



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN
PARA EL DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
UNIDAD OAXACA

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y
APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES
(INGENIERIA DE PROCESOS)

ALGORITMO PARA EL CONTROL DE
CONDICIONES VARIABLES EN UN SECADOR

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA:

JYL LÓPEZ TOLEDO MANZO

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JUAN RODRÍGUEZ RAMÍREZ

SANTA CRUZ XOXOCOTLÁN OAXACA, OAXACA MEX.,

ENERO 2008.



SIP-14

INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez siendo las 13:00 horas del día 9 del mes de enero del 2008 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca (CIIDIR-OAXACA)** para examinar la tesis de grado titulada:
"Algoritmo para el control de condiciones variables en un secador"

Presentada por el alumno:

López Toledo
Apellido paterno

Manzo
materno

Jyl
nombre(s)

Con registro:

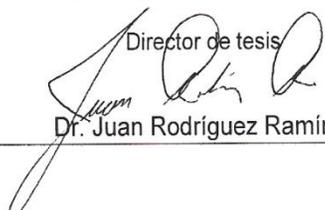
B	0	5	1	3	2	7
---	---	---	---	---	---	---

aspirante al grado de: **MAESTRO EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES**

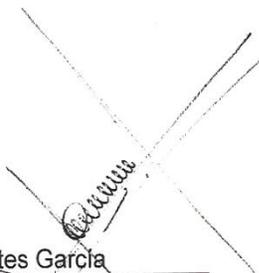
Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

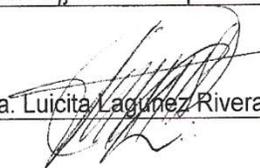
LA COMISION REVISORA

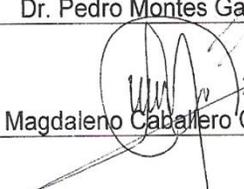
Director de tesis


Dr. Juan Rodríguez Ramírez


Dr. Juan Alejandro Vázquez Feijoo


Dr. Pedro Montes García


Dra. Luicita Lagunes Rivera


Dr. Magdaleno Caballero Caballero

LA PRESIDENTA DEL COLEGIO


Dra. María del Rosario Arnaud Viñas





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez el día 9 del mes enero del año 2008, el (la) que suscribe **LÓPEZ TOLEDO MANZO JYL** alumno (a) del Programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES** con número de registro **B051327**, adscrito al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Juan Rodríguez Ramírez y cede los derechos del trabajo titulado: **“Algoritmo para el control de condiciones variables en un secador”**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **Calle Hornos 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca**, e-mail: posgradoax@ipn.mx ó rastamania20@hotmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.



LÓPEZ TOLEDO MANZO JYL



RESUMEN

El uso eficiente de la energía y la obtención de productos deshidratados de calidad, se ha logrado incorporando sistemas automáticos en secadores convectivos, permitiendo que el material sea sometido a condiciones apropiadas de secado. Las mejoras en la calidad se han alcanzado incorporando condiciones de operación variables, por lo tanto en el presente trabajo se desarrolló un algoritmo de control versátil que permite cambiar el valor de consigna (*set-point*) siguiendo diversos patrones.

En el presente estudio se desarrolló un algoritmo para el control de las condiciones variables en un túnel de secado, éste se desarrolló en un ambiente de programación por medio de objetos de nombre comercial LabVIEW®. Se realizaron pruebas de control para saber el funcionamiento del programa con diferentes patrones de variación en el valor de consigna (*set-point*); éstos van desde constantes, pseudocuadrados, dientes de sierra, sinusoidales, dientes de sierra inversos, triangulares y cuadrados. Se realizó la sintonización de las ganancias del controlador por medio de tres métodos; entre ellos: el método de Ziegler y Nichols (1942) y dos métodos propuestos por Poulin y Pomerleau (1999). Los resultados demuestran que el método de Ziegler y Nichols (1942) presenta mejor estabilidad en el proceso que en comparación de los métodos propuestos por Poulin y Pomerleau (1999). Las variaciones en el valor de consigna constantes en el proceso presentaron mejor estabilidad que en comparación con una variación abrupta.

Palabras clave:

Algoritmo, control variable, túnel de secado, condiciones variables.



A B S T R A C T

The efficient use of energy and the production of dehydrated quality is achieved by incorporating automation convective dryers, allowing the material is subjected to appropriate conditions drying. Improvements in quality have been achieved by incorporating variable operating conditions, so in this work we developed a control algorithm which allows versatile change your slogan (set-point) following various patterns.

In the present study we developed an algorithm to control the variable conditions in a tunnel drying, it took place in an atmosphere of programming using objects trade name LabVIEW®. Control tests were conducted to see how the program works with different patterns of variation in the value of slogan (set-point), they range from constant pseudocuadratics, serrated teeth, sinusoidal, inverse saw tooth, triangular and square. We performed the tuning of the gain controller through three methods, including the method of Ziegler and Nichols (1942) and two methods proposed by Poulin and Pomerleau (1999). The results show that the method of Ziegler and Zichols (1942) showed better stability in the process compared to the methods proposed by Poulin and Pomerleau (1999). Changes in the value of constant slogan in the process showed better stability compared to an abrupt change.

Keywords:

Algorithm, variable control, drying tunnel, variable conditions.



DEDICATORIA

Con amor y respeto a mis padres Leiber López Toledo y Juana Manzo López por su apoyo incondicional en todos mis errores teniendo en cuenta que este también es otro logro para ellos. Teniendo en cuenta que no soy como todos los demás y nunca lo seré, gracias por su apoyo en todo momento los quiero mucho y por ustedes es todo esto.

A mis hermanos Kleiber y Samir por sus incansables fuerzas por vivir cada uno de los momentos.

A todos y cada uno de mis amigos. Porque si los menciono sería como no incluirlos a todos, por todos los momentos que pasamos juntos y saber que cuento con ellos.

A Jana por hacerme sentir que la vida no sólo son números y cálculos, sino también existe amor y sentimientos, gracias por aparecer en mi vida y cambiarla, de ningún modo olvidare las sensaciones que llevo a sentir mi corazón y todo mi ser a tu lado... muchas gracias.

Vive cada momento de tu vida como si fuera el último que estarías viviendo y no te rindas por nada, y si la muerte nos alcanza sabremos que estaremos todos reunidos en otro lugar para poder ser como siempre... los mejores.

Jyl López Toledo Manzo.

Ciertas cosas son tan importantes que necesitan ser descubiertas solas.

Paulo Coelho

The one i love live

R.E.M



AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Politécnico Nacional por su apoyo en el desarrollo de este trabajo.

Al Centro interdisciplinario para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR IPN, Unidad Oaxaca), por abrirme sus puertas, y permitirme la superación en mi vida profesional.

Al CONACYT, por la beca de estudios con registro 201788, ya que sin él no se hubieran realizado esta etapa.

Al Programa de Institucional para la Formación de Investigadores (PIFI), por el apoyo económico brindado.

Al Dr., Juan Rodríguez Ramírez y la M. C. Laura Victoria Aquino González, por todo el apoyo brindado y por la oportunidad de trabajar con ustedes, mil gracias.

A mis maestros de la maestría por todo el conocimiento que me brindaron, su disposición y apoyo.

A la Comisión de Operación y Fomento de Actividades Académicas del IPN (COFAA-IPN) por el apoyo otorgado mediante el proyecto SIP 20071041 Respuesta de los materiales sometidos al secado convectivo con condiciones de operación variable, SIP 20060155 Respuesta de los materiales sometidos al secado convectivo con condiciones de operación variable y CGPI 20050355 Secado convectivo de frutos y productos con alto valor nutraceutico.



INDICE

Lista de figuras.	xi
Lista de tablas.	xiv
Nomenclatura.....	xv
Capítulo Uno. Introducción.	1
1.1 Planteamiento del problema.....	3
1.2 Antecedentes.....	3
1.3 Justificación.	6
1.4 Objetivos.....	8
1.4.1 Objetivo general.	8
1.4.2 Objetivos específicos.....	8
1.5 Hipótesis	9
Capítulo Dos. Marco Teórico.	10
2.1 Algoritmo.....	11
2.1.1 Propiedades de los algoritmos.....	11
2.1.2 Formas de presentación de un algoritmo.....	12
2.2 El Proceso.	13
2.3 Variables de proceso.....	14
2.4 Condiciones variables.....	14
2.5 Perturbaciones.....	15
2.6 El proceso de secado.....	15
2.7 Control de procesos.	16
2.8 Estrategias de control.....	18
2.8.1 Control por retroalimentación.	18
2.8.2 Control por acción pre calculada.....	18
2.9 Controladores PID (Proporcional, Integral y Derivativo) y su estructura.	19
2.10 Métodos de ajustes en los controladores.....	22
2.10.1 Método de oscilación (método en frecuencia).....	22
2.10.2 Método de basado en la curva de reacción (método de respuesta al escalón).....	23
2.10.3 Método de Basado en el Máximo Pico de Resonancia.....	25
2.10.4 Método de Poulin y Pomerleau (1999).....	25



2.11	Métodos de ajustes en los controladores.....	26
2.12	Lógica difusa (Fuzzy Logic).....	27
2.13	Redes neuronales artificiales.....	28
2.14	Identificación de los cambios en el sistema.....	29
2.14.1	Patrones en forma de ondas cuadradas.....	29
2.14.2	Patrones en forma de rampas, cíclicos y complejos.....	30
2.15	Variables del sistema.....	33
Capítulo Tres. Metodología.....		34
3.1	Identificación de las variables de control de secado.....	35
3.2	Selección del lenguaje de programación.....	35
3.3	Elección del sistema de control.....	36
3.4	Realización del algoritmo de control.....	36
3.5	Aplicación del sistema de control.....	38
3.5.1	El túnel de secado y sistema de control.....	38
3.6	Parámetros de control a partir de las condiciones del proceso.....	42
3.7	Análisis del error de cada función.....	43
3.8	Programación y ajustes.....	43
3.8.1	Medición de temperatura y programación del controlador FieldPoint®.....	43
3.8.2	Programación en LabVIEW®.....	45
3.8.3	Conversión de unidades para señales de humedad, temperatura y velocidad del aire.....	47
3.8.4	Registro de datos.....	47
3.8.5	Programas de control de temperatura.....	50
3.8.6	Programación del controlador.....	52
3.8.7	Simulación de un control en cascada.....	55
Capítulo Cuatro. Resultados y discusión.....		59
4.1	Panel principal del algoritmo de control.....	60
4.1.2	Programación del algoritmo final.....	66
4.2	Pruebas de control.....	69
4.2.1	Capacidad de calentamiento y enfriamiento del sistema.....	69
4.2.2	Control para condiciones constantes de temperatura.....	70



4.2.3 Control PI en pruebas de secado con ciclos de variación de temperatura.....73

4.2.4 Sintonización de las ganancias PID para los ciclos de secado.76

4.2.5 Comparación de control PI y PID.....85

4.2.6 Resultados de los ciclos de secado con un control PID.....86

4.2.7 Programación de formas periódicas con diferentes arreglos.....94

4.2.8 Análisis del error para cada prueba de control.99

Capítulo Cinco. Conclusiones y Recomendaciones.105

5.1 Conclusiones.....106

5.2 Recomendaciones.....106

Referencias bibliográficas.108



Lista de figuras.

Figura 1. Ejemplo de un diagrama de flujo. Fuente internet (wikipedia).....	13
Figura 2. Esquema de un controlador PID enlazado en el proceso con un lazo cerrado.....	20
Figura 3. Respuesta al escalón en un proceso. Fuente: Mazzone (2002).	25
Figura 4. Diagrama para el control de una estación usando lógica difusa. Fuente internet (www.wikipedia.org).....	27
Figura 5. Diagrama de control para n-entradas en una red neuronal. Fuente internet (www.wikipedia.com)	28
Figura 6. Ondas cuadradas.	30
Figura 7. Rampa ascendente.....	31
Figura 8. Ciclos: a) sinusoidales, b) tipo dientes de sierra, c) ondas cuadradas, d) ondas cuadradas desplazadas, e) ondas triangulares y f) dientes de sierra inversas. Fuente internet (www.wikipedia.org).....	32
Figura 9. Ciclos arbitrarios. Fuente internet (www.wikipedia.org).....	32
Figura 10. Túnel de secado.....	40
Figura 11. FieldPOINT®.....	41
Figura 12. Detección de los canales en el controlador.	44
Figura 13. Comprobación en la medición de los diferentes canales en el controlador.	45
Figura 14. Controlador FieldPOINT® incorporado a la programación en LabVIEW®.....	46
Figura 15. Conversión de las señales análogas a datos de humedad y temperatura.....	47
Figura 16. Diagrama de bloques de una hoja de reporte.	48
Figura 17. Panel frontal de la hoja de datos del proceso.	49
Figura 18. Diagrama de bloques del reporte de la hoja de datos del proceso	50
Figura 19. Panel frontal de la programación de un control de temperatura.	51
Figura 20. Diagrama de bloques de la programación de un control de temperatura.....	52
Figura 21. Panel frontal de la programación de dos sistemas de control.	53
Figura 22. Panel frontal para especificar cambios lineales del valor de consigna (<i>set-point</i>)...54	
Figura 23. Programación de la variación del valor de consigna de temperatura.....	55
Figura 24. Panel frontal para el control cascada.....	56
Figura 25. Diagrama de bloques para la simulación control cascada.....	57



Figura 26. Diagrama de bloques de un control cascada incorporando el FieldPOINT®.....58

Figura 27. Panel principal de despliegue de datos a) datos numéricos b) datos en gráficos.....61

Figura 28. Valor de consigna, parámetros PID para el secado con temperatura constante y los factores para la conversión de la señal analógica a valores de proceso.63

Figura 29. Especificación de parámetros para la variación cíclica para el valor de consigna...64

Figura 30. Gráficas de la amplitud de señal de control, valor de consigna y valor del proceso.65

Figura 31. Variación del valor de consigna en forma de onda preestablecida.66

Figura 32. Diagrama de bloques del control de valor de consigna constante.67

Figura 33. Diagrama de bloques de la variación del valor de consigna en forma pseudocuadrada.67

Figura 34. Diagrama de bloques para la variación de consigna en forma de onda.68

Figura 35. Velocidad de calentamiento y enfriamiento del sistema.70

Figura 36. Temperatura del aire durante el secado a temperaturas constantes de 40, 50 y 60°C.71

Figura 37. Secado a temperaturas constantes de 40, 50 y 60°C72

Figura 38. Respuesta del sistema empleando parámetros PI calculados con el método de Formulas Básicas.....74

Figura 39. Parámetros PI calculados con el método de Ziegler y Nichols.....75

Figura 40. Parámetros de PI calculados con el método de formulas refinadas de Poulin y Pomerleau (1999).76

Figura 41. Ciclo de temperatura de secado 40-60°C en forma de onda pseudocuadrada mostrando el efecto de diferentes parámetros PID.....77

Figura 42. Ciclo 40-60°C con el periodo de 20-20 minutos.....80

Figura 43. Vista del error.....81

Figura 44. Respuesta del calentamiento en el proceso con una resistencia eléctrica.83

Figura 45. Respuesta del proceso a las variaciones cíclicas.....84

Figura 46. PI vs PID85

Figura 47. Ciclo de secado de 60-40°C con el periodo de variación de 20-10 minutos.....87

Figura 48. Ciclo de secado de 40-60°C con el periodo de variación de 20-20 minutos.....88

Figura 49. Ciclo de secado de 60-40°C con el periodo de variación de 20-20 minutos.....89



Figura 50. Ciclo de secado de 60-40°C con el periodo de variación de 20-60 minutos. 90

Figura 51. Ciclo de secado de 40-60°C con el periodo de variación de 20-40 minutos. 91

Figura 52. Ciclo de secado de 60-40°C con el periodo de variación de 20-40 minutos. 92

Figura 53. Ciclo de secado de 60-40°C con el periodo de variación de 20-10 minutos. 93

Figura 54. Ciclo Diente de sierra. 94

Figura 55. Ciclo Triangular 95

Figura 56. Ciclo Cuadrado. 96

Figura 57. Ciclo Diente de sierra inverso. 97

Figura 58. Respuesta del proceso la variación en el patrón de tipo sinusoidal. 98



Lista de tablas.

Tabla 1. Parámetros de ajuste (método de oscilación).	23
Tabla 2. Fórmulas del método de la curva de reacción.	24
Tabla 3. Variables del proceso de secado Propuestas por Chou y Chau (2001).	35
Tabla 4. Constantes PI de los parámetros calculados con diferentes métodos.....	74
Tabla 5. Ajustes del controlador PID usados para los diferentes ciclos.....	79
Tabla 6. Resultado del análisis de mínimos cuadrados para las pruebas de 40°C, 50°C y 60°C constantes.	100
Tabla 7. Resultado del análisis estadístico de los tres métodos comparados para una sintonización de las ganancias del controlador PI para ciclos en forma pseudocuadrada.....	101
Tabla 8. Mínimos cuadrados y coeficientes de correlación del análisis de error para cada una de las sintonizaciones de las ganancias de un controlador PID para ciclos en forma pseudocuadrada.	101
Tabla 9. Mínimos cuadrados y coeficientes de correlación de las pruebas de error en la comparación de los dos controladores (PI vs PID).	102
Tabla 10. Mínimos cuadrados y coeficientes de correlación para siete pruebas de control en forma de ciclos pseudocuadrados a diferentes tiempos constantes.	103
Tabla 11 . Mínimos cuadrados y coeficientes de correlación de los diferentes patrones cíclicos programados.	103



Nomenclatura.

$C_i(s)$	Acción de la integral en función de Laplace.
$C_P(s)$	Acción de la Proporcional en función de Laplace
$C_{PD}(s)$	Acción de un control Proporcional y Derivativo.
$C_{PID}(s)$	Acción de un control proporcional Integral y derivativo en función de Laplace.
D	Derivativo.
$e(t)$	Error en función de tiempo.
I	Integral.
K_0	Constante de Ziegler y Nichols.
K_c	Ganancia crítica del proceso.
k_i	Ganancia del tiempo de la Integral.
K_p	Ganancia de la proporcional.
P_c	Periodo de oscilación del proceso (Hz)
PID	Proporcional Integral y Derivativo
P	Proporcional.
T_d	Tiempo de la Derivada (seg.)
$T_d s$	Tiempo de la derivada en función de Laplace.
T_i	Tiempo de la Integral (seg.)
$T_i s$	Tiempo de la integral en función de Laplace.
t_u	Periodo en la última curva de reacción de Poulin y Pomerleau.



t_0	Tiempo de respuesta al escalón (seg.)
t_1	Inicio del cambio en escalón (seg.)
t_2	Final del cambio en escalón (seg.)
τ_0	Constante de Ziegler y Nichols.
u_0	Inicio en el cambio del escalón.
u_∞	Final del cambio en el escalón.
$u(t)$	Respuesta del proceso.
ω	Periodo de la respuesta del control.
v_0	Constante de Ziegler y Nichols.
y_0	Inicio del cambio.
y_∞	Final del cambio.



Capítulo Uno. Introducción.



Anteriormente al secado en los sistemas de control no se le consideraba de gran importancia ya que este era la última fase del proceso en el cual solo se le mantenía constante una sola variable y ésta era controlada con un sistema de control simple. En la actualidad el secado de productos agrícolas ha tenido un gran auge, ya que se quiere almacenar a éstos un mayor tiempo posible conservando sus componentes nutricionales, es por ello que el secado es uno de los métodos que se utiliza para esto. Estudios recientes indican que el secado de productos agrícolas a temperaturas constantes daña al producto produciendo una menor calidad de éste, es por tal motivo que se están haciendo investigaciones de secado de productos con diferentes niveles de temperaturas siguiendo tendencias diferentes en el secado.

Aunado a esto los sistemas de control simples no son tan óptimos para el seguimiento de los diferentes patrones de variación en el control de secado; es por ello que se requiere de sistemas de control que sigan estas variaciones y que éstas estén dentro de su programación, por ello se decide realizar un algoritmo para el control de las condiciones variables, esperando que este se adecue bien y siga todas las variaciones con el menor error posible.

En el presente trabajo se realizó el algoritmo que cumple con casi todos los patrones de cambio en el control de la temperatura; a continuación se describen cada uno de los capítulos que lo conforman.

El primer capítulo se habla de la problemática que se tiene que resolver haciendo se las preguntas de investigación y para que es bueno que el control de procesos de un secador, teniendo la justificación del porque la realización del trabajo de investigación, también las hipótesis y los objetivos que se esperan alcanzar.

En el capítulo dos se presentan las bases teóricas de la investigación, que van desde los conceptos básicos de control de procesos, pasando por las teorías que rigen dicho proceso y su forma de cómo se puede controlar.

En el capítulo tres se muestran todos los métodos empleados para la realización de las pruebas de control y también se muestra la realización del programa de control, y los equipos utilizados.

En el capítulo cuatro se muestra el resultado del desarrollo del algoritmo y cada una de sus partes que lo conforman; también, se muestra el resultado de las pruebas de control para



cada una de los patrones mas comúnmente utilizados en la variación en el secado de productos agrícolas así como las discusiones de cada resultado.

En el capítulo cinco se muestran las conclusiones y respuestas a cada una de las hipótesis que se plantearon para esta investigación.

1.1 Planteamiento del problema.

El secado de productos agrícolas se realiza de manera tradicional al aire libre, sin tener control de las condiciones de operación y la calidad del producto (Boateng y Axtell, 1998). En la actualidad el procedimiento de secado de productos agrícolas se realiza con equipos que se operan a condiciones constantes de secado, produciendo una deshidratación que afecta las características del producto, además de incrementar los costos de operación (Axtell y Bush, 1991).

Con un control eficiente del proceso de secado es posible variar y controlar la temperatura y la humedad, además de generar un ahorro de energía por la operación e incrementa calidad en los productos deshidratados, cosa que no sucede con los secadores que operan de forma constante. La carencia de un controlador que involucre las variaciones que se puedan generar en el proceso de secado y el requerimiento de parámetros de control PID en procesos con condiciones de operación variables, se necesita de un algoritmo para el control en el cual se engloben todas las variaciones cíclicas y las geometrías que se decidan realizar en el valor de consigna (*set-point*).

1.2 Antecedentes.

Existen procedimientos para el cálculo de los parámetros de control; entre ellos las ecuaciones de Zeigler y Nichol (1942), para el método de oscilación (método de respuesta en frecuencia) y para el método basado en la curva de reacción (método de respuesta al escalón). Los dos métodos se basan en la respuesta del proceso a variaciones, estas ecuaciones fueron evaluadas por Åström y Ho (1991), para disminuir el error (*overshoot*) que se genera en el proceso; estas ecuaciones proporcionan los parámetros de control para cada uno de los



controladores que se aplican en la industria, los cuales son: proporcional (P), proporcional integral (PI) y proporcional derivativo integral (PID); siendo el más estable el controlador PID ya que este permite la disminución y predicción del error (Virginia, 2002); sin embargo, contienen estructuras compuestas que incorporan dos o más controladores (Oubrahin y Leonard, 1998); los controladores PI, pueden ser estables y hacer que el proceso se mejore ya que el tiempo de la Derivada (D) produce ruido en la señal (Poulin y Pomerleau, 1996), debido a que los valores usados para este tipo de control PI eran erróneos se propusieron nuevas ecuaciones para el cálculo de estos parámetros (Poulin y Pomerleau, 1999) mejorando el control y disminuyendo el error (*overshoot*).

Qing y cols. (1999), proponen un método para un PID simple con alto rendimiento para una extensa gama de procesos lineales, de alto y bajo orden, este modelo es desarrollado para un tiempo muerto de segundo orden, simulando y comparándolo con datos en tiempo real.

En el 2002, Basilio y Matos diseñaron controles PI y PID usando el método basado en la curva de reacción, ajustando los controladores con las condiciones del proceso; retomando el análisis Åström y Hägglud (2004) para conocer el rendimiento en el proceso de los controladores; por otra parte, Huseyin y Zafer (2004), proponen una nueva técnica de ajuste del PID por medio de un algoritmo llamado “hormiga” (*ANT*), comparándolo con los métodos de Ziegler y Nichols (1942) y Poulin y Pomerleau (1999), obteniendo que el algoritmo hormiga no provoca error (*overshoot*) en la respuesta del proceso y se ajusta perfectamente al cambio total del valor de consigna (*set-point*).

Jianghua y Huihe (2003), proponen un nuevo método de integración para controles PID en procesos inestables incorporando dos nuevos valores a los parámetros de control (K , T_i , T_d , b y c), cuya función es filtrar la señal de salida del controlador mejorando el comportamiento del proceso, se selecciona un tiempo muerto amplio y se estabiliza en un tiempo mínimo reduciendo el error (*overshoot*).

Curt y col (2006), plantean que los sistemas de control se fundamenten tanto en ecuaciones de diseño como en el conocimiento humano, realizando una conjunción para la



evaluación de la calidad y el control del proceso. Por otro lado Qiang y Wen-Jian (2006), realizaron una función de transferencia para sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) –por sus siglas en inglés- las cuales son difíciles de controlar ya que existen iteraciones entre las variables de entrada y salida del proceso, encontrando que los sistemas con control simple (PID) resultan ser los más estables para este tipo de procesos.

Amer y Gottschalk (2005), utilizaron un controlador PID al deshidratar plátano, en el cual evaluaron los factores que afectan al plátano durante el proceso. Estos factores fueron el contenido de humedad relativa, el flujo y temperatura de aire en el secador; analizados con respecto a la variación del peso del plátano, obteniendo que la velocidad del aire fue el principal factor de obscurecimiento. Por otra parte Morissette y Savoie (2005), simularon el secado de heno utilizando como herramienta de programación el software LabVIEW® incorporando modelos matemáticos que realicen la secuencia de control; comprobando que los resultados con una prueba experimental son los mismos que en la simulación. Por otra parte, Faraco y Gabriele (2005), recomiendan el uso del software LabVIEW® como método de aprendizaje para el desarrollo del potencial humano por su fácil comprensión y uso.

Las variables principales en el proceso de secado según Traub (2005), son la temperatura y la humedad, utilizándolas para el control; Heilman (2005), agrega dos variables más al proceso de secado considerándolas importantes; el flujo de aire y la presión.

La distribución de temperaturas y humedad en el secado de productos agrícolas, con diferentes ciclos en la variación de la temperatura del aire de secado fueron propuesta por Ho y cols. (2002), que al aplicar un control PID obtienen una máxima eficiencia y un mejor control del proceso; mientras que Chou y Chua, (2001), estudiaron la implementación de una bomba de calor para un sistema de secado experimental aplicando los modos de control PID en la entrada del aire, monitoreando y registrando los datos en un ordenador.

El uso de los controles PID para muchos procesos simples lo propone Curtis Elia (1999), exponiendo que el control PID para una sola variable a controlar es benéfico con una estructura simple; se le considera como un control con mayor demanda en el mercado por su



fácil implementación y aplicación a varios criterios de sistemas control, comparándolo en base a la complejidad del proceso.

Los Controlador lógico Programable (PLC) son dispositivos electrónicos muy usados para la automatización industrial (Inmaculada y Medrano, 2006), su historia se remonta a la década de los 60' cuando la industria buscó en las nuevas tecnologías electrónicas una solución más eficiente para reemplazar a los sistemas de control basados en circuitos eléctricos, relés y otros componentes comúnmente utilizados para el control de los sistemas de lógica combinatoria. En la actualidad, se utilizan comúnmente en líneas industriales de producción (Flordal y cols, 2007), por ejemplo en la industria automotriz donde se utilizan en células de robots. Investigaciones recientes proponen la utilización de PLC para modelos predictivos de controladores para túneles de congelado criogénicos (Nazrul I. S. y Vittal P., 2007), minimizando a cero el error.

En el mercado existen varios tipos de software para el ajuste de los parámetros en el control PID, Tom (2006) hace una comparación de estos softwares con respecto al impacto económico y de programación, concluyendo que se necesita aplicar más herramientas de programación para la simulación de los procesos industriales

1.3 Justificación.

Los equipos para el secado de productos agrícolas, son aquellos que realizan la separación del agua en el sólido por un medio térmico. Las mejoras en el equipo de secado para productos agrícolas consideran el uso de sistemas de control automático para las condiciones de operación (Michael y cols, 1997); estudios tendientes a las mejoras, de los secadores, están relacionados con el avance de las técnicas para la conservación de las propiedades y nutrientes de los productos deshidratados, además de incrementar la eficiencia energética. Investigaciones recientes han mostrado que sometiendo un material a condiciones de operación cambiantes, se pueden lograr mejoras en la calidad de los productos deshidratados y una disminución del gasto energético (Ho et al, 2002).



El interés de implementar sistemas de control que respondan con las necesidades de la industria; además, del incremento del consumo de productos secos que conserven las propiedades y nutrientes hace necesaria la implementación de sistemas de control que permitan cambios en el proceso.

Los sistemas de control automático para los procesos diversificados en la agricultura y la industria, se han solucionado con la aplicación de métodos de control clásicos (Misa y cols, 2004), sin embargo, es necesaria la creación de nuevos algoritmos de control para el control eficiente.

Se han desarrollado teorías matemáticas acerca de los sistemas de control lineal multivariable para las operaciones unitarias en los procesos (Agamennoni y cols, 1988); sin embargo, el proceso de secado no se había considerado de importancia, hasta que se dio auge al consumo de deshidratados.

El proceso de secado se puede mejorar aplicando sistemas programables de control automático. En el mercado existen controladores con diversos tipos de funcionamientos para el control de las condiciones variables de proceso. Los controladores para el secado de madera consideran cambios lineales en la variación de las condiciones de operación; sin embargo, éstos tienen alto costo, son diseños limitados a la aplicación y no consideran patrones de variación complejos.

A nivel industrial los controladores cuentan con ajustes simples del valor de consigna, reduciendo el número de parámetros que se sintonizan (Basilio y Matos, 2002), por lo tanto se desarrollará un controlador que involucre en su programación los patrones simples, cíclicos y complejos para la variación del proceso.

Para lograr lo anterior se hace necesario la elección de un sistema de control distribuido, independiente con aplicaciones integradas en LabVIEW® (Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench) para el control, medición y procesamiento de señales del proceso.



El controlador se integra en un secador experimental de laboratorio. Se considera que el secado es un proceso estable de primer orden. Las adecuaciones del sistema de control consideran el cálculo de los parámetros de control y no consideran alguna función de transferencia. Los métodos de Ziegler y Nichols (1942) y Poulin y Pomerleau (1999) se eligieron para el cálculo de los parámetros de control, pues se pueden emplear en procesos de primer orden y no requieren del conocimiento de la función de transferencia.

Los datos que se presentan en el proceso de control pueden ser analizados por métodos estadísticos, como lo son el método de (MSE- Mean Square Error) mínimos cuadrados, que sirve para el análisis del error en una función; también por el método de coeficientes de correlación que este sirve para saber que tan exactos son los datos y parecidos a una función en el proceso (Terry y Himmelblau, 1993).

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general.

Desarrollar un algoritmo de control para el fácil uso del secador experimental en el cual se operará con condiciones variables.

1.4.2 Objetivos específicos.

- Diseñar un algoritmo en ambiente de LabVIEW® para el control de temperatura en un secador en el cual se varía el valor de consigna (*set-point*) de forma escalonada y cíclica.
- Analizar los datos de temperatura del aire en el secador experimental para la aplicación de los controladores.
- Analizar las pruebas de control para la mejora del algoritmo.
- Establecer los parámetros para el control de temperaturas siguiendo las variaciones en el valor de consigna (*set-point*) en diferentes geometrías cíclicas.



1.5 Hipótesis

La aplicación de herramientas para programar sistemas de control permitirá incorporar un controlador que englobe las variaciones en el valor de consigna (*set-point*) durante el secado convectivo.

En sistemas en los que el valor de consigna se hace variar siguiendo patrones cíclicos, los parámetros de control (PID y PI) calculados con las ecuaciones de Poulin y Pomerleau (1999) mejoran la controlabilidad y disminuyen variabilidad que con las ecuaciones de Ziegler y Nichols (1942).

En sistemas en los que el valor de consigna se hace variar siguiendo tendencias suavizadas (triangulares, pseudocuadradas), el error en el control es menor que en sistemas en el cual se requieren cambios abruptos (ciclos cuadrados y dientes de sierra) del valor de consigna (*set-point*).



Capítulo Dos. Marco Teórico.



2.1 Algoritmo.

Un algoritmo es un conjunto ordenado y finito de operaciones que permite hallar la solución de un problema. Su importancia está en mostrar la manera de llevar a cabo los procesos y resolver problemas matemáticos al igual que las funciones matemáticas. Un algoritmo debe de ser definido, finito y eficiente; entendiéndose por eficiente que las instrucciones encuentren la solución en un menor tiempo posible; finito, por qué debe de tener un determinado número de pasos; y definido, es porque si se sigue el mismo proceso más de una vez, se debe llegar siempre al mismo resultado. En la vida cotidiana se emplean multitudes de algoritmos por ejemplo un manual de instrucciones de cómo encender y operar algún equipo.

2.1.1 Propiedades de los algoritmos.

Los algoritmos tienen cinco propiedades.

Carácter finito. Siempre debe de terminar en un número finito de pasos. Lo que quiere decir que los pasos que sean necesarios siempre deben de tener un final.

Precisión. Cada paso debe de estar debidamente definido, las operaciones que se realicen deben de estar especificadas de manera rigurosa para cada paso del algoritmo.

Entrada. Debe de contar de cero a más entradas: estas son dadas antes de que comience con el algoritmo, estas entradas son tomadas específicamente de objetos.

Salida. Debe de tener una o más salidas de acuerdo a las entradas que este algoritmo tenga.

Eficacia. En el sentido de que todas las operaciones a realizar deben de ser básicas para hacerlas exactas en un tiempo finito por un hombre utilizando papel y lápiz.



2.1.2 Formas de presentación de un algoritmo.

Los algoritmos pueden ser expresados de diferentes formas que van desde el lenguaje natural, pseudocódigos, diagramas de flujo y lenguajes de programación. Estas expresiones son adecuadas para expresar un algoritmo pero no representan ningún lenguaje de programación específico, teniendo como más comunes las siguientes formas.

Diagramas de flujo.

Son descripciones gráficas de los algoritmos pues se usan símbolos conectados con flechas para iniciar la secuencia de inicio. Éstos son usados principalmente para representar algoritmos pequeños ya que abarcan mucho espacio y su construcción es laboriosa. Por su facilidad de lectura son utilizados como introducciones a los algoritmos que pueden representar la descripción de un lenguaje o un proceso de programación para personas que son ajenas a ello, un ejemplo es la figura 1 donde se puede ver con cinco pasos; en el cual se lee un valor, lo convierte a una constante y luego hace una división de la constante entre sí misma y pregunta si esta división es igual a b entonces realiza otra operación y la vuelve a dividir y preguntar si esta es igual a b entonces manda a que el valor se escriba igualándolo a una señal y la finaliza. El algoritmo consta de cinco pasos mínimos para la realización de las operaciones; porque tiene un carácter finito que a pesar de que realiza múltiples iteraciones siempre se tiene que llegar en algún momento al término; es preciso porque en cada una de los pasos tiene las operaciones bien definidas que se deben de realizar en cada paso; tiene una entrada una salida del proceso y es eficaz ya que como se observa las operaciones se pueden hacer con lápiz y papel.



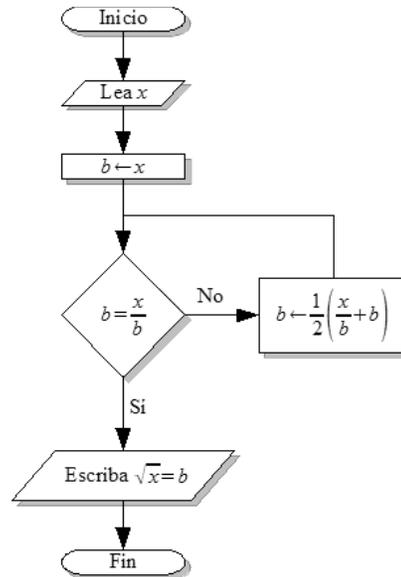


Figura 1. Ejemplo de un diagrama de flujo. Fuente internet (wikipedia).

Pseudocódigo.

Es la descripción de un algoritmo que se asemeja a un lenguaje de programación pero el lenguaje no es específico a uno de programación sino que tiene un lenguaje coloquial. Las ventajas que se tiene con respecto al diagrama de flujo son en el espacio para representar series complejas.

Las implementaciones más usuales de los algoritmos van desde la más clásica que es en la programación numérica pero esa no es la única utilización, pues se puede implementar en muchos otros casos y en la vida cotidiana.

2.2 El Proceso.

El diccionario de la real lengua española define el proceso como: una operación o un desarrollo natural progresivamente continuo, marcado por una serie de cambios graduales que suceden uno al otro en una forma relativamente fija y que conduce resultados o propósitos determinados; a una operación artificial o voluntaria progresiva que consiste en una serie de acciones o movimientos controlados sistemáticamente dirigidos hacia un resultado o propósito determinado.



