	17.7	17.9	17.8	17.80	332.4	68.9	-
08:10	17.9	18	18	17.97	411.6	96.2	-
08:20	18.1	18.2	13.2	16.50	612.8	101.7	-
08:30	18.3	18.4	18.3	18.33	672.6	105.4	-
08:40	18.5	18.9	18.6	18.67	72.2	118	-
08:50	19.1	18.3	18.3	18.57	713	161.2	-
09:00	19.3	18.2	17.6	18.37	858.7	291.8	-
09:10	20	19.1	18.5	19.20	941.9	147.4	-
09:20	19.3	18.6	18.4	18.77	123.7	45.2	-
09:30	19.1	18.3	18	18.47	87.4	51.7	-
09:40	18.9	18.8	18.6	18.77	192.6	85.7	-



09:50	20.6	19.6	18.9	19.70	882.9	158.2	-
10:00	22	20.4	19.4	20.60	1050	163.8	550
10:10	22.8	21.1	19.6	21.17	1050	172	490
10:20	23.7	21.9	20.3	21.97	938.3	143.3	330
10:30	24.3	22.3	20.7	22.43	665.8	135.7	171
10:40	23.2	21.8	20.3	21.77	861.3	156.4	220
10:50	24.9	22.6	20.9	22.80	919.7	112.6	431
11:00	23	22.3	20.7	22.00	621.1	128.1	350
11:10	21.8	20.7	19.7	20.73	197.1	68	75.4
11:20	24.9	23.6	21.1	23.20	1076	154.7	609
11:30	27.6	25.9	21.2	24.90	1109	168.5	690
11:40	28.8	27.2	22	26.00	465.2	124.3	340
11:50	28.7	27	22.3	26.00	438.5	122.6	230
12:00	28.3	27.3	22.6	26.07	1159	177.8	730
12:10	31.3	28.2	23.5	27.67	1318	211.7	810
12:20	30.5	27.6	22.9	27.00	1273	130.8	785
12:30	27.9	26	22.3	25.40	233.2	121.6	126.8
12:40	26.9	25.7	22.2	24.93	334.8	239.3	150.6
12:50	29.5	28.2	24	27.23	1305	242.1	632.9
13:00	27.1	25.5	22.3	24.97	330.6	149.4	157
13:10	26.5	24.9	22.3	24.57	460.5	141.7	212.6
13:20	27.1	25.5	23	25.20	1034	324.3	525
13:30	29.2	26.7	23.9	26.60	1285	286.9	579.5
13:40	26.3	24.7	22.5	24.50	190.8	154.3	82
13:50	25	23.9	21.8	23.57	140.9	67.4	79.7
14:00	24.5	23.5	21.6	23.20	159.2	84.5	83.5
14:10	24.6	23.6	21.6	23.27	213.2	94.4	105.4
14:20	24.2	23.2	21.6	23.00	209.7	101.9	103.4
14:30	25.3	24	21.8	23.70	470	124.4	215.6
14:40	24.8	23.7	21.6	23.37	189.9	86.6	103
14:50	24.5	23.3	21.5	23.10	204	96	124.6
15:00	24.4	23.3	21.6	23.10	188.8	89.6	98.7
15:10	23.9	22.8	21.4	22.70	116.3	59	88.1
15:20	22.7	22.1	21	21.93	26.6	18.4	19.3
15:30	22.8	22.1	21.2	22.03	46.9	28.5	28.3
15:40	22.5	22.1	21	21.87	78.9	44.6	37.8
15:50	22.6	21.7	21	21.77	103.4	52.5	48.6
16:00	22.4	21.7	21	21.70	89	47.4	44.6
16:10	22.1	21.6	20.5	21.40	67.1	38.5	34.3
16:20	21.6	21.5	20.7	21.27	48.3	26	22.5



16:30	21.5	21.2	20.7	21.13	53.7	28.3	26.7
16:40	21.4	21.3	20.6	21.10	45.7	21.9	22
16:50	21.2	20.9	20.5	20.87	17.9	11.2	9.4
17:00	21.1	20.7	20.5	20.77	38.4	20.1	19.7
17:10	21	20.7	20.3	20.67	39.5	20	17.8
17:20	20.8	20.7	20.4	20.63	18.5	11.2	9.4
17:30	20.5	20.5	20.4	20.47	11.8	6.2	5.2
17:40	20.3	20	20.1	20.13	4.4	3	2.2
17:50	20.4	19.9	19.9	20.07	2.3	1.4	1.7
18:00	19.6	19.9	19.9	19.80	2.1	0.9	1.3

SABADO 22 DE ENERO DEL 2011							
HORA	TEMPERATURA (°C)				RADIACION (W/m <sup>2</sup> )		
	T. Punto 1	T. Punto 2	T. Punto 3	T. Media	R. Directa	R. Difusa	R. Interna
08:00	16.9	17	17.3	17.07	52	36.4	-
08:10	17	17	17.2	17.07	81.9	39.6	-
08:20	17	16.5	16	16.50	90	45.9	-
08:30	17.2	16.8	16.2	16.73	97.9	45.5	-
08:40	17.6	17.4	17.7	17.57	97.3	47.9	-
08:50	18.1	17.7	17.9	17.90	147.6	58.2	66.3
09:00	18.3	18	18.4	18.23	147.6	63.2	78.8
09:10	18.6	18.1	18.4	18.37	134.2	62	68.9
09:20	18.8	18.4	18.6	18.60	161.3	72.6	90.8
09:30	19	18.5	18.7	18.73	145.9	63.1	80
09:40	19.2	18.6	19	18.93	230.6	101.8	105.4
09:50	19.9	19.1	19	19.33	288	101.6	113
10:00	20.1	19.1	19.2	19.47	265	110.6	147
10:10	20.4	19.5	19.4	19.77	271.8	116.2	151
10:20	20.8	20	19.5	20.10	314.7	128.5	166
10:30	21.1	20.2	19.8	20.37	344.6	124.6	198.4
10:40	21.5	20.4	19.9	20.60	448.8	137.9	250
10:50	22.7	21.1	20.2	21.33	635.1	159	346
11:00	23.8	21.8	20.6	22.07	636.3	166	348
11:10	24.4	22.2	21.1	22.57	713.9	179.5	351
11:20	25	22.7	21.4	23.03	653.7	165.1	277
11:30	24.9	22.7	21.5	23.03	518.9	164.7	256
11:40	24.5	23.1	21.4	23.00	485.4	173.8	309
11:50	25	23.4	21.8	23.40	550.2	177.6	307
12:00	25.9	23.9	22.2	24.00	593.2	186.7	233



12:10	25.3	23.4	21.6	23.43	440.9	169.3	188
12:20	24.8	22.8	21.3	22.97	320.8	173.8	308
12:30	26	24.1	22.2	24.10	621.3	298.3	330
12:40	26.6	24.5	22.7	24.60	615.9	239.7	325
12:50	26.5	24.6	23	24.70	594.7	326.5	280
13:00	25.3	23.3	22.3	23.63	254.8	136.4	128
13:10	24.5	23.3	21.9	23.23	280.1	148.7	128
13:20	24.6	23.3	22.2	23.37	284.2	173.6	133
13:30	25.5	24	22.7	24.07	406.6	177.8	203
13:40	25.2	23.6	22.5	23.77	349.5	133.2	161
13:50	25.1	23.8	22.8	23.90	373.8	150.6	183
14:00	24.5	23.3	21.8	23.20	302.7	132.4	141
14:10	24.7	23.6	22.4	23.57	327.2	134.3	159
14:20	24.7	23.4	22.7	23.60	383.1	142.3	164
14:30	24.6	23.2	22.3	23.37	318	134.8	135
14:40	24.2	23	22	23.07	254.9	129.3	118
14:50	23.9	22.9	22.1	22.97	224.4	110.1	107
15:00	23.7	23	22	22.90	206.2	110	103
15:10	23.7	22.8	21.6	22.70	193.3	91.3	88
15:20	23.5	22.8	21.4	22.57	133.8	69.6	63
15:30	23.1	22.5	21.7	22.43	131.4	71.1	61.5
15:40	22.8	22.5	21.7	22.33	120.5	60.5	61
15:50	23.1	22.3	21.3	22.23	144.8	72	74
16:00	22.7	22.2	21.3	22.07	116.2	57.8	56
16:10	22.6	22.2	21.3	22.03	97.4	48.9	52
16:20	22.2	21.8	21.1	21.70	77.5	39.8	40
16:30	21.8	21.4	20.9	21.37	38.5	23.2	20
16:40	21.5	21.2	20.5	21.07	27.6	16.1	13.5
16:50	21.2	20.8	20.4	20.80	23.4	12.9	11.5
17:00	20.9	20.7	20.4	20.67	22.5	12.8	12.7
17:10	20.7	20.7	20.5	20.63	26.3	13.9	13.7
17:20	20.6	20.3	20.3	20.40	10.6	6.8	6.5
17:30	20.4	20.2	19.6	20.07	26.2	12.6	12
17:40	20.4	20.5	20.8	20.57	11.8	7.5	5.6
17:50	20.2	20.2	20.3	20.23	9	4.9	4.5
18:00	20.1	20.1	20	20.07	5.6	2.8	3



### Monitoreo con Malla Polisombra

DOMINGO 23 DE ENERO DEL 2011							
HORA	TEMPERATURA (°C)				RADIACION (W/m <sup>2</sup> )		
	T. Punto 1	T. Punto 2	T. Punto 3	T. Media	R. Directa	R. Difusa	R. Interna
08:00	17.6	17.7	17.8	17.70	68.9	29.6	-
08:10	17.6	17.8	18.1	17.83	96.5	44	-
08:20	17.8	17.4	16.9	17.37	108.6	47	-
08:30	18	18	18.2	18.07	127	57.1	-
08:40	18.4	18.2	18.5	18.37	133.9	54.2	-
08:50	18.7	18.3	18.8	18.60	161.5	64.8	-
09:00	19.6	18.7	19.1	19.13	257.1	96.9	-
09:10	19.7	18.9	19.1	19.23	419	103.7	-
09:20	20.4	19.3	19.2	19.63	473	108.6	-
09:30	20.9	19.7	19.4	20.00	518.5	111	-
09:40	21.3	20	19.7	20.33	388.9	96.4	-
09:50	21.4	20.7	19.4	20.50	255.4	111.3	-
10:00	21.7	19.9	19.4	20.33	247.3	94.5	63.4
10:10	21.8	20.3	19.5	20.53	651.6	137.2	143.8
10:20	22.7	20.9	20	21.20	458.5	112.7	104.5
10:30	23.6	21.2	20.1	21.63	893.5	179.4	193.2
10:40	23.9	21.5	20	21.80	842.9	160	185.7
10:50	24.5	22	20.1	22.20	908.9	173.1	213.4
11:00	24.7	22.2	20.6	22.50	942.7	169.8	243
11:10	25.5	22.8	20.5	22.93	941.1	166.6	254
11:20	25.4	23	21.1	23.17	1002	179.7	265
11:30	25.8	23.5	21.6	23.63	394.7	120.7	88
11:40	25.7	23.3	21	23.33	591.2	120.4	105
11:50	26.3	23.7	21.5	23.83	456.5	119.6	110
12:00	25.9	23.5	21.5	23.63	302.2	105.6	93
12:10	26.8	24	22.4	24.40	1007	183.5	240
12:20	25.5	23.5	21.6	23.53	655.4	157.6	317
12:30	27.9	24.3	22.6	24.93	1219	216.1	340
12:40	29.6	25.7	22.7	26.00	1175	214.9	320
12:50	30.5	26.4	23.6	26.83	1061	242.6	290
13:00	30.3	26.3	24	26.87	990.6	211.4	264
13:10	29.8	26.7	23.6	26.70	826.8	184.5	231
13:20	29.6	27	23.8	26.80	864.8	200.5	190
13:30	29.9	27.8	24	27.23	885.9	207.5	205
13:40	29.8	27.6	24.1	27.17	687.9	193.5	140





