

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA INDUSTRIAL Y DE SISTEMAS**  
**SECCION DE POST GRADO**



**“ OPTIMIZACION DEL PROCESO DE DESHIDRATADO DE  
PRODUCTOS MEDIANTE LA AUTOMATIZACION BASADO EN LA  
CIBERNETICA Y LA ROBOTICA”**

**TESIS**  
**PARA OPTAR EL GRADO ACADEMICO DE MAESTRO EN CIENCIAS**  
**CON MENCION EN: INGENIERIA DE SISTEMAS**

**ING. JUAN MEZA ARRIETA**

**LIMA - PERU**  
**2011**

**Digitalizado por:**

**Consortio Digital del  
Conocimiento MebLatam,  
Hemisferio y Dalse**

A Dios por todo lo que me ha dado.

A mis queridos padres Aquilio y María quienes en vida me dieron su amor y apoyo.

A mis hermanos por la ayuda y comprensión de siempre.

## **AGRADECIMIENTOS**

Mi reconocimiento y gratitud a la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de San Martín de Porres FIA. Por facilitarme y darme el apoyo con el equipo deshidratador y herramientas del Taller de Ingeniería Industrial. De manera especial mi reconocimiento y agradecimiento a los profesores de la sección de Post grado por las orientaciones y sugerencias sobre la tesis.

## INDICE

	Pagina
Resumen	
Introducción	1
<b>Capitulo I. Marco Teórico</b>	<b>2</b>
1.1 Deshidratación	2
1.2 Equipos Deshidratadores	4
1.3 Parámetros a controlar en equipos deshidratadores	6
1.4 La Cibernética	7
1.5 La Robótica	8
1.5.1 Definición de Robot	10
1.5.2. Clasificación	12
1.5.3. Aplicaciones	14
1.6. Automatización	14
1.6.1. Conceptos	14
1.6.2. Clases de automatización	15
1.7. Micro controlador	16
1.8. Control avanzado	18
1.8.1. Conceptos	18
1.8.2. Sistemas de control digital	18
1.9. Redes de PETRI	21
1.9.1. Principales propiedades dinámicas	24
1.9.2. Métodos de análisis de propiedades dinámicas	25
1.9.3. Ventajas	26
1.9.4. Desventajas	26
1.9.5. Aplicaciones	27

<b>Capítulo II. Aspectos metodológicos</b>	28
2.0 Problema de investigación	28
2.1. Diagnostico y enunciado del problema	28
2.2. Definición del problema	29
2.2.1. Definición nominal	31
2.2.2. Definición operacional	31
2.2.3. Sub problemas	31
2.3. Objetivos de la investigación	32
2.3.1. Objetivo general	32
2.3.2. Objetivos específicos	32
2.4. Justificación y delimitación de la investigación	32
2.5. Marco de referencia de la investigación	33
2.6. Hipótesis de la investigación	33
2.6.1. Definición de las hipótesis	34
2.6.1.1. Hipótesis General	34
2.6.1.2. Sub hipótesis	34
2.6.2. Definición conceptual de las variables	34
2.6.3. Definición operacional de las variables	36
2.7. Metodología de la investigación	38
2.7.1. Tipo de investigación	38
2.7.2. Población y muestra	38
2.7.3. Técnicas e instrumentos	38
2.7.4. Análisis y tratamiento de los datos	39
<b>Capítulo III. Enfoque Sistémico del proceso de deshidratado de frutas</b>	40
3.0 Proceso de deshidratado de frutas	40
3.1 Sistema de deshidratado de frutas	41
3.2 Subsistemas del Sistema de deshidratado de frutas	43
3.3 Subsistemas del equipo deshidratador	45
3.4 Componentes del subsistema de control	47
3.5 Modelo del proceso de deshidratado mediante redes de Petri	49