Según Felder y Rousseau (2004, p.43) dicen que “un proceso es cualquier operación o series de operaciones por las cuales se logra un objetivo particular”.

Un proceso está definido por una serie de entradas y salidas, a esto se le llama alimentación y producto respectivamente. Los procesos se dividen en proceso por lotes y continuos. Los procesos por lotes que son aquellos que en su operación solo se hace una vez hasta que el producto se encuentre a las condiciones deseadas y los procesos continuos son aquellos en los cuales la operación es en forma continua y la alimentación y productos no se detienen. Para estos procesos es necesario gran estabilidad en el sistema

En este estudio se nombró proceso a la operación de secado referida al control y este proceso es por lotes lo que quiere decir que su operación no es de manera continua y la estabilidad en el proceso se debe de tener desde el primer punto de su puesta en marcha, ya que esta es la operación principal de estudio.

2.3 Variables de proceso.

Una variable de proceso es toda aquella magnitud que se tiene en el proceso, que es inconstante y manipulable a lo largo de la operación de proceso; por ejemplo la temperatura, el flujo, la presión y la humedad, estas son variables de proceso mientras no se mantengan constantes o en un punto fijo. Estas variables pueden ser controladas. Ponce (2007) dice que “Son las magnitudes que se especifican en los procedimientos que describen las actividades que un observador debe de medir para que ésta sea un variable.”

2.4 Condiciones variables.

Son todas aquellas fases que tienen variabilidad en el proceso y hace que éste se comporte de manera inconstante. Una condición variable frecuente es la programación de ciclos de calentamiento en los controladores ya que éstos hacen que el proceso sea variable pero al mismo tiempo estables con respecto al control de las condiciones.



2.5 Perturbaciones.

Una perturbación es una señal que tiende a afectar negativamente el valor de la salida de un sistema, una perturbación puede ser interna; cuando ésta surge dentro del proceso por ejemplo un cambio brusco en la temperatura; externa, cuando ésta surge en el exterior del sistema por ejemplo cuando llueve la humedad dentro del secador aumenta.

2.6 El proceso de secado.

El secado es la separación de agua de un sólido con una corriente de aire; también es el procedimiento que permite eliminar de un material cantidades relativamente pequeñas de agua en forma de vapor por medio de una corriente de aire. En el diseño y operación de secadores se requiere conocer dos tipos de información: la física del movimiento de humedad en el sólido y la difusión del vapor de agua del sólido a la corriente de aire. Además, para el diseño ingenieril del secador es necesario conocer los requerimientos de calor y flujo de aire, para ello se puede utilizar curvas de secado o isoterms de sorción con diagramas de entalpía-concentración (Mujumdar, 1995).

En la operación intervienen dos fenómenos fundamentales:

- La transferencia de calor, que aporta la energía necesaria para la transformación del agua en vapor (principalmente calor latente de vaporización).
- La transferencia de vapor de agua a través y fuera del sólido.

El secado más utilizado es por aire, a la presión atmosférica. El calor se transfiere al sólido por convección de aire caliente o mediante una superficie caliente (conducción). De manera general el vapor de agua formado se mezcla con el aire, que constituye así el medio para eliminarlo (Perry, 1974).

Durante el proceso de secado de materiales húmedos, la humedad se transporta desde el interior del material hasta la superficie de éstos y de ahí hacia el medio circundante (Meinardo y Vladimir, 1986). En el secado convectivo, el material húmedo se pone en contacto con un gas caliente y el líquido de la superficie se vaporiza y difunde hacia el medio circundante. El



agente de secado (gas caliente) cumple dos funciones: suministrar calor al material húmedo y absorbe vapores de agua. La vaporización de humedad en la superficie del material crea una diferencia entre el contenido de humedad de las capas interiores y las superficiales, lo cual provoca la difusión de humedad desde las capas profundas hacia las superficiales. Lo que quiere decir que el líquido en el interior del material se desplaza por los poros del material al exterior haciendo que éste tenga una pérdida de humedad en todo el cuerpo del material.

Este fenómeno de la difusión está explicado por la 1ª Ley de Fick que menciona: “cuando en un sistema termodinámico multicomponente hay un gradiente de concentraciones, se origina un flujo irreversible de materia, desde las altas concentraciones a las bajas, llamado difusión”. La difusión tiende a devolver el sistema a un estado de equilibrio, de concentración constante. La ley de Fick indica que el flujo difusivo que atraviesa una superficie (J en $\text{mol cm}^{-2} \text{s}^{-1}$) es directamente proporcional al gradiente de concentración.

Las variables principales que actúan en el proceso de secado y las cuales se deben de controlar son la temperatura, la humedad y el flujo de aire en el sistema las cuales actúan de manera conjunta unas con otras; por ejemplo, al aumentar la temperatura del aire de secado la humedad disminuye en el sistema haciendo que la velocidad del aire también se incremente por tener menor densidad que un aire frío, esto hace que el secado de los productos sea rápido que en comparación con temperaturas menores; a temperaturas menores la humedad en el sistema aumenta lo que hace que el aire de secado tenga menor capacidad de extracción del agua en el sólido provocando que el proceso de secado sea lento.

A consecuencia de esto se desea implementar un sistema de control que siga las variaciones del sistema, y se encontraron controladores sencillos en su programación como son los controladores PID que se describen a continuación.

2.7 Control de procesos.

El objetivo principal del control de procesos es mantener en un determinado valor de operación las variables del proceso tales como: la temperatura, la presión, los flujos y los compuestos, etc. Los procesos son de naturaleza dinámica lo que quiere decir que en ellos siempre ocurren cambios y si no se toman las acciones pertinentes, cambiarían cuando las



variables del proceso los niveles de seguridad, la calidad del producto y los índices de producción no se cumplirán.

Conceptos esenciales en control son: la variable controlada, como su nombre lo indica es la variable que se debe de mantener controlada dentro de un valor deseado. El valor de consigna (*set-point*), es el valor que se desea tener a la variable controlada. La variable manipulada, es la variable que se utiliza para mantener a la variable controlada en el punto de control. Cualquier variable que ocasione que la variable de control se desvíe del punto de ajuste se define como perturbación o trastorno; en la mayoría de los procesos existen perturbaciones diferentes, esta es la causa más común de que se requiera de poner un sistema de control automático; si no hubiera alteraciones en el proceso, prevalecerían las condiciones de operación de diseño y no se necesitaría supervisar continuamente el proceso.

Los siguientes términos también son importantes: lazo abierto o circuito abierto, éstos se definen a la situación donde el controlador no realiza ninguna función relativa para mantener la variable controlada en el punto de control; quiere decir que la acción del controlador no afecta a la medición. El control de circuito cerrado o lazo cerrado es aquel en donde el controlador está conectado al proceso, este compara el punto de ajuste con la variable del proceso y hace la acción correctiva.

También existen sistemas de control de lazo abierto estos sistemas son los que no afectan la acción del control, esto quiere decir que no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada; por lo tanto, a cada entrada de referencia le corresponde una condición operativa fija; el resultado del proceso depende de la calibración. Este sistema de control se utiliza en la actualidad si se conoce la relación de la entrada con la salida y que no existan perturbaciones en el sistema. Un ejemplo muy común es en el control de tránsito el cual es programado por medio de tiempos para encender cada una de las tres luces.

El objetivo de tener un sistema de control automático de procesos es mantener a la variable manipulada para mantener a la variable controlada cerca de un punto de control aunque existan perturbaciones en el sistema.



El controlador regulador es aquel que se utiliza en los procesos para compensar las perturbaciones. A veces como es este caso las perturbaciones más importantes es el punto de control mismo, esto es, que el punto de control puede cambiar en función del tiempo (lo cual es típico en los procesos por lotes), y en consecuencia la variable de control debe ajustarse al punto de control a esto se llama servo control que son diseñados para este tipo de procesos.

Las razones principales por las cuales se debe de tener un sistema de control son:

Evitar las lesiones al personal de la planta o daño al equipo; mantener la calidad en el producto y mantener la producción de la planta al costo mínimo.

2.8 Estrategias de control.

2.8.1 Control por retroalimentación.

En este proceso se toma la variable controlada y se realimenta al controlador para que este pueda tomar una decisión; por ejemplo, en un proceso si la temperatura aumenta y en tal efecto cause una perturbación su efecto se propaga a todo el proceso antes de que cambie la señal de salida, una vez cambiada la señal de salida está a su vez cambia la señal del transmisor al controlador en ese momento el controlador detecta la perturbación y debe de compensar la perturbación abriendo o cerrando el elemento final de control para hacer que el proceso tenga una corrección en el sistema. Esta operación de control es en base a prueba y error ya que hace que el proceso oscile sobre el punto de ajuste. La ventaja que tiene este tipo de control es que se compensa todas las perturbaciones y la desventaja que tiene este control está en que únicamente trata de compensar la perturbación hasta que la variable controlada se ha desviado del punto de control, esto es, que la perturbación se debe de propagar por todo el proceso antes de que la pueda compensar el control.

2.8.2 Control por acción pre calculada.

El objetivo de este control es medir las perturbaciones y compensarlas antes de que la variable controlada se desvíe del punto de control si se aplica de manera correcta la variable controlada no se desvía del punto de control. Este tipo de acción debe de ser por medio de dos



señales que se calculan para tener como deben de hacerse las correcciones de control pero solo va a controlar estas dos variables, si otra variable que no ah sido calculada interactúa en el proceso no se podrá compensar por medio de este control y causaría perturbaciones grandes en el proceso.

Para evitar esto se debe de acoplar dos sistemas de control uno por retroalimentación para cada una de las demás variables que se crean que puedan afectar seriamente el proceso; y así el control por acción pre calculada se aplica a las perturbaciones más serias en el proceso y el de retroalimentación compensa las demás.

2.9 Controladores PID (Proporcional, Integral y Derivativo) y su estructura.

Un controlador PID es un sistema de control, que mediante una actuador, es capaz de mantener una variable o proceso en un punto deseado dentro del rango de medición del sensor que la mide. Es uno de los métodos de control más frecuentes y precisos dentro de la regulación automática.

Para el correcto funcionamiento de un controlador PID se necesita al menos, un sensor que determine el estado del sistema, un controlador que genere la señal que gobierna al actuador y un actuador que modifique al sistema de manera controlada.

En la Figura 2, se muestra un sistema de control PID de lazo cerrado. En donde el sensor proporciona una señal analógica al controlador, él cual le presenta un punto actual del sistema, la señal puede representar un valor de tensión eléctrica o señal de temperatura. Después el controlador lee una señal externa de un valor que desea alcanzar, esta señal tiene el nombre de valor de consigna (*set-point*) o ajuste, la cual es de la misma naturaleza y tiene el mismo rango de valores que la señal que proporciona el sensor. Después el controlador resta la señal del valor de consigna (*set-point*) con la señal del sensor y es ahí donde entra la labor del control para que este error se disminuya a cero; después de tener el error la señal es mandada al actuador que es quien ajusta al proceso para la disminución del error este esquema se presenta en la Figura 2.



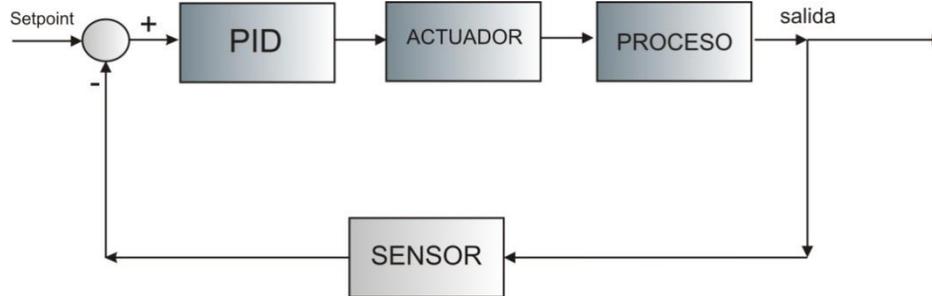


Figura 2. Esquema de un controlador PID enlazado en el proceso con un lazo cerrado.

Estos controladores muestran que son robustos en muchas aplicaciones y son los que más se usan en la industria. La estructura de un controlador PID es simple, aunque a su simpleza es también su debilidad, dado que limita el rango de plantas donde puede controlar en forma satisfactoria, a continuación se discutirá del enfoque tradicional al diseño de controladores PID.

Consideremos un lazo de control de una entrada y una salida (SISO) de un grado de libertad:

Los miembros de la familia de controladores PID, incluyen tres acciones: proporcional (P), integral (I) y derivativa (D). Estos controladores son los denominados P, I, PI, PD, PID.

- P: Acción de control proporcional, muestra una salida del controlador que es proporcional al error, es decir: $u(t)=K_p \cdot e(t)$, que queda con una función de transferencia:

$$C_p(s) = k_p \dots \dots \dots (1)$$

Donde K_p es una ganancia proporcional ajustable. Un controlador proporcional puede controlar cualquier planta estable, pero posee desempeño limitado y error en régimen permanente (off-set).

- I: Acción de control integral, da una salida del controlador que es proporcional al error acumulado, lo que implica que es un modo de controlar lento.



$$u(t) = k_i \int_0^t e(t) dt \qquad C_i(s) = \frac{K_i}{s} \dots\dots\dots (2)$$

La señal de control $u(t)$ tiene un valor diferente de cero cuando la señal de error $e(t)$ es cero. Por lo que se concluye que dada una referencia constante, o perturbaciones, el error en régimen permanente es cero.

- PI: Acción de control proporcional-integral, se define mediante;

$$u(t) = k_p e(t) + \frac{k_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \dots\dots\dots (3)$$

Donde T_i se denomina tiempo de la integral y es quien ajusta la acción de la integral. La función de transferencia resulta:

$$C_{PI}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \dots\dots\dots (4)$$

Con un control proporcional, es necesario que exista error para tener una acción de control distinta de cero. Con una acción integral, un error pequeño positivo siempre nos dará una acción de control creciente, y si fuera negativa la señal de control será decreciente. Este razonamiento sencillo muestra que el error en régimen permanente será siempre cero.

- PD: Acción de control proporcional-derivativa, se define mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \dots\dots\dots (5)$$

Donde T_d es una constante denominada tiempo derivativo. Esta acción tiene carácter de previsión, lo que hace más rápida la acción de control, aunque tiene la desventaja importante que amplifica las señales de ruido y puede provocar saturación en el actuador. La acción derivativa no se utiliza por sí sola, debido a que sólo es eficaz durante periodos transitorios. Teniendo como función de transferencia del PD:

$$C_{PD}(s) = K_p + sK_p T_d \dots\dots\dots (6)$$

Cuando una acción de control derivativa se agrega a un controlador proporcional, permite obtener un controlador de alta sensibilidad, es decir que responde a la velocidad del cambio del error y produce una corrección significativa antes de que la magnitud del error se



Algoritmo para el control de condiciones variables en un secador

vuelva demasiado grande. La acción derivativa agrega un amortiguamiento al sistema, por lo tanto, permite un valor más grande de la ganancia K, la cual lo hace más estable.

• PID: Acción de control proporcional-integral-derivativa, esta acción combinada reúne las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \dots\dots\dots (7)$$

la función de transferencia resulta:

$$C_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \dots\dots\dots (8)$$

2.10 Métodos de ajustes en los controladores.

Los métodos de ajuste de la sintonización de los parámetros del controlador pueden ser mediante modelos matemáticos del proceso, existen diferentes técnicas de diseño con el fin de determinar los parámetros del controlador que cumpla las especificaciones en estado transitorio y en estado estable del sistema en lazo cerrado. Sin embargo, si el proceso es tan complicado que no es fácil obtener su modelo matemático, tampoco es posible un enfoque analítico para el diseño de un controlador PID. En este caso, se recurre a los enfoques experimentales para la sintonización de los controladores PID.

Para procesos estables existen dos métodos de ajuste clásico y de fácil aplicación que se basan en el método de ajuste clásico de Ziegler y Nichols, con este método se pueden hacer los ajustes de las ganancias del controlador y son el método de oscilación (método en frecuencia) y el método basado en la curva de reacción (método de respuesta al escalón).

2.10.1 Método de oscilación (método en frecuencia).

Este método se basa en un lazo de control sólo con una ganancia proporcional y de acuerdo a la ganancia utilizada para que el sistema empiece a oscilar y al período de esas oscilaciones podemos establecer las ganancias del controlador PID.



Este procedimiento es válido solo para procesos estables a lazo abierto y se lleva a cabo con los siguientes pasos:

1. Utilizando sólo control proporcional, comenzando con un valor de ganancia pequeño, incrementando la ganancia hasta que el lazo comience a oscilar. Estas oscilaciones deben de ser lineales y se deben de observar en la salida del controlador.

2. Registrar la ganancia crítica del controlador $K_p = K_c$ y el período de oscilación de la salida del controlador, P_c .

3. Ajustar los parámetros del controlador según la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de ajuste (método de oscilación).

	K_p	T_i	T_d
P	$0.50K_c$		
PI	$0.45K_c$	$\frac{P_c}{1.2}$	
PID	$0.60K_c$	$0.5P_c$	$\frac{P_c}{8}$

La Tabla 1 fue obtenida por Ziegler y Nichols (1942), quienes buscaban una respuesta al escalón de bajo amortiguamiento para procesos que puedan describirse satisfactoriamente para un modelo de primer orden.

2.10.2 Método de basado en la curva de reacción (método de respuesta al escalón).

Este método se debe al ensayo del sistema a lazo abierto con un escalón unitario, se calculan algunos parámetros como la máxima pendiente de la curva y el retardo, y con ellos establecemos las ganancias de controlador.



Algoritmo para el control de condiciones variables en un secador

Una versión cuantitativa lineal de éste modelo puede ser obtenida mediante una experimentación a lazo abierto, haciendo lo siguiente:

Con el proceso a lazo abierto, llevarlo a un punto de operación normal. Se dice que la salida del proceso se estabiliza en $y(t) = y_0$ para una entrada constante de $u(t) = u_0$. En el instante inicial t_0 aplicar un cambio en la entrada escalón, desde u_0 hasta u_{∞} ; registrar la salida hasta que se estabilice el control en el nuevo punto de operación. La curva resultante es la curva de reacción del proceso como se muestra en la Figura 3.

Para calcular los parámetros del modelo se tienen las siguientes ecuaciones.

$$K_0 = \frac{y_{\infty} - y_0}{y_{\infty} - u_0} \quad \tau_0 = t_1 - t_0 \quad v_0 = t_2 - t_1 \dots \dots \dots (9)$$

Utilizando las siguientes ecuaciones:

Tabla 2. Fórmulas del método de la curva de reacción.

	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{K_0 \tau_0}{v_0}$		
PI	$\frac{0.9 K_0 \tau_0}{v_0}$	$3\tau_0$	
PID	$\frac{1.2 K_0 \tau_0}{v_0}$	$2\tau_0$	$0.5\tau_0$

La Tabla 2 fue obtenida por Ziegler y Nichols (1942), quienes buscaban una respuesta al escalón de alto amortiguamiento para procesos que puedan describirse satisfactoriamente para un modelo de primer orden.



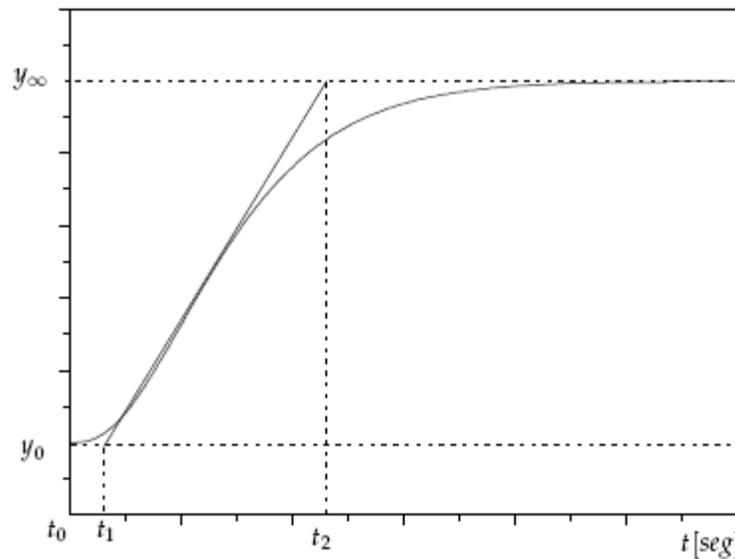


Figura 3. Respuesta al escalón en un proceso. Fuente: Mazzone (2002).

2.10.3 Método de Basado en el Máximo Pico de Resonancia.

Como su nombre lo indica es un método basado en el pico máximo de resonancia en la curva de reacción del proceso este método fue desarrollado por Poulin y Pomerlau (1999), este método se basa en el cálculo del máximo pico de resonancia de la gráfica de Nichols para procesos inestables y de lazo abierto. Se basa en el análisis de los valores que tiene el proceso en las curvas de reacción haciendo que éstas se estabilicen con mayor acercamiento a los valores de consigna (*set-point*).

Este método es más eficaz para el cálculo de las constantes de las acciones del controlador; este método se usa principalmente en el análisis de las constantes para procesos altamente inestables lo que hace que el cálculo normal de las constantes resulte erróneo y no se pueda controlar el proceso.

2.10.4 Método de Poulin y Pomerleau (1999).

El método consiste en la adecuación de los parámetros del control por medio de fórmulas aplicadas solo a dos parámetros –proporcional e integral- éstas se calculan mediante



la curva de reacción del proceso en donde se estima el periodo de la última curva en el proceso.

Para la obtener el periodo en la última curva de reacción se aplica la siguiente formula:

$$t_u = 2\pi/\omega \dots\dots\dots (10)$$

donde ω es el periodo de la respuesta del control.

Para la aplicación de este método se propusieron las siguientes fórmulas; para el cálculo de la ganancia de la proporcional:

$$0.45 * K_p \dots\dots\dots (11)$$

donde K_p es la ganancia critica del proceso.

Y para el cálculo del tiempo de la integral se aplica la siguiente fórmula:

$$t_u/1.2 \dots\dots\dots (12)$$

2.11 Métodos de ajustes en los controladores.

Las técnicas de control de procesos se dan en el campo de la industria. Estas nacen desde la manera de prevenir accidentes dentro de la planta de proceso, la mejora en la calidad en el producto, la automatización del proceso. Es por ello que existen técnicas especiales para cada uno de los procesos, estas técnicas de control van desde el control simple de una sola variable hasta de métodos más complejos de varias variables; analizando las técnicas de control simple se encontraron que existen; métodos de control simple, control por cascada, control por razón, control por acción pre calculada, control por sobre posición, control selectivo y control de procesos multivariables.

Este control puede ser de cuatro tipos: controladores con ajuste proporcional; éste es para procesos muy estables pero con desempeño limitado y un régimen de error permanente; controladores del tipo PI (Proporcional e integral), éste considera una acción integral el cual hace que un error pequeño positivo siempre dará una acción de control creciente y si fuera negativa la respuesta del control es decreciente, este razonamiento sencillo muestra que el error en régimen permanente siempre será cero. Un control PD (Proporcional y Derivativo) no



Algoritmo para el control de condiciones variables en un secador

afecta de forma directa al error en estado estacionario, añade amortiguamiento al sistema y esto permite una ganancia más grande la cual hace que se mejore la precisión en estado estable la deficiencia que tiene es que a valores grandes de tiempo de la derivada hace que se sature el actuador haciendo que el error crezca de manera significativa. El control tipo PID (Proporcional Integral y Derivativo) reúne las tres ventajas de las acciones de los controles individuales haciendo que el error se muestre en cero en un estado estacionario y haga que el error sea prevenido por la acción de la derivada dando como resultado que el proceso sea estable y corrija el error en menor tiempo.

2.12 Lógica difusa (Fuzzy Logic).

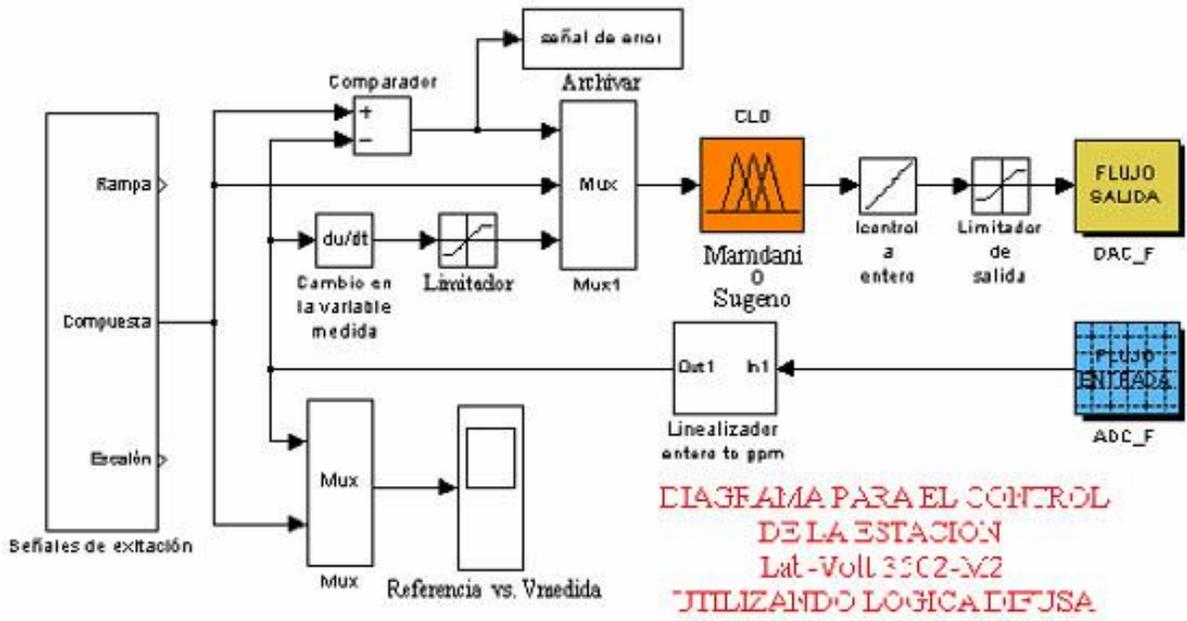


Figura 4. Diagrama para el control de una estación usando lógica difusa. Fuente internet (www.wikipedia.org)

La lógica difusa se adapta mejor al mundo real en el que se vive, e incluso puede comprender y funcionar con nuestras expresiones, del tipo "hace mucho calor", "no es muy alto", "el ritmo del corazón está un poco acelerado", etc.

La clave de esta adaptación al lenguaje, se basa en comprender los **cuantificadores** de lenguaje (en los ejemplos de arriba "mucho", "muy" y "un poco").



En la teoría de conjuntos difusos se definen también las operaciones de unión, intersección, diferencia, negación o complemento, y otras operaciones sobre conjuntos en los que se basa esta lógica.

Se basa en reglas heurísticas de la forma **SI (antecedente) ENTONCES (consecuente)**, donde el antecedente y el consecuente son también conjuntos difusos, ya sea puros o resultado de operar con ellos.

En cambio, no es una buena idea usarla cuando algún modelo matemático ya soluciona eficientemente el problema, cuando los problemas son lineales o cuando no tienen solución.

2.13 Redes neuronales artificiales.

Denominadas habitualmente como **RNA** o en inglés como: "ANN" son un paradigma de aprendizaje y procesamiento automático inspirado en la forma en que funciona el sistema nervioso de los animales. Se trata de un sistema de interconexión de neuronas en una red que colabora para producir un estímulo de salida, consiste en simular las propiedades observadas en los sistemas neuronales biológicos a través de modelos matemáticos recreados mediante mecanismos artificiales (como un circuito integrado, un ordenador o un conjunto de válvulas). El objetivo es conseguir que las máquinas den respuestas similares a las que es capaz el cerebro que se caracterizan por su generalización y su robustez.

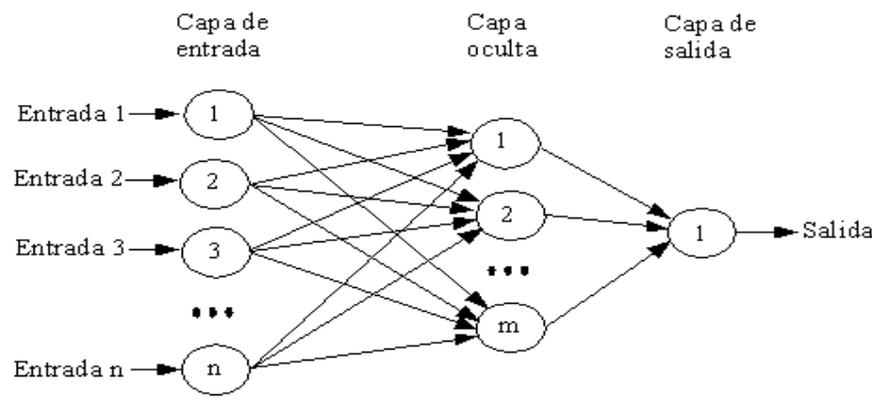


Figura 5. Diagrama de control para n-entradas en una red neuronal. Fuente internet (www.wikipedia.com)



2.14 Identificación de los cambios en el sistema.

En el control de procesos el estudio principal se basa en el desarrollo de técnicas y funciones de transferencia que aminoren todas las perturbaciones que afecten el sistema, en este caso las variaciones se harán de forma natural tomando en consideración la realización de ondas; una onda es una perturbación de alguna propiedad de un medio, que se propaga a través del espacio transportando energía. El medio perturbado puede ser de naturaleza diversa como aire, agua, un trozo de metal o el vacío, y las propiedades que sufren la perturbación pueden ser también variadas, por ejemplo, densidad, presión, campo eléctrico o campo magnético. Los patrones de variación que se podrían considerar en la temperatura del aire pueden ser incrementos ascendentes y descendentes (cambios tipo rampa), siguiendo funciones periódicas como ondas cuadradas, pseudocúadradas, semiciclos, dientes de tierra, combinaciones de los cambios antes mencionados también pueden considerarse en patrones complejos.

2.14.1 Patrones en forma de ondas cuadradas.

Se conoce como onda cuadrada (Figura 6), a la onda que alterna su valor entre dos valores extremos sin pasar por los valores intermedios; se usa para la generación de pulsos eléctricos que son usados por señales que permite que puedan ser manipuladas fácilmente.



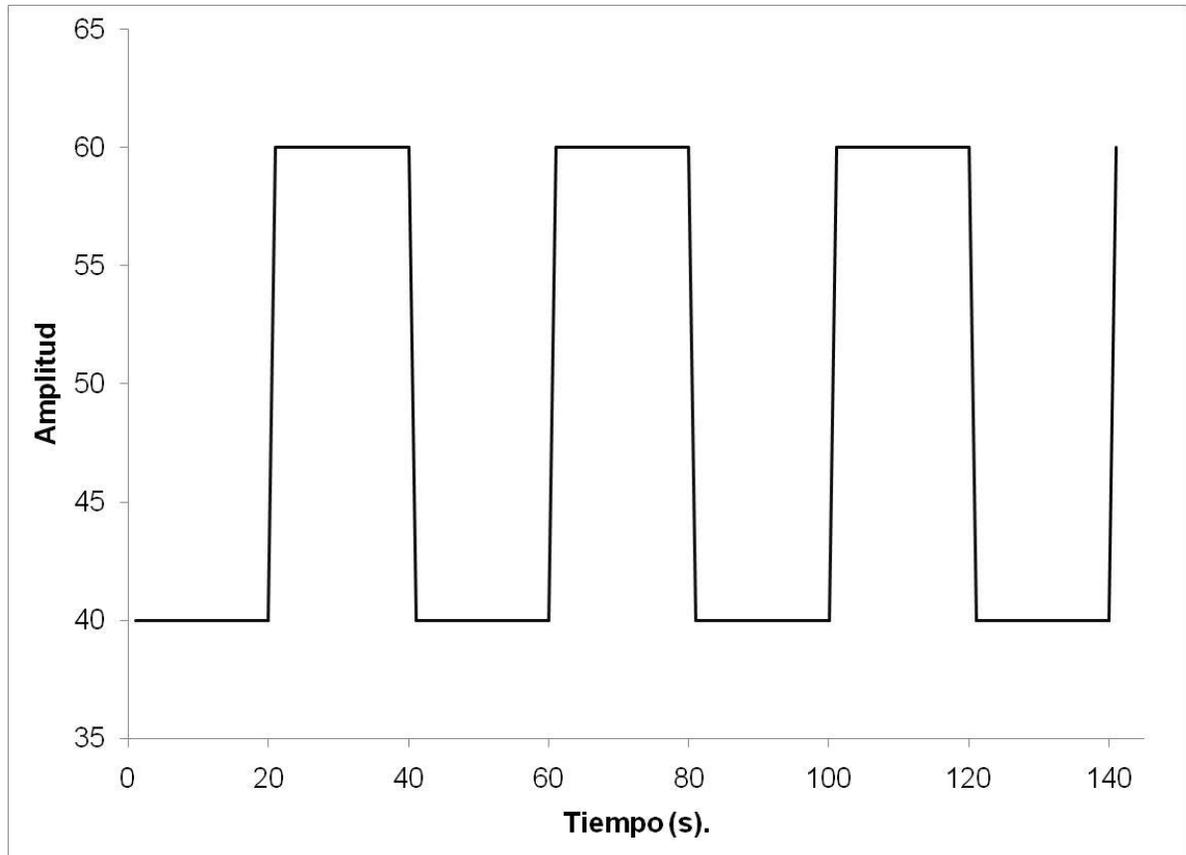


Figura 6. Ondas cuadradas.

2.14.2 Patrones en forma de rampas, cíclicos y complejos.

Los patrones pueden ser en forma de rampas que ascienden o descienden en el proceso, esto también es muy común en el calentamiento y enfriamiento del sistema como se ve en la Figura 7; es una de las maneras más comunes en las que se presentan las variaciones.

En la Figura 7 Se muestra un patrón en forma de rampa ascendente que se puede presentar el proceso de calentamiento. Una rampa descendente se puede presentar como un enfriamiento; esta también se puede llamar perturbación ya que este cambio del valor de consigna hace que el proceso se vuelva inestable y tome tiempo en estabilizarse.



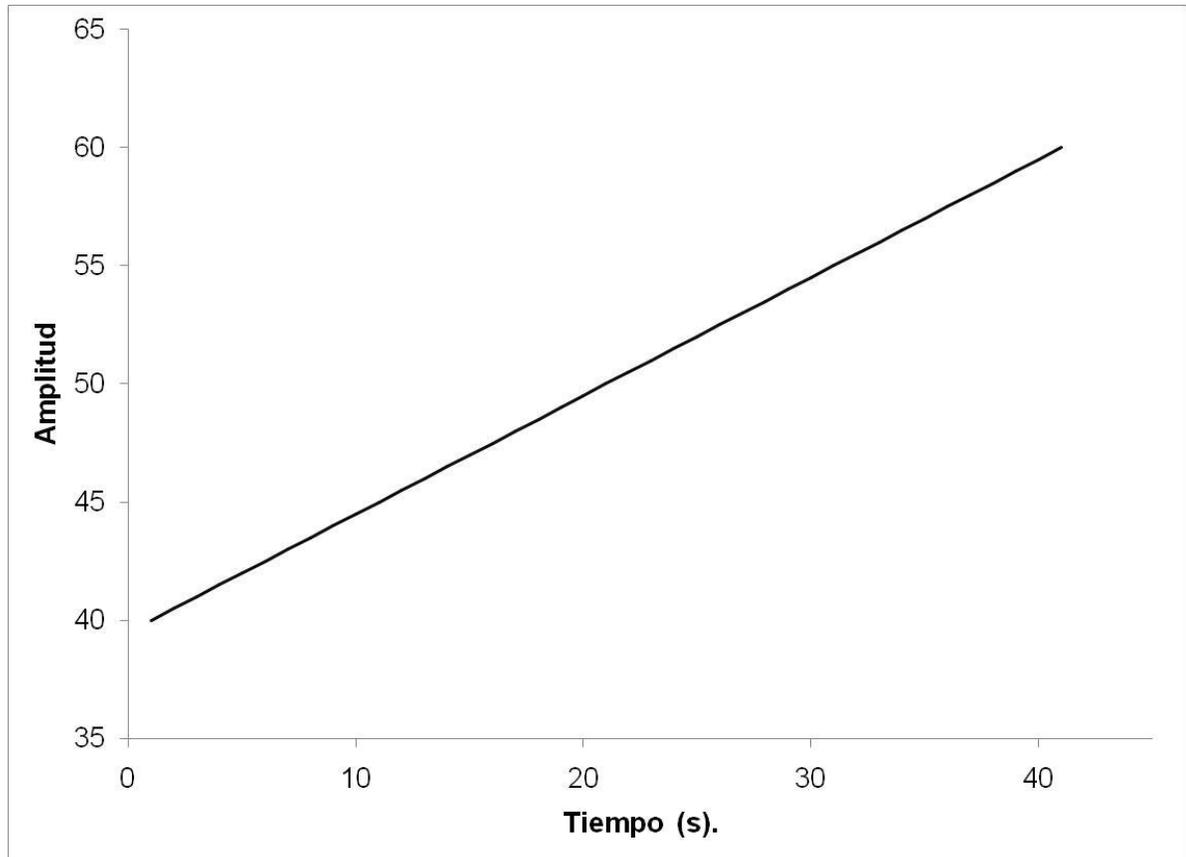


Figura 7. Rampa ascendente.