13:50	30.3	27.7	23.6	27.20	872.8	193.4	153
14:00	29.7	27.9	24	27.20	900.1	161.7	150
14:10	30.1	28	23.7	27.27	900	251.3	161
14:20	30.2	28.1	23.2	27.17	759.5	260.4	113
14:30	28.8	27	22.9	26.23	518.7	188.7	55
14:40	27.3	26.1	22.8	25.40	206.3	98.7	46.8
14:50	26.9	25.4	22.4	24.90	191.2	97	44
15:00	25.9	25	22.4	24.43	195.8	96.4	43
15:10	25.9	24.7	22.1	24.23	179.9	79.9	36.4
15:20	25.6	24.5	22	24.03	163.1	68.5	36
15:30	25.2	24	21.7	23.63	140.7	64	32.4
15:40	24.7	23.9	21.7	23.43	115.7	55.6	26.2
15:50	24.5	23.5	21.6	23.20	97.5	49.2	22.8
16:00	24.3	23.4	21.7	23.13	103.3	49.7	22
16:10	23.8	23.1	21.3	22.73	100.5	51.2	22.8
16:20	23.7	22.8	21.2	22.57	69.6	31.1	14.5
16:30	23.4	22.7	21.3	22.47	50	25.1	9.5
16:40	23.1	22.7	21.4	22.40	32.8	16.5	6.5
16:50	22.8	22.2	21.2	22.07	33.5	14.1	6.4
17:00	22.4	22.2	21.1	21.90	28.7	13.7	6.6
17:10	22.3	22	21	21.77	22.1	11	4.8
17:20	22	21.9	21.2	21.70	16.8	8.5	3.3
17:30	21.8	21.6	20.8	21.40	18.1	9.4	4.3
17:40	21.6	21.7	21.3	21.53	18.4	9.4	3
17:50	21.7	22.6	21.3	21.87	22.5	9.8	2.7
18:00	21.4	22.5	21.1	21.67	11.6	6.2	1.7

LUNES 24 DE ENERO DEL 2011							
HORA	TEMPERATURA (°C)				RADIACION (W/m <sup>2</sup> )		
	T. Punto 1	T. Punto 2	T. Punto 3	T. Media	R. Directa	R. Difusa	R. Interna
08:00	17.9	18.4	18.4	18.23	400.9	42.5	-
08:10	18.1	18.5	18.6	18.40	763.9	46.5	-
08:20	18.3	18.7	18.7	18.57	651.6	51.5	-
08:30	18.4	18.6	18.3	18.43	801.7	93.4	-
08:40	19.3	18.6	18.3	18.73	861.7	113.3	-
08:50	19.3	18.9	18.6	18.93	355.6	77.4	-
09:00	19.6	18.8	18.4	18.93	743.8	114.7	-
09:10	19.8	19	18.6	19.13	967.8	125.1	-
09:20	20	18.9	18.8	19.23	281.9	93.1	-



09:30	20.9	19.5	19.2	19.87	1126	142.7	-
09:40	20.9	19.7	19.3	19.97	450	119.3	-
09:50	21.3	19.9	19.3	20.17	594.2	111.3	-
10:00	21.6	20.1	19.4	20.37	137.9	41.8	58
10:10	22.2	20.3	19.7	20.73	1107	115.9	245
10:20	23.1	21.2	20.2	21.50	1148	120.4	265
10:30	23.9	21.4	20.2	21.83	1097	120.7	270
10:40	24.1	22.1	20.6	22.27	1086	93.9	290
10:50	25	22.4	20.8	22.73	1101	120.7	295
11:00	25.4	23.1	22.2	23.57	1092	117.4	305
11:10	26	23.3	21.4	23.57	1102	140.1	307
11:20	26.2	23.8	21.7	23.90	1142	121.2	310
11:30	26.6	24	23.3	24.63	1098	124.9	322
11:40	27.3	24.1	22.7	24.70	1162	124.8	324
11:50	27.9	25.1	23.2	25.40	1107	114.3	310
12:00	28.5	27.6	23.2	26.43	1169	123.6	303
12:10	29.8	28.7	23.9	27.47	1152	133.7	290
12:20	30.4	29.1	24.4	27.97	1125	127.3	320
12:30	31.1	29.5	24	28.20	1162	124.5	330
12:40	31.2	29.6	24.4	28.40	1173	158	322
12:50	30.1	28.8	24.2	27.70	203.7	102.2	270
13:00	28.9	27.8	23.3	26.67	889.4	123.8	236
13:10	29.3	28	23.3	26.87	436.9	130.9	114
13:20	29.8	29.8	25.3	28.30	1143	186.8	315
13:30	30.3	29.2	25.4	28.30	1000	152.7	150
13:40	30.9	29.9	25	28.60	1165	190.3	166
13:50	31.3	30.7	25.2	29.07	1102	149.4	250
14:00	30.7	30.7	25	28.80	1111	160.3	204
14:10	31.6	29.4	24.2	28.40	1217	240.9	281
14:20	29.4	27.3	23.9	26.87	82.5	35.7	18
14:30	28	26.6	23.3	25.97	1062	154.4	213.4
14:40	27.1	26.1	22.8	25.33	901.7	101.5	152.4
14:50	26.7	25.6	23.2	25.17	481.9	71.7	72
15:00	26.1	25.2	23.1	24.80	366.4	65.3	50
15:10	25.9	24.8	22.5	24.40	127.8	71.7	20.8
15:20	25.6	24.6	22.5	24.23	117	59	28
15:30	25.6	24.5	22.9	24.33	115.5	64.1	26
15:40	25	24.2	22.7	23.97	83.8	51.1	20
15:50	24.8	24	22.2	23.67	108.6	56.4	23
16:00	24.8	23.8	22.1	23.57	106.4	57.1	22.3



16:10	24.7	23.7	22.2	23.53	107	56.1	-
16:20	24.5	23.6	22.1	23.40	103.4	54.9	-
16:30	24.1	23.4	22	23.17	80.3	65.1	-
16:40	23.9	22.9	21.8	22.87	72.3	56.2	-
16:50	23.6	22.9	21.7	22.73	59.1	33.9	-
17:00	23.5	22.6	21.6	22.57	65.8	35	-
17:10	23.3	22.7	21.8	22.60	59.6	38.5	-
17:20	23	22.6	21.6	22.40	51.2	26	-
17:30	22.8	22.1	21.2	22.03	59.3	28.9	-
17:40	22.6	22.3	21.5	22.13	54.6	30.2	-
17:50	22.6	21.8	20.7	21.70	46.6	23.8	-
18:00	22.6	22.2	21.5	22.10	33.2	17.1	-

MARTES 25 DE ENERO DEL 2011							
HORA	TEMPERATURA (°C)				RADIACION (W/m <sup>2</sup> )		
	T. Punto 1	T. Punto 2	T. Punto 3	T. Media	R. Directa	R. Difusa	R. Interna
08:00	17.4	17.5	17.4	17.43	428.2	103.4	-
08:10	17.5	17.7	17.6	17.60	562.7	125.2	-
08:20	17.7	17.7	17.8	17.73	635.3	113.3	-
08:30	17.9	17.9	17.9	17.90	797.7	123.4	-
08:40	18.4	18.1	18.2	18.23	633	76.2	-
08:50	19.3	18.5	18.5	18.77	517.2	106.9	-
09:00	20	18.7	18.7	19.13	838.7	107.3	-
09:10	20.2	19	18.8	19.33	705.1	104.3	-
09:20	20.6	19.3	19	19.63	853.3	121.3	-
09:30	21.3	19.9	19.3	20.17	810.8	123.4	-
09:40	21.3	20	19.4	20.23	401.9	113.4	-
09:50	21	19.8	19.3	20.03	431	99.5	-
10:00	21.3	20	19.7	20.33	535.9	152	103.4
10:10	21.5	20.3	19.7	20.50	630.2	139.8	110
10:20	22.3	20.8	20.1	21.07	676.7	136.3	169
10:30	22.5	20.8	20	21.10	446.8	117.6	102.3
10:40	22.4	20.9	20.7	21.33	600.9	124.4	113.4
10:50	22.7	21.3	20.8	21.60	594.1	119	111
11:00	23.2	21.5	20.6	21.77	727.3	126	230
11:10	24.9	22.6	21.3	22.93	1098	147.4	310
11:20	25.7	23	21.6	23.43	960.9	133.2	258
11:30	25.8	23.3	21.7	23.60	802.1	131.9	159
11:40	25.4	23.4	22.1	23.63	654.9	145.4	177



11:50	25.6	23.3	22.3	23.73	703.4	167.7	175
12:00	26	23.7	22.4	24.03	684.6	150	173
12:10	27.6	24.5	23.3	25.13	1009	146	300
12:20	28.4	25	23.5	25.63	891	164.2	229
12:30	27.6	24.9	23.2	25.23	922.7	158	228
12:40	27.9	25.6	23.2	25.57	832.2	137.5	220
12:50	29.3	26	23.9	26.40	799.7	138.2	204
13:00	28.6	26.1	23.6	26.10	715.3	157.4	190
13:10	27.8	25.7	23.5	25.67	612.4	145.8	184
13:20	27.9	25.6	23.2	25.57	618.1	168.9	120
13:30	27.3	25.6	23.4	25.43	614.3	143.9	155
13:40	27.4	25.7	23.6	25.57	619.7	143.9	154
13:50	27.9	26.1	23.6	25.87	786.2	159.3	244
14:00	28.5	26.6	23.7	26.27	891	156.4	215
14:10	28.8	26.9	23.6	26.43	975.9	121.7	208
14:20	28.7	26.2	23.3	26.07	758	103.3	150
14:30	27.3	25.4	23.3	25.33	472.4	83.2	90
14:40	26.4	24.6	23.2	24.73	249.2	84.6	45.5
14:50	25.8	24.6	23.3	24.57	241.9	85.5	42.7
15:00	25.6	24.3	23.3	24.40	197.6	84.4	65.4
15:10	25	23.8	22.3	23.70	134.3	70.6	31
15:20	24.7	23.6	22.4	23.57	262.5	74.8	25.6
15:30	24.6	23.5	21.9	23.33	192.4	76.2	22.5
15:40	24.4	23.5	22.2	23.37	112.8	70.5	22.2
15:50	24.4	23.5	22.2	23.37	139.9	79.3	22.5
16:00	24.4	23.5	21.9	23.27	148.4	75.8	28
16:10	24.1	23.1	22	23.07	134.2	63.1	25.3
16:20	24	23	21.9	22.97	124.6	62.5	21.6
16:30	23.7	22.7	21.8	22.73	99.6	49.5	19
16:40	23	22.1	21.3	22.13	83.6	42	17.2
16:50	22.7	21.9	21.2	21.93	59.3	34.1	13.5
17:00	22.6	22.1	21.5	22.07	48.2	32.9	11
17:10	22.5	22	21.5	22.00	78.6	39.5	12.6
17:20	22.6	22	21.7	22.10	73.9	35.6	11.3
17:30	22.4	22	21.1	21.83	61	26.8	10.2
17:40	22.1	21.6	21.1	21.60	44.6	23.9	9
17:50	21.9	21.3	20.3	21.17	19.7	19	4.6
18:00	21.3	21.2	20.9	21.13	27.9	14.9	6.7