<b>Capítulo IV. Antecedentes del Proyecto</b>	<b>55</b>
4.0. Antecedentes	55
4.1. Automatización del control de parámetros del proceso de deshidratación	56
4.2. Funcionamiento del deshidratador automatizado	59
4.2.1 Manejo del panel de Control	61
<b>Capítulo V. Diseño e implementación del proyecto para la Optimización del proceso de deshidratado</b>	<b>63</b>
5.0. Razones para el desarrollo del proyecto de automatización Basado en la cibernética y la robótica	63
5.1. Características y especificaciones técnicas	64
5.2. Diagrama de bloques del deshidratador mejorado	64
5.3. Diseño del hardware	68
5.3.1. Diseño del sub sistema de control	68
5.3.2. Diseño del sub sistema de control de temperatura	69
5.3.2.1. Cruce por cero para el control por fase o PWM	72
5.3.3. Diseño del sub sistema de control de humedad Relativa	76
5.3.4. Módulo de control de peso	78
5.3.5. Mejora en el funcionamiento del deshidratador	80
5.4. Diseño del software	84
5.4.1. Especificaciones del software de control del Deshidratador.	84
5.4.2. Rutinas del software de control	84
5.4.3. Capacidad de memoria para el programa de Control	85
5.4.4. Procedimiento para el uso del software de control	86
5.4.5. Diagramas de flujo	86
5.4.5.1. Descripción de funcionamiento de la fase 1	93
5.5. Robótica aplicada al proceso de deshidratación de frutas	93

<b>Capítulo VI. Análisis de resultados</b>	<b>100</b>
6.1. Nivel tecnológico del control de parámetros de los deshidratadores en las PYMES agroindustriales	100
6.2. Aplicación de métodos de control avanzado en el diseño del deshidratador	102
6.2.1. Modelo matemático	102
6.2.2. Programación y simulación de los métodos	104
6.2.2.1. Método de control óptimo	104
6.2.2.2 Método de control adaptivo autosintonizado	108
6.2.2.3 Método de control predictivo basado en modelos	113
6.2.2.4 Análisis de la programación y simulación del proceso	116
6.3. Mejora del proceso de deshidratado de frutas	117
6.3.1. Materiales y método	117
6.3.1.1. Materias primas e insumos	117
6.3.2. Métodos de análisis	117
6.3.2.1. Análisis microbiológico	117
6.3.2.2. Análisis de caracterización: proximal	117
6.3.2.3. Análisis organoléptico	117
6.4. Análisis de caracterización de las frutas deshidratadas	120
6.4.1. Desde el punto de vista microbiológico	120
6.4.2. Análisis proximal de las frutas deshidratadas	122
6.4.3. De la evaluación sensorial	122
6.4.3.1. Comparación de las frutas deshidratadas en la línea de Producción haciendo uso de deshidratador sin automatización Y automatizado	123
6.5. Mejor respuesta en el proceso de deshidratación	130
6.5.1. Costos de producción	130
6.6. Costo del módulo de automatización	138
Conclusiones y recomendaciones	139
Glosario de términos	141
Referencias bibliográficas	144
Anexos	146

## INDICE DE ANEXOS

N°	Titulo	Página
1	Programación y simulación de los modelos de control avanzado realizado en MATLAB	146

## INDICE DE TABLAS, CUADROS Y GRÁFICOS

<b>TABLAS</b>	Página
2.1 Empresas Deshidratadoras Visitadas	29
6.1 Algunas Deshidratadoras para Pequeñas y Medianas Escalas Utilizadas en el Perú	101
6.2 Comportamiento de los métodos de control avanzado	116
6.3 Costo del módulo de automatización	138
<b>CUADROS</b>	
2.1 Importaciones de frutas deshidratadas	30
6.1 Formato de la prueba de la escala hedónica	118
6.2 Descripción de las Muestras	119
6.3 Análisis microbiológico	121
6.4 Resultados del Análisis Proximal de la Frutas Deshidratadas	122
6.5 Frecuencias de los calificativos de las hojuelas de manzana Deshidratada	124
6.6 Frecuencia de calificativos de durazno deshidratado	126
6.7 Frecuencia de calificativos de piña deshidratado	128
6.8 Costo de Producción de Durazno	132
6.9 Costo de Producción de Piña	133
6.10 Costo de Producción de Manzana	134
<b>GRAFICOS</b>	
3.1 Red de Petri del sistema de deshidratado de frutas	50-51
6.1 Sistema de control con auto sintonización	109