Los patrones de tipo cíclico se dan por la repetición en el periodo de tiempo (Figura 8), éstas van desde los que forman ciclos sinusoidales, formas de dientes de sierra, ciclos de cosenos, ciclos triangulares.

Juntando las dos variaciones de tipo rampa se pueden formar ciclos triangulares, ciclos pseudocuadrados, para considerar patrones de calentamiento-enfriamiento (Figura 8).



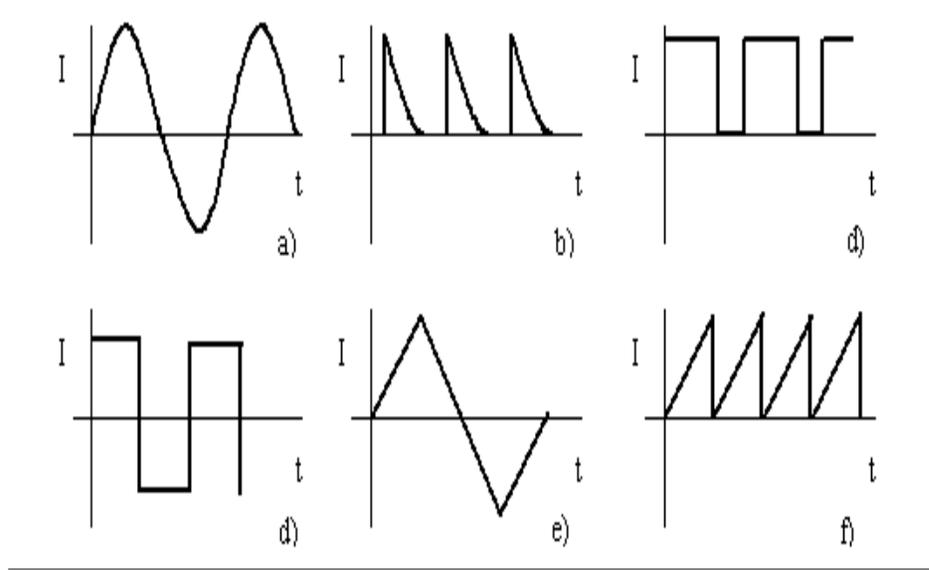


Figura 8. Ciclos: a) sinusoidales, b) tipo dientes de sierra, c) ondas cuadradas, d) ondas cuadradas desplazadas, e) ondas triangulares y f) dientes de sierra inversas. Fuente internet (www.wikipedia.org)

Patrones complejos son la combinación de los diferentes tipos de ciclos que no son fáciles de explicar y que se forman mediante programaciones de figuras no dadas y que no presentan formas comunes en los ciclos. Estos ciclos no son formas muy comunes como se muestra en la Figura 9.

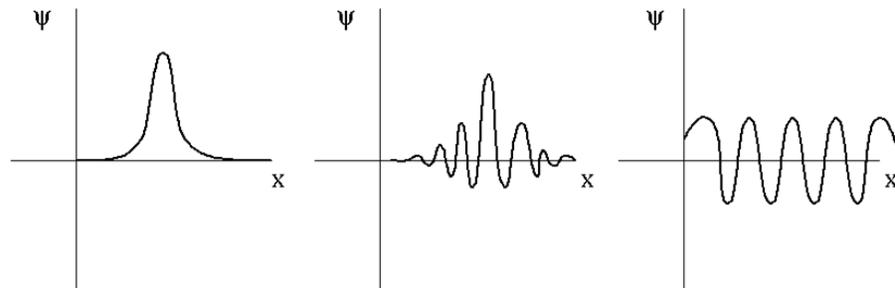


Figura 9. Ciclos arbitrarios. Fuente internet (www.wikipedia.org).

En la Figura 9 se muestran tres patrones que pueden ocurrir en el sistema; esto da lugar a que no solo deben de ser corregidas con un control, sino hechas desde el valor de consigna (*set-point*), el cual haría que el proceso sea variable por naturaleza, por tal motivo se investigó la realización de la variaciones por medio de la programación y como se podrían implementar en el algoritmo.



2.15 Variables del sistema.

Para la identificación de las variables principales del fenómeno que describe el secado, se estudiaron los fenómenos principales que ocurren; estos son el de difusión y el de convección principalmente; también se buscaron en los estudios realizados para saber que variables tenían mayor importancia en el proceso de secado.

El fenómeno de difusión en el secado está dado por la forma en que las moléculas de agua se desplazan por los poros del interior del material hacia el exterior, haciendo que la humedad se equilibre; en la difusión de la humedad interviene el gradiente de temperatura y de humedad; en este fenómeno las variables que intervienen son la humedad y la temperatura.

El fenómeno de convección es la forma en que se transmite el calor del aire de secado al producto es por tal motivo que la temperatura del aire es una de las variables principales del sistema.

Hay más variables que se derivan del proceso de secado pero no son de mucha importancia ya que se derivan de las principales que son: la temperatura del aire, la velocidad del aire y la humedad que se desprende del material que se absorbe por el aire.



Capítulo Tres. Metodología.



3.1 Identificación de las variables de control de secado.

En la investigación realizada por Chou y Chua (2001), muestra que las variables principales del proceso y las que se pueden controlar en el sistema son las siguientes:

Tabla 3. Variables del proceso de secado Propuestas por Chou y Chau (2001).

<i>Variables principales de proceso.</i>	<i>Variables que se deben de controlar.</i>
Temperatura.	Temperatura del proceso
Humedad relativa.	Humedad Relativa del secador.
Velocidad del aire.	Velocidad del aire.
Presión.	

Tomando en consideración estos estudios y los realizados por Traub (2005); se decidió, que las variables principales del proceso son la temperatura y la humedad, dándole mayor importancia a la temperatura del aire, por lo tanto se realizó el control para la temperatura del aire de secado.

3.2 Selección del lenguaje de programación.

Después de investigar que era lo que se requería para la programación de las ondas y sistemas de control, se realizó la investigación de cómo programar los patrones de cambio y el algoritmo.

La programación fue hecha en LabVIEW® (**L**aboratory **V**irtual **I**nstrumentation **E**ngineering **W**orkbench): que es una herramienta gráfica de test, control y diseño. El lenguaje que usa se llama lenguaje G. Este programa fue creado por National Instruments (1976) para funcionar sobre máquinas MAC® y salió al mercado por primera vez en 1986.

Los programas hechos con LabVIEW se llaman VI (*Virtual Instrument*), lo que da una idea de su uso en origen: el control de instrumentos. Entre sus objetivos están el reducir el



tiempo de desarrollo de aplicaciones de todo tipo y el permitir la entrada a la informática a programadores no expertos.

Se optó por la programación en LabVIEW® ya que cuenta con interfaces que interactúan con el controlador así teniendo un sistema de control completo en tiempo real del sistema; en él se pueden realizar reportes en tiempo real en hojas de cálculo o de escritura.

Se realizó la construcción del algoritmo con base en las necesidades; el algoritmo debería de contar con la adquisición de datos, el registro, el reporte, contar con gráficas, entre las actividades realizadas con el sistema de control fueron la configuración de las variables y la conversión de las señales de entrada del controlador a unidades científicas.

3.3 Elección del sistema de control.

En este estudio se consideró que los sistemas de control deberían de ser de la manera PID y PI, ya que estos tipos de control hacen que el proceso sea estable y un error mínimo, con una realimentación ya que estos controles por ser simples en su aplicación son los que mejor se pueden implementar en los procesos, la aplicación se hizo con un controlador de la marca National Instrument® FP-1000 ya que este controlador permite la incorporación de un sistema de entrada de datos y salida de control de procesos por medio de módulos adecuados para cada una de las señales que se tienen en el proceso.

3.4 Realización del algoritmo de control

Se decidió programar en LabVIEW® ya que en él se pueden adecuar las necesidades principales de la programación y hacer que este interactúe de manera natural con el proceso.

La programación se realizó de la siguiente manera:

a) **Programación del controlador.** Esta actividad se realizó en el programa Measurement & Automation® en el cual se configura la entrada del puerto por el cual está la



comunicación del controlador con la computadora, éste permite la configuración de los dispositivos de medición y control.

b) **Lectura de una señal del proceso.** Ésta consistió en hacer el algoritmo para la toma de una señal de un proceso, obteniendo datos reales del proceso.

c) **Graficar la señal.** Esta actividad consistió en graficar la señal del proceso que ya se podía leer, teniendo para esto un tiempo en el cual los datos aparecieran en la gráfica.

d) **Conversión de señales.** En esta actividad se tomaron todas las señales del proceso, se mandaron al panel de control para que fueran graficadas; para las señales que no contaban con unidades de ingeniería (temperatura, humedad, presión, etc.,) se realizó la conversión mediante la relación lineal del valor de la señal con la salida, para obtener los valores en el panel de control de todas las señales (temperatura, humedad, velocidad del aire y las temperaturas interiores y exteriores del producto).

e) **Control simple.** Se elaboró el algoritmo para el control de temperatura del aire de secado para mantener estable con relación al valor de consigna (*set-point*).

f) **Generación del reporte uno.** El algoritmo para la generación del reporte para una sola variable del proceso; se hizo para que se escribiera en una página de internet y después se realizó otro algoritmo para el reporte de datos en una hoja de cálculo Excel.

g) **Control complejo.** El algoritmo para un sistema de control complejo en el cual se tenían más de dos variables a controlar se hizo por medio de un control en cascada con el cual se controlaba la temperatura con base en los datos de la humedad.



h) **Control variable.** Se desarrolló el algoritmo para hacer que el sistema fuera variable, incorporando la programación del control por medio del tiempo en el valor de consigna (*set-point*), la variación del valor de consigna (*set-point*) por medio de ondas ya preestablecidas y también el control simple del proceso; para este tipo de control variable solo se consideró la variable más importante del proceso que fue la temperatura del aire de secado.

i) **Generación del reporte dos.** Se generó el reporte en tiempo real y a diferentes tiempos de ejecución; de tal manera que el operador pudiera decidir en qué tiempo se requería que los datos del proceso fueran guardados en una hoja de escritura (Word). Este reporte se distinguió del inicial pues se le incorporaron cinco variables del proceso que fueron: la temperatura del aire del secado, la temperatura del interior del material, la temperatura del exterior del material, la humedad del proceso y la velocidad del aire además del tiempo y de la fecha.

3.5 Aplicación del sistema de control.

Una vez realizado el algoritmo de control para las condiciones variables en el secador se integró al controlador para evaluar y corregir los errores que se pudieran presentar al incorporarse al secador.

3.5.1 El túnel de secado y sistema de control.

El equipo utilizado para el desarrollo de este trabajo está constituido por dos subsistemas que son el túnel y la bomba de calor.

El aire de secado se calienta empleando dos resistencias eléctricas de 20 Ω (2.4 kW) conectadas en paralelo que se encuentran en la parte inferior del túnel (Figura 10-E). El flujo de aire producido en el ducto para cada frecuencia del motor se mide con dos anemómetros (Figura 10-D), con la finalidad de obtener una velocidad del aire adecuada para el secado. Con



el fin de conocer las condiciones de secado, la humedad relativa y la temperatura del bulbo seco se miden empleando sensores ubicados en una zona antes de la muestra (Figura 10-J). La temperatura de bulbo seco, humedad relativa y velocidades de aire se miden en tiempo real empleando un sistema de adquisición FieldPOINT® (Figura 10-C).

El túnel de secado es un ducto diseñado de tal manera que se logre un flujo de aire uniforme y controlado como se muestra en la Figura 10. El aire se calienta mediante resistencias eléctricas (Figura 10-E) manteniéndose a la temperatura deseada mediante un control PID (Proporcional Derivativa e Integral (Figura 10-C)).

La velocidad de flujo de aire se regula con un variador de frecuencia (Figura 10-I) conectado al motor de un ventilador centrífugo Armeer Chicago tamaño 12 ¼ in, arreglo 2T-SQ, tipo A-SQ, diseño 10, clase II (Figura 10-H), con entrada sencilla con brida de descarga, sello enfriador, montaje de motor, transmisión de polea, con un cubre bandas de ancho especial y un motor de 1/2 HP. La uniformidad de la velocidad de aire en la selección de la muestra se logra dejando una distancia lineal equivalente de ducto y mamparas direccionadoras, lo cual ayuda a uniformizar la corriente del flujo entrante al ducto donde se localiza la muestra (Figura 10-K).

El túnel cuenta con una válvula de mariposa ubicada en el ducto (Figura 10-B). La válvula de la derecha sirve para la salida de aire húmedo y en la parte inferior (Figura 10-A) se encuentra ubicado un ducto que ayuda a la introducción de aire seco para disminuir la humedad relativa dentro del túnel.

En la parte de enfrente se encuentra ubicado el centro de carga del túnel (Figura 10-G), es ahí donde se pone en marcha el ventilador y se energizan las resistencias, el túnel trabaja con una corriente eléctrica de 220 volts; en esta parte se encuentran las protecciones necesarias para que el túnel de secado no se sobre cargue y los circuitos sufran algún daño.



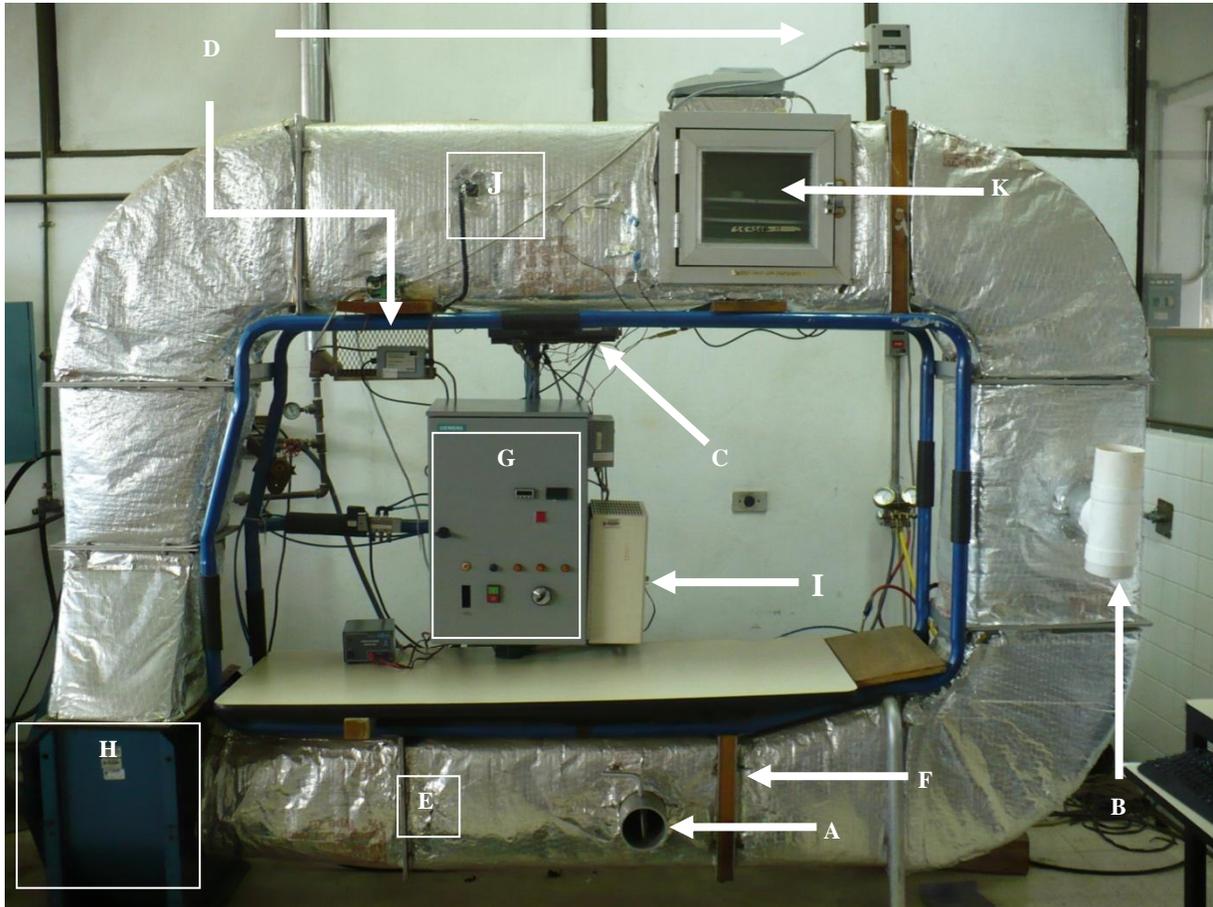


Figura 10. Túnel de secado

A un costado del túnel, está instalada una bomba de calor que se utiliza para enfriar el aire de secado dentro del túnel; la bomba de calor consta de un compresor TECUMSEH® modelo RK-136, hermético de 1 HP de capacidad, un condensador de tubos de cobre e 8 mm, (5/16 in) de diámetro, con aletas de aluminio es de 0.35 m de largo por 0.25 m de ancho y 0.1 m de profundidad; también cuenta con una válvula de expansión termostática ALCO® modelo AVT-50 con una capacidad de 0.8 T.R. (Toneladas de refrigerante); en el interior del túnel se encuentra situado un evaporador (Figura 10-F) de un tubo de cobre con aletas de aluminio que mide 0.30 m de largo, 0.30 m de ancho y 0.12 m de espesor colocado antes de las resistencias eléctricas; el refrigerante que se utiliza en la bomba de calor es Difluoroclorometano (Freón 22) con una carga en el refrigerante de 30-40 psias (lb/in^2).

El túnel cuenta un controlador automático programable (Figura 10-C) National Instrument® de la serie FP-1000 (



Algoritmo para el control de condiciones variables en un secador



Figura 11) este realiza el control del proceso y la adquisición de datos en tiempo real.

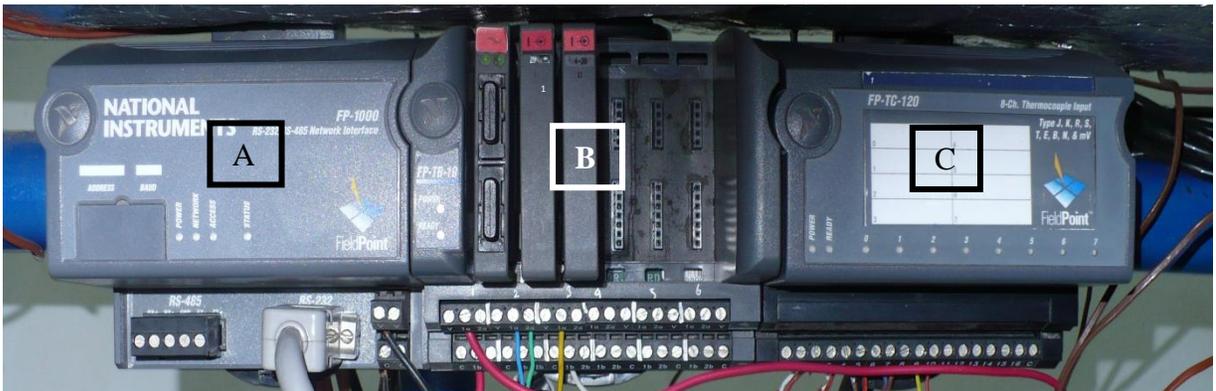


Figura 11. FieldPOINT®.

Tiene tres módulos principales; el primero de ellos es el módulo de comunicación FP-1000



Figura 11-A) que comunica los módulos de salida con una computadora y el proceso; la comunicación entre la computadora y el modulo se hace por medio de un puerto serial RS-232.



Algoritmo para el control de condiciones variables en un secador

La adquisición y la medición de las temperaturas se hace por medio del módulo FP-TC-120 (



Figura 11-C), éste cuenta con ocho canales de entrada de mili voltaje para los diferentes termopares que existen en el mercado y en él se encuentran conectados cinco termopares.

En el módulo llamado FP-TB-10 (



Figura 11-B) se realiza el control, la adquisición y la medición de datos; éste cuenta con la opción de entradas y salidas de señales con múltiples rangos de medición que van desde salidas booleanas, entradas y salidas en mili voltaje, entradas y salidas de voltaje, entradas y salidas a mili Amperaje.



Algoritmo para el control de condiciones variables en un secador

La base FT-TB-10 (



Figura 11-B) tiene incorporados submódulos. El primero de ellos corresponde a salidas booleanas y es donde se realiza el control del proceso; los otros submódulos son de adquisiciones de datos del proceso; en la placa de en medio (



Figura 11-B) se realiza la recolección de datos de los sensores de temperatura y humedad relativa del proceso por parte del equipo Vaisala y en el tercero de ellos se realiza la recolección de los datos de la velocidad del aire.

El registro de los datos se da por medio del software LabVIEW® National Instrument® a una hoja de texto Word® en la cual se registra la temperatura del proceso, la temperatura tanto del interior como del exterior del material, la humedad de sistema y el flujo de aire con respecto al tiempo y la fecha en que se realizó el secado.

Después de instalar el controlador y el sistema de control, se procedió a realizar las pruebas de control, estas pruebas se hicieron a temperatura constante y variable.



3.6 Parámetros de control a partir de las condiciones del proceso.

Pruebas previas de operación se realizaron para verificar el correcto funcionamiento del control. Para esto se hizo una prueba del controlador en cada uno de los programas de secado; se observaron las deficiencias del sistema corrigiendo los errores de programación y ajuste de los parámetros que el usuario requería para su manejo.

Se realizaron tres pruebas de control a un valor de consigna (*set-point*) constante con las temperaturas de 40 50 y 60 °C y para cada una de ellas se realizaron dos réplicas. En las pruebas se calcularon las constantes de PID para que el proceso se estabilizara y tuvieran menores errores.

Después de finalizar con los programas de secado a temperatura constante se programaron ciclos de calentamiento y enfriamiento de 40 a 60 grados entre ellos con diferentes espaciamentos en el tiempo constante, en los periodos de calentamiento y enfriamiento el tiempo fue de 20 minutos, a estos ciclos se les calcularon las constantes de PID para que el proceso fueran estable y con el menor error.

Para verificar que este sistema de control fuera el más eficaz se comparó con un control de tipo PI teniendo tres parámetros para este tipo de control: el primero de ellos se programó con base en las formulas de Ziegler y Nichols (1942), para controles PI; el segundo con base en las formulas básicas obtenidas por Poulin y Pomerleau (1996), para controles PI; y la tercera con base en las formulas de Poulin y Pomerleau (1999) para controles PI. Comparando el mejor resultado obtenido en este sistema de control con el control PID.

Después de obtener los resultados de las pruebas de comparación entre los sistemas de control se realizaron pruebas de ciclos con diferentes geometrías para saber como se comportaba el proceso a cada una de las variaciones y tener una fuente para realizar ajustes posteriores para disminuir el error en cada una de las geometrías de los ciclos.



3.7 Análisis del error de cada función.

El error en cada una de las pruebas de control se realizaron por medio de mínimos cuadrados a esto se le llamo variabilidad (MSE- Mean Square Error) y la controlabilidad se midió por medio del coeficiente de correlación entre los rangos de 0 a 1 teniendo que entre más cercano el valor de éste a uno los datos obtenidos se asemejan a la función de entrada en el control.

3.8 Programación y ajustes.

En esta sección se desarrolla cada uno de los pasos que se siguieron en la programación del algoritmo de control con mayor claridad.

3.8.1 Medición de temperatura y programación del controlador FieldPoint®.

La programación del controlador FieldPOINT® se realizó en Measurement & Automation®. En este programa la configuración del controlador se realizó como se muestra a continuación.

a) Se ejecutó el programa Measurement & Automation® se desplegaba la opción (Figura 12) y se seleccionó el modulo que se quería configurar.

b) Para la aplicación en el secador se dispone de un modulo llamado FP-TB-10 que se encarga de las entradas y las salidas múltiples. En la parte derecha de la ventana se programan cada uno de los módulos considerando el tipo de entrada o salida que corresponda.

c) El modulo FP-TC-120, tiene ocho canales para termopares (Figura 13-A), estos se programaron para una entrada en la medición del proceso en cualquiera de las magnitudes que se quisieran, en este caso se programó en grados Celsius.



Algoritmo para el control de condiciones variables en un secador

d) El correcto funcionamiento del sistema de medición se verificó en el apartado **data neighborhood**, al seleccionar en el nombre de FieldPOINT®, aparecían dos carpetas cada una de ellas correspondía a cada uno de los módulos. Se seleccionó el módulo y se eligió **start** (Figura 13-B) para verificar si los valores que se mostraban eran datos reales de la medición en el controlador.

e) El programa se guardó y se cerró con el icono de **stop** (Figura 13-C). Este programa será llamado en la ejecución de LabVIEW®.

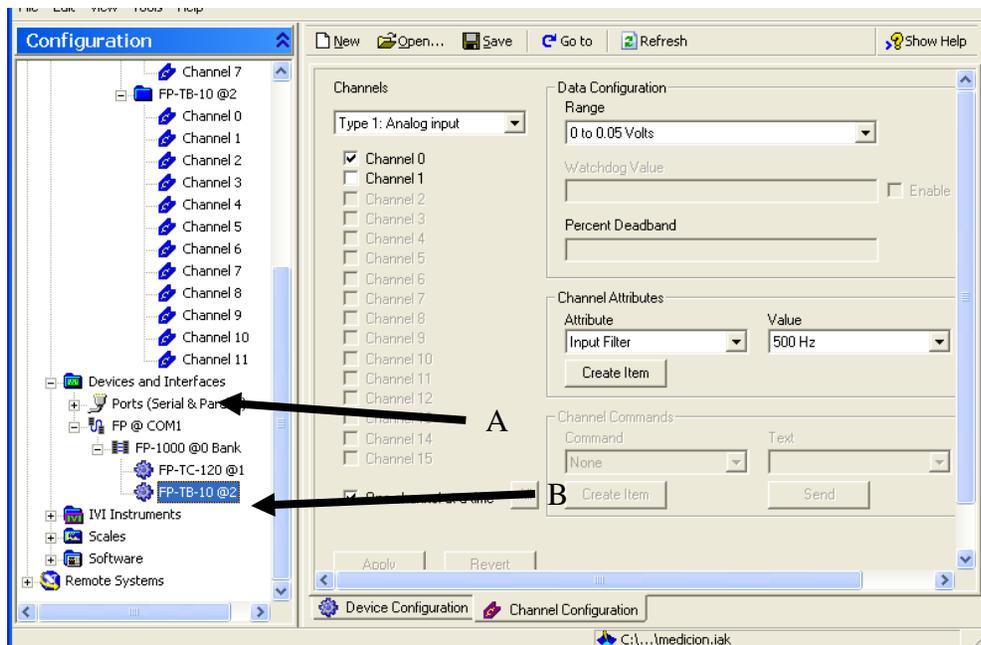


Figura 12. Detección de los canales en el controlador.



Algoritmo para el control de condiciones variables en un secador

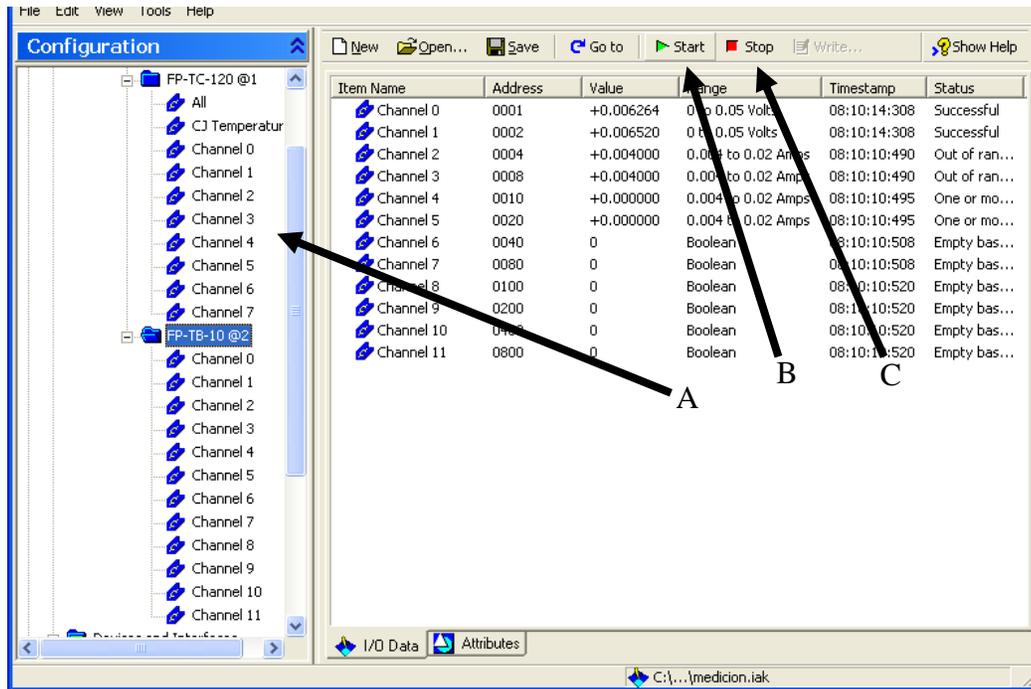


Figura 13. Comprobación en la medición de los diferentes canales en el controlador.

3.8.2 Programación en LabVIEW®.

La programación en LabVIEW® se hizo de manera gráfica por medio de VI’s que son instrumentos virtuales específicos para cada operación que se necesite realizar, conectados por cables para su comunicación entre ellos, como lo muestra la Figura 14.

La programación se hizo en dos ventanas, la primera ventana correspondía al panel frontal en donde se le incorporaban los elementos de lectura de las señales tales como interruptores de encendido medición de valores numéricos de entrada de señal, graficado de datos, e interacciones con el usuario como calendarios, cronómetros, etc.

En la segunda ventana diagrama de bloques (Figura 14) se realizó la programación, parte medular del proceso, es en donde se colocaron lo subVI’s (Figura 14-A). Cada subVI tenía su propia programación, a la mayoría de los subVI’s se puede tener acceso a la programación pero otros tienen restricciones de acceso.



Algoritmo para el control de condiciones variables en un secador

Con el diagrama de bloques y el menú de subVI's se obtuvo una programación rápida pues se contaba con objetos destinados a cada una de las funciones específicas que se decidan hacer; una de las desventajas es que se tiene que conocer bien la comunicación de cada uno de los VI's ya que cada uno se comunica de manera diferente entre si.

En la Figura 14, se presenta la programación de la medición de cualquiera de los canales de medición, solo se usan tres VI's, el primero corresponde a un VI de nombre READ (Figura 14-C), que se utilizaron para leer los canales que se tenían en el controlador, los otros dos VI's (Figura 14-A) eran la interface entre el panel frontal y el diagrama de bloques, ellos mostraban los valores de forma numérica y gráfica.

La línea que rodea a los VI's (Figura 14-B) es una línea de ejecución que se llama WHILE, es similar a un ciclo de programación y da como resultado que las señales recibidas de los dispositivos de medición sean leídos continuamente.

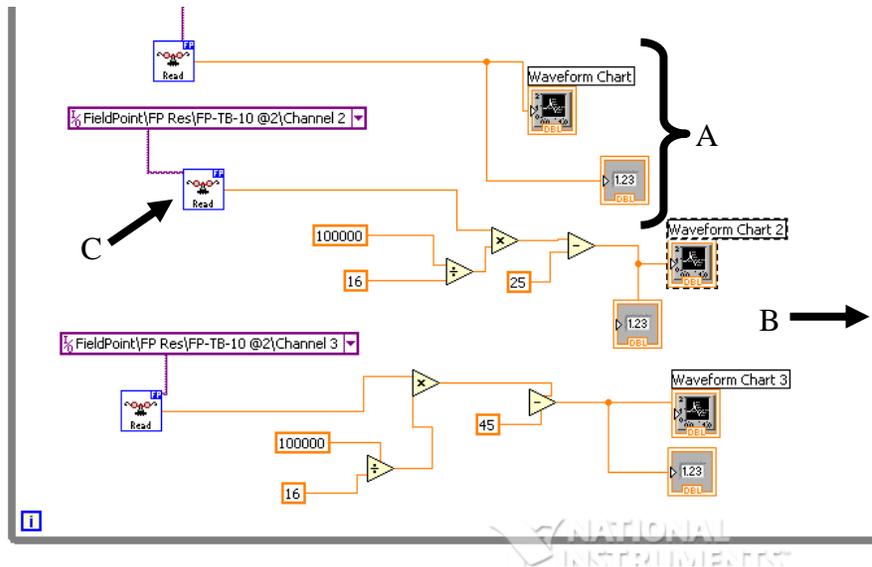


Figura 14. Controlador FieldPOINT® incorporado a la programación en LabVIEW®.



Algoritmo para el control de condiciones variables en un secador

3.8.3 Conversión de unidades para señales de humedad, temperatura y velocidad del aire.

En la Figura 15, se muestran los iconos operacionales para convertir las unidades de mili voltaje o miliamperaje que son las salidas de cada uno de los medidores, a unidades científicas de porcentaje de humedad, velocidad del aire (m/s), y temperatura (°C). LabVIEW® aparte de los subVI's incorpora iconos de operaciones aritméticas (Figura 15-A) que actúan directamente en las señales que manejan los subVI's.

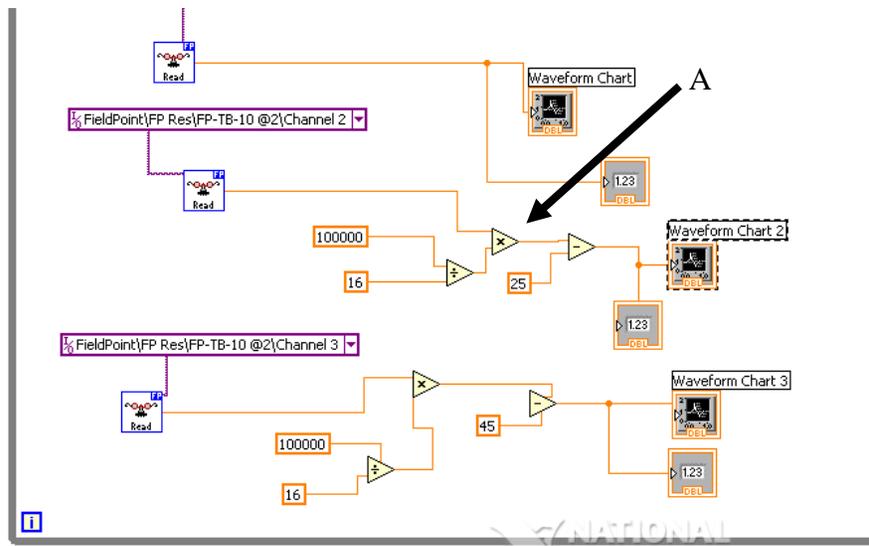


Figura 15. Conversión de las señales analógicas a datos de humedad y temperatura.

3.8.4 Registro de datos.

En la Figura 16, se muestra la programación en el diagrama de bloques de una hoja de reporte el cual consta de cinco VI's, se observó que la programación es sencilla, consta de una lectura de datos, VI READ (Figura 16-A). La señal se divide en cuatro, se manda a un gráfico que está en el panel frontal, a un indicador numérico, a un “termómetro” (en caso de ser de temperatura) y por último la señal es mandada a un subVI denominado REPORT GENERATION (Figura 16-B) en cual se registran los datos en un archivo de tipo página web. Los datos se incorporaron considerando un ciclo de ejecución de nombre FOR (Figura 16-C).