MIÉRCOLES 19 DE ENERO DEL 2011						
HORA	TEMPERATURA (°C)				RADIACION (W/m <sup>2</sup> )	
	T. Punto 1	T. Punto 2	T. Punto 3	T. Media	R. Directa	R. Difusa
08:00	16.7	16.7	17.5	16.97	65.8	21.5
08:10	17	16.8	17.5	17.10	51.4	18.7
08:20	17.1	17	17.8	17.30	50	17.9
08:30	16.9	16.9	17.7	17.17	63.1	19.9
08:40	17.2	16.9	17.8	17.30	47.5	16.8
08:50	17.1	17.2	17.8	17.37	24.1	6.7
09:00	17.1	17.1	18.2	17.47	57.5	20.7
09:10	17.8	17.4	18.3	17.83	151.8	56.2
09:20	18.6	17.8	18.5	18.30	194.4	67.7
09:30	19	17.9	18.6	18.50	271.7	101.9
09:40	19.5	18.2	18.8	18.83	129.5	54.1
09:50	19.2	18.5	18.7	18.80	111	48.4
10:00	19.2	18.5	18.9	18.87	209.8	59.5
10:10	19.4	18.5	18.8	18.90	104.9	43.4
10:20	20.1	19	19.7	19.60	189.7	61.1
10:30	20.3	19	19.3	19.53	167.9	62.5
10:40	19.9	19.2	20.2	19.77	133.5	66.6
10:50	20.5	19.6	20.4	20.17	590.7	137.7
11:00	21.3	19.8	20.3	20.47	183.5	65.1
11:10	20.7	19.5	19.8	20.00	190.6	66.4
11:20	20.6	19.7	20.1	20.13	548.7	118.4
11:30	21.2	19.9	20.3	20.47	217.8	79.7
11:40	20.9	20.1	20.6	20.53	282.6	91.5
11:50	21.3	20.7	20.3	20.77	862	222.3
12:00	22.6	21.4	21.1	21.70	402.5	122
12:10	22.5	20.8	20.9	21.40	756.1	183.9
12:20	22.2	20.8	20.4	21.13	203.9	62.6
12:30	21.5	20.6	20.6	20.90	200	74.9
12:40	21.5	20.6	20.6	20.90	204.4	71.5
12:50	21.7	21	20.8	21.17	242.4	82.3
13:00	22.1	21.4	21.4	21.63	312.6	93.5
13:10	23.3	22	21.7	22.33	602.5	121.4
13:20	23.8	22.4	21.9	22.70	320	109.7
13:30	23.4	22.4	21.7	22.50	267.9	98.6
13:40	23.5	22.6	21.7	22.60	257.9	84.3
13:50	24.6	22.6	21.8	23.00	283.4	102.5
14:00	24.2	22.6	21.7	22.83	217.1	98.9



14:10	23.3	22.5	21.5	22.43	237.4	101.3
14:20	23.3	22.6	21.5	22.47	234.3	106.4
14:30	23.8	22.9	21.9	22.87	307	119.3
14:40	23.9	23.1	21.9	22.97	252.3	117.3
14:50	24.3	23.2	22.2	23.23	286.9	121.1
15:00	24.3	23.4	22.4	23.37	220.9	104.6
15:10	24.2	23.5	22.6	23.43	202.8	89.7
15:20	24.2	23.4	22.6	23.40	179.7	81.3
15:30	24	23.7	23.2	23.63	210.4	98.4
15:40	24.6	23.9	23.3	23.93	209.4	97.1
15:50	24.7	23.9	23.2	23.93	185.9	86.9
16:00	24.7	23.9	23.6	24.07	124.6	62.2
16:10	24.3	23.9	23.5	23.90	105.9	40.9
16:20	24.2	24	23.4	23.87	69.7	30.5
16:30	24.2	24.1	23.7	24.00	54.4	23.3
16:40	24.1	24.1	23.8	24.00	31.5	14.2
16:50	24	24.2	24.1	24.10	23.5	9.7
17:00	24.1	24.2	24.4	24.23	25.2	11.7
17:10	24.1	24.4	24.6	24.37	33.1	13.4
17:20	25.2	25.3	25.6	25.37	31.5	11.3
17:30	24.3	24.6	24.8	24.57	26.7	11.4
17:40	20.3	19.9	20.2	20.13	20.3	8.3
17:50	24.2	24.7	25	24.63	12.2	4.8
18:00	24.4	24.6	24.9	24.63	10.8	4.1



## Anexo 4

### Data Utilizada para la Identificación

MARTES 1 DE MARZO DEL 2011						
HORA	T1 (Entrada)	T2 (Media)	T3 (Fondo)	Temp_Media	TE (Externa)	Rad_Directa
09:00:00	18.3	17.9	18	18.07	15.1	476.5
09:01:00	18.3	17.9	18.1	18.10	15.2	576.8
09:02:00	18.4	18	18.1	18.17	15.2	483.3
09:03:00	18.5	18	18.2	18.23	15.2	530.5
09:04:00	18.5	18.1	18.2	18.27	15.3	656.9
09:05:00	18.6	18.1	18.1	18.27	15.3	331
09:06:00	18.6	18.1	18.2	18.30	15.3	377.6
09:07:00	18.7	18.2	18.3	18.40	15.4	460.5
09:08:00	18.7	18.2	18.3	18.40	15.4	443.8
09:09:00	18.8	18.3	18.4	18.50	15.5	400.7
09:10:00	18.9	18.3	18.4	18.53	15.4	366.4
09:11:00	18.9	18.4	18.5	18.60	15.5	408.2
09:12:00	19	18.5	18.6	18.70	15.6	500.1
09:13:00	19.1	18.6	18.7	18.80	15.6	626.8
09:14:00	19.2	18.7	18.8	18.90	15.7	741
09:15:00	19.3	18.7	18.8	18.93	15.7	534
09:16:00	19.3	18.7	18.9	18.97	15.7	509
09:17:00	19.4	18.8	18.9	19.03	15.8	473.8
09:18:00	19.4	18.8	19	19.07	15.8	421.1
09:19:00	19.5	18.8	19	19.10	15.8	420.3
09:20:00	19.6	18.9	19	19.17	15.9	420.7
09:21:00	19.6	18.9	19.1	19.20	15.8	459.7
09:22:00	19.7	19	19.1	19.27	15.9	575.1
09:23:00	19.8	19.1	19.2	19.37	16	591.8
09:24:00	19.9	19.2	19.3	19.47	16	535.2
09:25:00	20	19.2	19.3	19.50	16.1	470.5
09:26:00	20	19.2	19.4	19.53	16.1	401.7
09:27:00	20.1	19.3	19.5	19.63	16.2	443.5
09:28:00	20.1	19.3	19.4	19.60	16.2	389.2
09:29:00	20.2	19.4	19.5	19.70	16.2	417.7
09:30:00	20.3	19.4	19.5	19.73	16.3	509.8
09:31:00	20.4	19.5	19.6	19.83	16.3	538.3
09:32:00	20.5	19.6	19.7	19.93	16.4	680.3
09:33:00	20.6	19.7	19.8	20.03	16.4	680.3



09:34:00	20.7	19.7	19.9	20.10	16.5	843.1
09:35:00	20.8	19.8	20	20.20	16.6	452.1
09:36:00	20.9	19.9	20.1	20.30	16.6	471.8
09:37:00	20.9	19.9	20.1	20.30	16.7	535.1
09:38:00	21	20	20.2	20.40	16.8	516.2
09:39:00	21.1	20.1	20.3	20.50	16.9	510.8
09:40:00	21.2	20.2	20.4	20.60	16.9	459.8
09:41:00	21.3	20.3	20.5	20.70	17	413.8
09:42:00	21.4	20.4	20.6	20.80	17.1	401.7
09:43:00	21.5	20.5	20.6	20.87	17	385.2
09:44:00	21.6	20.6	20.7	20.97	17.1	401.5
09:45:00	21.7	20.7	20.8	21.07	17.1	495.3
09:46:00	21.8	20.8	20.9	21.17	17.2	508.1
09:47:00	21.9	20.9	21	21.27	17.2	484.2
09:48:00	22	20.9	21.1	21.33	17.3	463.1
09:49:00	22.1	21	21.1	21.40	17.3	447.1
09:50:00	22.2	21	21.2	21.47	17.4	454.7
09:51:00	22.3	21.1	21.3	21.57	17.4	470.6
09:52:00	22.3	21.1	21.3	21.57	17.4	282.3
09:53:00	22.3	21.2	21.4	21.63	17.5	537.9
09:54:00	22.4	21.3	21.5	21.73	17.6	550.4
09:55:00	22.4	21.4	21.6	21.80	17.7	603.2
09:56:00	22.5	21.5	21.7	21.90	17.7	650.6
09:57:00	22.6	21.6	21.8	22.00	17.8	593.3
09:58:00	22.6	21.7	21.9	22.07	17.9	541.9
09:59:00	22.6	21.8	21.9	22.10	17.9	588.4
10:00:00	22.7	21.9	22	22.20	18	646.2
10:01:00	22.7	21.8	22	22.17	17.9	653.7
10:02:00	22.7	21.9	22.1	22.23	18	737.6
10:03:00	22.8	22	22.2	22.33	18	642.8
10:04:00	22.8	22	22.3	22.37	18	643.9
10:05:00	22.8	22	22.4	22.40	18.1	688.4
10:06:00	22.9	22.1	22.4	22.47	18.1	697.6
10:07:00	22.9	22.2	22.5	22.53	18.2	724.2
10:08:00	23	22.2	22.5	22.57	18.2	746.5
10:09:00	23	22.3	22.6	22.63	18.3	687.2
10:10:00	23.1	22.3	22.7	22.70	18.3	607
10:11:00	23.2	22.4	22.6	22.73	18.3	634.4
10:12:00	23.3	22.4	22.7	22.80	18.4	812.4
10:13:00	23.4	22.5	22.7	22.87	18.5	799.3