## INDICE DE FIGURAS

N°	Titulo	Página
1.1	Deshidratadores Indirectos	5
1.2	Deshidratadores Directos	6
1.3	Esquema básico de un control digital	19
1.4	Diagrama de bloques de un sistema de adquisición de datos	20
1.5	Diagrama de bloques de un sistema de reconstrucción de la señal analógica.	20
3.1	Diagrama de contexto de un sistema de deshidratado de frutas	41
3.2	Sistema de deshidratado de frutas	43
3.3	Subsistemas del sistema de deshidratado de frutas	44
3.4	Subsistemas del equipo deshidratador	46
3.5	Componentes del subsistema de control	48
4.1	Deshidratador de cabina	56
4.2	Diagrama de Bloques del deshidratador Automatizado	57
4.3	Circuito de Control con el PIC16F877	58
4.4	Descripción de los Indicadores Electrónicos y Dispositivos de la Cabina Deshidratadora	60
4.5	Panel de control y visualización	61
5.1	Diagrama de bloques del control de proceso de deshidratado Mejorado	65
5.2	Circuito de control del deshidratador mejorado	69
5.3	Subsistema de control de temperatura	70
5.4	Circuito de cruce por cero	72

5.5 Formas de onda en la base del transistor	73
5.6 circuito de potencia	74
5.7 Formas de onda de pulso de disparo, ángulo de disparo, y ángulo de conducción para los Triacs.	75
5.8 Ubicación de la Resistencias	76
5.9 Subsistema de control de humedad relativa	77
5.10 Ubicación del sensor de humedad relativa.	78
5.11 Vista frontal del deshidratador mostrando las bandejas	80
5.12 Vista lateral del deshidratador	81
5.13 Ubicación de los sensores de Temperatura	82
5.14 Mecanismo de intercambio de aire	82
5.15 Panel frontal mejorado	83
5.16 Producto final del proceso de deshidratado	83
5.17 Diagramas de flujo	87
5.18 Robot Scara de cuatro grados de libertad	94
6.1 Aceptabilidad de las hojuelas de Manzana en Porcentaje	125
6.2 Aceptabilidad del Durazno Deshidratado en Porcentaje	127
6.3 Aceptabilidad de la Piña Deshidratada en Porcentaje	129
6.4 Costes Comparativos de Producción de Durazno	135
6.5 Costes Comparativos de Producción de Piña	136
6.6 Costes Comparativos de Producción de Manzana	137

## DESCRIPTORES TEMATICOS

- Proceso de deshidratación
- Equipo deshidratador
- Cibernética
- Robótica
- Automatización
- PYMES Agroindustriales
- Humedad relativa
- Micro controladores
- Control optimo
- Control Adaptivo
- Control Predictivo
- Redes de Petri

## RESUMEN

El desarrollo del presente estudio se enmarca en la optimización de un proceso industrial que opera dentro del sector agroindustrial, habiéndose identificado en dicho sector la línea de deshidratados de productos hortofrutícolas que tiene un gran potencial, pero que presenta aun un desarrollo incipiente siendo uno de los factores para esta situación el poco desarrollo tecnológico referido a la construcción de deshidratadores.

Se visitó PYMES deshidratadoras de productos hortofrutícolas representativas, evaluándose los equipos y la tecnología de sus líneas de producción, constatándose la alta incidencia del uso de mano de obra en las operaciones de selección y acondicionamiento, determinándose asimismo, que el equipo de mayor uso y relevancia en esta línea de producción es el deshidratador tipo cabina; el mismo que por sus características tecnológicas presenta deficiencias en su funcionamiento, afectando la calidad de sus productos.