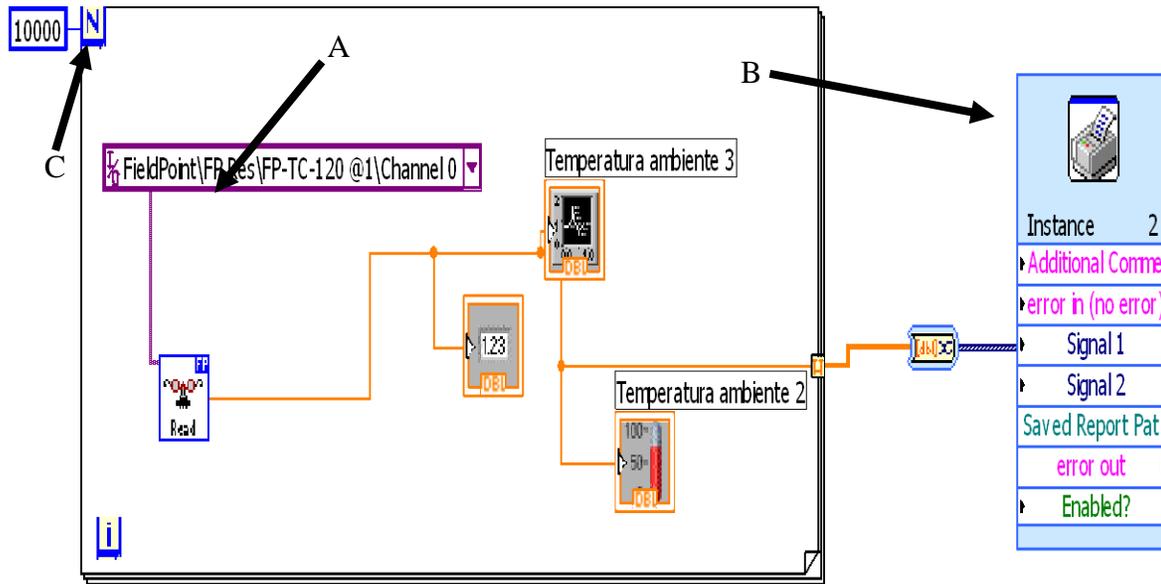


Figura 16. Diagrama de bloques de una hoja de reporte.

Ésta (Figura 16) es una de las maneras en las cuales se puede generar un reporte de los datos; también, se pueden generar hojas interactivas de cálculo y escritura (Excel y Word).

En la Figura 17-A se observa el panel frontal de la elección de la hoja de datos del proceso. Se observa que se puede elegir si se quiere un reporte o no para la prueba de secado que se esté realizando y en cuanto tiempo quiere el usuario que este reporte escriba en la hoja cada uno de los datos.

En la hoja de escritura se registra la fecha y la hora de la medición, la temperatura del aire de secado, la temperatura de la superficie del material, la temperatura del interior, la humedad relativa del aire de secado y en la parte final la velocidad del aire. En este caso los datos que se están generando son escritos en una hoja de escritura cada minuto.



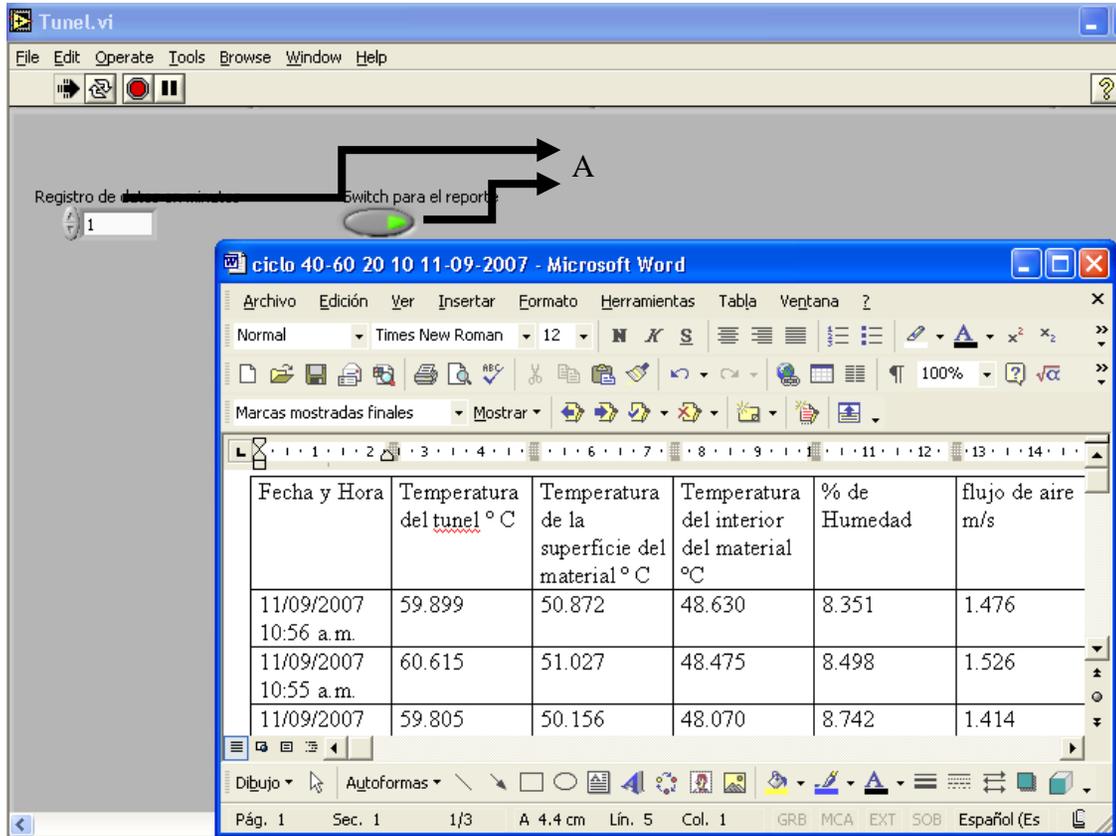


Figura 17. Panel frontal de la hoja de datos del proceso.

El diagrama de bloques de la programación de la hoja de datos se presenta en la Figura 18, tiene quince VI's, dos VI's (Figura 18-A) introducen los títulos de la hoja de datos, los siguientes cinco (Figura 18-B) leen los datos del proceso, tres (Figura 18-C) se utilizan para la incorporación de los datos que se leen en el proceso en forma de arreglos y los distribuyen en cada una de las columnas correspondientes y son generadores de tiempo y la fecha.

Tres VI's (Figura 18-D) introducen los datos en cada una de las filas y columnas de la hoja de datos siguiendo un ciclo de ejecución WHILE que tiene como parámetro de ejecución el periodo de tiempo de registro automática en la hoja de escritura. Los números dentro del ciclo de ejecución son valores constantes que son necesarios en el programa.



El programa funciona de esta manera:

Los datos se almacenan en un VI llamado BULDING ARRAY (Figura 18-E), introducidos en forma de columna, siendo necesario agregar un VI para colocar los datos de forma horizontal.

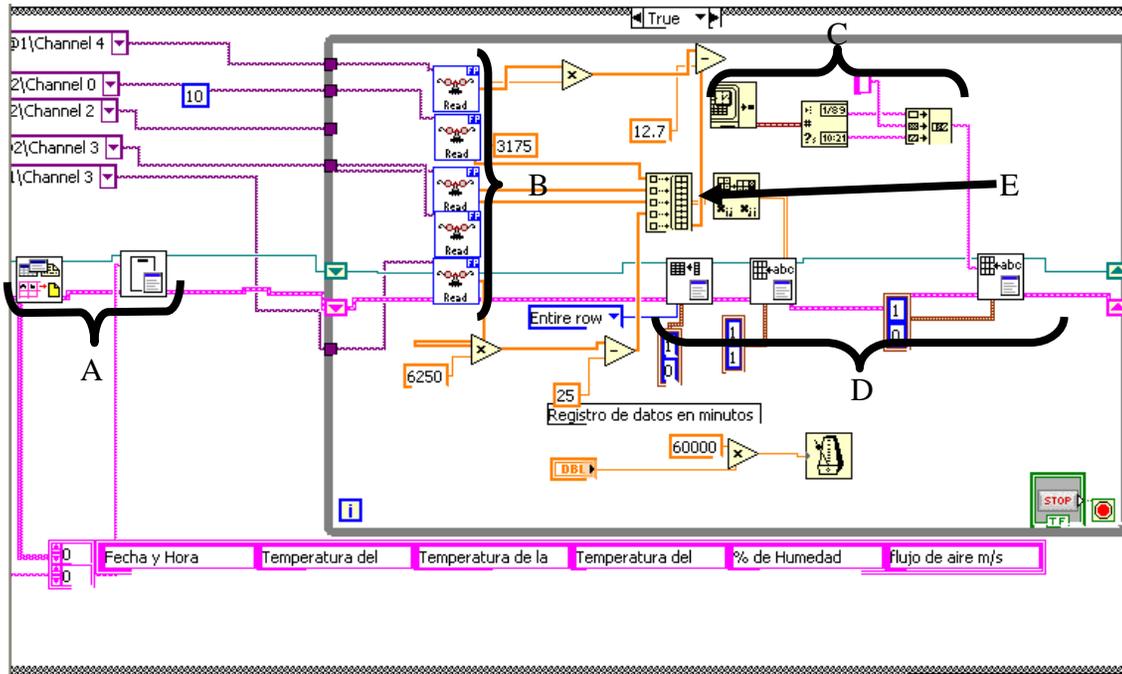


Figura 18. Diagrama de bloques del reporte de la hoja de datos del proceso

3.8.5 Programas de control de temperatura.

En la Figura 19, se presenta el panel frontal donde se muestran los indicadores de proceso. Se muestra un controlador en forma de aguja con el cual se puede establecer el valor de consigna (*set-point*) de 0 a 50°C (Figura 19-A), las constantes de ajustes del controlador PID se incorporan de forma numérica dependiendo del criterio de cada usuario (Figura 19-B). Se muestran dos ventanas para indicar la posición de entrada y salida de la señal; también, se muestra la gráfica de datos de temperatura que se monitorean del proceso y la amplitud de la salida del controlador (Figura 19-D y E).



Algoritmo para el control de condiciones variables en un secador

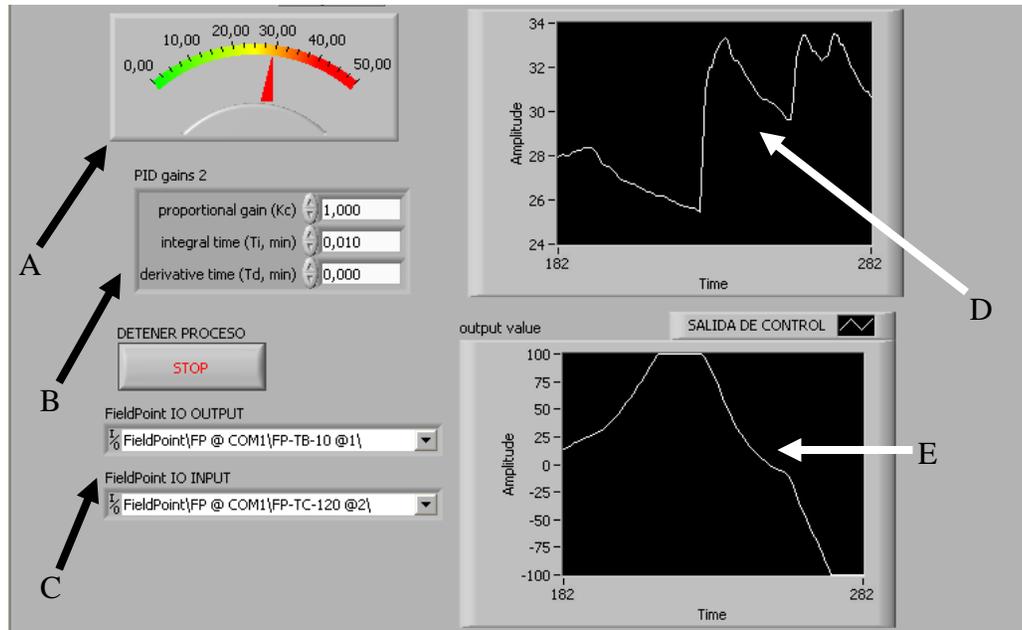


Figura 19. Panel frontal de la programación de un control de temperatura.

La programación para un sistema simple de control de temperatura de lazo cerrado se muestra en la Figura 20, consiste de 14 subVI's uno de lectura *READ* (Figura 20-A), dos de escritura *WRITE* (Figura 20-B) para mandar la señal al controlador. El VI principal es el de control PID con autotuning (Figura 20-C), el cual se enlaza con el VI *READ*, por medio una línea conectadora esta señal se conecta en el VI PID como la variable del proceso, el instrumento virtual PID tiene líneas de conexión a la entrada del valor de consigna (*set-point*) y al arreglo de los principales ajustes.

Las salidas del controlador; se conectan a dos indicadores; a una gráfica que se muestra en el panel frontal y a un VI *WRITE*, el cual le manda la señal al controlador para que controle en el proceso; todos estos están encerrados por un ciclo de ejecución de nombre *WHILE* con un tiempo de ejecución llamado VI *TIMER* (Figura 20-D), para delimitar la velocidad de salida de control. El valor del ciclo *WHILE* es en milisegundos de la ejecución de la señal de control.



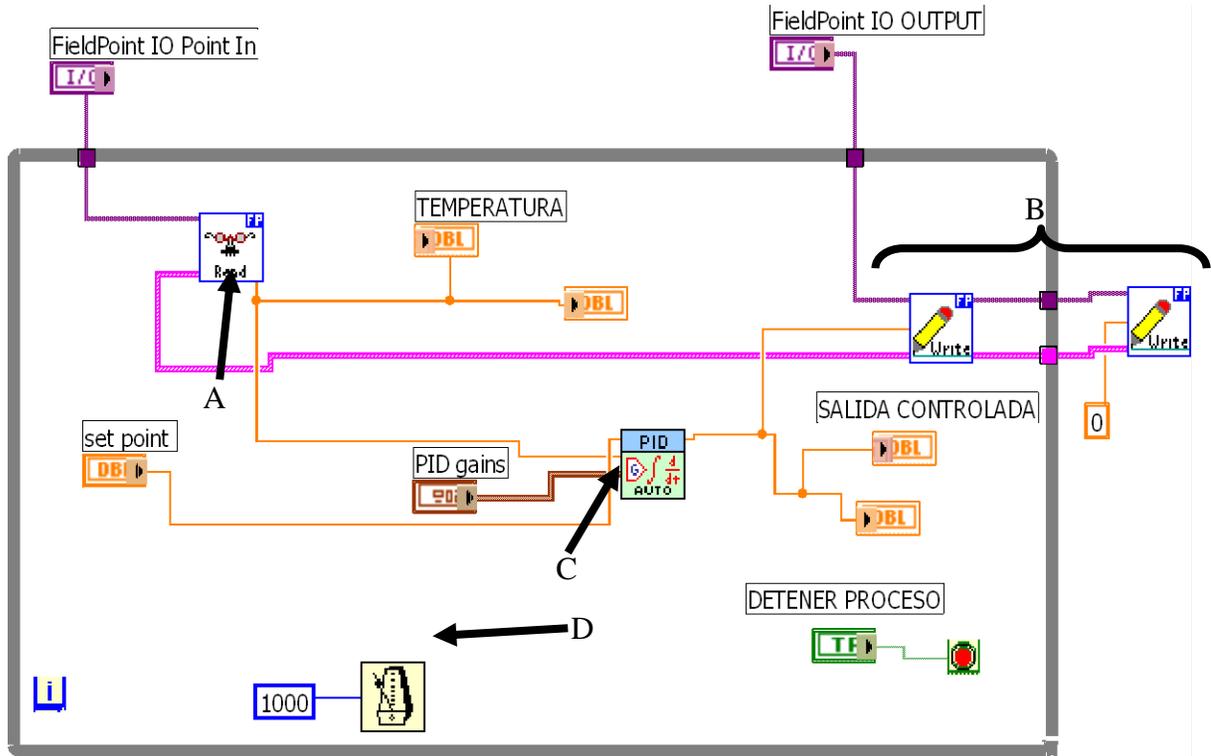


Figura 20. Diagrama de bloques de la programación de un control de temperatura.

3.8.6 Programación del controlador.

La Figura 21 muestra el panel de control que incluye más elementos de los que se consideraron en el control simple de lazo cerrado. Las principales modificaciones fueron la incorporación de un PID con autotuning para el control de temperatura y humedad del aire así como el registro en una hoja de Excel ®. El PID con autotuning (Figura 21-B), ayuda en la mejora de la aplicación de proceso de control porque se le puede elegir qué tipo de control se requiere con base al conocimiento del usuario. Desde un control P (Proporcional), un control PI (Proporcional + Integral) y el PID. Se puede elegir entre los tres tipos de controladores así como el tipo de sistema a controlar; lentos, normales y rápidos. Con este tipo de controlador se puede calcular las constantes del controlador, para que este actúe de manera precisa en la corrección del error.



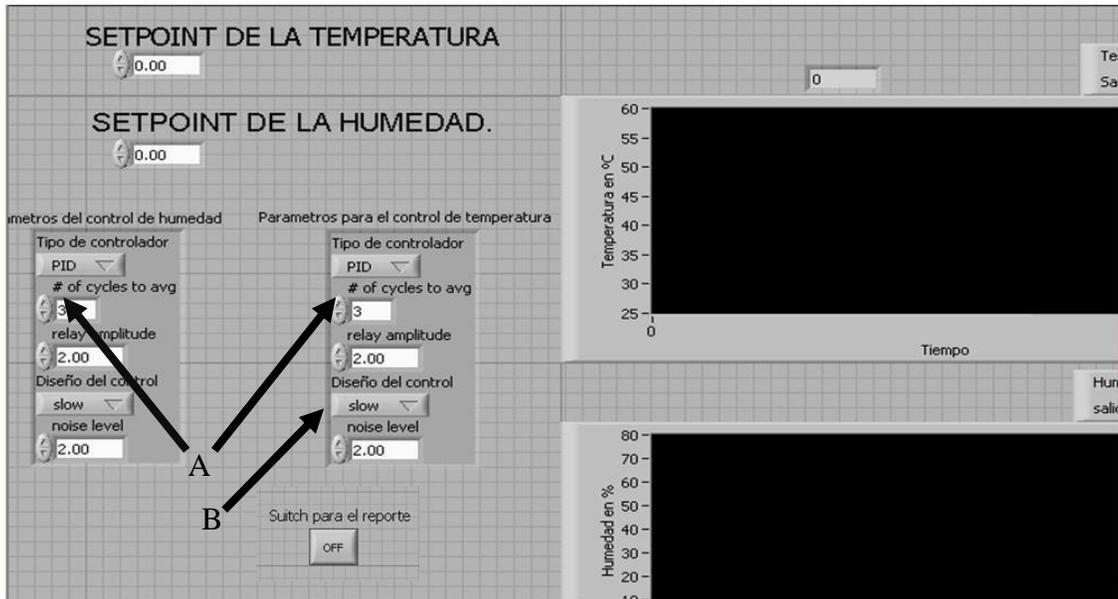


Figura 21. Panel frontal de la programación de dos sistemas de control.

Se puede distinguir en la Figura 21 el interruptor (*switch*) para la generación del reporte en una hoja de cálculo de Excel® en el cual proporciona la fecha, la hora en la que se inicio la prueba de secado y el nombre del operador, estos datos deben ser escritos en un registro en el diagrama de bloques para quedar registrados en la hoja de Excel®.

El panel frontal de la programación del valor de consigna (*set-point*) para que se puedan generar cambios en forma de escalón, rampa ascendente y en forma trapezoidal se presentan en la Figura 22. Se muestra la entrada de los datos para la generación de la señal en el valor de consigna (*set-point*) (Figura 22-A); la respuesta del valor de consigna (*set-point*) a esa generación de señal y la respuesta del control simple para la generación de la señal del valor de consigna (Figura 22-C).



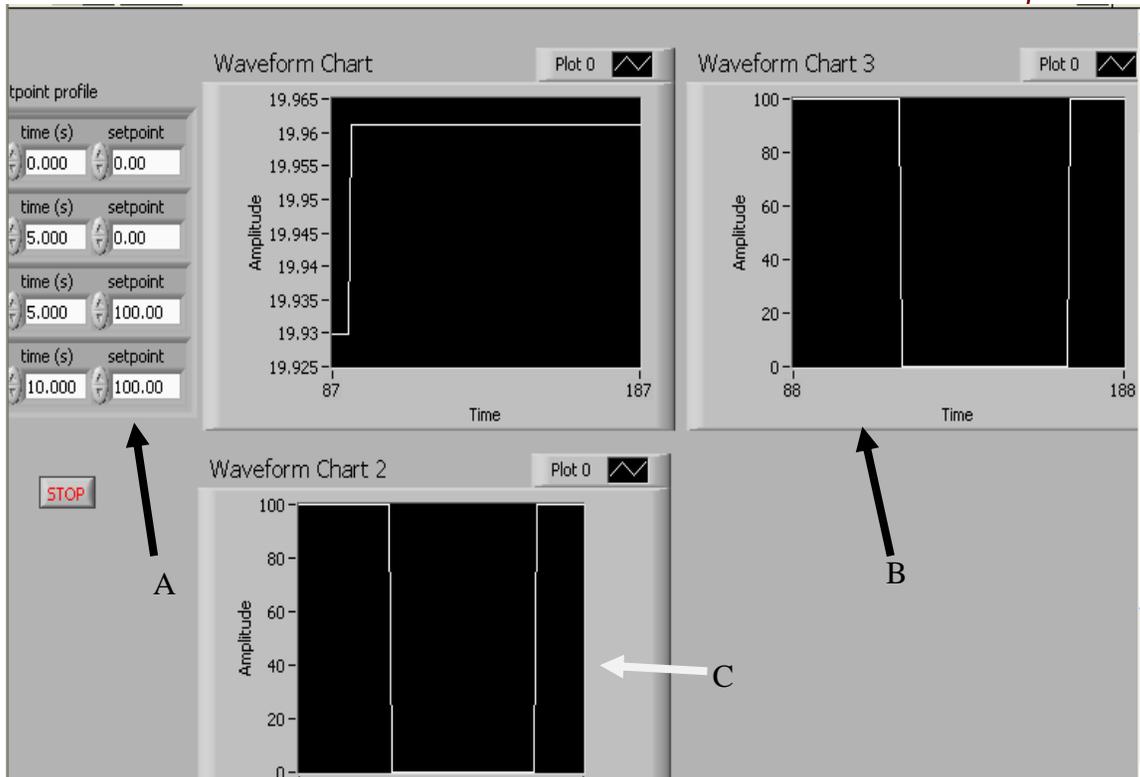


Figura 22. Panel frontal para especificar cambios lineales del valor de consigna (*set-point*).

El diagrama de bloques de la programación de la variación del valor de consigna (*set-point*) se presenta en la Figura 23. Esta programación cuenta con 9 VI's de los cuales los principales son el de la programación del valor de consigna (*set-point*) llamado *SET-POINT PROFILE* (Figura 23-A), el VI PID (Figura 23-B) y el VI *READ* (Figura 23-C), los demás VI's son indicadores del proceso; se ingresan los datos del valor de consigna (*set-point*) y tiempo para cada uno de los puntos que se quiera programar, éste los ejecuta y hace que el valor de consigna (*set-point*) cambie y pase al control para que realice las variaciones en el proceso en el tiempo establecido.



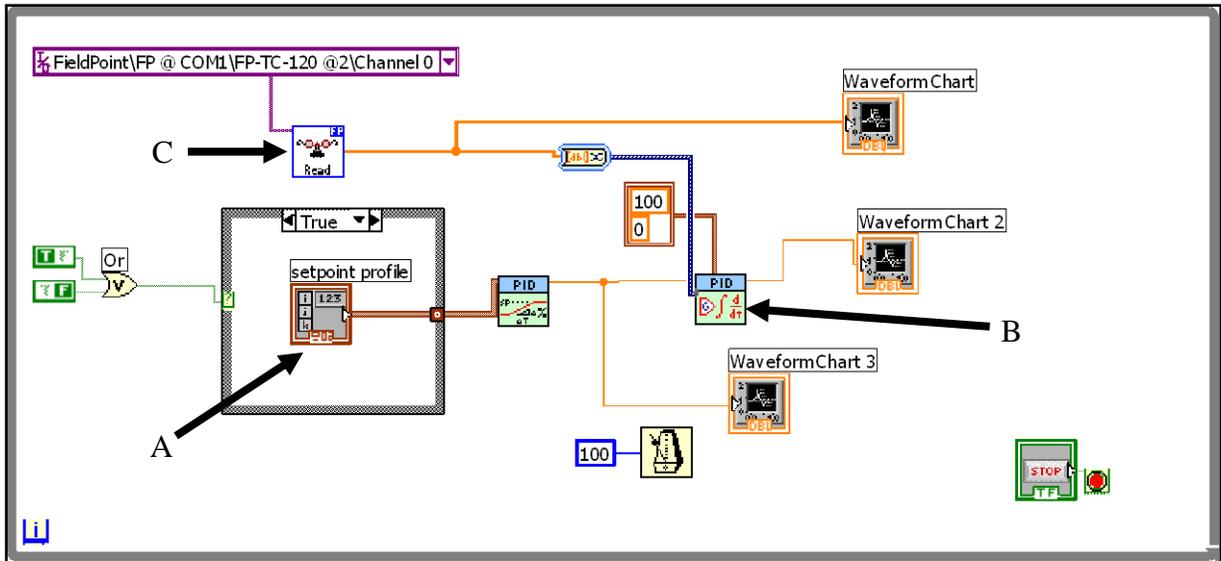


Figura 23. Programación de la variación del valor de consigna de temperatura.

3.8.7 Simulación de un control en cascada.

La simulación de un control cascada se realizó con el propósito de tener una referencia de cómo se implementaría el control en el secador, este control se pensó para hacer un control más amplio de todas las variables que intervienen en el proceso

En la Figura 24 se muestra el panel frontal de la programación de la simulación del control de tipo cascada, donde se observa que tiene tres indicadores; uno de tipo gráfico y dos más de tipo booleano (Figura 24-A), estos dos últimos son alarmas del proceso y señalamiento de qué control está funcionando; en la gráfica se puede observar que se tienen dos líneas: la línea blanca es la reacción del proceso al control y la línea roja es el valor de consigna (*setpoint*) del proceso; también tiene un indicador numérico el cual muestra la salida del actuador del proceso.

En el lado derecho de la Figura 24, se tiene tres programaciones de las constantes del controlador, cada una de ellas pertenece a los tres controladores para hacer que se establezca el proceso.



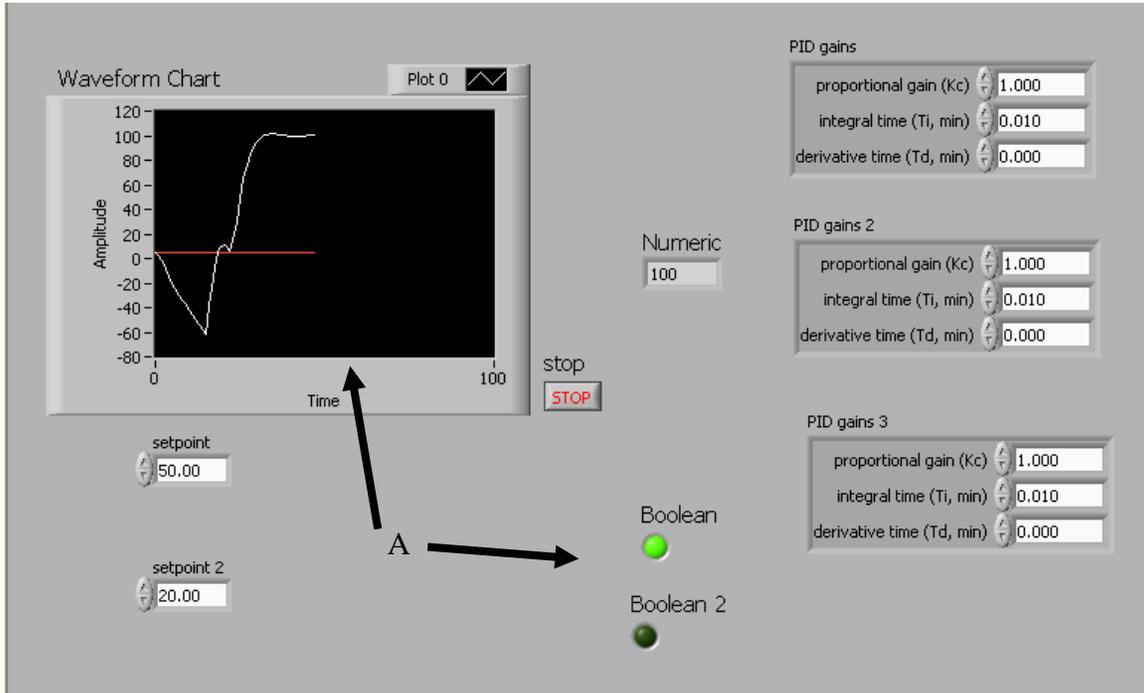


Figura 24. Panel frontal para el control cascada.

La Figura 25 pertenece a la programación en el diagrama de bloques del control en cascada, este consta de diecinueve subVI's, los primeros cuatro del lado izquierdo son parte de la simulación del proceso, este tipo de control consta de dos o más controladores, uno es el esclavo que en este caso pertenece a los VI's de en medio de la (Figura 25-A) estos controladores deben ser más rápidos que el control maestro ya que la acción que se ejecuta en el controlador secundario es la que se toma como una decisión del control primario.

Consta de dos VI's que sirven para hacer la simulación del proceso (Figura 25-B), mandando señales a los controladores secundarios para efectuar la elección entre los dos para mandar la señal como valor de consigna (*set-point*) al controlador secundario (Figura 25-C).



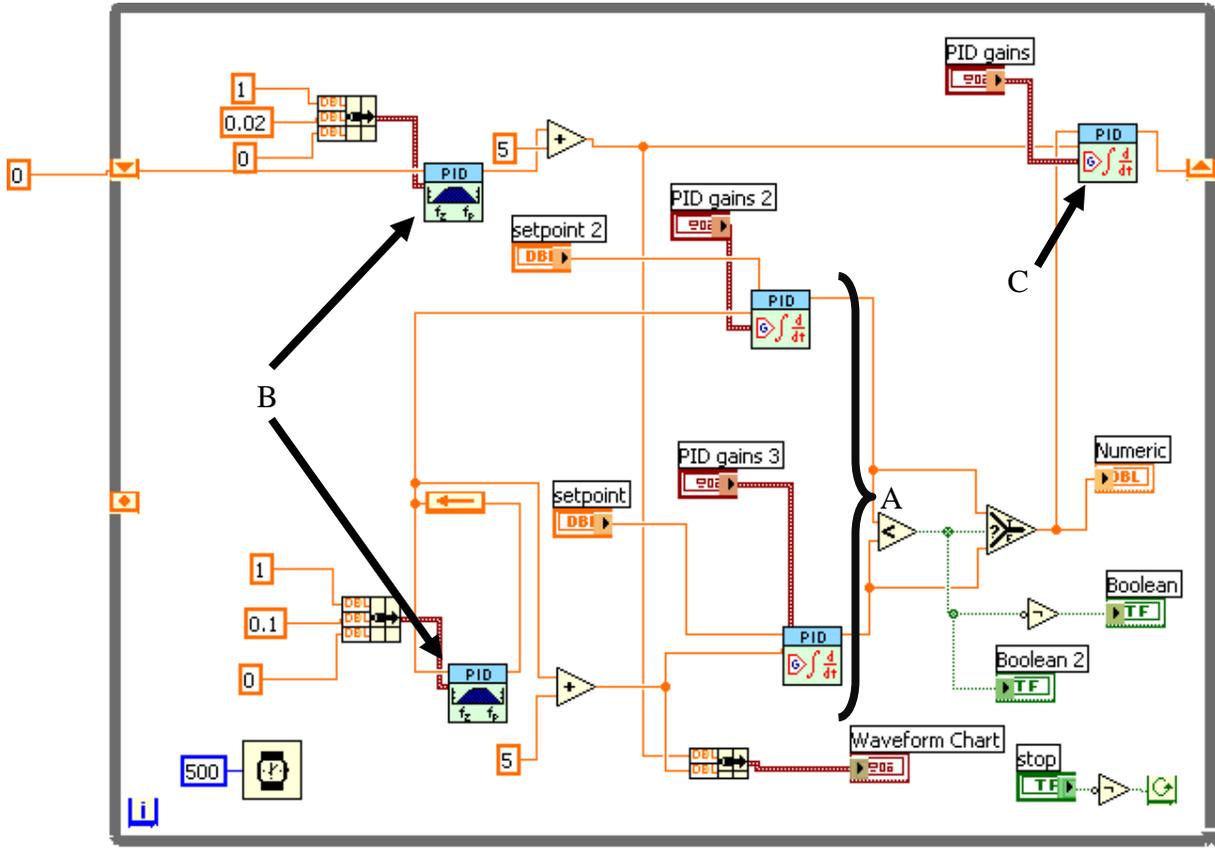


Figura 25. Diagrama de bloques para la simulación control cascada.

Después de realizada la simulación del control cascada se realizó un control cascada con datos reales y se observó su comportamiento en el control; considerando que el control se basa en controles simples; se hace esta propuesta con respecto a la temperatura del exterior y el interior del producto para hacer que el sistema responda a estos cambios en el producto.

La programación del diagrama de bloques del sistema de control de tipo cascada, consta de ocho VI's entre ellos el control esclavo (Figura 26-A), los datos del proceso se toman por medio de VI READ. La señal que toma del VI READ (Figura 26-B), sirve como valor de consigna (*set-point*) y la señal que viene del VI READ (Figura 26-C), la variable de proceso en el controlador esclavo (Figura 26-A). La señal de salida del controlador esclavo se suma a la señal que viene del proceso y entra como variable de proceso, antes la señal se divide y una de ellas se pone como valor de consigna (*set-point*) en el controlador maestro (Figura 26-D). La señal de salida del controlador es dividida en dos (Figura 26-E), una se manda a una gráfica que se muestra en el panel frontal, la otra se manda a un VI de escritura (Figura 26-F), la señal



Algoritmo para el control de condiciones variables en un secador

de salida que se manda al controlado para que este actuara directamente en el proceso y sea controlado.

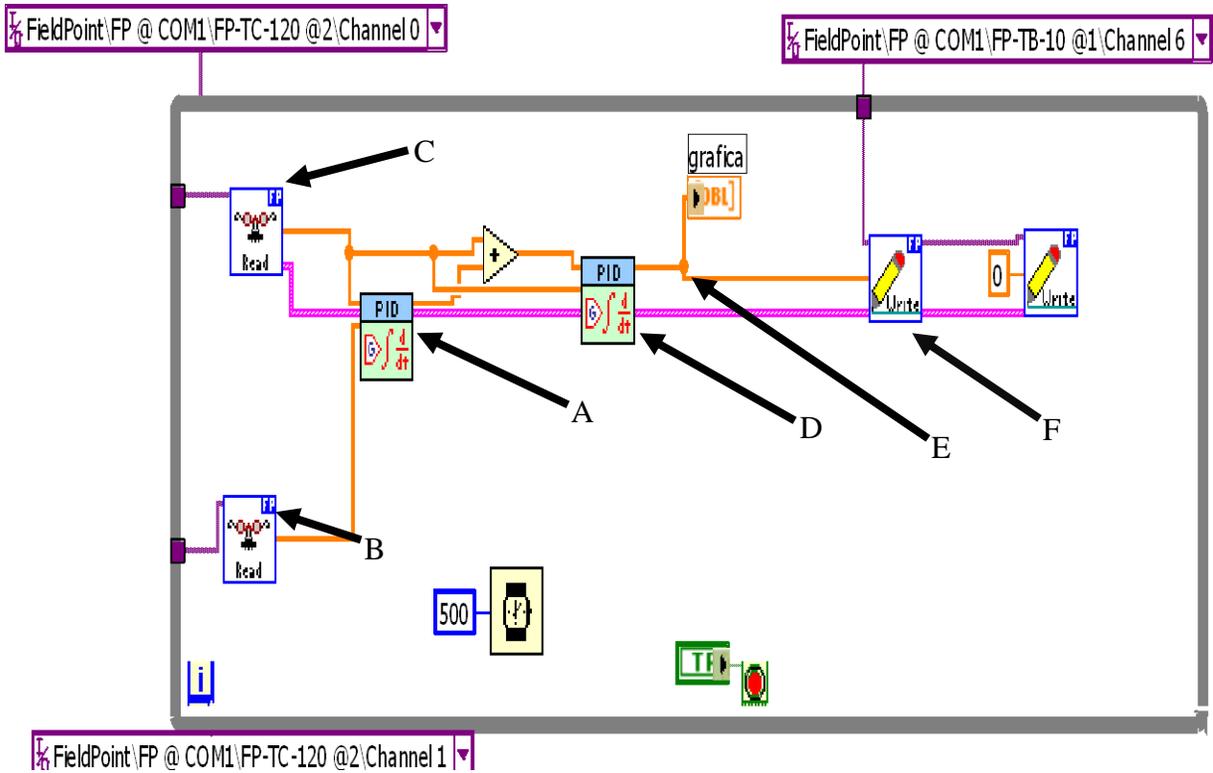


Figura 26. Diagrama de bloques de un control cascada incorporando el FieldPOINT®.



Capítulo Cuatro. Resultados y discusión.



Este capítulo se divide en dos partes; en la primera parte se presenta el resultado del algoritmo para el control del túnel de secado. En la segunda parte se presentan los resultados que se obtuvieron en cada una de las pruebas realizadas para el control del túnel de secado convectivo.