10:14:00	23.5	22.6	22.8	22.97	18.5	818.4
10:15:00	23.6	22.7	22.8	23.03	18.5	865.8
10:16:00	23.6	22.8	22.9	23.10	18.6	933.1
10:17:00	23.7	22.9	23	23.20	18.6	923.5
10:18:00	23.8	23	23.1	23.30	18.7	927.6
10:19:00	23.9	23.1	23.1	23.37	18.8	912.9
10:20:00	24	23.2	23.2	23.47	18.8	956.1
10:21:00	24.1	23.4	23.4	23.63	18.9	972.3
10:22:00	24.3	23.5	23.6	23.80	19	953.6
10:23:00	24.5	23.7	23.8	24.00	19.1	997.7
10:24:00	24.6	23.9	23.9	24.13	19.2	713.9
10:25:00	24.7	24	24	24.23	19.3	933.1
10:26:00	24.8	24	24.1	24.30	19.4	936
10:27:00	24.9	24.1	24.3	24.43	19.5	996.3
10:28:00	25	24.2	24.5	24.57	19.6	989
10:29:00	25.2	24.2	24.6	24.67	19.7	1021
10:30:00	25.3	24.3	24.7	24.77	19.8	1017
10:31:00	25.3	24.3	24.8	24.80	19.8	1052
10:32:00	25.4	24.4	24.9	24.90	19.9	1042
10:33:00	25.4	24.5	25	24.97	19.9	1029
10:34:00	25.5	24.6	25.1	25.07	20	1042
10:35:00	25.5	24.7	25.1	25.10	20	972.7
10:36:00	25.6	24.7	25.2	25.17	20	1067
10:37:00	25.7	24.8	25.2	25.23	20	1040
10:38:00	25.7	24.9	25.3	25.30	19.8	1010
10:39:00	25.8	24.9	25.3	25.33	20	1078
10:40:00	25.8	25	25.4	25.40	20.1	999
10:41:00	25.9	25.1	25.5	25.50	20.2	1123
10:42:00	26	25.3	25.6	25.63	20.3	1101
10:43:00	26.1	25.5	25.7	25.77	20.4	1060
10:44:00	26.2	25.7	25.8	25.90	20.6	1088
10:45:00	26.3	25.8	25.9	26.00	20.8	1094
10:46:00	26.4	25.8	25.9	26.03	20.7	1032
10:47:00	26.5	25.9	25.8	26.07	20.7	979.3
10:48:00	26.6	26	25.9	26.17	20.8	1012
10:49:00	26.7	26	26	26.23	20.8	1078
10:50:00	26.8	26.1	26.1	26.33	20.9	1021
10:51:00	26.9	26.2	26.1	26.40	20.9	1109
10:52:00	26.9	26.3	26.2	26.47	21	1099
10:53:00	27	26.4	26.3	26.57	21	1060



10:54:00	27.2	26.5	26.3	26.67	21.1	1085
10:55:00	27.3	26.6	26.4	26.77	21	982.6
10:56:00	27.4	26.6	26.5	26.83	21.1	1111
10:57:00	27.5	26.7	26.6	26.93	21.2	1104
10:58:00	27.6	26.8	26.7	27.03	21.3	1041
10:59:00	27.7	26.9	26.8	27.13	21.3	1071
11:00:00	27.7	27	26.8	27.17	21.4	1120
11:01:00	27.7	27	26.8	27.17	21.4	1134
11:02:00	27.8	27	26.9	27.23	21.5	1128
11:03:00	27.9	27.1	26.9	27.30	21.4	1095
11:04:00	27.9	27.1	27	27.33	21.3	1166
11:05:00	28	27.1	26.9	27.33	21.2	1112
11:06:00	28	27.1	26.9	27.33	21.3	1193
11:07:00	27.9	27.1	27	27.33	21.4	1172
11:08:00	27.9	27	26.9	27.27	21.3	1172
11:09:00	27.9	27	26.9	27.27	21.3	1227
11:10:00	27.9	27	26.9	27.27	21	142.6
11:11:00	27.9	27	26.9	27.27	21.2	532.7
11:12:00	28	27	26.8	27.27	21.3	1167
11:13:00	28	27	26.8	27.27	21.4	1156
11:14:00	28.1	27	26.9	27.33	21.4	805.7
11:15:00	28.1	27	27	27.37	21.3	244.2
11:16:00	28.2	26.9	27	27.37	21.4	654.7
11:17:00	28.2	27	26.9	27.37	21.5	1090
11:18:00	28.3	27.1	26.8	27.40	21.6	1092
11:19:00	28.3	27.1	26.9	27.43	21.8	1250
11:20:00	28.4	27	27	27.47	21.8	419.8
11:21:00	28.3	27	26.9	27.40	21.6	397.8
11:22:00	28.2	26.9	26.9	27.33	21.4	387.7
11:23:00	28.1	26.9	26.8	27.27	21.1	295.7
11:24:00	28	26.8	26.7	27.17	20.9	146.8
11:25:00	27.9	26.8	26.7	27.13	20.5	242.6
11:26:00	27.9	26.7	26.7	27.10	20.8	652.9
11:27:00	27.9	26.8	26.7	27.13	21.1	1238
11:28:00	28	26.8	26.8	27.20	21.3	1188
11:29:00	28	26.9	26.9	27.27	21.6	1155
11:30:00	28.1	27	26.9	27.33	21.8	1261
11:31:00	28.1	27	27	27.37	22	1042
11:32:00	28.1	26.9	26.9	27.30	21.9	197.1
11:33:00	27.9	26.9	26.8	27.20	21.8	327.8



11:34:00	28	27	26.9	27.30	22	1187
11:35:00	28.1	27.1	27	27.40	22	1167
11:36:00	28.3	27.3	27.2	27.60	22	1172
11:37:00	28.5	27.4	27.4	27.77	21.8	1194
11:38:00	28.6	27.6	27.5	27.90	22	1187
11:39:00	28.7	27.7	27.6	28.00	22.1	1223
11:40:00	28.8	27.7	27.7	28.07	22	267
11:41:00	28.7	27.6	27.6	27.97	21.7	186.8
11:42:00	28.6	27.5	27.5	27.87	21.5	195.1
11:43:00	28.4	27.3	27.3	27.67	21.3	210.4
11:44:00	28.2	27.1	27.1	27.47	21.3	989.1
11:45:00	28	27	26.8	27.27	21.3	1048
11:46:00	27.9	26.8	26.6	27.10	21.1	342.8
11:47:00	27.7	26.6	26.3	26.87	21	128.3
11:48:00	27.5	26.4	26.1	26.67	20.8	125.4
11:49:00	27.2	26.1	25.9	26.40	20.6	137.4
11:50:00	27	25.9	25.7	26.20	20.4	165.8
11:51:00	26.8	25.7	25.5	26.00	20.3	177.5
11:52:00	26.5	25.5	25.3	25.77	20.2	143.5
11:53:00	26.2	25.3	25.1	25.53	20.2	125.5
11:54:00	26	25.1	24.9	25.33	20.1	136.9
11:55:00	25.8	25	24.8	25.20	20	152.9
11:56:00	25.8	25.1	24.9	25.27	20.1	183.7
11:57:00	25.9	25.2	24.8	25.30	20.1	171.7
11:58:00	25.9	25.3	24.9	25.37	20.2	207.1
11:59:00	26	25.4	25	25.47	20.3	455.9
12:00:00	26	25.5	25.1	25.53	20.5	1217
12:01:00	26.1	25.6	25.3	25.67	20.6	261.1
12:02:00	26.3	25.7	25.4	25.80	20.8	813.3
12:03:00	26.4	25.7	25.5	25.87	20.9	235.3
12:04:00	26.5	25.8	25.5	25.93	21	216.8
12:05:00	26.5	25.8	25.6	25.97	21	100.8
12:06:00	26.5	25.7	25.6	25.93	20.9	102.6
12:07:00	26.4	25.6	25.5	25.83	20.8	125.4
12:08:00	26.2	25.5	25.4	25.70	20.7	234.3
12:09:00	26.1	25.4	25.3	25.60	20.6	174.5
12:10:00	26	25.3	25.2	25.50	20.6	210.2
12:11:00	26	25.3	25.2	25.50	20.8	815.2
12:12:00	25.9	25.3	25.3	25.50	20.8	213.3
12:13:00	26	25.2	25.4	25.53	20.9	129.9



12:14:00	26.2	25.3	25.5	25.67	20.9	134.5
12:15:00	26.3	25.4	25.7	25.80	21	129.7
12:16:00	26.5	25.7	26.1	26.10	21.1	311.4
12:17:00	26.8	26	26.4	26.40	21.2	206.4
12:18:00	27	26.4	26.9	26.77	21.4	1185
12:19:00	27.4	26.8	27.5	27.23	21.6	1163
12:20:00	27.8	27.2	27.9	27.63	21.8	1172
12:21:00	28.1	27.4	28.2	27.90	21.8	906.4
12:22:00	28.4	27.5	28.5	28.13	21.9	1132
12:23:00	28.7	27.7	28.8	28.40	22	1160
12:24:00	29.1	27.9	29	28.67	22.1	1156
12:25:00	29.5	28.1	29.3	28.97	22.1	1145
12:26:00	29.9	28.5	29.6	29.33	22.2	1070
12:27:00	30.3	28.8	29.9	29.67	22.2	1053
12:28:00	30.7	29.1	30.2	30.00	22.2	1075
12:29:00	31.1	29.4	30.5	30.33	22	803.3
12:30:00	31.5	29.7	30.7	30.63	21.8	850.4
12:31:00	31.6	30	30.8	30.80	21.9	987.4
12:32:00	31.5	30.1	31	30.87	22	1099
12:33:00	31.4	30.2	31.2	30.93	22	1110
12:34:00	31.4	30.3	31.4	31.03	22.1	1049
12:35:00	31.3	30.4	31.5	31.07	22	1035
12:36:00	31.3	30.6	31.6	31.17	22.1	972.8
12:37:00	31.4	30.7	31.6	31.23	22.1	927.3
12:38:00	31.4	30.8	31.7	31.30	22	994.7
12:39:00	31.5	30.9	31.8	31.40	22	972.1
12:40:00	31.5	31	31.8	31.43	22	902
12:41:00	31.5	31	31.9	31.47	22.1	1085
12:42:00	31.6	31.1	32	31.57	22.2	1006
12:43:00	31.6	31.1	32	31.57	22.2	1107
12:44:00	31.7	31.2	31.9	31.60	22.1	944.2
12:45:00	31.7	31.2	32	31.63	22	1018
12:46:00	31.7	31.2	32	31.63	22	986.1
12:47:00	31.7	31.3	32	31.67	22	973.1
12:48:00	31.7	31.3	32	31.67	21.9	915.8
12:49:00	31.8	31.4	32.1	31.77	21.9	1153
12:50:00	31.8	31.4	32.1	31.77	21.9	961.3
12:51:00	31.7	31.4	32.2	31.77	21.8	956.4
12:52:00	31.7	31.4	32.2	31.77	21.8	894.7
12:53:00	31.7	31.4	32.2	31.77	21.9	1152