Teniendo en cuenta que la Automatización permite la estandarización de los resultados y mejora de la calidad y competitividad nace como respuesta a las nuevas exigencias del mercado. El presente proyecto es una mejora a un trabajo inicial realizado en el taller de la escuela de Ingeniería Industrial de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la USMP, donde se tiene un prototipo de deshidratador de cabina, similar al usado por las PYMES, pero al cual se le incorporó un sistema de automatización digital que permitió optimizar el proceso de deshidratado usando para el control de los parámetros conceptos de robótica y Cibernética.

Con la finalidad de evaluar el efecto de la incorporación de un equipo automatizado en la línea de deshidratado de frutas para mejorar su productividad, se contacto con la empresa “Representaciones Agro Industriales SRL” para llevar a cabo la deshidratación de frutas: durazno, manzana y piña en su línea tradicional; haciendo uso de ambos deshidratadores, de cabina sin automatizar y automatizado, aplicando los mismos parámetros de deshidratación, reportados en este trabajo de investigación para las frutas consideradas.

Las frutas deshidratadas, manzana, durazno y piña, en las líneas con deshidratador tradicional y con deshidratador automatizado fueron caracterizados con análisis proximal, obteniéndose como resultado que los productos elaborados con la incorporación del equipo automatizado con proceso optimizado tuvieron mayor aceptabilidad.

En cuanto a los costos de producción de las frutas deshidratadas con equipo automatizado con relación al deshidratador tradicional, se determino una reducción de costo del 14% para el caso del durazno deshidratado, de 30% para el caso de la manzana y del 17% para el caso de la piña deshidratada. Resultados que servirán a la mencionada empresa para potenciar su línea de proceso en el corto plazo.

## **INTRODUCCION**

Una de las alternativas para mejorar la rentabilidad de los agentes en la actividad agroindustrial es mejorar su competitividad, como en el caso de frutas deshidratadas para el mercado nacional que son abastecidas casi en su totalidad por Chile y Argentina, esta actividad de deshidratación de frutas en el país se viene efectuando en el ámbito de las PYMES aún en forma incipiente.

Muchas PYMES por su estructura actual de funcionamiento no pueden desarrollar el proceso de deshidratado en forma rentable y sostenible.

Ante la problemática expuesta es conveniente desarrollar un sistema de control automático que optimice el proceso de deshidratado. Para el desarrollo del estudio se han considerado seis capítulos:

En el capítulo I, se realiza una descripción de los conceptos básicos sobre: deshidratación, automatización, cibernética, robótica y métodos de control avanzado.

En el capítulo II, se plantea los aspectos metodológicos aplicando al proceso de deshidratación materia de esta tesis.

En el capítulo III, trata de un enfoque sistémico del proceso de deshidratado de frutas.

En el capítulo IV, se ve los antecedentes del proyecto

En el capítulo V, se describe detalladamente el diseño del hardware y software necesarios para el proyecto.

En el capítulo VI, se presenta los resultados de la optimización del proceso y discusión de las pruebas experimentales llevadas a cabo como una verificación a las sub hipótesis planteadas.

Por todo lo mencionado anteriormente espero que esta tesis sirva de base para futuras investigaciones.

# **CAPITULO I**

## **MARCO TEORICO**

### **1.1. DESHIDRATACION**

Teniendo en cuenta que la actividad productiva priorizada en el presente estudio es la deshidratación de frutas y hortalizas se presenta algunas definiciones y consideraciones técnicas sobre el proceso de deshidratación.

Campos (1988) y Sánchez (1988), coinciden en señalar que todo proceso de secado tiene el mismo principio: suministrar energía sea por conducción, radiación o convección, para evaporar el agua dentro del producto y luego extraer este vapor por circulación de aire.

El secado por aire es un fenómeno simultáneo de transmisión de calor del aire al producto y de transferencia de masa desde el producto al aire. Según este concepto, el proceso de secado aumenta la humedad del aire y para mantenerla en los niveles adecuados, es necesario removerla total o parcialmente. Conviene que el aire próximo al producto esté en permanente movimiento, para evitar que se formen alrededor de él, capas con alta humedad relativa que retrasarían el proceso de secado.