4.1 Panel principal del algoritmo de control.

El programa final tomó en cuenta cada uno de los aspectos considerados en las secciones anteriores, consideró los requerimientos de usuario; pero al mismo tiempo es sencillo de operar.

En la Figura 27 se muestran los despliegues de cada uno de los datos que son necesarios para el operador del proceso; (Figura 27-B), también tiene la opción de cambiar las unidades de medición; cada una de las variables principales que se tiene que almacenar, se presentan en el panel de datos (Figura 27-C).

La parte importante de este programa es que el usuario no tiene que estar viendo en la primera pantalla todos los datos que se tiene que programar; para hacer los programas de secado, para ello solo tiene que darle un clic a cada una de las pestañas (Figura 27-D) con las que cuenta para acceder directamente a las configuraciones.



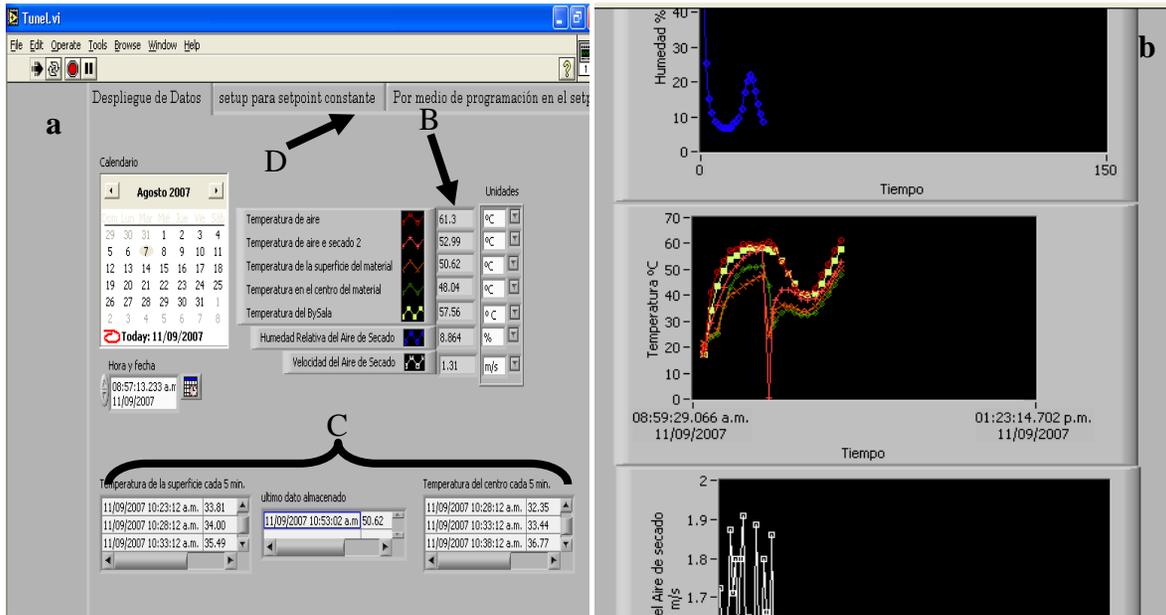


Figura 27. Panel principal de despliegue de datos a) datos numéricos b) datos en gráficos.

En el panel principal se puede observar el valor actual, la tendencia de cada una de las variables, la humedad relativa del proceso, la temperatura del aire de secado y la velocidad del aire. Lo anterior permite monitorear la prueba de secado así como las variaciones que puedan existir dentro del proceso presentando una visión mas detallada del proceso.

Los parámetros de control para un valor de consigna constante se introducen en el panel frontal mostrados en la Figura 28. Hay dos formas de introducir las constantes del controlador; incorporando directamente el valor de la ganancia proporcional, el tiempo de la integral (en minutos) y el tiempo de la derivada (en minutos) (Figura 28-B) o bien empleando un PID con auto sintonía que genera los parámetros al elegir el botón autotuning (Figura 28-A)



Algoritmo para el control de condiciones variables en un secador

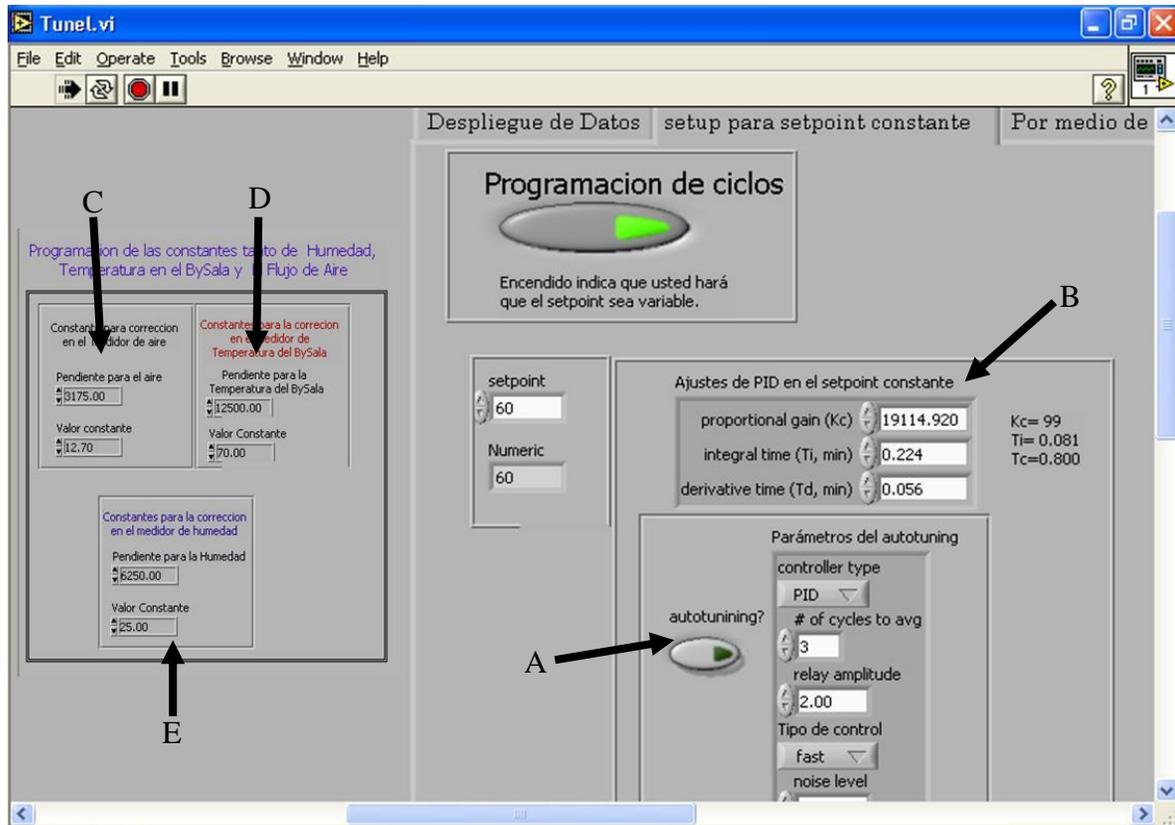


Figura 28. Valor de consigna, parámetros PID para el secado con temperatura constante y los factores para la conversión de la señal analógica a valores de proceso.

El panel frontal de parámetros para el control del valor de consigna considera la inclusión de valores para la conversión de señales analógicas a unidades científicas. Para la velocidad del aire de secado (Figura 28-C), el medidor manda una señal de 4 a 20 mA la cual es convertida a metros por segundo. Las señales provenientes del transmisor Visala de temperatura y humedad relativa (Figura 28-D y E) se convierte de igual manera, con sus respectivos valores de conversión.

Si la prueba de secado se realiza con el valor de consigna (*set-point*) para patrones complejos de secado (Figura 29), se elige la sección de la programación del valor de consigna (*set-point*); se despliega una ventana en la parte superior izquierda en donde se introducen los datos de programación del valor de consigna (*set-point*) dependiendo del ciclo que se desee programar.



Algoritmo para el control de condiciones variables en un secador

En la Figura 29-A se muestran los valores de consigna para un patrón de temperatura de aire de secado con una temperatura de 60 °C, descendiente a 40°C en 20 minutos, se mantiene constante a 40°C por 10 minutos, se incrementa a 60 °C en 20 minutos, se mantiene constante a 60°C por 10 minutos repitiéndose el ciclo pues así fue especificado.

Los parámetros de control, se especifican para lograr que el patrón programado y la respuesta del sistema sean similares; patrones en ondas sinusoidales o en formas complejas se pueden especificar seleccionando el interruptor de la Figura 29-B.

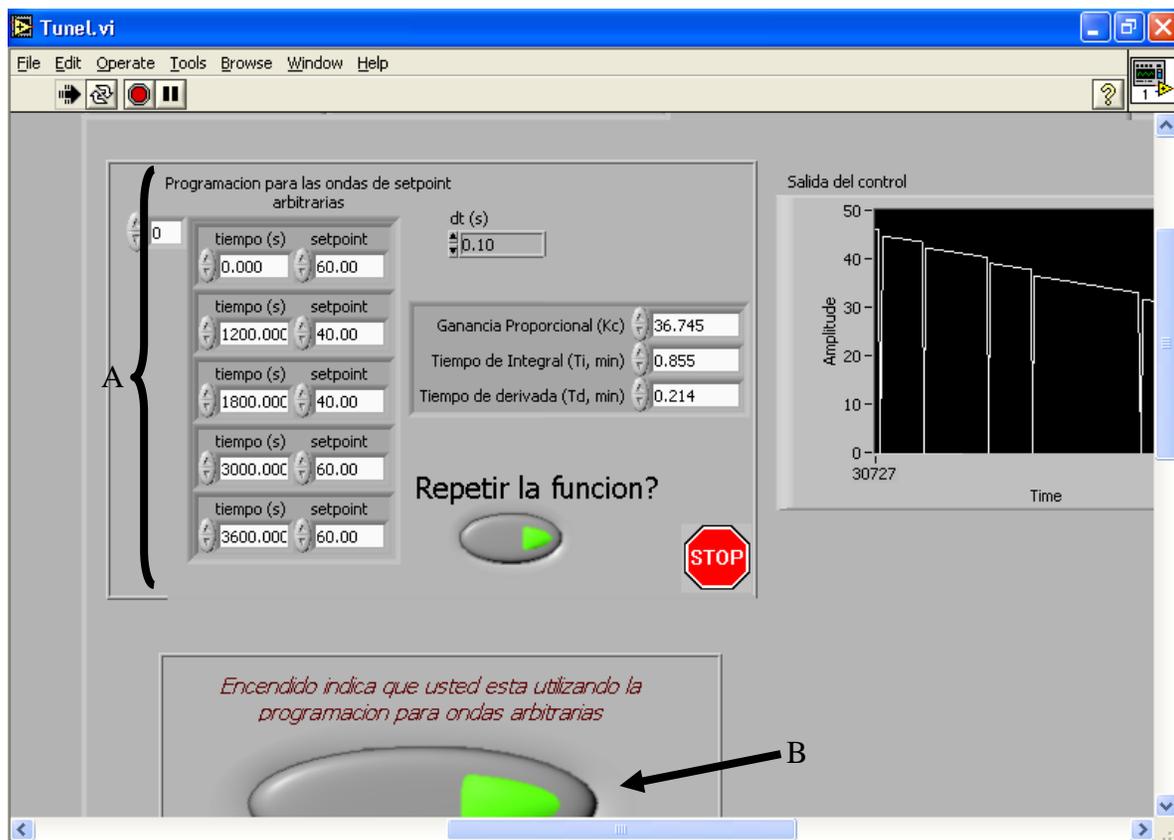


Figura 29. Especificación de parámetros para la variación cíclica para el valor de consigna.

Dos gráficas permiten ver el comportamiento del controlador y la respuesta del sistema (Figura 30); la primera muestra la amplitud de la señal al dispositivo de control, la segunda indica el valor de consigna y la respuesta del proceso.



La Figura 30 ilustra que la respuesta del proceso fue lenta con respecto a la variación en el valor de consigna (*set-point*); teniendo una respuesta escalonada ascendente y presentando un error de 0.02°C con respecto al valor de consigna (*set-point*), las constantes pudieron ser sintonizadas para reducir el error, pero la respuesta del proceso se considera aceptable.

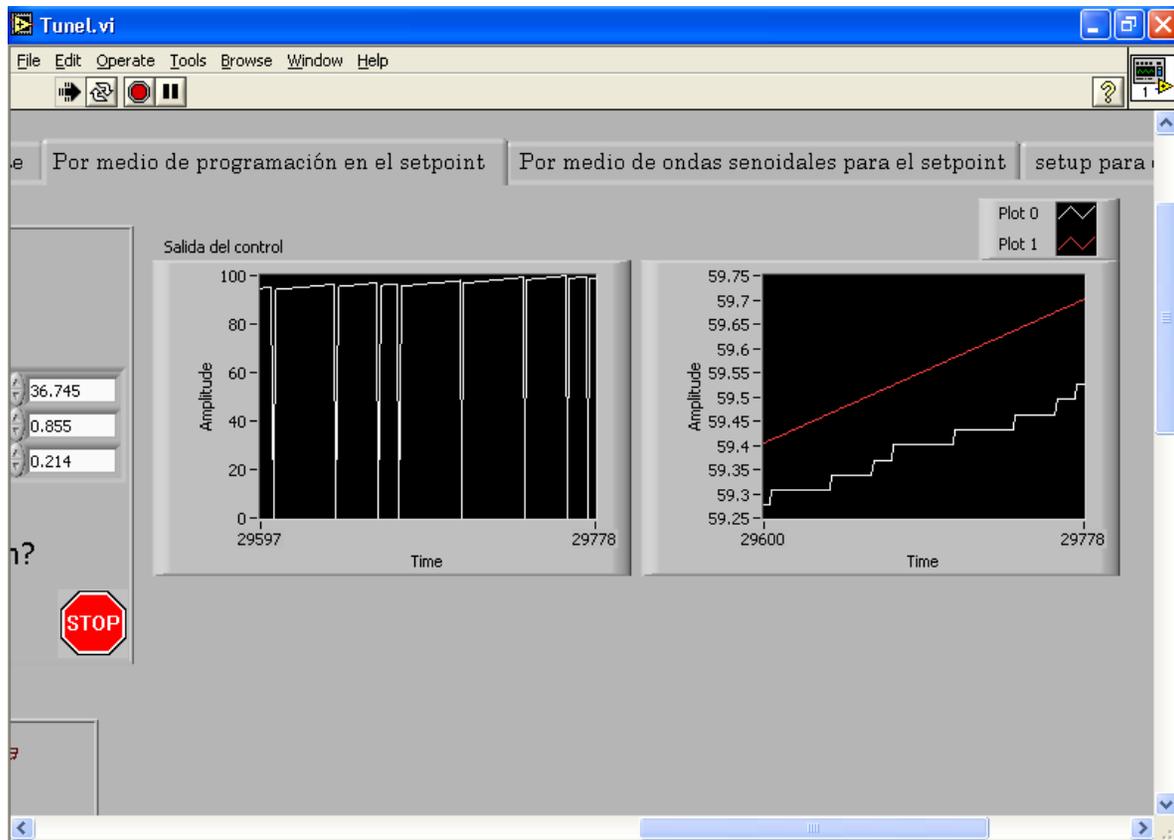


Figura 30. Gráficas de la amplitud de señal de control, valor de consigna y valor del proceso.

La pantalla de programación para funciones periódicas se presenta en la Figura 31. El operador puede elegir entre una onda sinusoidal, onda diente de sierra, onda cuadrada, etc. Se cuenta con sus gráficas de la salida del control y del proceso, para monitorear las variaciones durante el tiempo de ejecución.

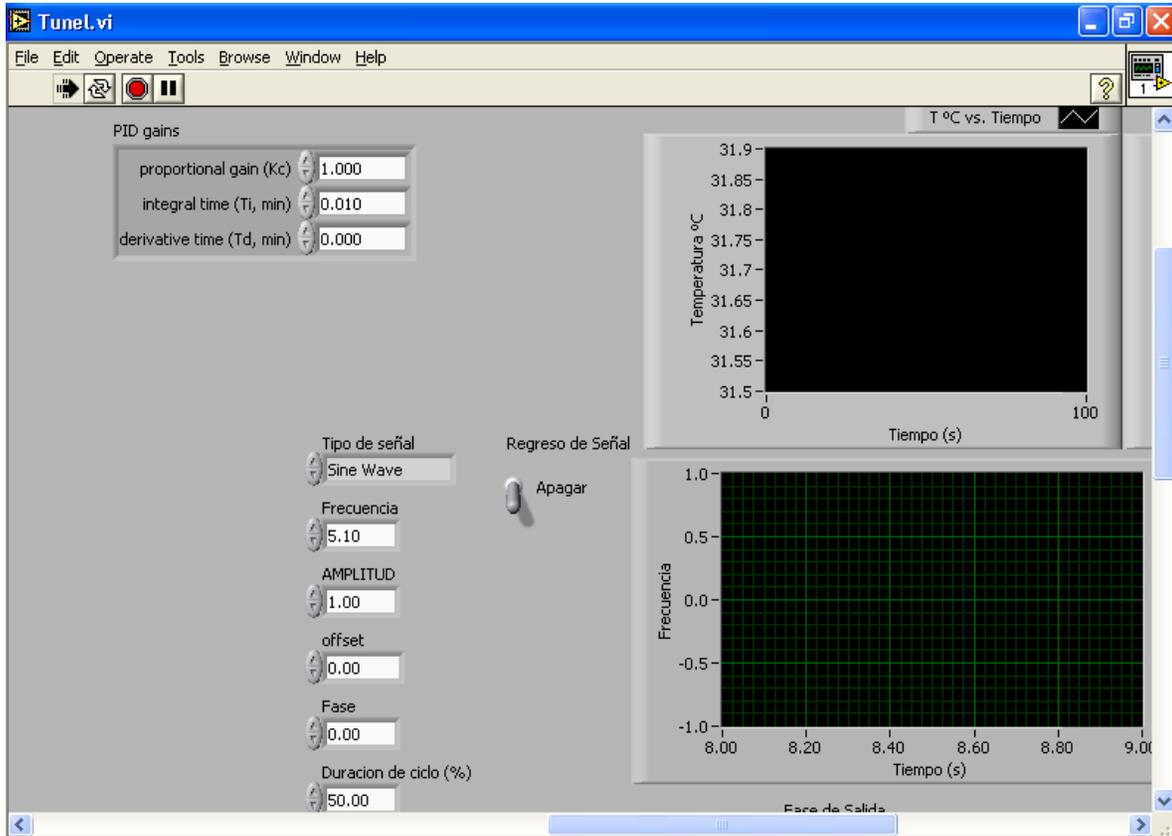


Figura 31. Variación del valor de consigna en forma de onda preestablecida.

4.1.2 Programación del algoritmo final.

La programación del valor de consigna (*set-point*) para que una variable se mantenga constante es bastante sencilla, siendo posible establecer el mismo método a las otras variables que se pretendan controlar (Figura 32).

El diagrama de bloques cuenta con un VI READ para obtener los valores de la señal de entrada transmitidos por el controlador. Los datos de entrada, los valores de consigna y los parámetros de control se introducen en el VI PID; el valor de consigna sale a un VI WRITE que manda la señal al controlador del proceso.



Algoritmo para el control de condiciones variables en un secador

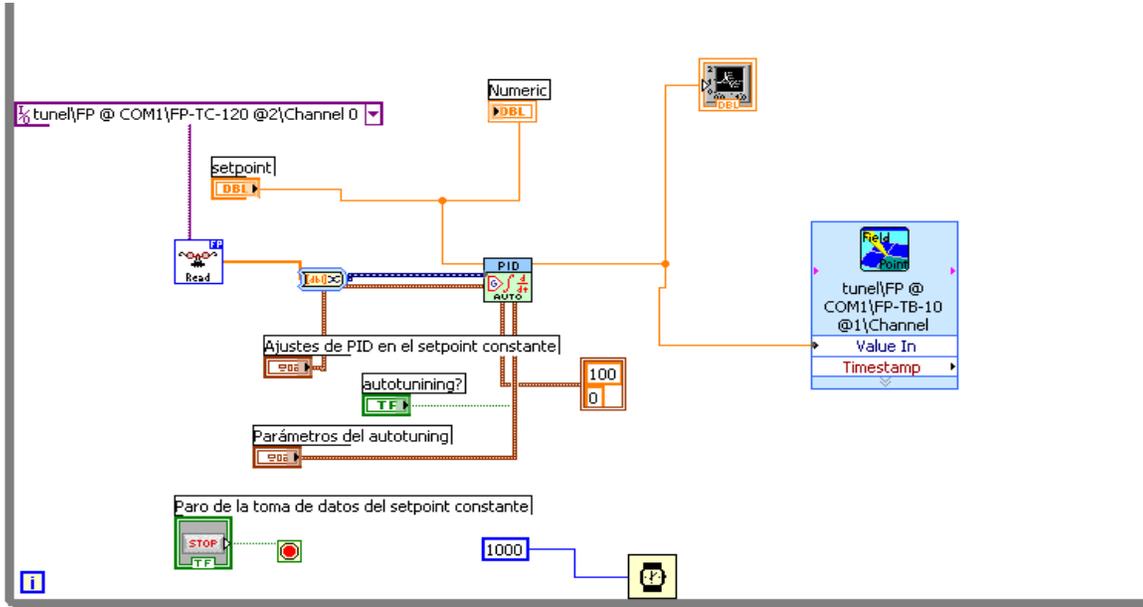


Figura 32. Diagrama de bloques del control de valor de consigna constante.

La Figura 33 muestra la programación para la variable arbitraria del valor de consigna (*set-point*), esta programación es más elaborada que para un valor de consigna (*set-point*) constante la diferencia es un VI llamado SETPOINT PROFILE (Figura 33-A) en donde se considera que el ciclo se repite la veces que sea necesario.

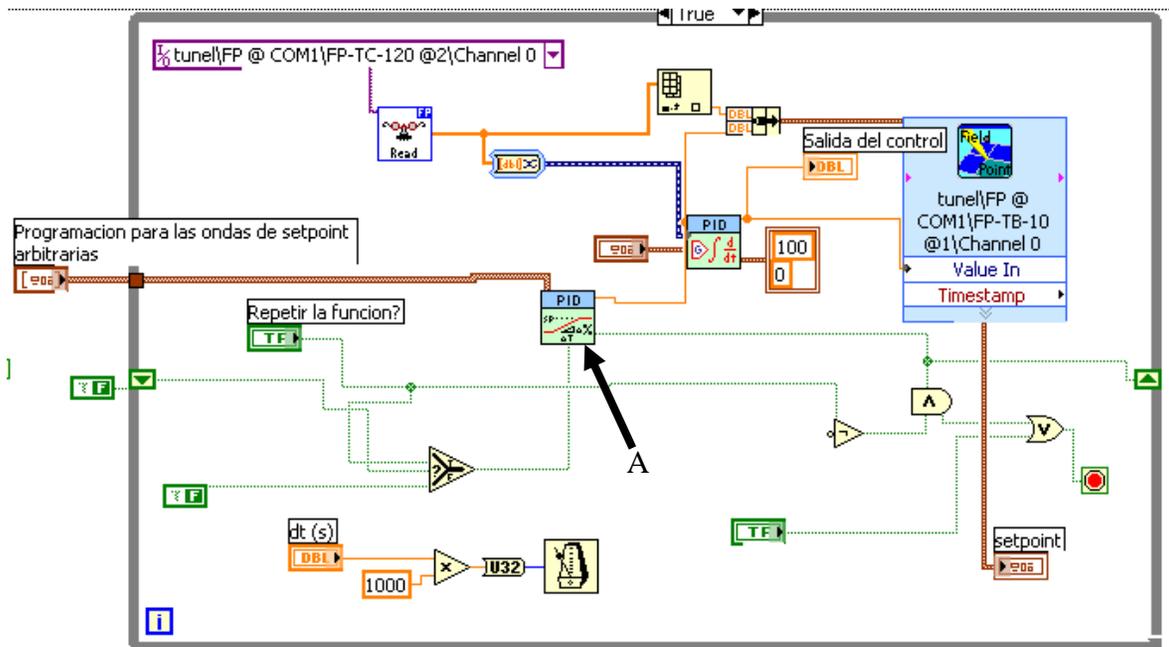


Figura 33. Diagrama de bloques de la variación del valor de consigna en forma pseudocuadrada.



La programación para la variación siguiendo funciones periódicas preestablecidas es casi similar con la de un valor de consigna constante (Figura 34). La diferencia es un Vi llamado BULDING WAVE (Figura 34-A), que genera las funciones para que éstas sean llevadas al proceso y se apliquen como variaciones en el valor de consigna (*set-point*).

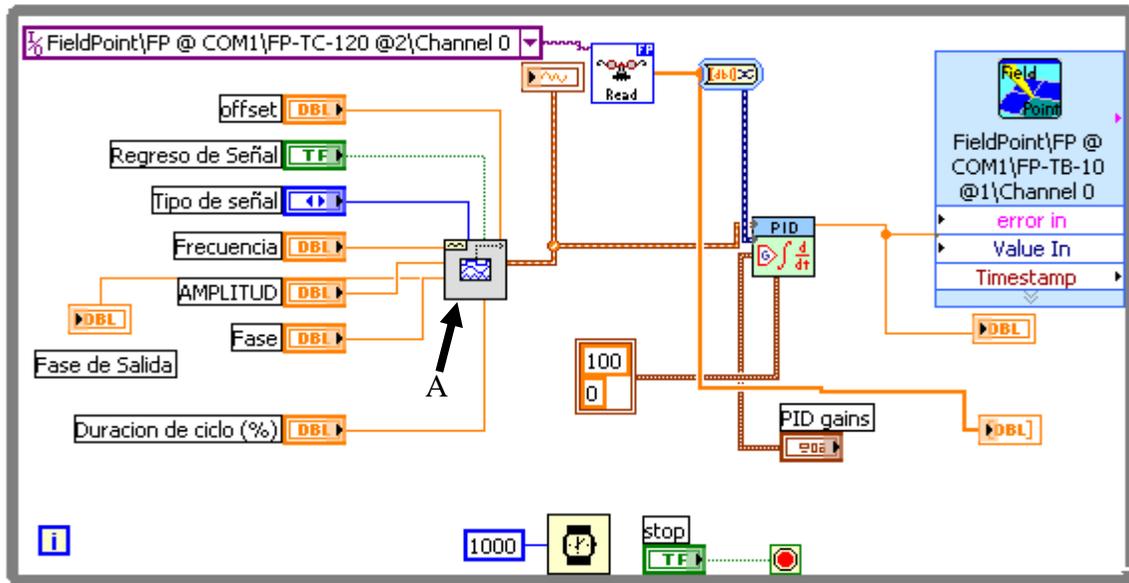


Figura 34. Diagrama de bloques para la variación de consigna en forma de onda.

Los instrumentos virtuales (VI) para el control considerados en LabVIEW® permitieron incorporar cada una de las variaciones que el operador puede realizar para el control con condiciones variables de operación durante el secado. A través de los diferentes paneles frontales el operador puede establecer los cambios del valor de consigna, no requiriendo las modificaciones del diagrama de bloques en donde solo el programador tiene acceso.



4.2 Pruebas de control.

4.2.1 Capacidad de calentamiento y enfriamiento del sistema.

La respuesta del proceso a enfriamiento y calentamiento brusco se presenta en la Figura 35. Se programó un ciclo de onda cuadrada para el calentamiento y enfriamiento desde una temperatura de 30°C a una de 70°C. Para permitir la estabilidad se mantuvo 20 minutos a una temperatura de 30°C y 10 minutos a una temperatura de 70 °C. Los parámetros de PID se establecieron para que se realizara un control on/off con una K_c (Ganancia de la proporcional) de 1.00, una T_i (Tiempo de la integral) de 0.010 minutos y una T_d (Tiempo de la derivada) de 0.000 minutos, el último valor no se considera ya que se quería que el proceso actuara de forma natural con poca acción del controlador.

La capacidad de calentamiento de las resistencias eléctricas requirió de al menos 10 minutos para alcanzar 70°C. El calentamiento no fue lineal, la velocidad de calentamiento fue mayor a bajas temperaturas. La capacidad de enfriamiento fue menor que la de calentamiento, un tiempo de 20 minutos no es suficiente para reducir la temperatura de 70 a 30°C. La velocidad de enfriamiento es mayor a temperaturas altas (por arriba de 50°C).



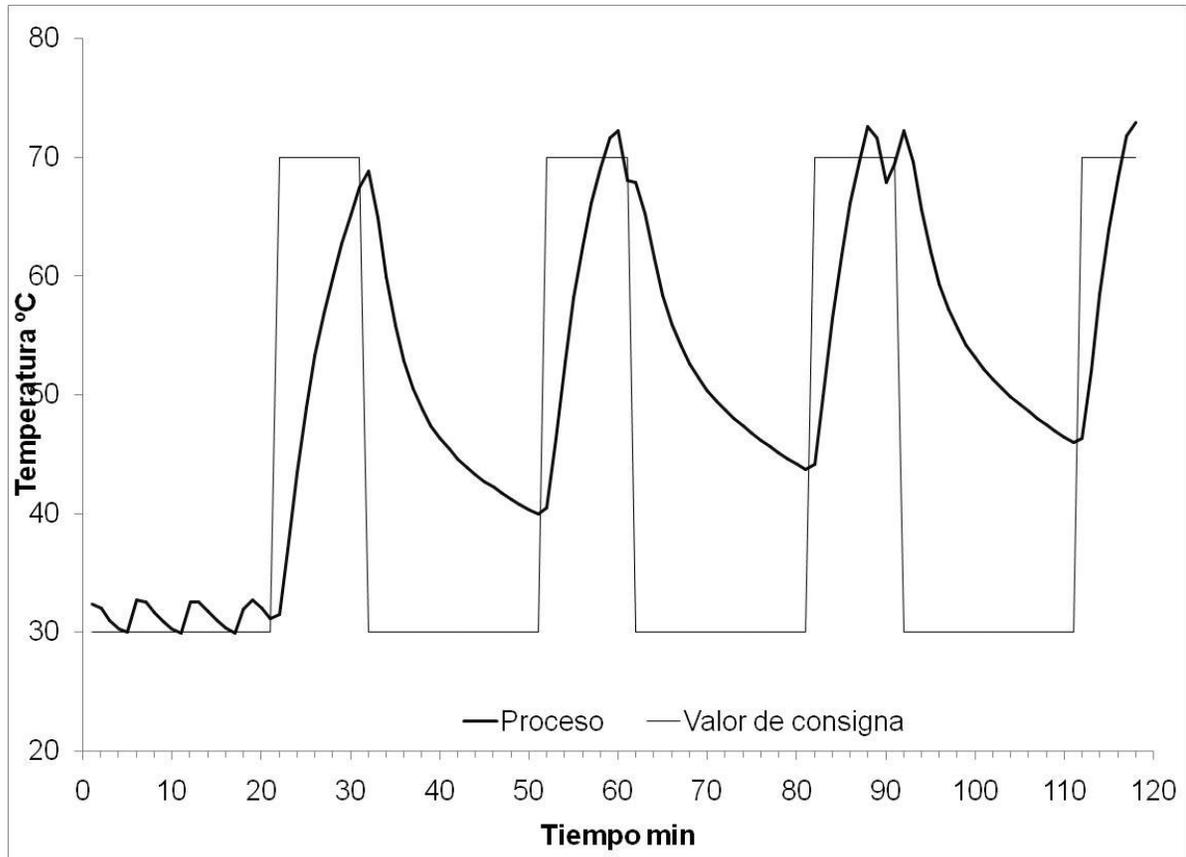


Figura 35. Velocidad de calentamiento y enfriamiento del sistema.

El conocimiento de la respuesta del proceso a los cambios en el valor de consigna (set-point) permite programar patrones de variación que el sistema es capaz de llevar a cabo.

4.2.2 Control para condiciones constantes de temperatura.

Se realizaron pruebas de control a temperaturas constantes, con un controlador PID con una K_c de 50, una T_i de 0.800 min y una T_d de 0.080 min.

Obteniéndose los siguientes resultados:



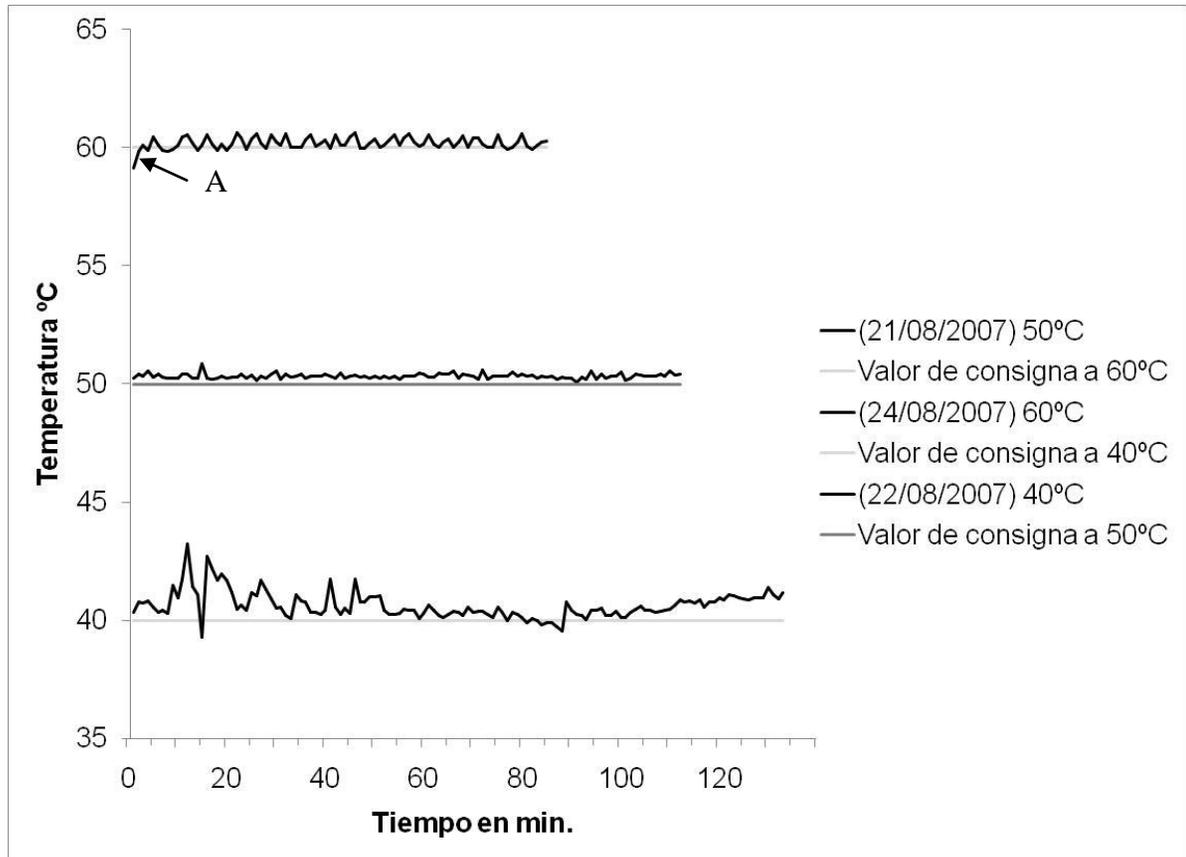


Figura 36. Temperatura del aire durante el secado a temperaturas constantes de 40, 50 y 60°C.

En la Figura 36, se observa la variabilidad de la temperatura del aire dentro del túnel con respecto al valor de consigna (*set-point*) (60°C). El calentamiento fue de manera abrupta con una estabilización rápida hacia el punto de ajuste (A), con pequeños cambios debido a la respuesta rápida del calentamiento y el ruido de la medición. El sistema de control permitió un error máximo de 0.6°C. Empleando los mismos parámetros de control se realizó una prueba a 50 °C (Figura 36). La diferencia de la temperatura del aire de secado con el valor de consigna (*set-point*) es mayor que en la prueba de 60°C. Se tienen variaciones de 0.2 a 0.8 °C, la estabilidad y controlabilidad del sistema es mejor conforme transcurrió la prueba.

El seguimiento del control para un programa de secado a temperatura constante de 40°C se presenta en la Figura 36. Las variaciones fueron más amplias (con un error de 3°C) en comparación con otras pruebas de temperatura de 50°C y 60°C. La ganancia, el tiempo de la



Algoritmo para el control de condiciones variables en un secador

integral y la derivada no fueron las adecuadas para este nivel de temperatura; ya que la temperatura en el proceso es inestable con oscilaciones tardando para estabilizarse.