12:54:00	31.7	31.5	32.3	31.83	21.9	1154
12:55:00	31.7	31.4	32.4	31.83	22	1150
12:56:00	31.8	31.5	32.5	31.93	22.1	1047
12:57:00	31.8	31.6	32.5	31.97	22.1	993.1
12:58:00	31.9	31.7	32.6	32.07	22	1080
12:59:00	31.9	31.7	32.7	32.10	21.9	993.4
13:00:00	32	31.8	32.8	32.20	21.7	997.1
13:01:00	32	31.8	32.8	32.20	21.9	1050
13:02:00	32	31.9	32.9	32.27	22	960.4
13:03:00	32	31.9	32.9	32.27	22.1	968.4
13:04:00	32.1	32	32.9	32.33	22.2	1001
13:05:00	32.1	32	33	32.37	22.4	1005
13:06:00	32	32	33.1	32.37	22.3	923.2
13:07:00	32	31.9	33.2	32.37	22.2	1022
13:08:00	32.1	32	33.2	32.43	22.1	946.3
13:09:00	32	32	33.3	32.43	22	922
13:10:00	32.1	32.1	33.2	32.47	21.8	954.6
13:11:00	32.1	32.1	33.2	32.47	21.7	971.3
13:12:00	32.1	32	33.3	32.47	21.6	963
13:13:00	32.1	32	33.3	32.47	21.6	1134
13:14:00	32.2	32.1	33.4	32.57	21.6	988.5
13:15:00	32.2	32.1	33.4	32.57	21.5	974.7
13:16:00	32.2	32.1	33.4	32.57	21.4	976.8
13:17:00	32.1	32.1	33.4	32.53	21.3	944.2
13:18:00	32.1	32	33.5	32.53	21.2	992.8
13:19:00	32.1	32	33.5	32.53	21.1	943.9
13:20:00	32.1	32	33.5	32.53	21.2	1128
13:21:00	32.1	32.1	33.6	32.60	21.1	1004
13:22:00	32.1	32.1	33.6	32.60	21.2	1107
13:23:00	32.1	32	33.7	32.60	21.1	1087
13:24:00	32.1	32.1	33.6	32.60	21.1	1125
13:25:00	32.1	32.1	33.6	32.60	21	1045
13:26:00	32.1	32.1	33.7	32.63	21.1	1113
13:27:00	32.1	32.2	33.6	32.63	21.2	1139
13:28:00	32.2	32.2	33.5	32.63	21.3	1137
13:29:00	32.1	32.2	33.5	32.60	21.4	1114
13:30:00	32	32.2	33.4	32.53	21.5	981.6
13:31:00	32	32.2	33.3	32.50	21.5	1090
13:32:00	31.9	32.1	33.2	32.40	21.5	1038
13:33:00	31.9	32.1	33.2	32.40	21.4	973.5



13:34:00	31.8	32	33.1	32.30	21.3	1099
13:35:00	31.8	31.9	33	32.23	21.1	1115
13:36:00	31.9	31.9	32.9	32.23	21.1	1117
13:37:00	32	32	32.7	32.23	21.2	1132
13:38:00	31.9	32	32.6	32.17	21.2	1115
13:39:00	31.9	31.9	32.5	32.10	21.2	1115
13:40:00	31.8	31.9	32.5	32.07	21.2	1109
13:41:00	31.8	31.9	32.5	32.07	21.3	1089
13:42:00	31.7	32	32.6	32.10	21.3	1119
13:43:00	31.7	32	32.6	32.10	21.4	1026
13:44:00	31.8	31.9	32.5	32.07	21.4	1098
13:45:00	31.7	31.9	33.5	32.37	21.4	1093
13:46:00	31.7	31.9	33.6	32.40	21.4	1077
13:47:00	31.6	32	33.7	32.43	21.5	1098
13:48:00	31.7	32.1	33.6	32.47	21.4	1094
13:49:00	31.7	32	33.7	32.47	21.3	1130
13:50:00	31.6	32.1	33.7	32.47	21.1	1136
13:51:00	31.6	32.1	33.7	32.47	21.2	1142
13:52:00	31.6	32.1	33.8	32.50	21.2	1132
13:53:00	31.6	32.1	33.8	32.50	21.2	1142
13:54:00	31.5	32	33.7	32.40	21.2	1071
13:55:00	31.4	31.9	33.6	32.30	21	1106
13:56:00	31.3	31.8	33.5	32.20	21.1	884.3
13:57:00	31.2	31.8	33.6	32.20	21.2	1094
13:58:00	31.2	31.7	33.5	32.13	21.2	978.2
13:59:00	31.1	31.6	33.6	32.10	21.3	1019
14:00:00	31.1	31.6	33.6	32.10	21.2	1082
14:01:00	31	31.6	33.7	32.10	21.3	1075
14:02:00	30.9	31.6	33.8	32.10	21.2	1078
14:03:00	30.8	31.6	33.9	32.10	21.1	1093
14:04:00	30.7	31.5	33.9	32.03	21.1	1067
14:05:00	30.7	31.5	33.9	32.03	20.9	1081
14:06:00	30.6	31.6	33.9	32.03	21	1071
14:07:00	30.6	31.7	33.7	32.00	21.1	935.9
14:08:00	30.5	31.7	33.5	31.90	21.1	959.8
14:09:00	30.4	31.8	33.2	31.80	21.1	987.7
14:10:00	30.3	30.9	33	31.40	21.2	1006
14:11:00	30.3	30.8	33.1	31.40	21.2	920.9
14:12:00	30.2	30.7	33.1	31.33	21.2	960.9
14:13:00	30.2	30.6	33	31.27	21.1	630.2



14:14:00	30.1	30.5	33.1	31.23	21.2	618.7
14:15:00	30	30.4	33	31.13	21.3	1083
14:16:00	29.9	30.2	32.8	30.97	21.4	855.1
14:17:00	29.7	30.1	32.6	30.80	21.5	1145
14:18:00	29.5	29.9	32.3	30.57	21.7	1106
14:19:00	29.3	29.7	32	30.33	21.9	1124
14:20:00	29.2	29.5	31.8	30.17	21.8	108.9
14:21:00	29.1	29.4	31.9	30.13	21.6	638.3
14:22:00	29	29.3	31.8	30.03	21.7	955.9
14:23:00	28.8	29.2	31.7	29.90	21.7	1084
14:24:00	28.7	29.1	31.7	29.83	21.7	1024
14:25:00	28.6	29	31.6	29.73	21.5	1117
14:26:00	28.5	29	31.4	29.63	21.6	945.5
14:27:00	28.4	28.9	31.2	29.50	21.4	250.7
14:28:00	28.3	28.8	31	29.37	21.2	412.8
14:29:00	28.2	28.8	30.8	29.27	2.1	1065
14:30:00	28.1	28.7	30.6	29.13	21.2	1044
14:31:00	28	28.5	30.4	28.97	21.2	1056
14:32:00	27.8	28.3	30.2	28.77	21.3	1060
14:33:00	27.7	28.1	29.9	28.57	21.3	973.3
14:34:00	27.5	27.9	29.6	28.33	21.1	154.5
14:35:00	27.3	27.7	29.2	28.07	21	305
14:36:00	27.2	27.5	28.8	27.83	20.9	465.6
14:37:00	27.1	27.3	28.5	27.63	20.9	280.7
14:38:00	27	27.1	28.2	27.43	20.8	103.2
14:39:00	26.9	26.9	28	27.27	20.7	207
14:40:00	26.8	26.8	27.9	27.17	20.6	156.4
14:41:00	26.7	26.7	27.7	27.03	20.6	152.2
14:42:00	26.6	26.5	27.5	26.87	20.5	109.4
14:43:00	26.6	26.3	27.3	26.73	20.6	781.3
14:44:00	26.5	26.2	27.1	26.60	20.7	972
14:45:00	26.4	26.1	27	26.50	20.9	1076
14:46:00	26.3	26.1	27.1	26.50	21	1228
14:47:00	26.2	26	27	26.40	21.1	1162
14:48:00	26.1	26	26.9	26.33	20.9	218.8
14:49:00	26.1	25.9	26.8	26.27	20.7	67.2
14:50:00	26	25.9	26.9	26.27	20.6	61.2
14:51:00	26	25.8	26.8	26.20	20.6	74.4
14:52:00	25.9	25.8	26.7	26.13	20.6	52.4
14:53:00	25.8	25.7	26.5	26.00	20.5	44.5



14:54:00	25.7	25.6	26.4	25.90	20.6	67.9
14:55:00	25.8	25.6	26.3	25.90	20.6	81.4
14:56:00	25.8	25.6	26.2	25.87	20.6	86.5
14:57:00	25.7	25.7	26.2	25.87	20.7	89.20
14:58:00	25.7	25.6	26.1	25.80	20.8	92.40
14:59:00	25.6	25.5	26.1	25.73	20.8	99.60
15:00:00	25.6	25.4	26.1	25.70	20.9	100.10
15:01:00	25.6	25.4	26.1	25.70	20.8	96.30
15:02:00	25.5	25.3	26.2	25.67	20.8	93.70
15:03:00	25.6	25.2	26.2	25.67	20.9	98.90
15:04:00	25.6	25.3	26.1	25.67	20.9	90.80
15:05:00	25.7	25.3	26	25.67	21	113.70
15:06:00	25.7	25.2	26.1	25.67	20.9	118.70
15:07:00	25.7	25.2	26.1	25.67	21	109.40
15:08:00	25.7	25.2	26	25.63	21.1	101.90
15:09:00	25.6	25.1	25.9	25.53	21	82.90
15:10:00	25.6	25	25.8	25.47	21	81.50
15:11:00	25.5	25	25.7	25.40	21.1	69.30
15:12:00	25.4	24.9	25.6	25.30	21.1	62.20
15:13:00	25.2	24.9	25.5	25.20	21	61.10
15:14:00	25.1	24.8	25.4	25.10	21	63.40
15:15:00	25	24.8	25.3	25.03	21	64.60
15:16:00	25	24.7	25.4	25.03	20.9	55.90
15:17:00	25.1	24.6	25.3	25.00	20.9	53.50
15:18:00	25	24.5	25.2	24.90	20.9	68.40
15:19:00	25	24.5	25.1	24.87	21	75.10
15:20:00	24.9	24.5	25.2	24.87	21	75.80
15:21:00	24.9	24.5	25.1	24.83	21	71.80
15:22:00	24.8	24.5	25.1	24.80	21	55.20
15:23:00	24.8	24.4	25	24.73	21.1	62.10
15:24:00	24.7	24.4	25.1	24.73	21.1	69.80
15:25:00	24.7	24.3	25	24.67	21	54.80
15:26:00	24.6	24.3	24.9	24.60	21	51.60
15:27:00	24.6	24.3	24.9	24.60	21	53.30
15:28:00	24.5	24.3	25	24.60	20.9	65.60
15:29:00	24.6	24.2	25	24.60	20.9	57.10
15:30:00	24.6	24.2	25	24.60	21	61.10
15:31:00	24.6	24.2	25.1	24.63	21	62.30
15:32:00	24.6	24.2	25.1	24.63	20.9	67.00
15:33:00	24.7	24.2	25	24.63	20.9	74.10