Sánchez también indica, que los elementos que determinan las condiciones de secado, son: las características del producto a secar, las condiciones del medio ambiente y la fuente de energía a utilizar.

Para los diferentes productos a deshidratar es posible elaborar curvas de secado, definiéndose así a la representación grafica de la variación del contenido de humedad con relación al tiempo.

Según Hall citado por Montes (1968), el proceso de secado se desarrolla en 3 etapas: Periodo de calentamiento, deshidratación a velocidad constante y la velocidad de secado decreciente. Al iniciar el proceso de secado, se tiene

el "periodo inicial de calentamiento del producto", que es muy corto durante el cual, la humedad decrece muy lentamente y puede ser o no un factor a ser tomado en cuenta.

En el periodo de deshidratación a velocidad constante la humedad interior del producto llega tan rápidamente a la superficie de evaporación que la película que en ella se encuentra se renueva casi instantáneamente; asimismo la velocidad de secado es función de la velocidad de transmisión de calor a la superficie de secado. En la etapa de secado decreciente se presentan mecanismos de difusión y capilaridad, así como fenómenos osmóticos.

Valera (1988), señala que los parámetros físicos que actúan en el proceso de secado son los siguientes:

- a).- La temperatura a la que se encuentra el producto
- b).- La humedad relativa del medio que rodea al producto
- c).- El flujo de aire que circunda el producto.

La combinación de estos tres parámetros define la velocidad de secado y la calidad del producto deshidratado.

El secado consiste básicamente en remover por evaporación el agua de la superficie del producto y trasladarlo al aire circundante, dependiendo la rapidez de este proceso de la velocidad con que circula el aire y su sequedad.

La cantidad de vapor de agua que el aire puede absorber depende, en gran medida de su temperatura, siendo posible calcular la cantidad adicional de vapor de agua que el aire puede absorber a una temperatura determinada. A medida que el aire se calienta, su humedad relativa decae y, por lo tanto, puede absorber mas humedad.

Una vez que la humedad de la superficie de un alimento se ha retirado por evaporación, el nivel de secado depende de la velocidad con que la humedad interna se dirige a la superficie, lo que varía de un producto a otro.

Para obtener un producto deshidratado de mejor calidad se debe de alcanzar el equilibrio entre un nivel máximo de secado que permita obtener

eficiencia económica y calidad microbiológica y un mínimo de pérdida de componentes esenciales del alimento.

Campos (1988) detalla la importancia de la calidad del producto desde el punto de vista microbiológico. Al respecto se presenta consideraciones a tener en cuenta desde el punto de vista microbiológico en el proceso de deshidratación de productos agrícolas.

## **1.2. EQUIPOS DESHIDRATADORES**

La configuración básica de un deshidratador constituye: Una cámara donde se coloca el producto en bandejas, equipado con un ventilador que permite la circulación del aire a través del producto, el aire es calentado a la entrada de la cabina mediante una fuente de calor y es recirculado constantemente.

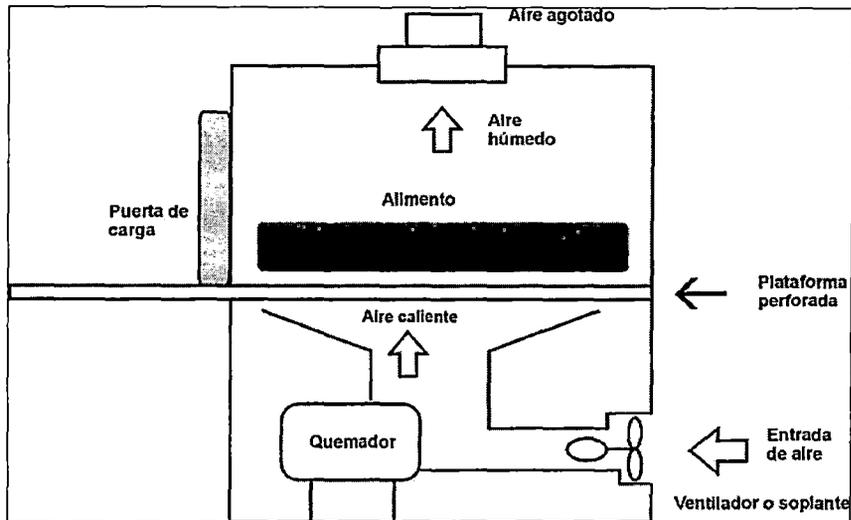
### **Tipos de Deshidratadores**

El calor requerido para el deshidratado puede ser suministrado por convección, conducción o radiación.