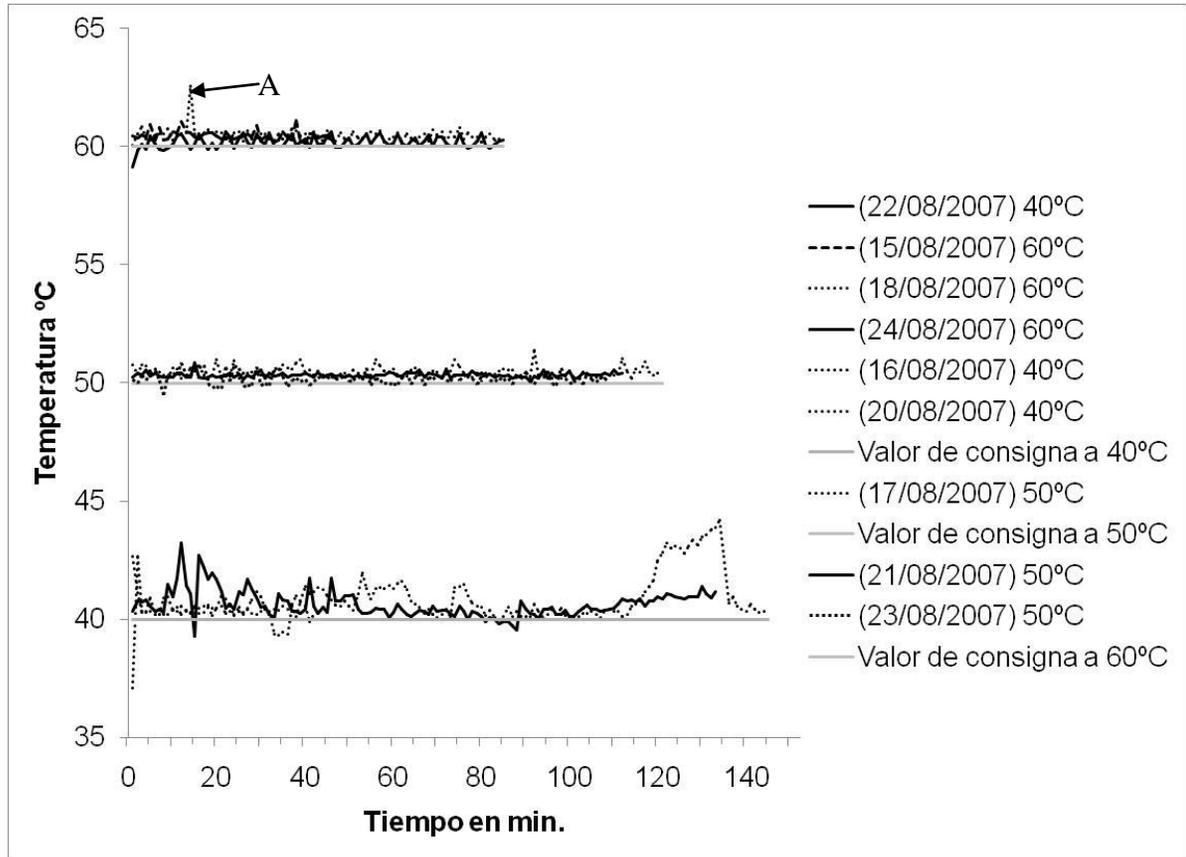


Figura 37. Secado a temperaturas constantes de 40, 50 y 60°C

La comparación de tres pruebas de secado a 40 °C con diferentes parámetros de control se presenta en la Figura 37. La diferencia entre el valor de consigna (*set-point*) y el proceso no fue adecuada por lo que se requiere de un cálculo más exacto de los parámetros de PID para que el proceso se mantenga estable con la mínima variación. La prueba de secado a temperatura constante mas estable se realizó el día 22/08/2007 con una Kc de 60.00, un Ti de 0.44 min y un Td de 0.011 min con una desviación máxima de 1°C del valor de consigna (*set-point*).

Las pruebas de secado a temperaturas constantes de 50°C, también se muestran en la Figura 37, se observaron muchas variaciones del proceso con respecto al valor de consigna (*set-point*).



Los parámetros de control que más se acercan al valor de consigna (*set-point*) fueron los empleados en la prueba realizada el día 21/08/2007, con un K_c de 60.00, una T_i de 0.440 min y un T_d de 0.110 min (similares a los parámetros que la prueba de 40°C).

Con una temperatura constante de 60°C se presentaron desviaciones que van desde los 0.5°C a los 2.5°C (Figura 37). Las oscilaciones fueron muchas, esto fue a causa de un mal ajuste en los parámetros de control y una saturación al actuador; el pico que se muestra provocó un sobrecalentamiento en el proceso (Figura 37-A). Después de un tiempo la variabilidad de la temperatura fue similar en todas las pruebas. Los mejores parámetros para las pruebas con 40 y 50°C fueron los adecuados para la prueba de 60°C (día 24/08/2007) con una variación de 0.5°C. Los mejores parámetros se obtubieron con las correccion de las constantes de control empleando el método de oscilación lo que dio como resultado un proceso más estable y con menor variabilidad.

Las constantes se pueden aplicar para cualquiera de las pruebas de secado a temperatura constante teniendo mínimas oscilaciones y reduciendo el error entre el valor de consigna (*set-point*) y el proceso.

4.2.3 Control PI en pruebas de secado con ciclos de variación de temperatura.

Se realizaron pruebas de secado con un control PI con la finalidad de comparar los dos tipos de control (PI y PID) y saber cual presenta menor error en la respuesta del proceso.

Las pruebas de control se hicieron en ciclos de calentamientos y enfriamientos variando de 40 a 60°C y con mesetas y valles de 20 minutos cada uno. Se evaluaron tres tipos de métodos para calcular los parámetros de control PI.

El primer ajuste se hizo por medio del método de formulas básicas establecidas por Poulin y Pomerleau (1996), el segundo por el método de Ziegler y Nichols (1942) y el tercero el por el método modificado de Poulin y Pomerleau (1999).



Los parámetros PI se presentan en la Tabla 5.

Tabla 4. Constantes PI de los parámetros calculados con diferentes métodos.

Método	Kc	Ti
Poulin y Pomerleau (1996).	23.80	0.03952
Ziegler y Nichols (1942).	31.50	0.03162
Método modificado de Pulin y Pomerleau (1999).	0.800	0.03952

En la Figura 38 se presenta la respuesta de la temperatura de secado con los parámetros de control calculados por el método de formulas básicas de Poulin y Pomerleau (1996). Presentaron inestabilidad y oscilaciones en la respuesta del proceso con respecto al valor de consigna. Las desviaciones se amplificaron en los valles y mesetas. El enfriamiento se comportó como si se siguiera un control on/off.

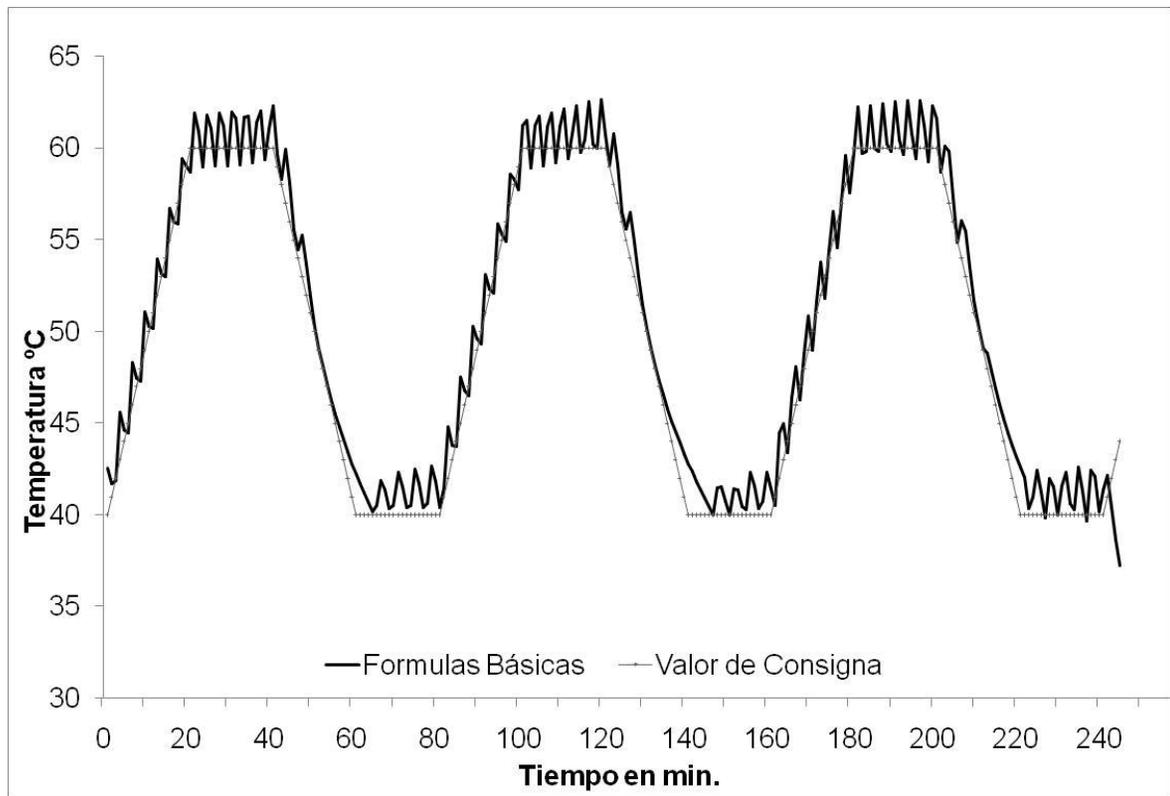


Figura 38. Respuesta del sistema empleando parámetros PI calculados con el método de Formulas Básicas.



Con los parámetros PI calculados con las formulas de Zeigler y Nichols (1942), el proceso siguió el valor de consigna con inestabilidades (Figura 39). Las desviaciones mayores se localizaron en el valle. La variabilidad y controlabilidad fue mejor que con los parámetros PI obtenidos de las ecuaciones de las formulas básicas de Poulin y Pomerleau (1996).

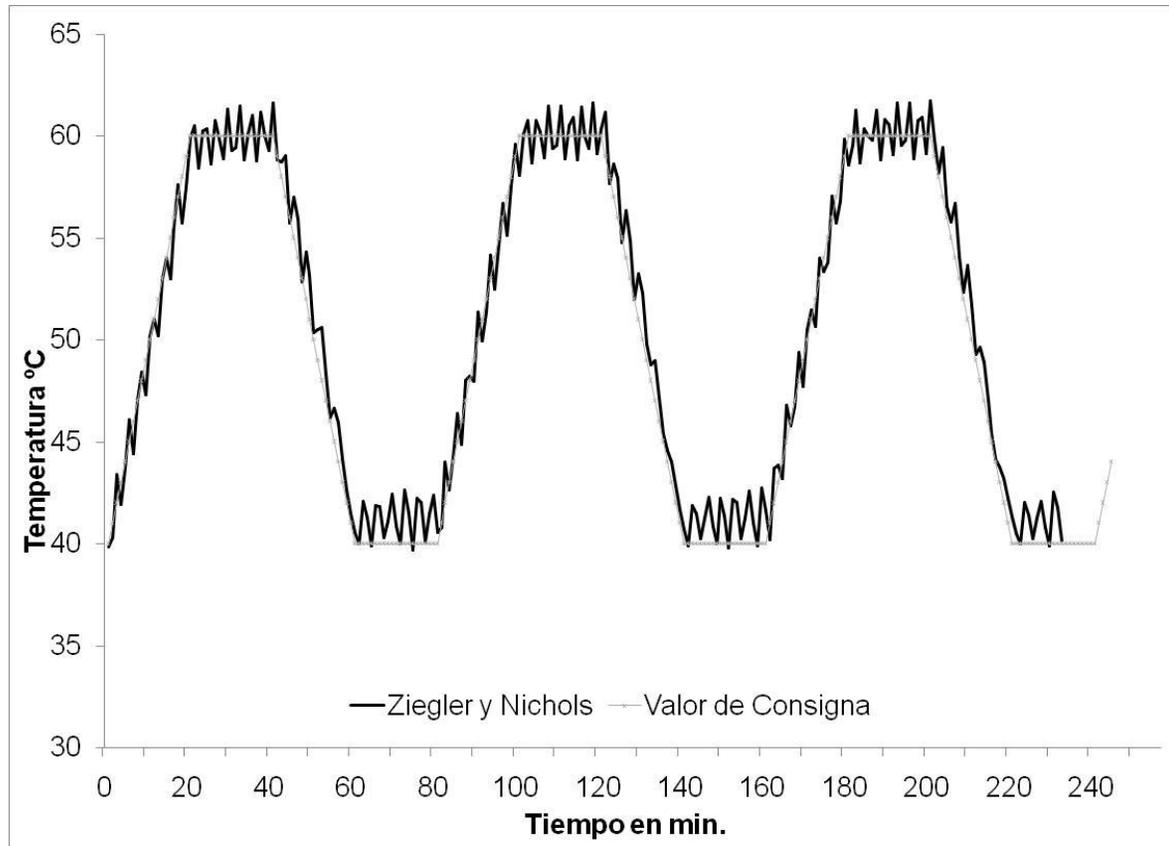


Figura 39. Parámetros PI calculados con el método de Ziegler y Nichols.

Con los parámetros de las ecuaciones modificadas de Poulin y Pomerleau (1999), el proceso fue inestable con desviaciones de 5°C (Figura 40). La amplitud de la salida del control fue grande, haciendo que el calentamiento sea mayor lo cual presentó inestabilidad en el proceso. La mayor inestabilidad se manifestó en la meseta, se observó el mismo patrón de picos en el enfriamiento y el calentamiento. Minimizando el error a la parte del valle.



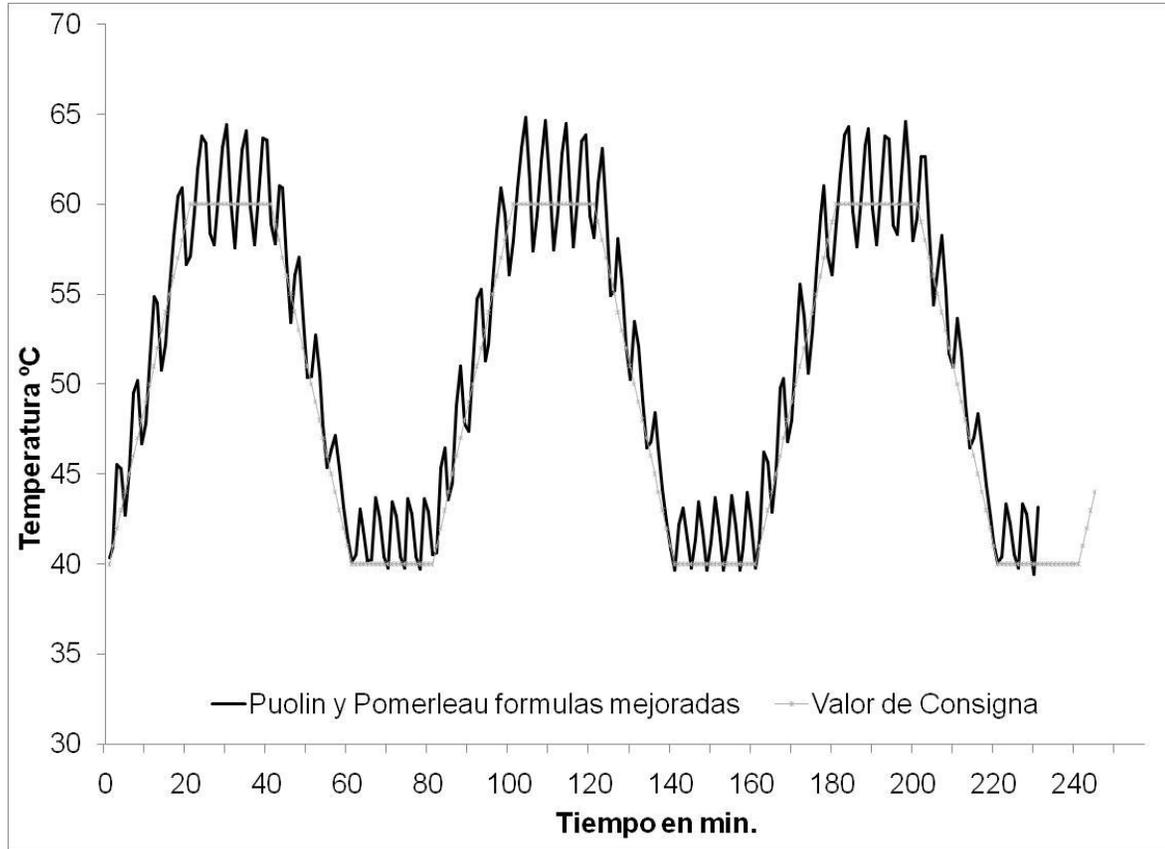


Figura 40. Parámetros de PI calculados con el método de formulas refinadas de Poulin y Pomerleau (1999).

El método de Ziegler y Nichols (1942) para el cálculo de parámetros PI empleados en las pruebas de variación cíclica de temperatura mostró mejores resultado en la estabilidad y una menor variabilidad en el seguimiento del valor de consigna (*set-point*) que los otros métodos evaluados.

4.2.4 Sintonización de las ganancias PID para los ciclos de secado.

La respuesta a los ajustes en los parámetros de control se pueden observar en la Figura 41, en ella se observa una programación en el valor de consigna (*set-point*) en un ciclo de forma pseudocuadrada.



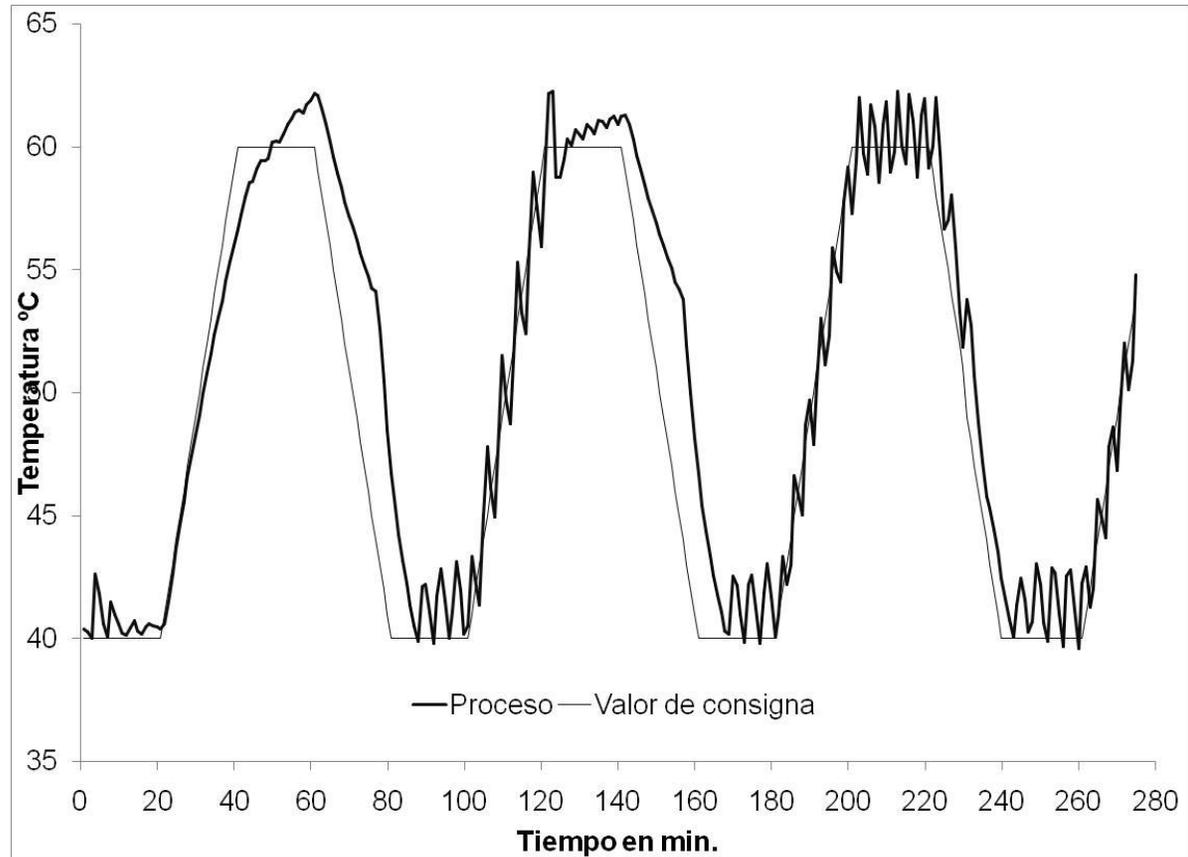


Figura 41. Ciclo de temperatura de secado 40-60°C en forma de onda pseudocuadrada mostrando el efecto de diferentes parámetros PID.

En la Figura 41 se muestra el ciclo de programación arbitraria que fue de 40-60 con 20 minutos en enfriamiento, calentamiento, valles y mesetas. Se ejemplifica bien cada una de las variaciones que existe; en la primera parte se realizó la programación del valor de consigna (*set-point*) con ajustes en las acciones del controlador, utilizando un controlador PID. Estos ajustes se observan en la Tabla 5 PID₁ donde corresponden al primer ciclo de calentamiento; meseta, enfriamiento y valle de la Figura 41, se apreció que el calentamiento fue muy brusco en las ultima parte hasta llegar a los 60 °C presentando inestabilidad en el enfriado del ciclo, esto fue debido a la acción en el Tiempo de la derivada que a mayor tiempo en la acción de éste se satura el actuador; en este caso la salida booleana se saturó y no permitió que el enfriamiento siga al valor de consigna (*set-point*) mostrando un error muy grande. Estas constantes fueron programadas por medio del conocimiento que se tenia del proceso y la respuesta del mismo.



En la parte de la meseta a 60 °C en el primer ciclo, se presentó un pico muy alto que tiende a la estabilización, pero no se estabilizó haciendo que se sobrecaliente el sistema en ese punto; en el momento en que se le dio la orden de enfriamiento la respuesta del proceso fue más rápida que en el primer ciclo pero no se ajusta al valor de consigna (*set-point*).

En la segunda parte del ciclo, en el calentamiento las constantes fueron calculadas por el método de ajuste de Ziegler and Nichols (1942), basado por el método de la Curva de Reacción teniendo como resultado PID₂ de la Tabla 5 tomando en cuenta que la ganancia crítica es de 99.00 para este punto.

La respuesta del proceso en el segundo ciclo de calentamiento y enfriamiento, fue buena con respecto al ciclo anterior, con la diferencia que este ciclo de calentamiento mostró mucho ruido debido a la saturación de la señal en el actuador con el mismo error en el enfriamiento que en el primer ciclo.

En la tercera parte del ciclo de calentamiento, que lo comprende el último ciclo de la Figura 41, se realizó la colocación de las acciones con valores arbitrarios hasta llegar a un valor óptimo en el proceso, este valor se muestran en la Tabla 5 PID₃; en donde se apreció que en la parte de estabilidad en los 40°C, se presentó ruido e inestabilidad pero se observó que los ciclos se completan; lo que quiere decir, que este fue un valor óptimo para que la respuesta del proceso siguiendo al valor de consigna (*set-point*). En las dos partes de valores constantes presentó inestabilidad pero en las partes de calentamiento y enfriamiento el proceso se ajustó con respecto el valor de consigna (*set-point*), lo que hizo que estos fueran los mejores puntos de ajuste para este ciclo de calentamiento.

Se realizaron dos nuevos ajustes en las constantes ya que las anteriores presentaban inestabilidades y oscilaciones en la mayor parte del proceso; para eso se realizará otra prueba de control para saber cuáles eran las constantes adecuadas para los procesos cíclicos; teniendo dos resultados mostrados en la Tabla 5 PID₄, PID₅.



Esto se hizo en el mismo periodo de calentamiento que fue de 40-60°C (Figura 42) en el cual en los dos primeros ciclos presentó estabilidad, al hacer el cambio de los parámetros, al inicio del cambio se presentaron oscilaciones pero el control las corrigió y redujo el error a 0.6°C entre el valor de consigna (*set-point*) y el proceso.

Estas mismas constantes de PID se aplicaron para todo el ciclo para observar cuál era el comportamiento del proceso. En el periodo de temperatura constante de 60°C del primer ciclo, el error fue de 0.5°C entre el valor de consigna (*set-point*) y el proceso, este error fue que el proceso está por arriba del valor de consigna (*set-point*), teniendo una salida del controlador de 0 a 3 % de apertura del actuador.

Tabla 5. Ajustes del controlador PID usados para los diferentes ciclos.

Controlador	Kc	Ti	Td
PID ₁	99.00	0.081	0.800
PID ₂	12.00	4.00	0.089
PID ₃	10.00	0.010	0.080
PID ₄	99.00	0.814	0.089
PID ₅	99.00	1.814	0.089



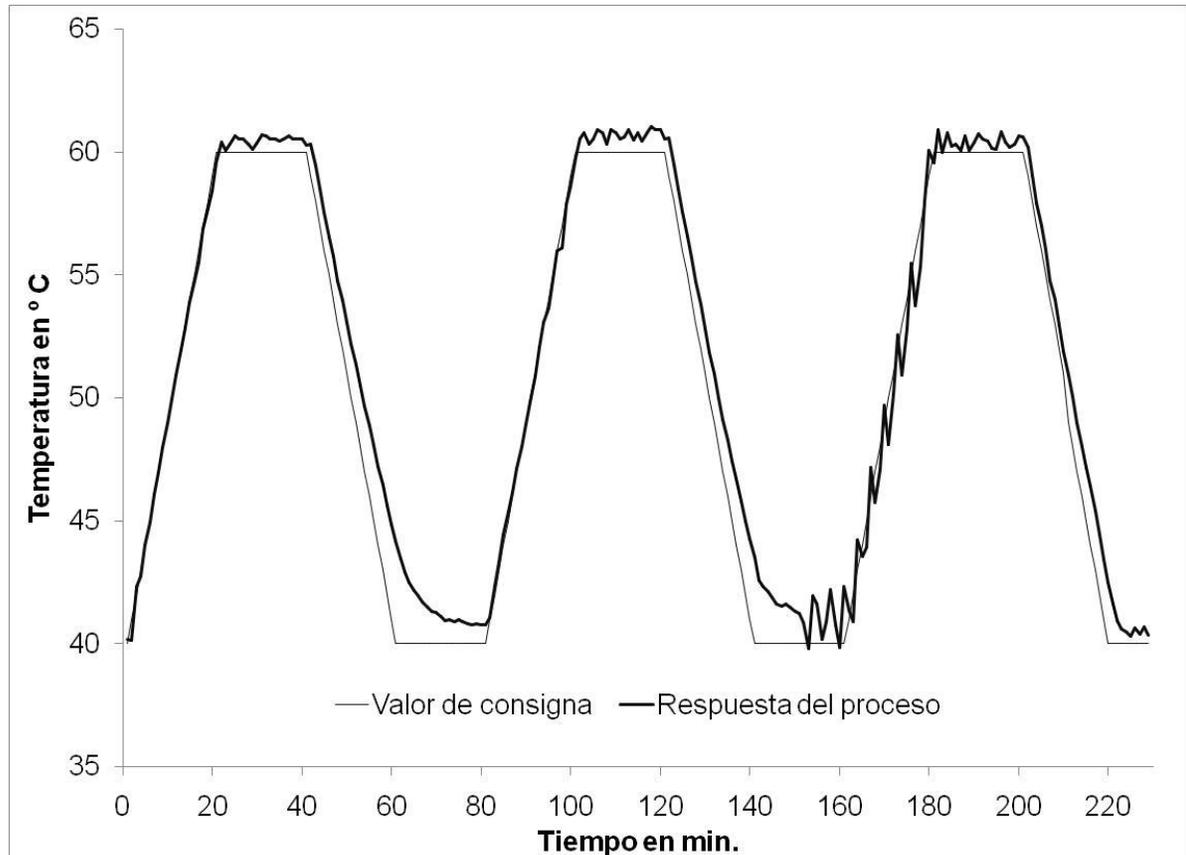


Figura 42. Ciclo 40-60°C con el periodo de 20-20 minutos.

En el periodo de enfriamiento del primer ciclo de la Figura 42 que va de 60 a 40°C, se observa que este se torna lento, con 1°C de error, teniendo un error máximo en la meseta de 40°C de 2°C; como se puede visualizar el proceso no alcanzó a llegar a la temperatura que le ordena el valor de consigna (*set-point*).

Observando que la ganancia de la proporcional disminuyó y el tiempo de la integral aumentó junto con el tiempo de la derivada teniendo que el proceso en el calentamiento del segundo ciclo presentó un error de 1.2°C haciendo estable el calentamiento y con más ajuste en el enfriamiento, éste presentó un error de 2°C entre el proceso y el valor de consigna (*set-point*); llegando a un error mínimo de 1.75°C. Después ajustando nuevamente las constantes al mismo proceso y teniendo el mismo ciclo de secado, haciendo los cálculos de las constantes de PID y tomando en cuenta que la ganancia de la proporcional de 90% es crítica. Se realizó el ajuste de las constantes teniendo una K_c de 54.00, una T_i de 2.22 minutos y una T_d de 0.555 minutos. El tiempo de la meseta de 60°C presentó oscilaciones más drásticas y menos



estabilidad en el calentamiento teniendo de 0.4 a 0.8°C de error mostrando mayor estabilidad en el enfriamiento minimizando el error y ajustando al valor de consigna (*set-point*) en la parte final del proceso en la meseta de los 40°C.

Después de 10 minutos de observar que el proceso no se estabilizaba se le redujeron las constantes de PID a la mínima expresión con una K_c de 10.00 una T_i de 0.010 en minutos y una T_d de 0.080 minutos.

Una vez aplicados estos cambios se observaron las variaciones del proceso para saber qué es lo que paso en el proceso teniendo constantes chicas; se observó, que los picos que se presentan descendieron haciendo que el actuador mande una señal de cero, observándose en la señal de salida del PID tiene una señal de cero, haciendo un control on/off con mucho error e inestabilidad en el proceso.

Después de observar el comienzo del tercer ciclo de calentamiento con las constantes mínimas y observar que el proceso se tornó inestable, se procedió nuevamente a calcular las constantes por el método de oscilación teniendo una K_c de 36.745, una T_i de 0.855 minutos y una T_d de 0.213 minutos. El error en el calentamiento aumentó como lo muestra la Figura 43. En donde la línea del proceso corresponde a la línea que presentó variaciones en forma de escalón y el valor de consigna (*set-point*) es la línea ascendente que se observa en la parte inferior de la Figura 43. Teniendo el proceso una mejor controlabilidad y menor variabilidad.

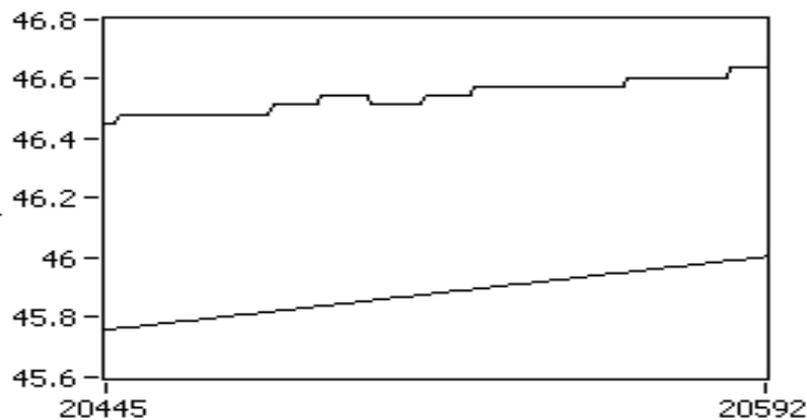


Figura 43. Vista del error.



Una vez realizadas las pruebas de control y pensando que el comportamiento del proceso fue de manera rápida en el calentamiento a temperaturas bajas y rápido en el enfriamiento a temperaturas altas esto se debió a que se conectaron para su calentamiento dos resistencias eléctricas de 1450 Watt cada una de ellas, que hacen que éste fuera muy rápido e inestable.

Una vez realizados los ajustes necesarios se procedió a desconectar una de las resistencias para observar el comportamiento del proceso. Se programó una prueba de secado en forma cíclica de 40-60 teniendo como periodo 20 minutos en cada operación (Figura 44). Observado que el calentamiento en temperaturas bajas que fueron hasta los 45°C, el calentamiento es rápido de manera lineal ascendente; después, el calentamiento se volvió en forma lenta de manera logarítmica con un error de 6°C del valor de consigna (*set-point*) como lo muestra la Figura 44; llegando a la conclusión que una resistencia no tiene la suficiente capacidad calorífica para vencer el enfriamiento que la bomba de calor le aplica al proceso, haciendo que este se torne lento a temperaturas altas y no llegue al punto establecido.

La resistencia por sí sola no aportó el calor necesario al proceso para que este respondiera de manera adecuada a los ciclos, pero se observó más estabilidad en la respuesta del proceso en el enfriamiento de éste, con un margen de error mínimo y no presentó oscilaciones drásticas en la meseta de 40°C esto se debió a que la resistencia a temperaturas bajas aportó el calor necesario y no hizo que se sobrecaliente el proceso y esto produjera oscilaciones tan drásticas.



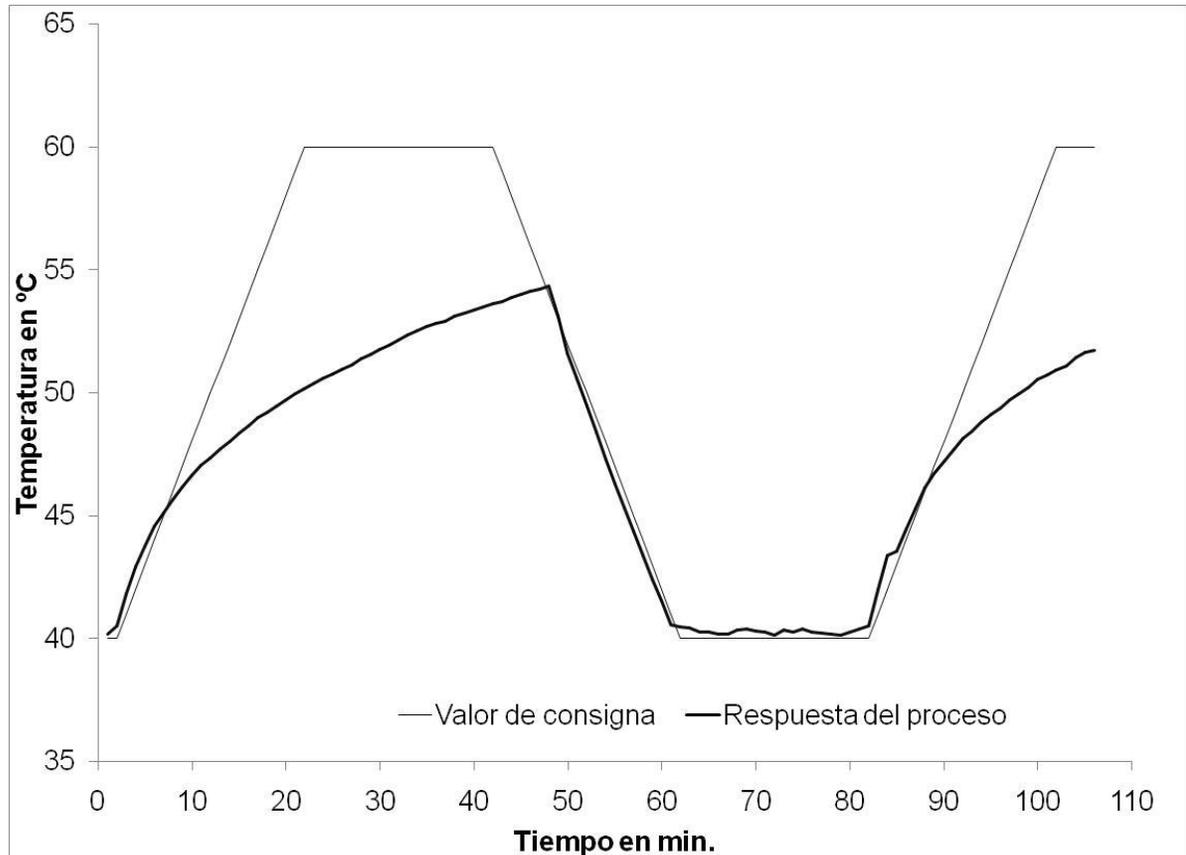


Figura 44. Respuesta del calentamiento en el proceso con una resistencia eléctrica.

En la Figura 45, se muestra la respuesta del proceso a todas las variaciones que se presentaron en los programas de secado en forma cíclica, en la primera parte del proceso se pudo observar que se pone en marcha la bomba de calor en donde el proceso se enfrió; de ahí se prendieron las resistencias para que al proceso se calentara a la temperatura de 40°C como se observó en el primer pico de la Figura 45, una vez más se volvió a enfriar para observar la respuesta y se le aplicó calor para estabilizarlo por 10 minutos a la temperatura de 40°C.