15:34:00	24.7	24.1	25	24.60	20.8	60.70
15:35:00	24.7	24.1	25	24.60	20.9	58.60
15:36:00	24.7	24.1	24.9	24.57	20.8	53.50
15:37:00	24.7	24	24.9	24.53	20.7	50.00
15:38:00	24.7	24	24.9	24.53	20.6	65.00
15:39:00	24.7	24.1	24.8	24.53	20.6	65.00
15:40:00	24.6	24.1	24.8	24.50	20.5	51.40
15:41:00	24.6	24	24.7	24.43	20.4	45.40
15:42:00	24.5	24	24.7	24.40	20.3	49.90
15:43:00	24.5	24	24.7	24.40	20.2	38.50
15:44:00	24.4	23.9	24.6	24.30	20.1	31.40
15:45:00	24.4	23.9	24.6	24.30	20	37.60
15:46:00	24.3	23.8	24.5	24.20	19.9	36.20
15:47:00	24.2	23.8	24.5	24.17	10.7	33.40
15:48:00	24.1	23.8	24.4	24.10	19.5	32.80
15:49:00	24.1	23.7	24.3	24.03	19.5	35.10
15:50:00	24	23.7	24.4	24.03	19.4	34.80
15:51:00	24	23.7	24.4	24.03	19.4	36.00
15:52:00	24	23.6	24.3	23.97	19.3	34.50
15:53:00	24	23.6	24.2	23.93	19.4	31.00
15:54:00	23.9	23.5	24.2	23.87	19.3	30.00
15:55:00	23.9	23.4	24.2	23.83	19.2	29.00
15:56:00	23.8	23.4	24.1	23.77	19.2	27.00
15:57:00	23.9	23.3	24.1	23.77	19.1	27.10
15:58:00	23.9	23.3	24.1	23.77	19.2	27.80
15:59:00	24	23.2	24.1	23.77	19.1	28.20
16:00:00	24	23.2	24	23.73	19	30.60

### Data Utilizada para la Validación

JUEVES 3 DE MARZO DEL 2011						
HORA	T1 (Entrada)	T2 (Media)	T3 (Fondo)	Temp_Media	TE (Externa)	Rad_Directa
09:00:00	20.1	18.9	19.3	19.43	16.3	880.3
09:01:00	20.3	19.1	19.5	19.63	16.4	902.4
09:02:00	20.4	19.2	19.6	19.73	16.5	836.1
09:03:00	20.6	19.4	19.8	19.93	16.5	915.5
09:04:00	20.8	19.6	20	20.13	16.6	942.7
09:05:00	20.9	19.7	20.1	20.23	16.7	865.8
09:06:00	21	19.8	20.2	20.33	16.8	954.2



09:07:00	21.2	20	20.4	20.53	16.9	965
09:08:00	21.4	20.1	20.6	20.70	17	901.8
09:09:00	21.5	20.2	20.7	20.80	17	884.6
09:10:00	21.7	20.4	20.9	21.00	17.1	1146
09:11:00	21.9	20.6	21.1	21.20	17.2	987.7
09:12:00	22.2	20.8	21.2	21.40	17.2	986.9
09:13:00	22.4	21	21.4	21.60	17.3	1128
09:14:00	22.6	21.2	21.6	21.80	17.4	1059
09:15:00	22.8	21.4	21.8	22.00	17.5	1141
09:16:00	22.9	21.4	21.9	22.07	17.6	760.3
09:17:00	22.9	21.5	21.9	22.10	17.6	1242
09:18:00	23	21.6	22.1	22.23	17.8	1283
09:19:00	23.2	21.8	22.3	22.43	17.9	1311
09:20:00	23.4	21.9	22.5	22.60	18	1196
09:21:00	23.5	22	22.6	22.70	18.1	1169
09:22:00	23.6	22.1	22.7	22.80	18.2	1197
09:23:00	23.7	22.2	22.8	22.90	18.3	1105
09:24:00	23.9	22.3	22.9	23.03	18.4	1162
09:25:00	24	22.5	23	23.17	18.5	1086
09:26:00	24	22.6	23.1	23.23	18.5	1123
09:27:00	24.1	22.7	23.2	23.33	18.6	1194
09:28:00	24.2	22.8	23.3	23.43	18.7	1381
09:29:00	24.3	22.9	23.4	23.53	18.7	1279
09:30:00	24.4	23	23.5	23.63	18.8	1437
09:31:00	24.6	23.1	23.7	23.80	18.8	1327
09:32:00	24.7	23.2	23.8	23.90	18.9	1368
09:33:00	24.8	23.3	23.9	24.00	18.8	1234
09:34:00	24.9	23.2	24	24.03	18.7	1165
09:35:00	25	23.3	24.1	24.13	18.6	1151
09:36:00	25.1	23.4	24.2	24.23	18.6	1238
09:37:00	25.2	23.6	24.3	24.37	18.7	1298
09:38:00	25.4	23.8	24.4	24.53	18.7	1235
09:39:00	25.5	23.9	24.4	24.60	18.6	1193
09:40:00	25.7	24	24.5	24.73	18.7	1248
09:41:00	25.7	24.1	24.6	24.80	18.6	1185
09:42:00	25.7	24.1	24.6	24.80	18.6	1072
09:43:00	25.8	24.2	24.7	24.90	18.7	1134
09:44:00	25.8	24.3	24.8	24.97	18.7	1242
09:45:00	25.9	24.4	24.8	25.03	18.6	1176
09:46:00	26	24.4	24.9	25.10	18.5	1183



09:47:00	26.1	24.5	24.9	25.17	18.6	1275
09:48:00	26.2	24.5	25	25.23	18.6	1341
09:49:00	26.3	24.6	25.1	25.33	18.6	1331
09:50:00	26.3	24.6	25.1	25.33	18.7	1300
09:51:00	26.3	24.7	25.1	25.37	18.7	1219
09:52:00	26.3	24.7	25.1	25.37	18.7	1226
09:53:00	26.3	24.6	25.2	25.37	18.8	1140
09:54:00	26.3	24.6	25.2	25.37	18.8	1178
09:55:00	26.3	24.5	25.3	25.37	18.8	1160
09:56:00	26.3	24.6	25.3	25.40	18.9	1186
09:57:00	26.3	24.6	25.3	25.40	18.9	1174
09:58:00	26.2	24.6	25.4	25.40	18.9	1160
09:59:00	26.3	24.7	25.4	25.47	19	1311
10:00:00	26.3	24.7	25.4	25.47	19	1285
10:01:00	26.3	24.7	25.4	25.47	19	1152
10:02:00	26.3	24.7	25.3	25.43	18.9	919.7
10:03:00	26.3	24.7	25.3	25.43	18.9	1196
10:04:00	26.3	24.7	25.3	25.43	19	1006
10:05:00	26.3	24.8	25.2	25.43	19	986.1
10:06:00	26.4	24.8	25.3	25.50	19.1	1236
10:07:00	26.4	24.8	25.3	25.50	19.1	1143
10:08:00	26.5	24.9	25.4	25.60	19.1	1236
10:09:00	26.6	24.9	25.4	25.63	19.2	1214
10:10:00	26.7	25	25.4	25.70	19.2	1319
10:11:00	26.8	25.1	25.5	25.80	19.2	1225
10:12:00	26.9	25.1	25.6	25.87	19.3	1155
10:13:00	26.9	25.1	25.6	25.87	19.3	1135
10:14:00	26.9	25.1	25.6	25.87	19.3	1090
10:15:00	26.9	25	25.7	25.87	19.3	1051
10:16:00	27	25.1	25.7	25.93	19.4	1239
10:17:00	27.1	25.2	25.8	26.03	19.4	1201
10:18:00	27.2	25.3	25.9	26.13	19.5	1227
10:19:00	27.3	25.4	26	26.23	19.5	1267
10:20:00	27.3	25.4	26	26.23	19.6	1137
10:21:00	27.4	25.5	26	26.30	19.6	1269
10:22:00	27.5	25.6	26.1	26.40	19.7	1222
10:23:00	27.7	25.8	26.2	26.57	19.7	1247
10:24:00	27.9	25.9	26.3	26.70	19.7	1197
10:25:00	28	26	26.3	26.77	19.8	1173
10:26:00	28.1	26.1	26.4	26.87	19.8	1250



10:27:00	28.3	26.2	26.6	27.03	19.9	1233
10:28:00	28.4	26.2	26.7	27.10	19.9	1199
10:29:00	28.5	26.1	26.9	27.17	20	1288
10:30:00	28.6	26.1	27.1	27.27	20	1286
10:31:00	28.8	26.2	27.3	27.43	20.1	1305
10:32:00	28.9	26.3	27.5	27.57	20.1	1281
10:33:00	29	26.3	27.6	27.63	20.2	1284
10:34:00	29.1	26.4	27.8	27.77	20.2	1285
10:35:00	29.2	26.4	27.9	27.83	20.2	1212
10:36:00	29.3	26.5	28	27.93	20.3	1278
10:37:00	29.3	26.5	28.1	27.97	20.4	1272
10:38:00	29.4	26.6	28.1	28.03	20.5	1288
10:39:00	29.5	26.7	28.2	28.13	20.7	1315
10:40:00	29.6	26.8	28.3	28.23	20.9	1271
10:41:00	29.7	26.8	28.3	28.27	21	1250
10:42:00	29.8	26.9	28.4	28.37	21.1	1228
10:43:00	29.9	26.9	28.4	28.40	21.1	1280
10:44:00	30	27	28.5	28.50	21.2	1314
10:45:00	30.2	27.1	28.6	28.63	21.3	1303
10:46:00	30.6	27.2	28.7	28.83	21.3	1301
10:47:00	30.9	27.3	28.7	28.97	21.3	1277
10:48:00	31.3	27.4	28.8	29.17	21.4	1316
10:49:00	31.7	27.5	28.9	29.37	21.3	1309
10:50:00	32	27.7	29	29.57	21.2	1314
10:51:00	32.1	27.7	28.9	29.57	21.3	1282
10:52:00	32.3	27.8	29	29.70	21.4	1305
10:53:00	32.5	27.9	29	29.80	21.5	1327
10:54:00	32.7	28	29.1	29.93	21.7	1312
10:55:00	32.8	28.1	29.2	30.03	21.8	1305
10:56:00	32.9	28.2	29.3	30.13	21.8	1237
10:57:00	33	28.3	29.3	30.20	21.9	1281
10:58:00	33.1	28.3	29.4	30.27	21.7	1247
10:59:00	33.2	28.4	29.5	30.37	21.8	1256
11:00:00	33.4	28.5	29.6	30.50	21.9	1311
11:01:00	33.4	28.5	29.7	30.53	21.8	1321
11:02:00	33.5	28.6	29.8	30.63	21.8	1324
11:03:00	33.6	28.7	29.9	30.73	21.9	1327
11:04:00	33.6	28.7	29.9	30.73	21.9	1307
11:05:00	33.6	28.8	30	30.80	21.7	1336
11:06:00	33.6	28.8	30	30.80	21.9	1325