En cierto tipo de deshidratadores el producto se expone directamente a una corriente de aire caliente y se elimina el vapor de agua que se produce, sin embargo la naturaleza de ciertos productos no permite la exposición directa al aire caliente y el calentamiento se realiza mediante intercambiadores de calor que evitan el contacto directo entre el producto y el medio de calentamiento. Al primer tipo de deshidratador se les conoce como deshidratadores directos y al segundo deshidratadores Indirectos.

En los deshidratadores indirectos el calor es transmitido hacia el producto mediante placas metálicas calientes del recipiente y por contacto directo entre las placas calientes y las partículas frías del producto como se muestra en el grafico.

**Fig. 1.1 Deshidratador Indirecto**



**Fuente: SÁNCHEZ, M. 1988**

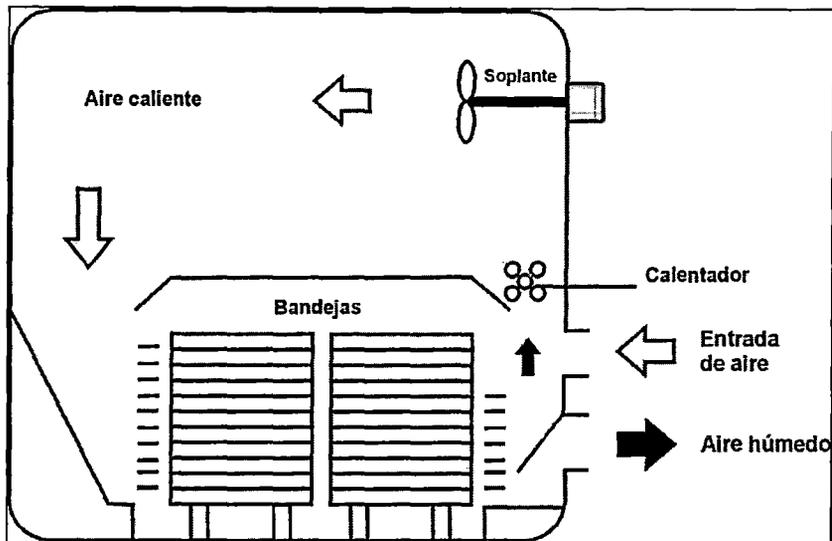
Los deshidratadores directos utilizan aire caliente, el cual pasa a través del producto, el proceso de calentamiento en los deshidratadores directos es más uniforme que en los deshidratadores indirectos, el deshidratador directo más utilizado es el de tipo cabina.

Las bandejas que contienen el producto se colocan en un compartimiento de secado en contacto con el aire caliente, el aire es calentado mediante un calentador a la entrada de la cabina y es forzado a pasar a través del conjunto de bandejas donde se encuentra el producto.

Los calentadores de aire pueden ser quemadores de gas directo, serpentines de vapor, calentadores eléctricos, estos deshidratadores se utilizan para deshidratar frutas y hortalizas.

Los deshidratadores de cabina son los que más comúnmente se encuentran en las operaciones de deshidratado. Se utilizan generalmente en operaciones a pequeña escala y en plantas piloto.

**Fig. 1. 2 Deshidratador Directo**



**Fuente: SÁNCHEZ, M. 1988**

### **1.3. PARÁMETROS A CONTROLAR EN EQUIPOS DESHIDRATADORES**

Después del análisis del proceso de deshidratado de productos alimenticios en función del tiempo, donde durante cada fase se deben mantener los valores referenciales programados de los parámetros, resulta que los parámetros más importantes a controlar son: la temperatura y la humedad relativa.