Una vez estable el proceso se encendió el ciclo de calentamiento que fue de 40 a 60°C en 20 minutos y las mesetas son de 20 minutos constantes; como se pudo observar el proceso respondió de manera adecuada al ciclo de calentamiento, teniendo la línea de la temperatura del interior del material con una respuesta lenta, ya que como esta mide la temperatura de la superficie representa diferente respuesta pero en forma cíclica.



Algoritmo para el control de condiciones variables en un secador

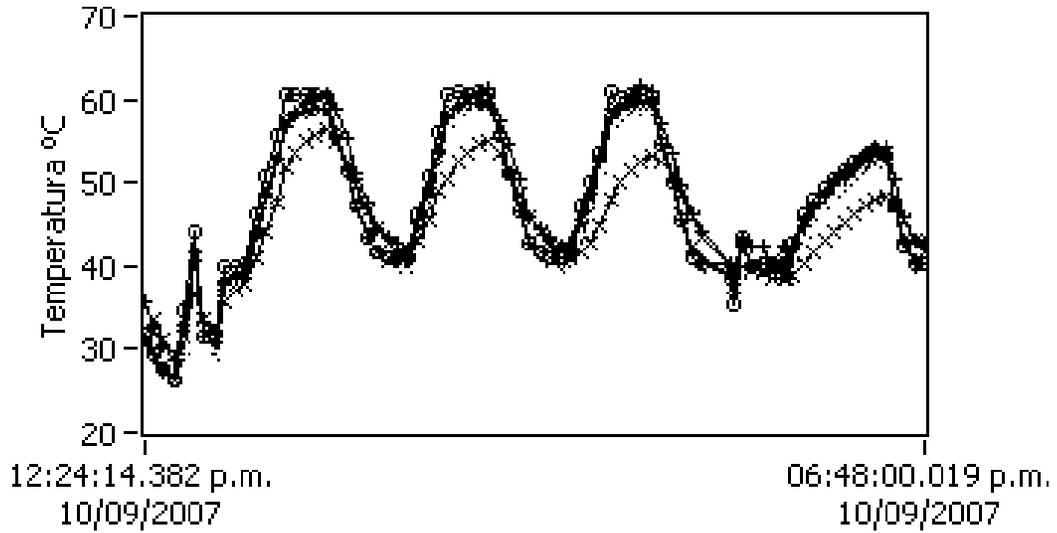


Figura 45. Respuesta del proceso a las variaciones cíclicas.



4.2.5 Comparación de control PI y PID.

La respuesta del proceso siguiendo una variación cíclica se empleó para comparar los parámetros de control PI y PID calculados con las formulas de Ziegler y Nichols (Figura 46).

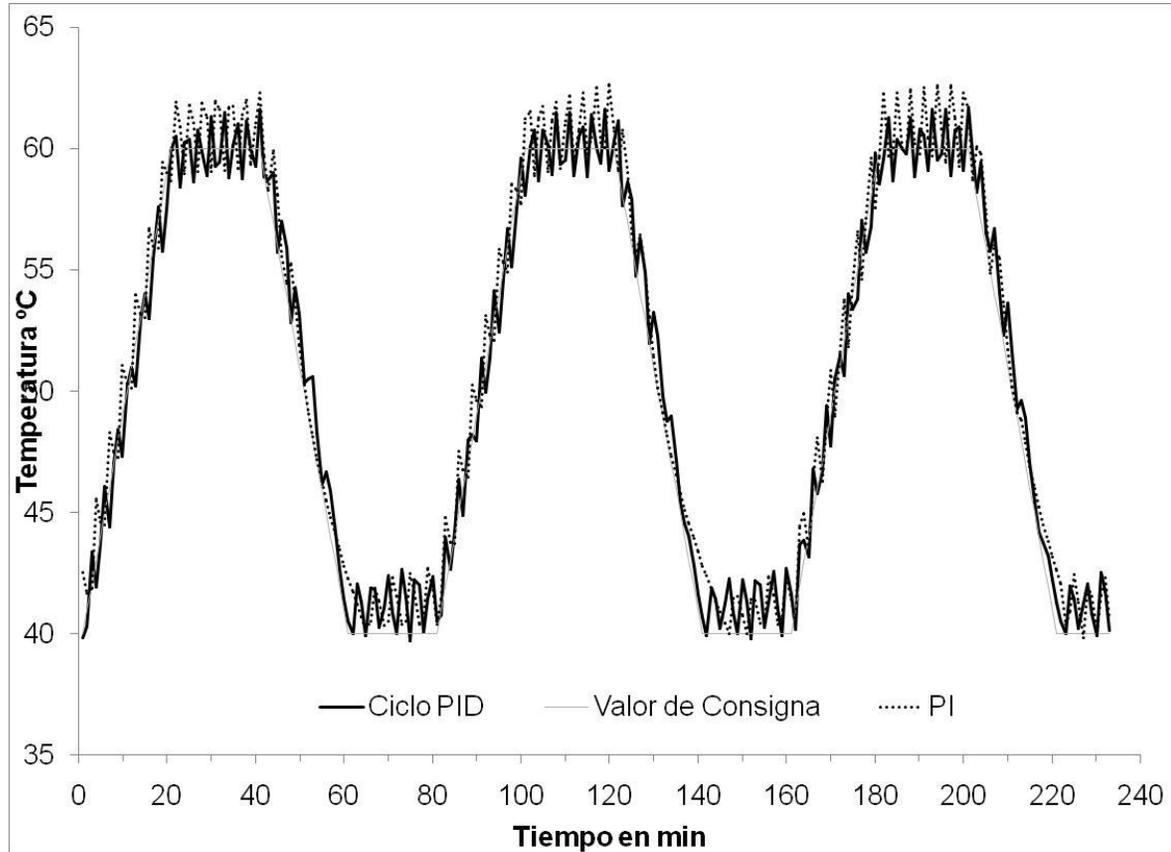


Figura 46. PI vs PID

Los dos tipos de controles siguieron la tendencia de los ciclos. El control PI presentó más variación que el PID. El parámetro derivativo disminuyó la respuesta rápida del sistema evitando que el control se sature, la proporcional y el tiempo de la integral hicieron que la salida del actuador realizara una curva de mayor amplitud, lo que hace que el proceso se mantenga encendido en el calentamiento mucho tiempo haciendo que este se sobrecalentara y formara picos. El control PID fue el más estable, siguiendo cada uno de los puntos del valor de consigna (*set-point*), pues la amplitud en la salida del controlador no saturó la señal del actuador haciendo que este reaccione de manera rápida a los cambios y previniendo el error.



4.2.6 Resultados de los ciclos de secado con un control PID.

Se realizaron siete pruebas de control en forma cíclica para conocer como era el comportamiento del proceso a los cambios que se le aplicaron al valor de consigna (*set-point*). Las constantes de control PID elegidas fueron de una K_c de 36.745, una T_i de 0.855 minutos y una T_d de 0.2137 minutos ya que estos parámetros mostraron mayor estabilidad en el proceso. Los ciclos se hicieron en forma pseudocuadrada con una amplitud de 40 a 60°C cuando el ciclo era ascendente y de 60 a 40 °C cuando el ciclo era descendente, el tiempo de calentamiento y enfriamiento fue de 20 minutos en todas las pruebas con una velocidad de 2°C/min respectivamente. Variando el tiempo de estabilización en los valles y mesetas de 10, 20, 40 y 60 minutos.

El programa de variación para la prueba de secado se muestra en la Figura 47, éste considera 20 minutos para el calentamiento y enfriamiento y de 10 minutos en los valles y mesetas.

La controlabilidad de calentamiento o enfriamiento fue adecuada con un ligero desfase en el enfriamiento entre el valor de consigna (*set-point*) y la temperatura del control. En los valles y mesetas se presentaron oscilaciones; posiblemente por el tiempo que se le impone al controlador para que el proceso llegue a estabilizarse. Las oscilaciones en las mesetas fueron mayores que en los valles, en éstos el proceso no se ajustó a la temperatura de consigna.



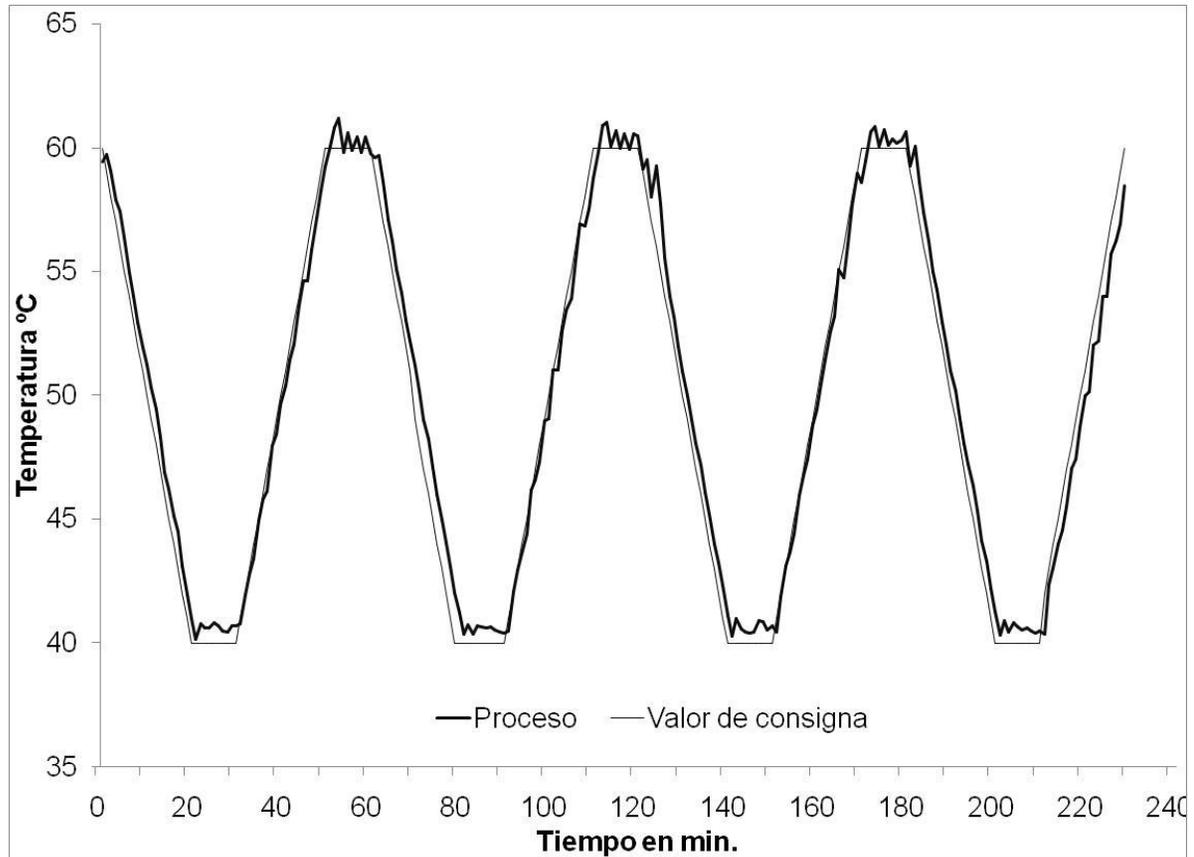


Figura 47. Ciclo de secado de 60-40°C con el periodo de variación de 20-10 minutos.

La secuencia de variación de temperatura de 40 a 60°C con un tiempo de 20 minutos entre cada periodo constante se muestra en la Figura 48. La variabilidad en el proceso se aminoró conforme se fue ejecutando el ciclo; en la meseta del primer ciclo el proceso fue variable pero siguiendo los valores de consigna (*set-point*) que se le asignan; en el primer valle se produjeron variaciones suaves casi manteniéndose estable el error; en la segunda meseta presentó menores variaciones en comparación a la primera, haciendo pequeños ciclos y reduciendo el error; en el segundo valle el proceso se acercó a la estabilización en el valor de consigna (*set-point*) establecido minimizando el error. La meseta del tercer ciclo presentó variabilidad pero con un menor error acercándose más al valor de consigna (*set-point*) en comparación con las otras dos mesetas.



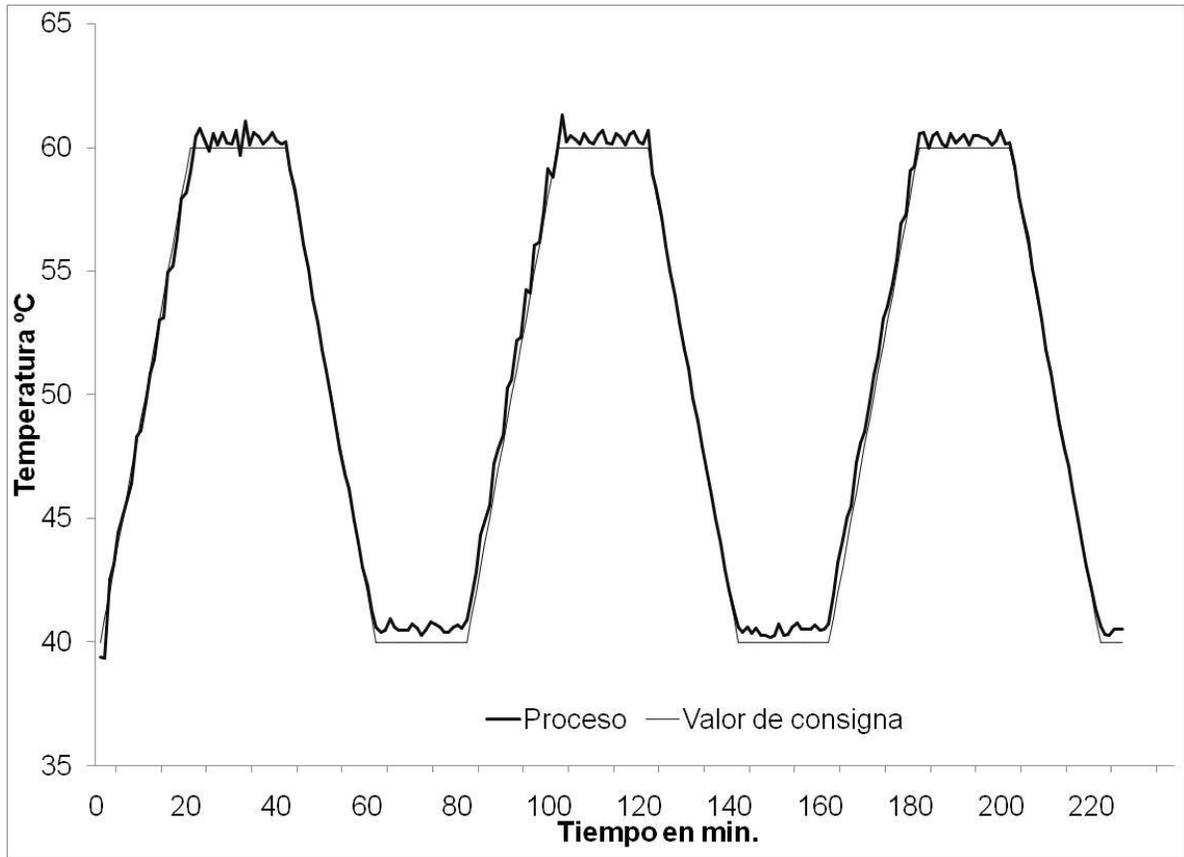


Figura 48. Ciclo de secado de 40-60°C con el periodo de variación de 20-20 minutos.

En la Figura 49 se presenta la prueba de secado con variación descendiente de temperatura de 60 a 40°C, con un tiempo en los valles y mesetas de 20 minutos. El comportamiento de la respuesta del sistema a los cambios de temperatura fue similar que las pruebas con variación ascendente. Los parámetros de control para pruebas con cambios ascendentes y descendentes pueden ser similares.



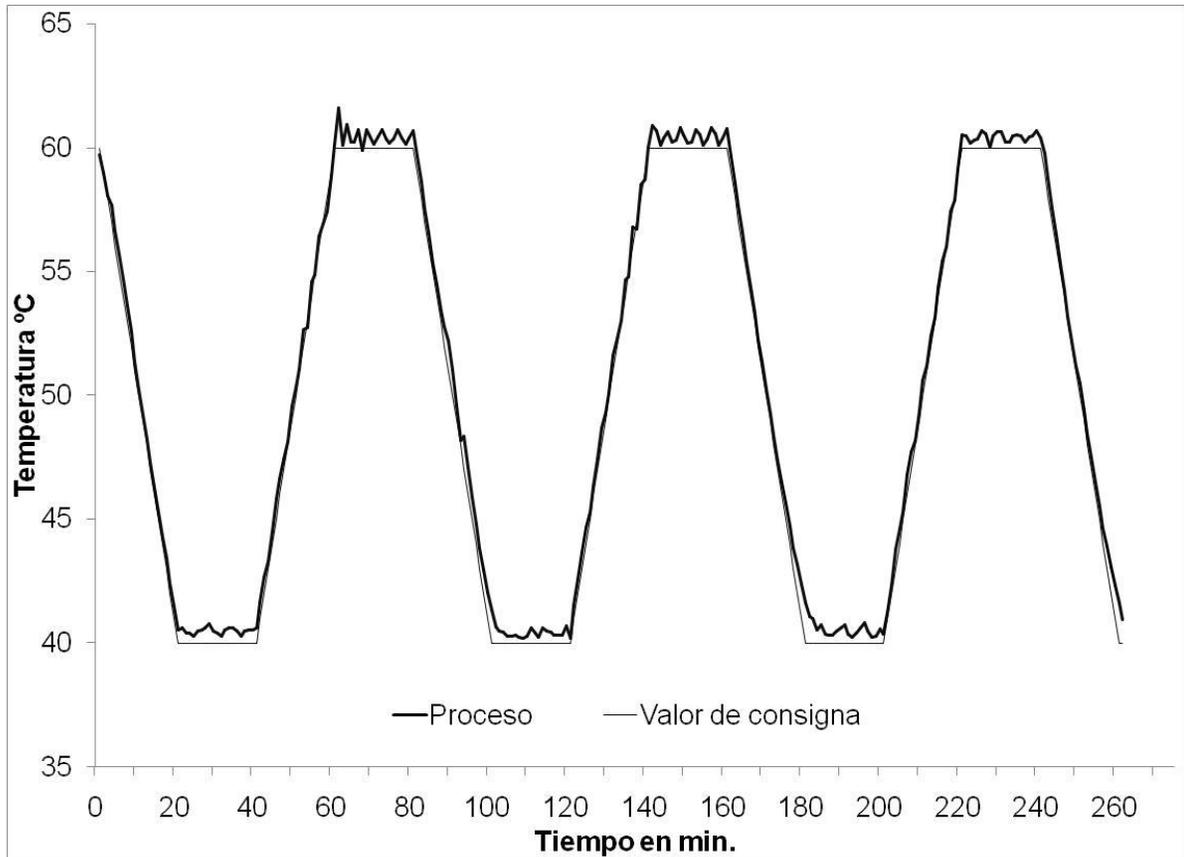


Figura 49. Ciclo de secado de 60-40°C con el periodo de variación de 20-20 minutos.

En la Figura 50 se muestra la prueba de secado con una variación ascendente y con 60 minutos para el tiempo constante.

En las mesetas y valles la temperatura del proceso siempre es ligeramente mayor que el valor de consigna. Picos de temperatura de mayor amplitud que la variabilidad se debe a la apretura de la ventanilla del túnel de secado para extraer muestras de ajo.



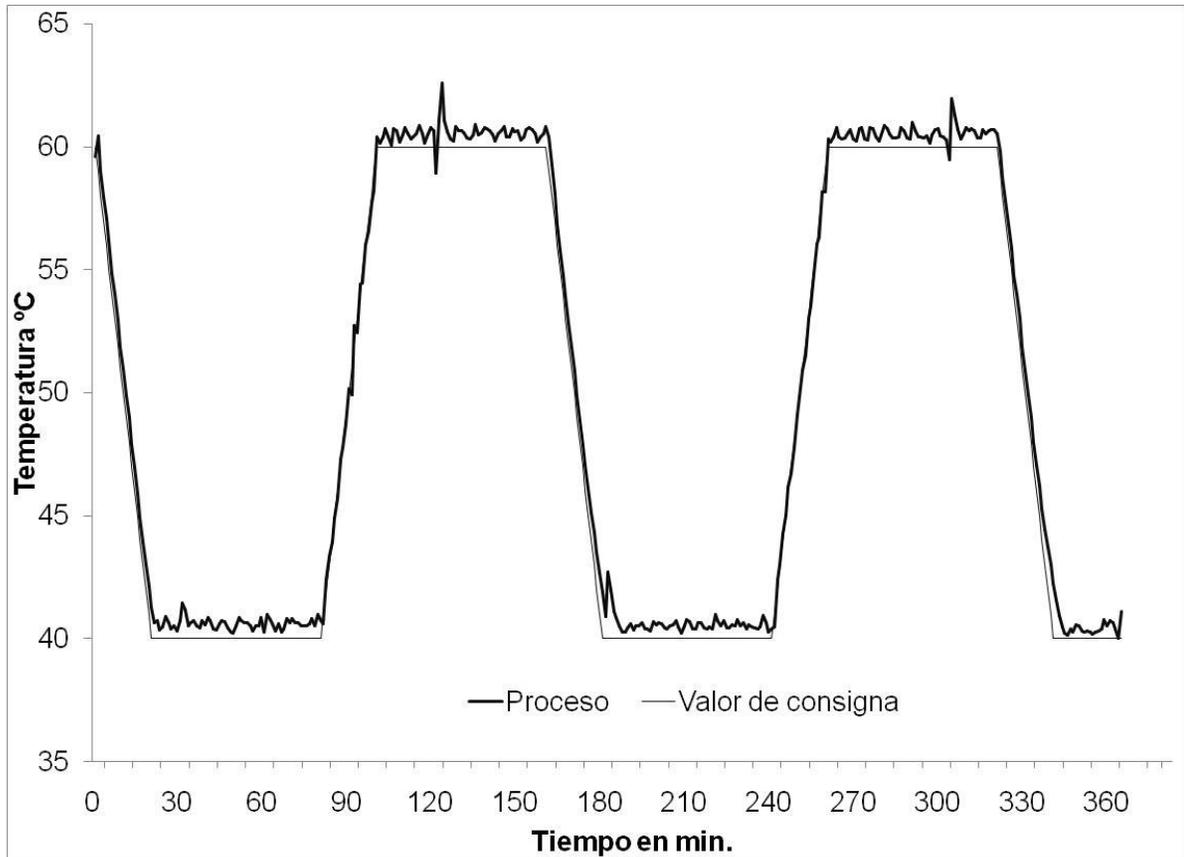


Figura 50. Ciclo de secado de 60-40°C con el periodo de variación de 20-60 minutos.

En la Figura 51 se muestra la prueba de secado con una variación ascendente y con 40 minutos para el tiempo constante.

En la meseta y en los valles este programa es casi similar a las anteriores pruebas de secado teniendo una pequeña variación en la tercera parte del enfriamiento donde el proceso tiene un error de 1°C con respecto al valor de consigna (*set-point*).



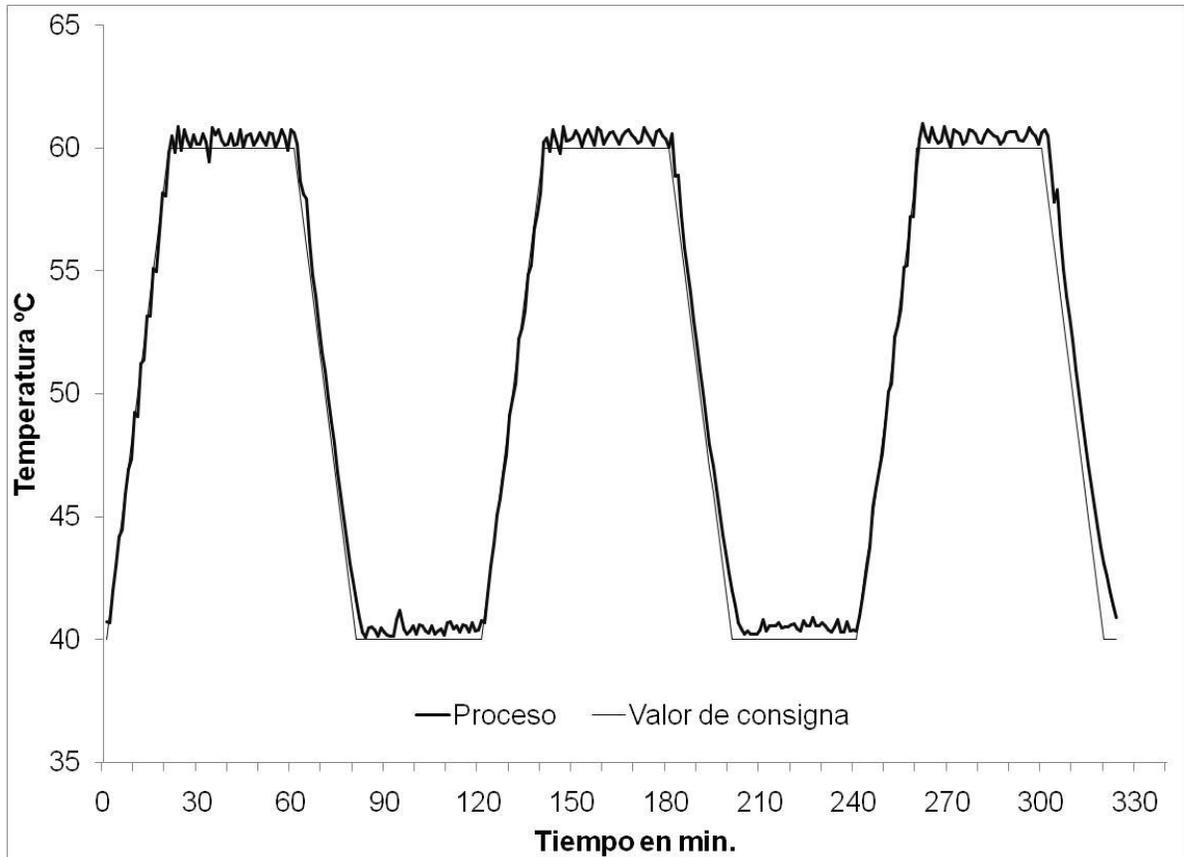


Figura 51. Ciclo de secado de 40-60°C con el periodo de variación de 20-40 minutos.

En la Figura 52 se muestra la prueba de secado con una variación descendente y con 40 minutos para el tiempo constante.

En el primer valle se observa una pequeña variación causando un error de casi 3°C, esto se debió a que en ese tiempo se extrajo muestra de ajo haciendo que el control se ajustara, teniendo oscilaciones y manteniendo un error de aproximadamente 1°C, ajustándose en el calentamiento al valor de consigna (*set-point*) mostrando mínimas oscilaciones, en la parte de los valles la respuesta fue similar que las demás pruebas de secado manteniendo oscilaciones, ajustándose al valor de consigna (*set-point*), con una diferencia en el enfriamiento de aproximadamente 0.5°C sin mostrar oscilaciones.



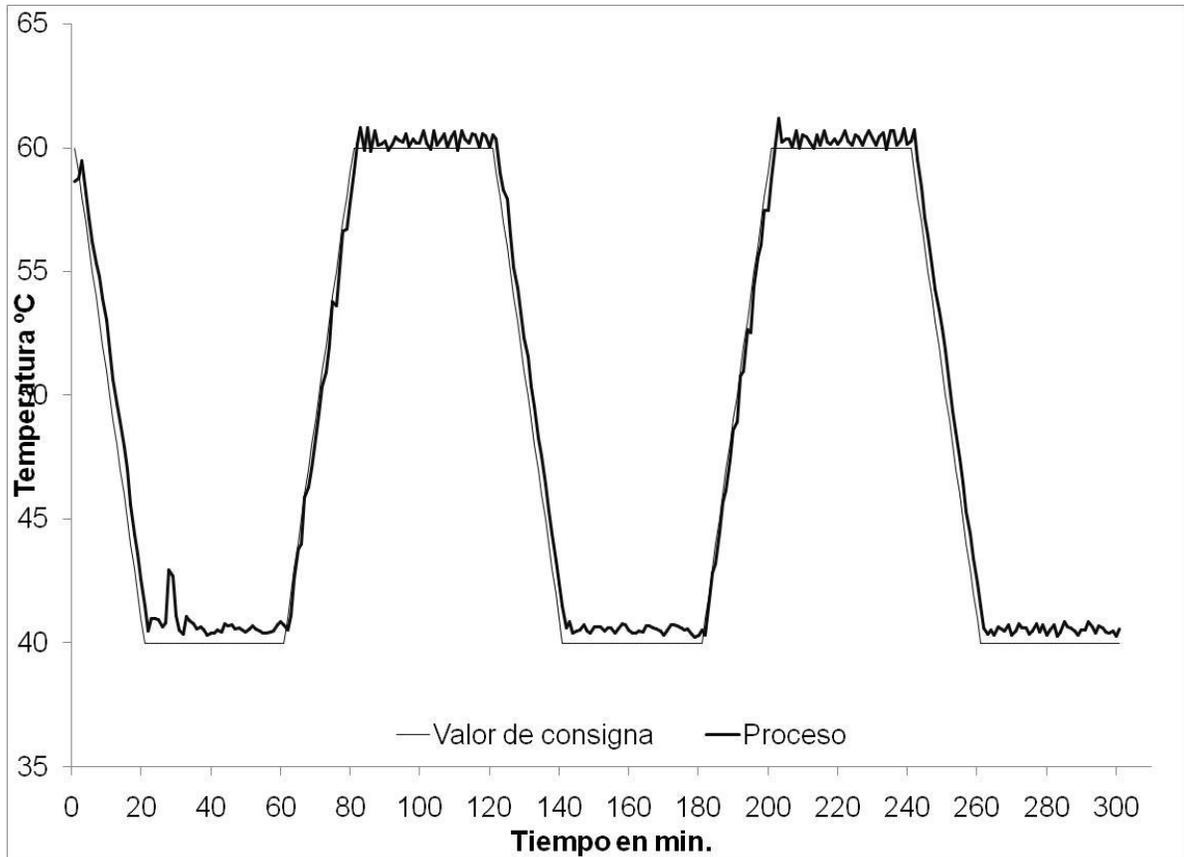


Figura 52. Ciclo de secado de 60-40°C con el periodo de variación de 20-40 minutos.

En la Figura 53 se muestra la prueba de secado con una variación descendente y con 10 minutos para el tiempo constante.

Teniendo una similar respuesta que en la primera prueba con el mismo tiempo en el periodo constante, observando mayor controlabilidad y seguimiento del valor de consigna (*set-point*) en casi todos los puntos del proceso se ajustó mejor y mostró menor error en la parte de los valles, pero con las mismas oscilaciones en las mesetas.



Algoritmo para el control de condiciones variables en un secador

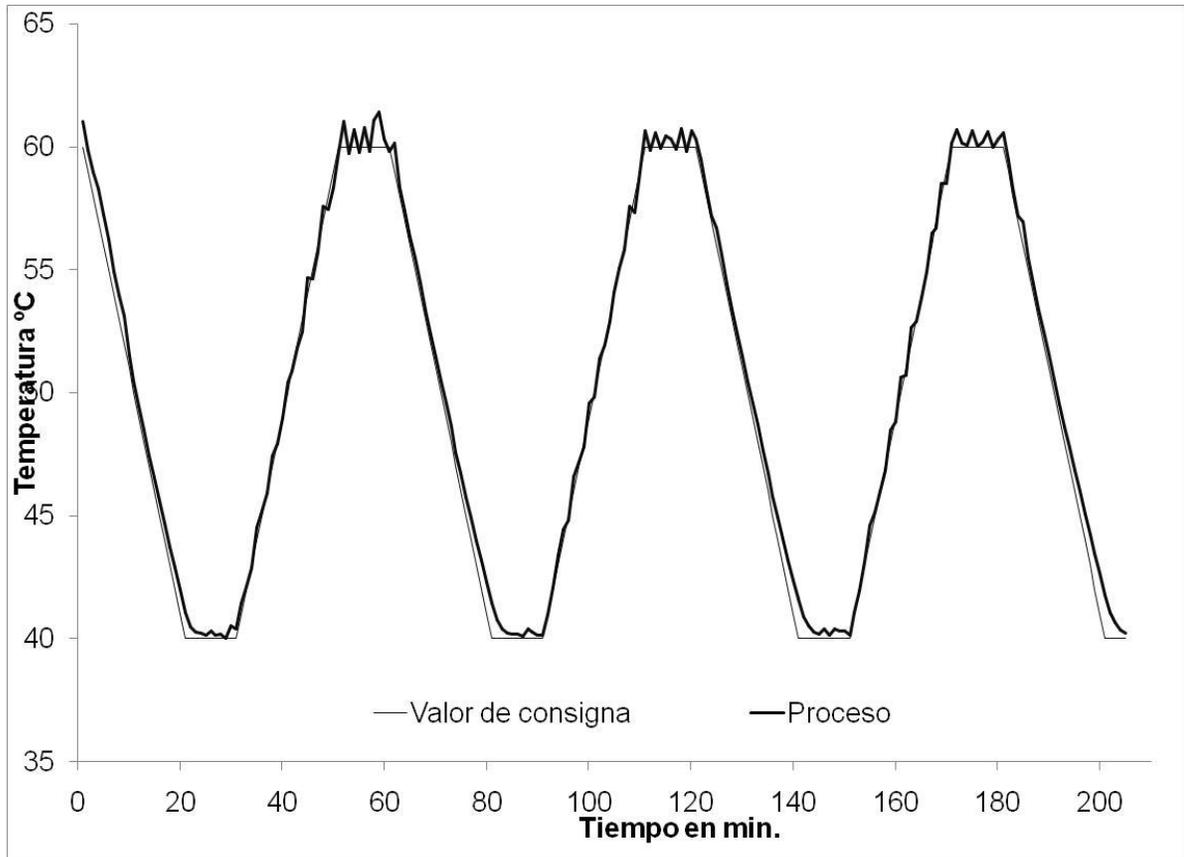


Figura 53. Ciclo de secado de 60-40°C con el periodo de variación de 20-10 minutos.

Se observó que si el periodo constante es mínimo en una función, la respuesta del proceso se torna inestable teniendo ruido en las partes de las mesetas, ya que el proceso no contó con el suficiente tiempo para la estabilización; pasando lo contrario en el periodo de enfriamiento y calentamiento, ya que estos si contaron con tiempo para estabilizarse, el proceso lo sigue de manera normal con un una mínima variación en el calentamiento que en el enfriamiento, esto debió a la respuesta del proceso ya que este fue más estable en el enfriamiento que en el calentamiento.



4.2.7 Programación de formas periódicas con diferentes arreglos.

La presente sección tiene el propósito de observar el comportamiento del sistema cuando se sometió a diferentes formas de variaciones del valor de consigna (*set-point*) de temperatura del aire de secado.

En todos los casos se emplearon los parámetros de control con una K_c de 36.745, una T_i de 0.855 minutos y una T_d de 0.0214 minutos, estos valores se tomaron porque presentan mayor estabilidad para los ciclos en forma de pseudocuadrado esperando que ellos ajusten el proceso al valor de consigna (*set-point*).

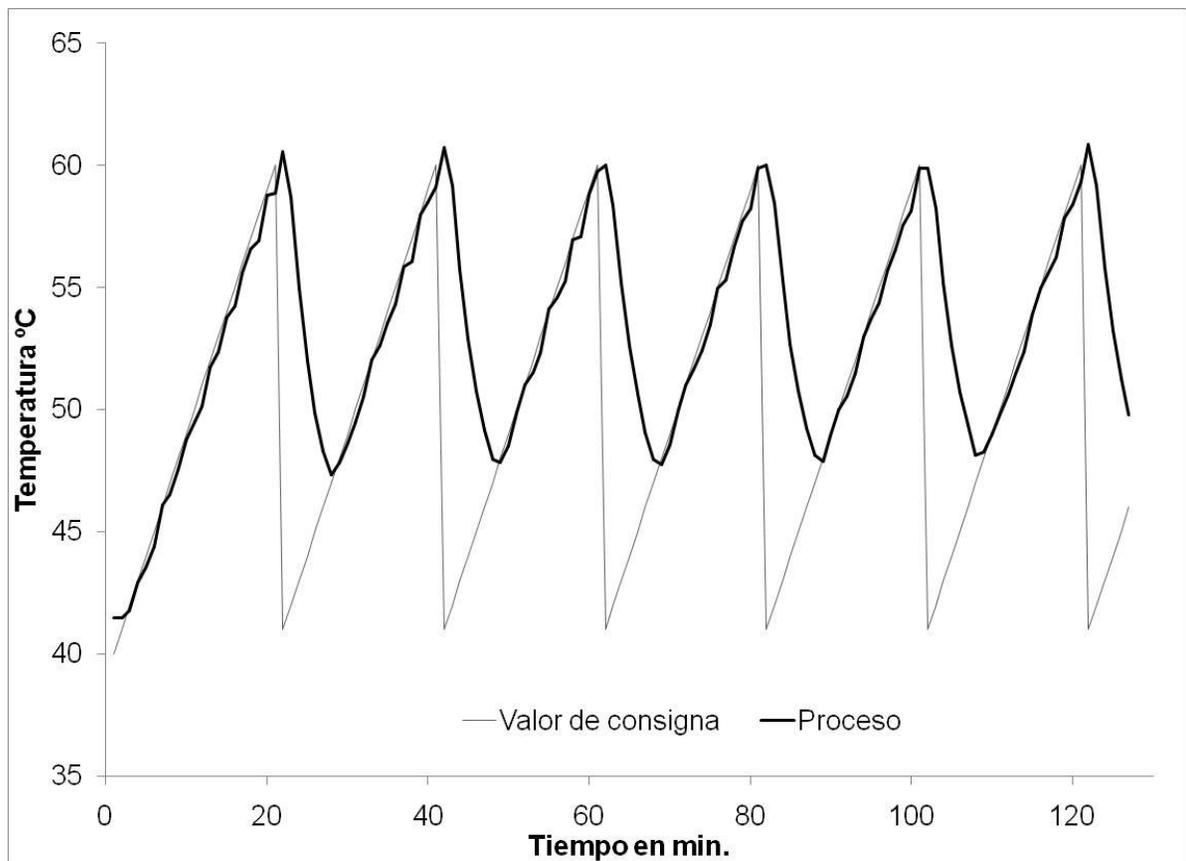


Figura 54. Ciclo Diente de sierra.