11:07:00	33.5	28.9	30.1	30.83	21.9	1315
11:08:00	33.4	29	30.1	30.83	22	1326
11:09:00	33.3	29	30.2	30.83	22	1336
11:10:00	33.2	29.1	30.2	30.83	22.1	1305
11:11:00	33.2	29.2	30.3	30.90	22.1	1331
11:12:00	33.1	29.3	30.3	30.90	22.2	1306
11:13:00	33.1	29.4	30.4	30.97	22.2	1327
11:14:00	33	29.5	30.4	30.97	22.3	1303
11:15:00	32.9	29.6	30.5	31.00	22.2	1249
11:16:00	32.8	29.7	30.6	31.03	22.3	1289
11:17:00	32.7	29.7	30.7	31.03	22.4	1299
11:18:00	32.6	29.8	30.8	31.07	22.5	1301
11:19:00	32.5	29.9	30.9	31.10	22.6	1309
11:20:00	32.5	30	31	31.17	22.5	1301
11:21:00	32.6	30	31.1	31.23	22.6	1302
11:22:00	32.6	30.1	31.2	31.30	22.6	1321
11:23:00	32.5	30.2	31.3	31.33	22.7	1322
11:24:00	32.5	30.2	31.4	31.37	22.7	1313
11:25:00	32.4	30.3	31.5	31.40	22.8	1310
11:26:00	32.4	30.3	31.6	31.43	22.7	1251
11:27:00	32.3	30.4	31.6	31.43	22.6	1225
11:28:00	32.3	30.4	31.7	31.47	22.6	1230
11:29:00	32.2	30.5	31.7	31.47	22.5	1052
11:30:00	32.2	30.5	31.8	31.50	22.3	1245
11:31:00	32.2	30.6	31.8	31.53	22.2	1292
11:32:00	32.3	30.7	31.9	31.63	22.3	1311
11:33:00	32.3	30.8	31.9	31.67	22.4	1313
11:34:00	32.3	30.8	31.9	31.67	22.4	1294
11:35:00	32.4	30.9	32	31.77	22.1	1253
11:36:00	32.4	31	32	31.80	22.3	1214
11:37:00	32.5	30.9	32	31.80	22.4	1198
11:38:00	32.5	30.9	32.1	31.83	22.5	1213
11:39:00	32.5	31	32.1	31.87	22.7	1230
11:40:00	32.6	31.1	32.2	31.97	22.8	1251
11:41:00	32.5	31.2	32.3	32.00	22.7	1261
11:42:00	32.4	31.4	32.5	32.10	22.6	1253
11:43:00	32.4	31.5	32.6	32.17	22.5	1255
11:44:00	32.3	31.7	32.7	32.23	22.4	1247
11:45:00	32.2	31.8	32.8	32.27	22.4	1249
11:46:00	32.2	31.7	32.6	32.17	22.3	888.9



11:47:00	32.1	31.5	32.4	32.00	22.2	1036
11:48:00	32.2	31.3	32.3	31.93	22.1	1187
11:49:00	32.1	31.2	32.2	31.83	22	1200
11:50:00	32	31	32	31.67	21.8	876.7
11:51:00	31.9	30.9	31.9	31.57	21.7	1049
11:52:00	31.6	30.7	31.6	31.30	21.6	296.4
11:53:00	31.4	30.6	31.5	31.17	21.5	647.1
11:54:00	31.4	30.6	31.4	31.13	21.4	1052
11:55:00	31.4	30.6	31.5	31.17	21.3	1115
11:56:00	31.4	30.6	31.5	31.17	21.3	1015
11:57:00	31.5	30.7	31.6	31.27	21.4	1154
11:58:00	31.5	30.8	31.6	31.30	21.4	1120
11:59:00	31.6	30.9	31.7	31.40	21.4	1117
12:00:00	31.7	31	31.7	31.47	21.5	1115
12:01:00	31.6	31.1	31.7	31.47	21.4	351
12:02:00	31.5	31	31.6	31.37	21.3	741.1
12:03:00	31.4	30.9	31.6	31.30	21.3	1105
12:04:00	31.4	30.9	31.6	31.30	21.3	1104
12:05:00	31.4	30.9	31.6	31.30	21.1	1095
12:06:00	31.4	30.9	31.6	31.30	21.2	1107
12:07:00	31.4	31	31.7	31.37	21.2	1108
12:08:00	31.5	31.1	31.8	31.47	21.2	1115
12:09:00	31.6	31.2	31.9	31.57	21.3	1112
12:10:00	31.7	31.3	32	31.67	21.2	1111
12:11:00	31.7	31.4	32	31.70	21.3	1120
12:12:00	31.8	31.5	32.1	31.80	21.4	1124
12:13:00	31.9	31.6	32.2	31.90	21.5	1142
12:14:00	31.9	31.7	32.3	31.97	21.6	1156
12:15:00	32	31.8	32.4	32.07	21.7	1154
12:16:00	32.1	31.8	32.5	32.13	21.7	1165
12:17:00	32.2	31.9	32.6	32.23	21.6	1167
12:18:00	32.2	31.9	32.7	32.27	21.6	1151
12:19:00	32.3	31.9	32.8	32.33	21.6	1162
12:20:00	32.4	32	32.9	32.43	21.5	1164
12:21:00	32.5	32.1	32.8	32.47	21.6	1169
12:22:00	32.7	32.2	32.8	32.57	21.6	1146
12:23:00	32.8	32.1	32.9	32.60	21.7	1144
12:24:00	32.9	32.1	32.9	32.63	21.7	1143
12:25:00	33	32.1	33	32.70	21.6	1142
12:26:00	33	32.2	33	32.73	21.7	1131



12:27:00	32.9	32.2	33.1	32.73	21.6	1134
12:28:00	32.9	32.2	33.1	32.73	21.6	1137
12:29:00	33	32.1	33.1	32.73	21.6	1153
12:30:00	33	32.2	33	32.73	21.5	1144
12:31:00	33.1	32.2	33.1	32.80	21.6	1157
12:32:00	33.1	32.2	33.1	32.80	21.6	1175
12:33:00	33.1	32.3	33.2	32.87	21.6	1181
12:34:00	33.2	32.2	33.2	32.87	21.7	1185
12:35:00	33.2	32.3	33.3	32.93	21.7	1195
12:36:00	33.3	32.2	33.4	32.97	21.7	1175
12:37:00	33.3	32.3	33.3	32.97	21.8	1128
12:38:00	33.4	32.3	33.3	33.00	21.7	1123
12:39:00	33.3	32.3	33.2	32.93	21.7	1068
12:40:00	33.3	32.3	33.2	32.93	21.6	1051
12:41:00	33.4	32.2	33.2	32.93	21.6	1074
12:42:00	33.3	32.2	33.1	32.87	21.7	1121
12:43:00	33.3	32.1	33.1	32.83	21.7	1167
12:44:00	33.3	32.2	33	32.83	21.7	1170
12:45:00	33.3	32.2	33	32.83	21.6	1195
12:46:00	33.3	32.2	33	32.83	21.7	1106
12:47:00	33.2	32.2	33.1	32.83	21.7	1122
12:48:00	33.2	32.2	33.1	32.83	21.8	1127
12:49:00	33.2	32.2	33.1	32.83	21.8	1109
12:50:00	33.2	32.1	33.2	32.83	21.7	1097
12:51:00	33.2	32.1	33.2	32.83	21.7	1107
12:52:00	33.3	32	33.2	32.83	21.7	1106
12:53:00	33.2	32.1	33.2	32.83	21.6	1147
12:54:00	33.2	32	33.3	32.83	21.6	1154
12:55:00	33.2	32	33.3	32.83	21.6	1156
12:56:00	33.3	32	33.4	32.90	21.5	1106
12:57:00	33.3	32.1	33.4	32.93	21.5	1132
12:58:00	33.3	32.1	33.5	32.97	21.4	1149
12:59:00	33.4	32.1	33.6	33.03	21.3	1183
13:00:00	33.4	32	33.7	33.03	21.2	1037
13:01:00	33.3	31.9	33.6	32.93	21.2	1146
13:02:00	33.2	31.8	33.5	32.83	21.1	1004
13:03:00	33.1	31.7	33.4	32.73	21	993.2
13:04:00	33	31.6	33.2	32.60	21.9	822.4
13:05:00	32.8	31.5	33	32.43	20.8	854.7
13:06:00	32.8	31.4	32.9	32.37	20.7	943.2



13:07:00	32.7	31.4	32.9	32.33	20.7	915.3
13:08:00	32.7	31.4	32.9	32.33	20.7	955.4
13:09:00	32.7	31.3	33	32.33	20.8	1002
13:10:00	32.8	31.3	32.9	32.33	20.9	1022
13:11:00	32.8	31.3	32.9	32.33	20.9	1079
13:12:00	32.8	31.3	32.9	32.33	21	1080
13:13:00	32.8	31.3	33	32.37	21	1060
13:14:00	32.7	31.4	33	32.37	21.1	1071
13:15:00	32.7	31.4	33	32.37	21	1084
13:16:00	32.7	31.4	33	32.37	21.1	1071
13:17:00	32.8	31.3	33.1	32.40	21	1096
13:18:00	32.8	31.3	33.1	32.40	20.9	1085
13:19:00	32.7	31.4	33.1	32.40	20.9	1084
13:20:00	32.7	31.4	33.1	32.40	20.8	1099
13:21:00	32.7	31.4	33.2	32.43	20.8	1097
13:22:00	32.8	31.4	33.2	32.47	20.8	1129
13:23:00	32.8	31.4	33.2	32.47	20.7	1139
13:24:00	32.8	31.4	33.2	32.47	20.7	1147
13:25:00	32.8	31.3	33.2	32.43	20.6	1134
13:26:00	32.7	31.2	33.2	32.37	20.7	822.7
13:27:00	32.4	31.1	32.9	32.13	20.6	679.9
13:28:00	32.1	30.9	32.6	31.87	20.6	665.9
13:29:00	31.9	30.8	32.3	31.67	20.5	707.5
13:30:00	31.7	30.7	32	31.47	20.6	711.3
13:31:00	31.5	30.6	31.9	31.33	20.6	729.4
13:32:00	31.4	30.5	31.8	31.23	20.7	767.4
13:33:00	31.3	30.4	31.7	31.13	20.7	721.6
13:34:00	31.1	30.3	31.6	31.00	20.7	773.4
13:35:00	31.1	30.2	31.6	30.97	20.8	835.3
13:36:00	31.1	30.2	31.6	30.97	20.8	764.6
13:37:00	31	30.1	31.5	30.87	20.7	758.9
13:38:00	31	30.1	31.5	30.87	20.7	820.7
13:39:00	31	30.1	31.4	30.83	20.6	787.7
13:40:00	31	30.1	31.4	30.83	20.7	763.7
13:41:00	31	30	31.5	30.83	20.7	830.5
13:42:00	31	29.9	31.6	30.83	20.7	914.5
13:43:00	31	29.9	31.6	30.83	20.8	918.4
13:44:00	31	29.9	31.6	30.83	20.8	856.6
13:45:00	30.9	30	31.6	30.83	20.6	831.5
13:46:00	30.9	30	31.6	30.83	20.8	921.4