**Control de Temperatura.** El parámetro temperatura, es responsable de que el agua contenida dentro de la fruta salga hacia la superficie a través de los tubos capilares que tiene la fruta. La variación progresiva por etapas y sin cambios bruscos de este parámetro garantiza el éxito en el proceso.

**Control de Humedad Relativa.** Al contenido de agua en el aire se le conoce como humedad relativa y se define como el porcentaje de saturación del aire con vapor de agua, es decir, es la relación entre la cantidad de vapor de agua que contiene un metro cúbico de aire en condiciones determinadas de temperatura y presión, para medir la humedad relativa del aire se utilizan el

higrómetro y los psicrómetros que hay de diferentes tipos. Como la capacidad del aire para absorber humedad varía con la temperatura, la humedad relativa aumenta cuando desciende la temperatura, aunque la humedad absoluta se mantenga invariable. La medición de la humedad relativa, indica cuan seca está el producto.

**Control de Peso.** Mediante el control de este parámetro se determina el porcentaje de humedad relativa que debe tener el producto final.

#### **1.4. LA CIBERNÉTICA**

Es una ciencia que se ocupa de los sistemas de control y comunicación en las personas y en las máquinas. Está íntimamente vinculada con la teoría general de sistemas al grado en que muchos la consideran inseparable de esta y que se ocupa del estudio de: el mando, el control, las regulaciones y el gobierno de los sistemas.

El propósito de la Cibernética es desarrollar un lenguaje y técnicas que permitan atacar los problemas de control y comunicación en general y es lo que estabiliza y coordina el funcionamiento de los sistemas complejos como los seres vivos que les permite hacer frente a las variaciones del ambiente y presentar un comportamiento más o menos complejo, es el control que le permite al sistema seleccionar las entradas ( inputs ) para obtener ciertas salidas ( outputs ) predefinidas. La regulación está constituida por los mecanismos que permiten al sistema mantener su equilibrio dinámico y alcanzar o mantener un estado. Un concepto muy importante en la Cibernética es la retroalimentación, que es parte del principio de que todos los elementos de una totalidad de un sistema deben comunicarse entre sí para poder desarrollar interrelaciones coherentes, sin comunicación no hay orden y sin orden no hay totalidad. Con la cibernética el concepto de máquina ha ido cambiando a lo largo de los años, luego de aquellas primeras máquinas mecánicas donde se pretendía reemplazar completa o parcialmente el trabajo físico del hombre, han seguido otras, cuyo fin, es la mecanización del trabajo intelectual. Hoy las máquinas realizan funciones que antes se consideraban propias del intelecto humano.

Entonces dentro del campo de la cibernética se incluyen toda clase de mecanismos o procesos de autocontrol. El aporte más importante de la cibernética fue fundamentarse sobre las analogías, de ahí su característica de ciencia exógena, la cual está dada por la interrelación con otras ramas del conocimiento y su asimilación, pero sobre todo por la propuesta de teorías generales que explican fenómenos propios de las otras ciencias. Por ejemplo la cibernética ha preferido basarse en la teoría de los modelos, haciendo más hincapié en la representación funcional de los organismos que en su estructura, en el sentido vertical o jerárquico, esto unido a la búsqueda de analogías entre los fenómenos y no a la reducción de un fenómeno en otro, la llevó a convertirse en una guía científica para la comprensión del mundo desde una visión más general abierta.

Otro de los aportes de la cibernética fue la utilización del aparato matemático (su creador Wiener, fue un destacado matemático), que hasta ese momento era de uso casi exclusivo de la física, como la cibernética es a su vez una disciplina común a varios sectores de investigación, trajo como consecuencia que ramas como la psicología, la sociología y la biología pudieran de alguna manera formalizar sus teorías y fue más lejos, al proporcionarles métodos de experimentación a través de la creación de máquinas que permitan estudiar conductas, reacciones, reflejos, formas de aprendizajes, etc. Los Automatismos están compuestos de tres partes principales como son: la obtención de señales por parte de los sensores, el procesamiento de dichas señales hecho por los procesadores inteligentes y la ejecución de respuestas efectuada por los actuadores.