La respuesta del proceso a un ciclo en forma de dientes de sierra fue inadecuada en el enfriamiento pero muy eficiente en el calentamiento (Figura 54). La respuesta a un enfriamiento brusco fue lenta, presentando desplazamiento de 10 minutos lo que dio como resultado que se iniciara el calentamiento aun cuando no se haya alcanzado los 40°C.

El ciclo respondió siguiendo un ciclo triangular cuyo limite inferior esta 8°C arriba del valor de consigna.

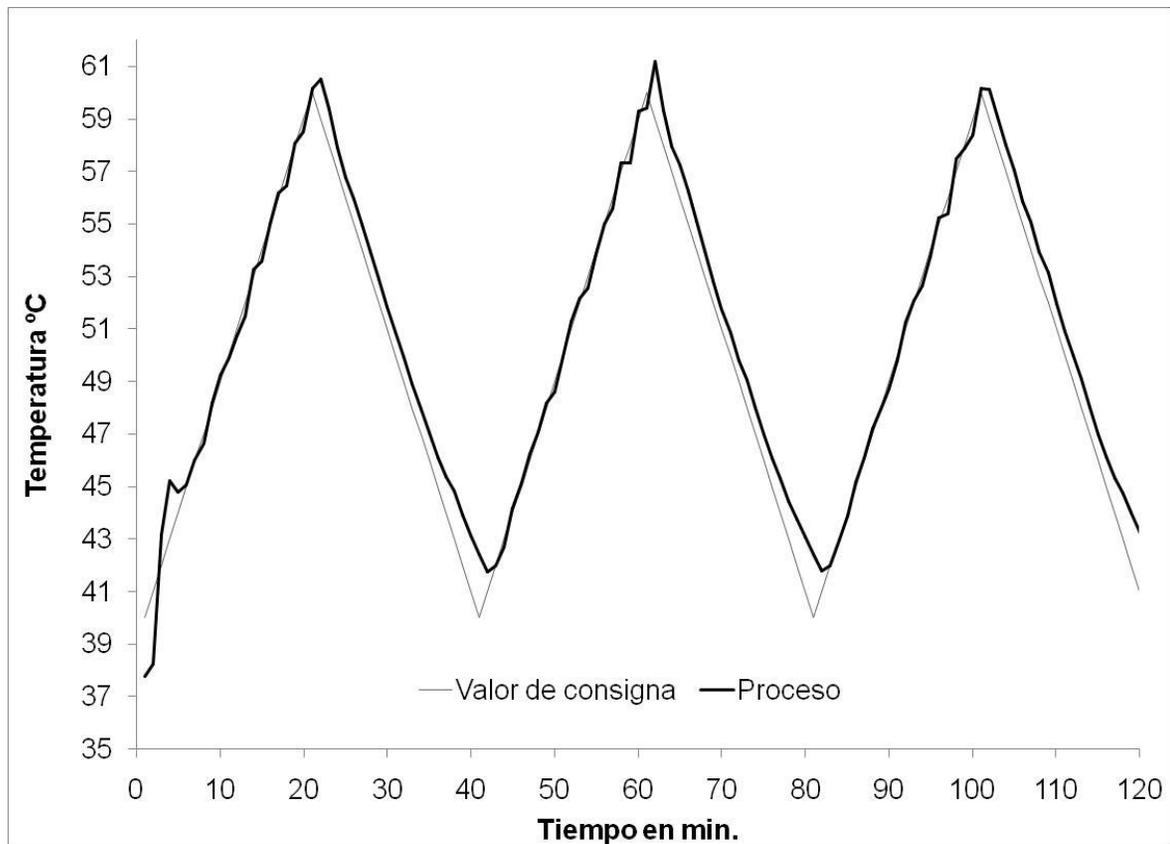


Figura 55. Ciclo Triangular

La respuesta del proceso a cambios de tipo triangular en el valor de consigna (*set-point*) se presenta en la Figura 55. La respuesta del proceso a cambios del valor de consigna (*set-point*) de forma triangular fue adecuada y estable. En el calentamiento y el enfriamiento con una diferencia de aproximadamente 1°C entre la temperatura de consigna y el proceso; sin embargo se presentaron diferencias importantes en los vértices.



En la parte superior el proceso se pasa 1°C; la tendencia del enfriamiento presentó un desfase de 5 minutos con relación al valor de consigna (set-point), esto fue a causa de la reacción del proceso ya que este se calienta muy rápido haciendo que en este punto cuando el valor de consigna (*set-point*) baja el proceso se encuentre en el calentamiento y como el proceso es lento para enfriar tarda un poco en ajustarse pero el error y esta reacción disminuye, ya que el control toma las debidas precauciones para que esto no vuelva a suceder.

Una corrección puede hacerse estableciendo un valor de consigna (*set-point*) de 59°C. El vértice inferior no alcanzó el límite inferior de temperatura debido a que se presentó un desfase y el control pasa a la etapa de calentamiento. El desfase en la etapa de enfriamiento podría corregirse si se incorporan diferentes parámetros de control para el calentamiento y para el enfriamiento.

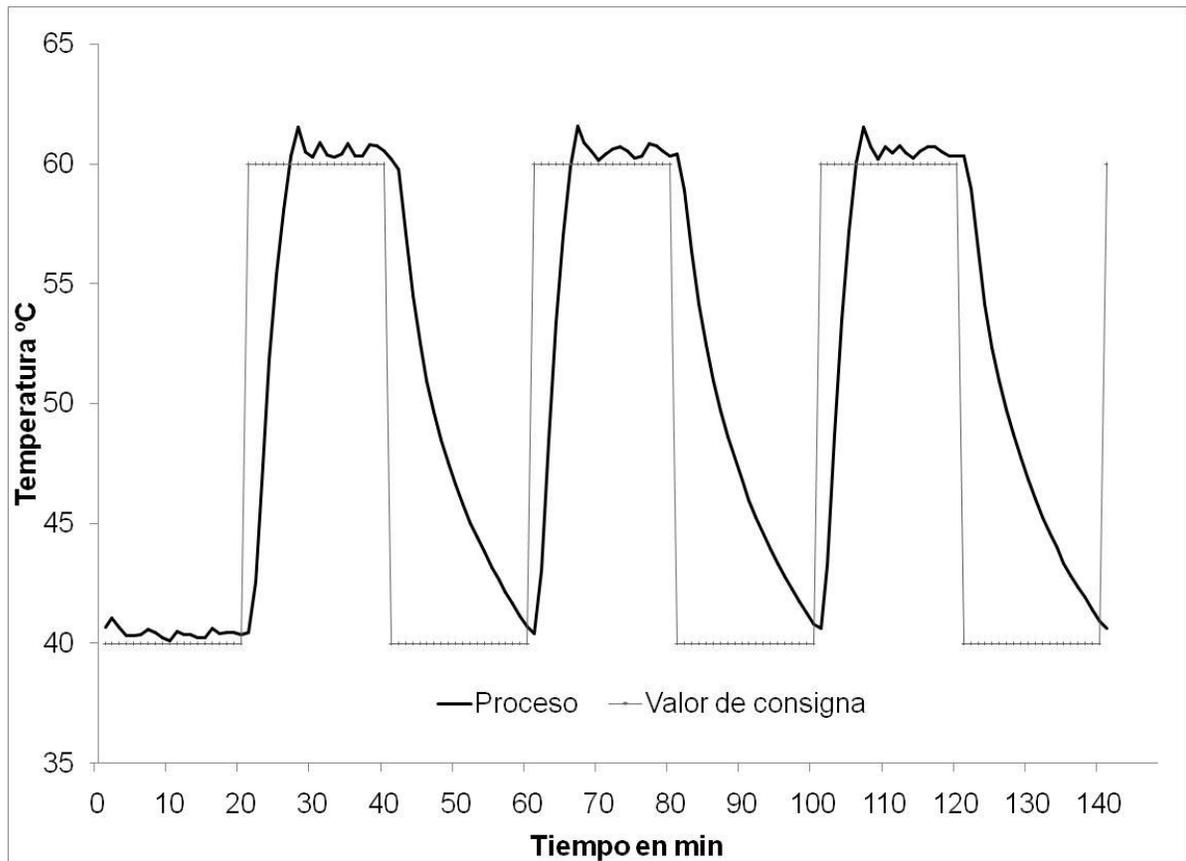


Figura 56. Ciclo Cuadrado.



Algoritmo para el control de condiciones variables en un secador

En la Figura 56 se presenta la respuesta del proceso a cambios en el valor de consigna (*set-point*) en forma cuadrada, en ella se pudo observar que la respuesta del proceso a un calentamiento brusco fue rápida con oscilaciones en los puntos donde se alcanzaron los 60°C, esto se debió a la reacción del proceso, haciendo que el control actuara e hiciera que el proceso se ajuste al punto del valor de consigna (*set-point*).

La primera parte del enfriamiento fue rápida (de 60 a 50°C), después la velocidad de enfriamiento disminuyó conforme baja la temperatura, esto se debió a la acción del controlador.

En la respuesta al calentamiento, presentó un tiempo muerto (tiempo de reacción del proceso) de un minuto, después el proceso reaccionó de manera rápida hasta llegar al valor de consigna (*set-point*) de 60°C en cinco minutos.

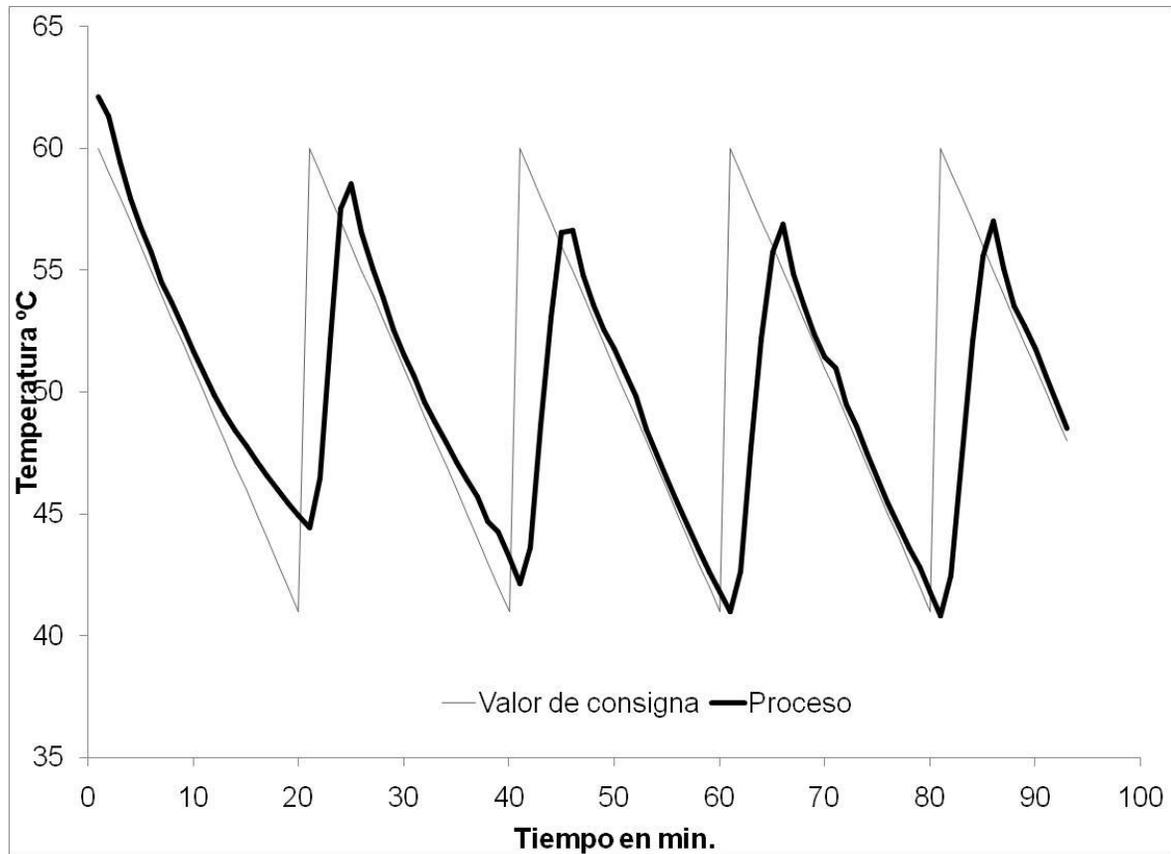


Figura 57. Ciclo Diente de sierra inverso.



El sistema respondió rápido al calentamiento y lento al enfriamiento. Es de esperarse que un ciclo diente de sierra inverso de cómo resultado una mejor respuesta del proceso. En la Figura 57 se muestra que el proceso no pudo alcanzar al valor de consigna (*set-point*) en el punto más alto, realizando un buen seguimiento del enfriamiento, lo que quizo decir que el proceso respondió muy bien a enfriamientos lentos con mayor eficacia que a enfriamientos muy rápidos.

Conforme pasó el tiempo se presentó estabilización en el enfriamiento, reduciendo el error y ajustándose al valor de consigna (*set-point*). Mostrando que en el calentamiento se presentó un desfase y el proceso no alcanzó al valor de consigna (*set-point*) de 60°C.

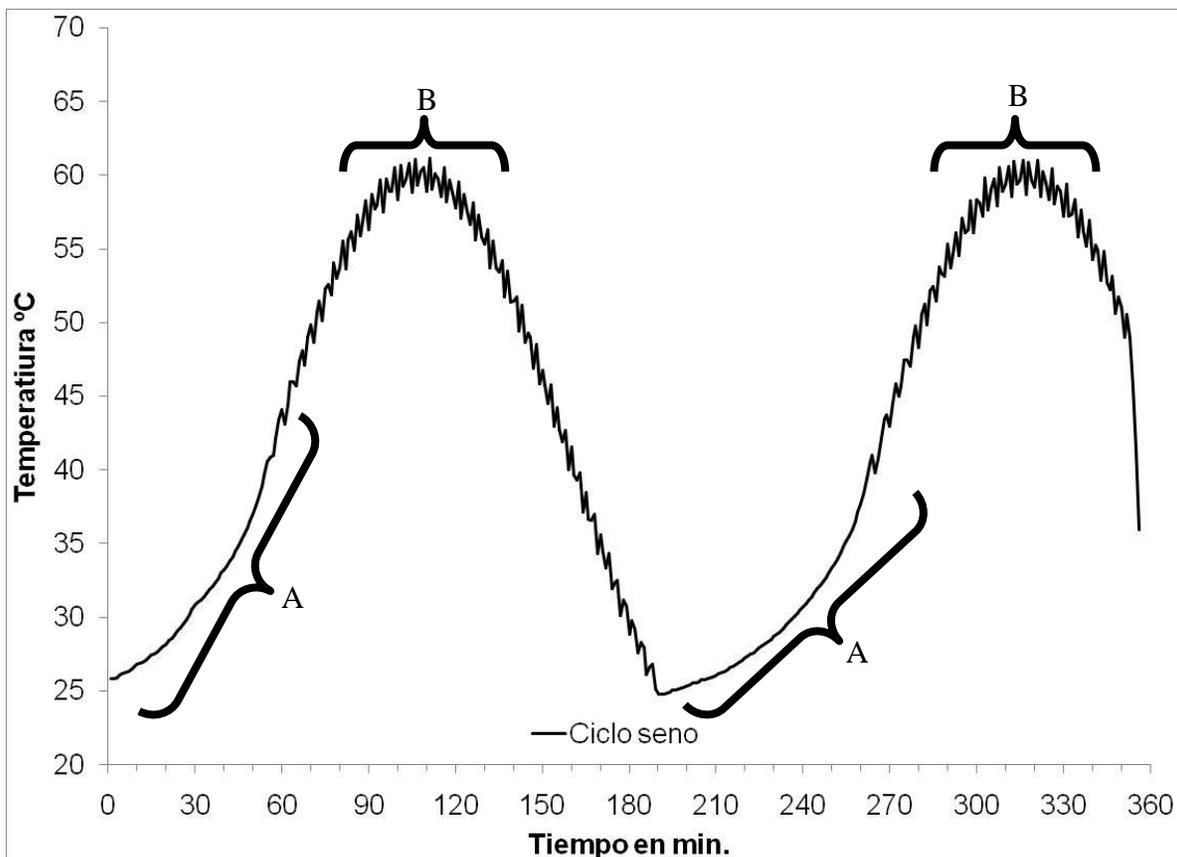


Figura 58. Respuesta del proceso la variación en el patrón de tipo sinusoidal.



Ciclos simétricos de calentamiento y enfriamiento con cambios suaves en el valor de consigna, se esperaría poca desviación entre el valor de consigna (*set-point*) y la respuesta del proceso.

La respuesta del proceso a un patrón de tipo sinusoidal (Figura 58) al inicio del calentamiento (de 20 a 40°C) se presentó variaciones en el proceso (A), en las variaciones en la cresta (B) y el enfriamiento se amplificó; mostrando mejor controlabilidad en el seguimiento del valor de consigna (*set-point*).

4.2.8 Análisis del error para cada prueba de control.

Se define como error para este estudio a la diferencia que existe entre el valor de consigna (*set-point*) y la respuesta del proceso.

El análisis de error de las pruebas de control se realizó por los métodos de mínimos cuadrados (MSE) y el de coeficiente de correlación con la finalidad de tener parámetros de controlabilidad y variabilidad en cada una de ellas. El coeficiente de correlación se analizó en un rango de 0 a 1 teniendo en cuenta que el valor cero significa que no tiene correlación con la función, 0.5 una media correlación y 1 una muy buena correlación. Un valor un valor cercano a cero en el método de mínimos cuadrados, indica que no hay error entre la respuesta del proceso y el valor de consigna (*set-point*).

En las pruebas de temperaturas constantes solo se realizó el método de mínimos cuadrados (MSE) ya que el método de correlación al ser una línea recta no proporciona gran detalle.



Para las tres pruebas realizadas de 40°C constantes los datos fueron los siguientes:

Tabla 6. Resultado del análisis de mínimos cuadrados para las pruebas de 40°C, 50°C y 60°C constantes.

PID (Kc, Ti y Td)	Temperatura.	Mínimos cuadrados (MSE)
99.00, 0.081, 0.800	40°C	0.58789422
99.00, 0.081, 0.800	50°C	0.11577367
99.00, 0.081, 0.800	60°C	0.14184726
60.00, 0.440, 0.011	40°C	0.479060311
60.00, 0.440, 0.110	50°C	0.09710377
60.00, 0.440, 0.110	60°C	0.09372761
50.00, 0.800, 0.080	40°C	1.3561766
50.00, 0.800, 0.080	50°C	0.23377859
50.00, 0.800, 0.080	60°C	0.29618478

Analizando los tres niveles de temperatura constantes a las cuales se realizaron las pruebas de control; a la menor temperatura de trabajo el control fue más inestable. Se encontró que a mayor nivel de temperatura el control fue más estable disminuyendo considerablemente el error, como se puede apreciar en las pruebas de 50 y 60°C con valores de Kc de 60.00, Ti de 0.440 y una Td de 0.110; esto se debe a que la reacción del proceso a mayor temperatura es más lenta que a menos temperatura; por lo tanto se debe de considerar para futuros análisis que la sintonización de los parámetros de control para cada nivel de temperatura deben de ser diferentes.

Para las pruebas de control PI con ciclos de variación de temperatura se realizaron dos análisis del error; el método de mínimos cuadrados para saber la variabilidad de cada una de ellas y el método de coeficiente de correlación para saber la controlabilidad y seguimiento de cada función dada; obteniendo los siguientes resultados:



Tabla 7. Resultado del análisis estadístico de los tres métodos comparados para una sintonización de las ganancias del controlador PI para ciclos en forma pseudocuadrada.

Método	PI (Kc y Ti)	Mínimos cuadrados (MSE)	Coefficiente de correlación
Poulin y Pomerleau (1996).	23.00, 0.03952	2.02937019	0.99096507
Ziegler y Nichols (1942).	31.50, 0.03162	1.57495482	0.99038723
Método modificado de Pulin y Pomerleau (1999).	0.800, 0.03952	5.67362779	0.96886385

Como se puede observar en los resultados obtenidos en el análisis estadístico de cada método propuesto para la sintonización de las ganancias del controlador PI, el método que menor variabilidad tiene es el método propuesto por Ziegler y Nichols (1942); en los resultados de los coeficientes de correlación se puede observar que los tres métodos presentan una buena controlabilidad, lo que quiere decir que el control si sigue a los valores de consigna (*set-point*) que se le asignen.

Para la sintonización de las ganancias PID para los ciclos en forma pseudocuadrada, se obtuvieron los siguientes resultados para cada una de las pruebas.

Tabla 8. Mínimos cuadrados y coeficientes de correlación del análisis de error para cada una de las sintonizaciones de las ganancias de un controlador PID para ciclos en forma pseudocuadrada.

Controlador	Kc	Ti	Td	Mínimos cuadrados (MSE).	Coefficiente de correlación.
PID ₁	99.00	0.081	0.800	12.3630493	0.920695
PID ₂	12.00	4.00	0.089	13.1799373	0.933734
PID ₃	10.00	0.010	0.080	4.14428903	0.97545795
PID ₄	99.00	0.814	0.089	2.33361112	0.99093611
PID ₅	99.00	1.814	0.089	2.030140525	0.993687068
PID ₆	36.745	0.855	0.2137	1.43727366	0.9903976
PID una resistencia	36.745	0.855	0.2137	22.8608625	0.95046699



Se puede observar en la Tabla 8 que los resultados de las sintonizaciones de cada uno de los parámetros de control se mejoró cuando los parámetros fueron calculados por el método de Ziegler y Nichols (1942), este corresponde a el PID₆; teniendo una menor variabilidad y mejor controlabilidad en comparación de los resultados obtenidos por el método de prueba y error con el que se realizaba. La respuesta que se obtuvo con una sola resistencia se muestra en el último apartado de la Tabla 8 en donde se ve que el error es mayor a comparación de los demás ajustes de PID.

Para la comparación de control PI vs PID para pruebas de control con una programación en el valor de consigna (*set-point*) en forma de pseudocuadrada; los resultados de error fueron los siguientes:

Tabla 9. Mínimos cuadrados y coeficientes de correlación de las pruebas de error en la comparación de los dos controladores (PI vs PID).

Controlador	Ganancias (Kc, Ti y Td)	Mínimos cuadrados (MSE).	Coefficiente de correlación.
PI	31.50, 0.03162	1.57495482	0.99038723
PID	36.745, 0.855, 0.214	0.28754486	0.99858564

Lo que se demuestra en la Tabla 9, es que un control PID tiene una mejor controlabilidad y menor variabilidad. Esto significa que el error con un control PID lo regula y lo predice para que este no vuelva a suceder. El coeficiente de correlación indica que las respuesta del sistema de control son semejantes a las función pseudocuadrada que se le programó en el valor de consigna (*set-point*).



Para las siete pruebas de control que se realizaron de ciclos pseudocuadrados en los cuales se varió el periodo del ciclo con una amplitud de 20 minutos y se emplearon los mismos parámetros PID (K_c de 36.745, una T_d de 0.855 y una T_i de 0.213), los resultados del análisis de error fueron los siguientes.

Tabla 10. Mínimos cuadrados y coeficientes de correlación para siete pruebas de control en forma de ciclos pseudocuadrados a diferentes tiempos constantes.

Prueba	Mínimos cuadrados (MSE).	Coefficiente de correlación.
ciclo 60-40 (20-10)	1.09695226	0.99137764
ciclo 60-40 (20-10)	0.38035276	0.99817796
ciclo 60-40 (20-20)	0.31044834	0.99930646
ciclo 60-40 (20-40)	0.72599214	0.99667534
ciclo 60-40 (20-60)	0.54532373	0.9986949
ciclo 40-60 (20-20)	0.32022587	0.99871687
ciclo 40-60 (20-40)	0.69431917	0.9971113

Los datos obtenidos en la Tabla 10 se observa que a mayores tiempos en la estabilización del proceso (mesetas y valles), éste se torna más estable reduciendo la variabilidad; también, se puede observar que si los calentamientos y enfriamiento coinciden con los tiempos del valle y la meseta (ciclo 40-60 y 60-40 (20-20)), los errores se reducen teniendo una mejor controlabilidad y una menor variabilidad la respuesta del proceso.

Los resultados del análisis del error para las formas periódicas con diferentes patrones cíclicos de programación se muestran a continuación:

Las pruebas se realizaron con una K_c de 36.745, una T_i de 0.855 y una T_d de 0.2137.

Tabla 11 . Mínimos cuadrados y coeficientes de correlación de los diferentes patrones cíclicos programados.

Prueba	Mínimos cuadrados (MSE)	Coefficiente de correlación.
Diente de sierra.	42.8345437	0.37188172
Triangular.	1.08605269	0.98905933
Cuadrada.	61.2962139	0.66439655
Diente de sierra inverso	28.6732315	0.50641717
Sinusoidal.	16.6112471	0.98719706



El ciclo diente de sierra, presentó un error alto y una mínima aproximación al valor de consigna, esto era de esperarse ya que los cambios en el enfriamiento fueron abruptos haciendo que el proceso respondiera de una manera lenta formando nuevamente que el valor de consigna alcanzara al proceso antes de que este se hubiera enfriado al punto establecido.

El ciclo triangular presentó una menor variabilidad y un buen seguimiento del proceso, esto fue debido a que los cambios que se producen en el valor de consigna (*set-point*) fueron constantes y graduales con forme pasa el tiempo; el error más grande se produjo en la intersección de la parte superior, donde se produjo un cambio brusco de temperatura.

El ciclo cuadrado presentó el error más grande con un bajo seguimiento de la función, esto fue debido a los cambios bruscos en el calentamiento y enfriamiento del valor de consigna (*set-point*); por lo tanto; produjeron un desplazamiento mayor en el enfriamiento que en el calentamiento donde la reacción del proceso es mayor.

El ciclo diente de sierra inverso presentó un alto error con un bajo seguimiento del valor de consigna (*set-point*), esto fue debido a los cambios bruscos que se presentaron en el valor de consigna (*set-point*), mostrando un ligero desfase en el periodo de calentamiento; por lo tanto, no alcanza al punto máximo del valor de consigna (*set-point*) donde se genera el mayor error. La respuesta del proceso de ajustaron mejor en el enfriamiento debido a que los cambios en el valor de consigna son graduales.

El ciclo sinusoidal presentó un error considerable como se observa en la Tabla 11, pero con un buen seguimiento del valor de consigna (*set-point*); esto fue debido a que la amplitud en el ciclo sinusoidal fue muy amplia haciendo que el proceso a temperaturas bajas no alcance el valor de consigna.

Después de analizar los datos obtenidos se llegaron a las siguientes conclusiones.



Capítulo Cinco. Conclusiones y Recomendaciones.



5.1 Conclusiones.

Con LabVIEW® fue posible programar la variación del valor de consigna durante pruebas de secado. Se incorporaron variaciones cíclicas; sinusoidales, dientes de sierra, triangulares, pseudocuadradas y cuadradas. Sin embargo, para cada diferente nivel de temperatura con el valor de consigna (*set-point*) constante, se requiere de parámetros diferentes de control.

Las sintonizaciones de las ganancias de PID y PI por el método que propone Ziegler y Nichols (1942) da mejores resultados que el de Poulin y Pomerleau (1999) a condiciones variantes del proceso. Mostrando mejor estabilización y controlabilidad un controlador PID con las mismas sintonizaciones de ganancias en comparación que un controlador PI

El control de las modificaciones del valor de consigna durante el proceso de secado es más adecuado cuando se tienen patrones suavizados, escalonados, sinusoidales, pseudocuadrados y triangulares que en aquellas donde hay modificaciones bruscas en los valores de consigna (*set-point*); cuadradas y dientes de sierra. Observándose claramente en la tendencia del error que este llega a ser del 6192.31094 % mayor que cuando los cambios en el valor de consigna son graduales.

5.2 Recomendaciones.

Incorporar el análisis del autotuning para procesos variables para que estos permitan los ajustes de control PID de manera automática.

Considerar valores PI y PID a diferentes niveles de ganancia para diferentes estados del sistema “calentamiento enfriamiento y estabilización”.

Cada patrón de variación requiere la determinación de los parámetros de control que reduzcan la variabilidad y mejore la controlabilidad del proceso.



La respuesta variable del calentamiento y enfriamiento del sistema hace necesario el tener parámetros que tomen en consideración los niveles de temperatura empleados durante el secado.

Referencias bibliográficas.



- Agamennoni O.E., Desages A.C. and Romagnoli J.A., (1988). Robust controller design methodology for multivariable chemical processes. *Chemical Engineering Science*, vol. 43, No. 11, pp. 2937-2950.
- Amer B. A. A. and Gottschalk K., (2005). Drying rates of banana slice in thin-layer under varying controlled drying air conditions. *IADC*, paper I-5.
- Åstöm K. J. y Hägglund T., (2004). Revisiting the Ziegler-Nichols step response method for PID control. *Journal of Process Control*, 14, pp. 635-650.
- Axtell B. y Bush A. (1991). Interrelate Technology. Try drying, case studies dissemination of technology. Publications 1991.
- Basilio J.C. y Matos S. R., (2002). Design of PI and PID controllers with transient performance specification. *IEEE Transactions on education*, Vol 45 no. 4, pp. 364-370.
- Boateng, P.O., y Axtell, B. (1998). *Técnicas de secado*. Intermediate Technology Development Group; United Nations Development Fund for Women. (2da. Ed.) ITDG. 10-14.
- Boizán J. M. A., Zhidko V. I., (1986) Secado fluidizado de productos alimenticios (Fundamentos teóricos y aplicación del régimen oscilatorio). Editorial Oriente Santiago de Cuba, pp. 100-102.
- Carlos A. S. y Armando B. C., (2001). *Control automático de procesos teoría y práctica*, 8ª reimpresión. En español. México. Limusa Noriega Editores, pp. 119-219, 419-515.
- Chou S. K. and Chua K. J., (2001). New hybrid heat pump drying technologies – status and potential for drying food and heat sensitive materials. *IADC*, pp. 69-90.
- Curt C., Hossenlopp J., Triystram G. (2007). Control of food batch processes based on human knowledge. *Journal of food engineering*. vol. 79, pp 1221-1232.
- Curtis Elia, (1999). Achieving Effective Multizone Temperature Control. *IDS*. n. d.
- Darren A. T., (2005). Let's Talk Control. *IDS*. n. d.
- Davidson J.V., LI X., Brown B. B., (2004). Forced air drying of ginseng root: 2. Control strategy for three-stage drying process. *Journal of Food Engineering*, 63, pp. 369-373.
- Felder R.M., Rousseau R.W. (2004) Principios elementales de los procesos químicos, 3ª Edición. Editorial Limusa Wiley, pp 43-80.
- Flordal H., Fabian M., Åkesson K., Spensieri D., (2007). Automatic model generation and PLC-code implementation interlocking policies in industrial robots cells. *Control Engineering Practice*, vol. 15, pp. 1416-14226.



- Ho J.C., Chou S.K., Chua K.J., Mujumdar A.S. and Hawlader M.N.A., (2002). Analytical study of cyclic temperature drying: effect on drying kinetics and product quality. *Journal of Food Engineering*, Vol 51, pp. 65-75.
- Huseyin A. V. y Zafer B., (2004). A new PID tuning technique using Ant algorithm. *Proceeding of the 2004 American Control Conference*. ThA06.5, pp. 2154-2159.
- Mazzone V., (2002). Controladores PID. Control automático 1, *Automatización y Control Industrial*, Universidad Nacional de Quilmes, pp. 1-11.
- McCabe W. L., Smith J. C. y Harriott P., (2002). Operaciones unitarias en ingeniería química, 6ª. ed. En español. México. McGraw-Hill, pp. 835-872.
- Morrisette R. y Sproule P., (2005). Simulation of high density hay drying using labVIEW® software-a multiple thin-layer approach. *IADC*, paper X-3.
- O'Mahony T., (2006). PID Tuning software: A practical review. *ISSC Dublin institute of technology*, pp. 409-414.
- Oubrahim R. y Leonard F., (1998). PID Auto-tuning by composed structure. *Proceeding of 1998 IEEE International Conference on Control Applications*. WA05, pp. 144-147.
- Plaza I. y Medrano C., (2007). Exception in a Programmable Logic Controller implementation based on ADA. *Computers in Industry*, vol. 58, pp. 347-354.
- Poulin É. y Pomerleau A., (1996). PID tuning for integrating and unstable processes. *Proc. Inst. Elect. Eng.*, Vol 143, pp, 429-435.
- Poulin É. y Pomerleau A., (1999). PI settings for integrating processes based on ultimate cycle information. *IEEE Transaction on control systems technology*. Vol 7, No. 4, pp 509-511.
- Robert K. H., (2000). Foundations of the strategies of the process control. *IDC*. n. d.
- Robert K. H., (2005). The foundations of the process control. *IDS*. n. d.
- Shaikh N. I. y Prabhu V., (2007). Model predictive controller for cryogenic tunnel freezers. *Journal of Food Engineering*, vol. 80, pp. 711-718.
- Sousa L.H.C.D., Motta Lima O.C., Perri V.R., Monteiro A.S. and Pereira N.C. (2005). Heat transfer análisis in the conductive/convective drying of textile fabric, *IADC*. Paper B - 9
- Sproule P., (2003). Control of a process that cools off. *Spaltech International*.
- Terry A. P. and Himmelblau M. D.,(1993). Data rectification and gross error detection steady-state process via artificial neural networks. *Ind. Eng. Chem. Res.* Vol 32, pp 3020-3028.



Wang Q.G., Lee T.H., Fung H.W, Bi Q. y Zhang Y., (1999). PID tuning for improved performance. *IEEE Transaction on Control systems Technology*, vol. 7, no. 4, pp. 457-465.

Xiong Q. y Cai W.J. (2006). Effective transfer function method for decentralized control system design of multi-input multi-output processes. *Journal of process control*. Vol 16, pp 773-784.

Xu J. y Shao H., (2003). A novel method of PID tuning for integrating processes. *Proceeding of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control*. TuA04-6, pp. 139-142.

Ziegler J.G. y Nichols N. B., (1942). Optimum setting for automatic controllers. *Trans, ASME*, Vol 64, pp. 759-768.

Consultas a internet.

CtrlLAB,

<http://www.matworks.com/matlabcentral/fileexchange/loadFile.do?objectId=18&objectType=file>, consultado en agosto del 2007 n.d.

ET PID, <http://www.acg.cit.ie/software>, consultado en agosto del 2007.

EZYTUNE, Matrikon INC., <http://matri-kon.com>, consultado en agosto del 2007.

<http://es.wikipedia.org/wiki/Algoritmo> consultado en septiembre 2007 n.d.

http://ponce.inter.edu/cai/reserva/lvera/DEFINICIONES_VARIABLES.pdf consultado 07/09/2007 a las 3:30 p.m.

IMCTUNE,

<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/loadFile.do?objectId=3369&objectType=file>, consultado en agosto del 2007 n.d.

RaPID, IPCOS, <http://www.ipcos.be/products/generic/rapid.html>, consultado en agosto del 2007 n.d.

TOPÂS, ACT GmbH, <http://www.act-control.com>, consultado en agosto del 2007 n.d.

U-Tune, Contek System, <http://contek-systems.co.uk>, consultado en agosto del 2007 n.d.