13:47:00	30.9	30	31.6	30.83	20.8	927.5
13:48:00	30.9	30	31.6	30.83	20.9	819.4
13:49:00	30.8	30	31.5	30.77	21	844.1
13:50:00	30.7	30	31.4	30.70	20.9	634.1
13:51:00	30.6	29.8	31.2	30.53	20.9	629.5
13:52:00	30.5	29.7	31.1	30.43	20.8	620.4
13:53:00	30.4	29.6	31	30.33	20.8	657.5
13:54:00	30.3	29.5	30.9	30.23	20.7	675.9
13:55:00	30.2	29.4	30.8	30.13	20.6	694.5
13:56:00	30.1	29.3	30.7	30.03	20.6	739.7
13:57:00	30.1	29.3	30.6	30.00	20.6	787.5
13:58:00	30	29.2	30.4	29.87	20.5	551.7
13:59:00	29.9	29.1	30.2	29.73	20.5	498.6
14:00:00	29.7	29	30	29.57	20.5	465.7
14:01:00	29.5	28.9	29.9	29.43	20.4	451.1
14:02:00	29.4	28.8	29.8	29.33	20.4	448.7
14:03:00	29.3	28.8	29.8	29.30	20.3	505.7
14:04:00	29.2	28.7	29.7	29.20	20.4	507.5
14:05:00	29.1	28.7	29.8	29.20	20.3	503.4
14:06:00	29.1	28.7	29.8	29.20	20.4	528.7
14:07:00	29.1	28.7	29.8	29.20	20.4	651
14:08:00	29.1	28.7	29.8	29.20	20.5	662.3
14:09:00	29.1	28.7	29.8	29.20	20.5	712.9
14:10:00	29	28.7	29.7	29.13	20.5	685.1
14:11:00	29	28.6	29.6	29.07	20.6	557.7
14:12:00	28.9	28.5	29.5	28.97	20.6	507.9
14:13:00	28.8	28.4	29.4	28.87	20.6	426.7
14:14:00	28.7	28.2	29.2	28.70	20.5	369.5
14:15:00	28.7	28.1	29	28.60	20.5	434.3
14:16:00	28.7	28.1	29	28.60	20.6	629.4
14:17:00	28.6	28	28.8	28.47	20.5	358.5
14:18:00	28.6	28	28.7	28.43	20.5	501.3
14:19:00	28.5	27.9	28.7	28.37	20.4	415.7
14:20:00	28.5	27.9	28.6	28.33	20.4	357.9
14:21:00	28.4	27.8	28.5	28.23	20.3	393.5
14:22:00	28.3	27.7	28.5	28.17	20.2	400.2
14:23:00	28.2	27.7	28.4	28.10	20.2	371.1
14:24:00	28.1	27.6	28.4	28.03	20.1	386.2
14:25:00	28	27.5	28.3	27.93	20.2	365.5
14:26:00	28	27.5	28.3	27.93	20.1	341.1



14:27:00	27.9	27.4	28.2	27.83	20.1	296.2
14:28:00	27.8	27.3	28.1	27.73	20	280.5
14:29:00	27.8	27.3	28.1	27.73	20	303.5
14:30:00	27.7	27.2	28	27.63	20	375.4
14:31:00	27.7	27.2	28	27.63	20.1	521.2
14:32:00	27.6	27.1	27.9	27.53	20.1	344.1
14:33:00	27.6	27.1	27.9	27.53	21.2	514.3
14:34:00	27.6	27.1	27.8	27.50	21.1	575.5
14:35:00	27.5	27	27.8	27.43	20	521.7
14:36:00	27.5	27	27.7	27.40	21.1	342.5
14:37:00	27.5	26.9	27.6	27.33	20	326.7
14:38:00	27.4	26.9	27.5	27.27	20	305.1
14:39:00	27.4	26.8	27.4	27.20	20	295.9
14:40:00	27.4	26.8	27.3	27.17	20	285.1
14:41:00	27.3	26.7	27.3	27.10	19.9	276.2
14:42:00	27.2	26.7	27.2	27.03	19.9	269.4
14:43:00	27.2	26.6	27.2	27.00	19.9	239.7
14:44:00	27.1	26.6	27.1	26.93	19.8	231.2
14:45:00	27	26.5	27.1	26.87	19.9	207.5
14:46:00	27.1	26.4	27	26.83	19.8	224.6
14:47:00	27	26.4	27	26.80	19.8	254
14:48:00	27	26.3	26.9	26.73	19.9	251.7
14:49:00	26.9	26.3	26.8	26.67	19.9	246.5
14:50:00	26.9	26.2	26.7	26.60	19.8	245.3
14:51:00	26.9	26.2	26.7	26.60	19.8	244.2
14:52:00	26.8	26.1	26.6	26.50	19.8	245.6
14:53:00	26.8	26.1	26.5	26.47	19.8	247.2
14:54:00	26.7	26	26.5	26.40	19.9	249.5
14:55:00	26.7	26	26.4	26.37	19.9	250.4
14:56:00	26.6	25.9	26.4	26.30	20	253.2
14:57:00	26.6	25.9	26.3	26.27	19.9	250.3
14:58:00	26.5	25.8	26.3	26.20	19.9	251.9
14:59:00	26.5	25.8	26.2	26.17	19.8	246.3
15:00:00	26.4	25.8	26.2	26.13	19.8	244.7
15:01:00	26.4	25.7	26.3	26.13	19.9	339.9
15:02:00	26.4	25.7	26.3	26.13	19.9	337.3
15:03:00	26.4	25.6	26.2	26.07	19.9	239.9
15:04:00	26.3	25.6	26.2	26.03	20	234.4
15:05:00	26.3	25.5	26.1	25.97	19.8	232.7
15:06:00	26.2	25.5	26.1	25.93	20	251.4



15:07:00	26.2	25.5	26.1	25.93	20	247
15:08:00	26.1	25.4	26	25.83	20.1	245.5
15:09:00	26.1	25.4	26	25.83	20	242.2
15:10:00	26	25.4	26	25.80	20	241.3
15:11:00	26	25.5	25.9	25.80	19.9	255.6
15:12:00	25.9	25.4	25.9	25.73	19.9	271.2
15:13:00	25.9	25.3	25.9	25.70	19.9	208.5
15:14:00	25.8	25.3	25.9	25.67	19.8	210.2
15:15:00	25.8	25.3	25.9	25.67	19.9	207.4
15:16:00	25.8	25.3	25.9	25.67	19.9	232.1
15:17:00	25.8	25.3	25.9	25.67	19.8	231.5
15:18:00	25.8	25.2	25.8	25.60	19.9	221.9
15:19:00	25.7	25.2	25.8	25.57	19.9	214.7
15:20:00	25.7	25.2	25.8	25.57	20	214.1
15:21:00	25.7	25.1	25.7	25.50	19.9	237.7
15:22:00	25.6	25.1	25.7	25.47	19.9	227.8
15:23:00	25.6	25.1	25.6	25.43	19.8	203.1
15:24:00	25.5	25	25.5	25.33	19.8	190.2
15:25:00	25.5	25	25.4	25.30	19.8	188.2
15:26:00	25.4	24.9	25.4	25.23	19.7	176.5
15:27:00	25.4	24.9	25.3	25.20	19.7	175.7
15:28:00	25.3	24.8	25.3	25.13	19.6	175.4
15:29:00	25.3	24.8	25.3	25.13	19.6	172.1
15:30:00	25.2	24.8	25.2	25.07	19.5	170.4
15:31:00	25.2	24.7	25.2	25.03	19.6	161.4
15:32:00	25.2	24.7	25.2	25.03	19.6	162.7
15:33:00	25.1	24.7	25.1	24.97	19.6	149.7
15:34:00	25.1	24.6	25.1	24.93	19.7	157.3
15:35:00	25.1	24.6	25	24.90	19.7	157
15:36:00	25.1	24.5	25.1	24.90	19.7	164.7
15:37:00	25.1	24.5	25.1	24.90	19.6	167.3
15:38:00	25.1	24.5	25.1	24.90	19.6	164.7
15:39:00	25	24.4	25	24.80	19.5	154.9
15:40:00	25	24.4	25	24.80	19.5	136.9
15:41:00	25	24.3	24.9	24.73	19.4	130.5
15:42:00	24.9	24.3	24.9	24.70	19.4	128.5
15:43:00	24.9	24.2	24.9	24.67	19.3	124
15:44:00	24.8	24.2	24.8	24.60	19.2	115.9
15:45:00	24.8	24.1	24.8	24.57	19.1	111.1
15:46:00	24.7	24.1	24.7	24.50	19.1	110



15:47:00	24.6	24.1	24.7	24.47	19.1	116.7
15:48:00	24.6	24.1	24.6	24.43	19.2	126.7
15:49:00	24.5	24	24.6	24.37	19.2	132.5
15:50:00	24.5	24	24.6	24.37	19.2	135.1
15:51:00	24.5	24	24.6	24.37	19.3	121.6
15:52:00	24.4	24	24.5	24.30	19.3	119.4
15:53:00	24.4	23.9	24.5	24.27	19.3	109.3
15:54:00	24.4	24	24.4	24.27	19.2	111.9
15:55:00	24.3	24	24.4	24.23	19.2	110.7
15:56:00	24.4	23.9	24.4	24.23	19.1	133.5
15:57:00	24.4	24	24.3	24.23	19.1	139.5
15:58:00	24.3	24	24.3	24.20	19.1	137.7
15:59:00	24.3	23.9	24.2	24.13	19.2	126.7
16:00:00	24.3	23.9	24.2	24.13	19.2	123.2

## Anexo 5

### Fotos del Invernadero y del Monitoreo Realizado



Invernadero de Orquídeas



Vista Derecho del Invernadero





Vista Izquierda del Invernadero



Ingreso al Invernadero





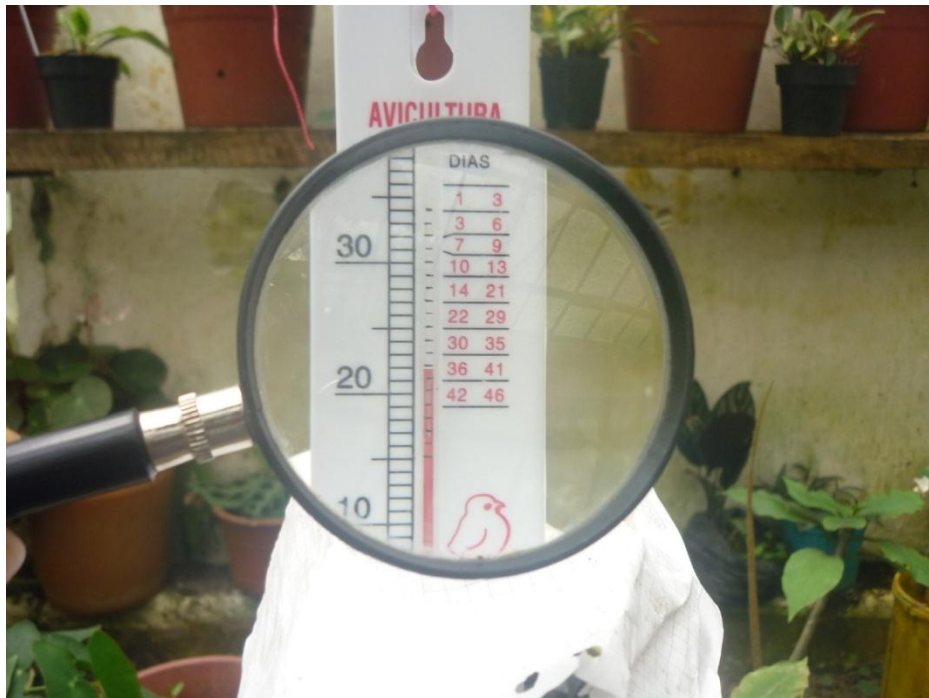
Invernadero sin Malla Polisombra



Invernadero con la Malla Polisombra Colocada



Medición de la temperatura interna con el datalogger de temperatura



Medición de la Temperatura Interna con Termómetros de Vidrio





Medición de la Radiación con Piranómetros



Medición de la Humedad con un Higrómetro