## **1.5. LA ROBÓTICA**

La Robótica es un campo multidisciplinario complejo en el cual intervienen diversas especialidades de Ingeniería, tales como Ing. Electrónica, Ing. Mecánica, Ing. de Control, Ing. Informática, Procesamiento de señales, Visión Artificial, Sistemas de Manufactura, etc.

La Robótica es un área moderna, científica y tecnológica que se viene desarrollando a velocidades vertiginosas en los países desarrollados y en

aquellos aún en vías de desarrollo, sobre todo en estas cuatro últimas décadas, tanto en la investigación como en sus diferentes áreas de aplicación: industriales, militares, espaciales, educacionales, etc.

La Robótica se relaciona estrechamente con la Automatización Industrial, por lo que fundamentalmente debe estar apoyada por la industria moderna interesada en aminorar los costos y el tiempo de productividad, aumentar la flexibilidad y calidad de la producción masiva.

La filosofía de la ROBOTICA INDUSTRIAL, como una tecnología factible del futuro, tanto en su aplicación e investigación esencialmente se basa en:

- Que un robot no puede actuar en contra del ser humano o mediante la inacción, permitir que éste sufra daños.
- Disminuir el trabajo monótono y agotador del hombre.
- Que los robots realicen tareas en ámbitos inhóspitos al ser humano.
- Que el trabajo humano se oriente a las tareas creativas en vez de las productivas.
- Elevar la producción masiva y el rendimiento en la industria.
- La disminución de los costos y tiempo de producción en la industrialización de productos.
- El aumento del factor calidad de la producción y optimización de los recursos.
- Que el desarrollo industrial esté basado en nuevas características técnicas, especialmente en la eficiencia, flexibilidad y fiabilidad en el trabajo.

El objetivo del desarrollo y utilización de robots industriales se hace con fines de mejorar la eficiencia en los procesos de manufactura por lotes y para relevar a los operadores humanos en puestos de trabajo peligrosos e insalubres, o simplemente para efectuar tareas imposibles de realizar mediante trabajo manual.

Un robot industrial es un brazo mecánico o manipulador programable, equipado con un mínimo de capacidades sensoriales, capaz de mover piezas o herramientas a lo largo de trayectorias previamente definidas por el

operador. Su programabilidad y su sistema sensorial le confieren versatilidad para desarrollar tareas variadas y adaptabilidad para reaccionar a algunos cambios en su medio ambiente.

En todas las fases de desarrollo de un robot o de un puesto de trabajo robotizado, es necesario contar con modelos apropiados para apoyar el diseño y el análisis de tales máquinas y de cada uno de sus sistemas. Los modelos más utilizados para diseño, simulación y control son los que describen el movimiento del manipulador, destacando los modelos cinemático, variacional y dinámico.

### **1.5.1 DEFINICION DE ROBOT**

Un robot es considerado en general, como una cadena cinemática abierta, de tracción regulada propia, que realiza un trabajo, una acción predeterminada o tareas, basado en el conocimiento de su entorno, herramientas y procesos interactivos a través de su diseño y sensores montados en él, con o sin intervención directa del hombre en el lazo de control.

Un robot para ser considerado como tal, debe cumplir ciertas características mínimas tales como:

- Aproximarse a las características humanas de trabajo.
- Tener movimiento (auto) regulado de sus efectores.
- Estar dotado de mecanismos sensoriales.
- Tener un control en lazo remoto o directo.
- Contar con un volumen de trabajo determinado.
- Ejecutar repetitivamente acciones determinadas.
- Presentar flexibilidad al intercambio de acciones.
- Ser programable y de fácil adaptación a posibles variaciones de su entorno.

Existen varias definiciones de un robot, formuladas por diversas asociaciones científicas. Cada autor, científico o tecnólogo lo define desde su punto de vista y de acuerdo a las propiedades del robot. Sin embargo, la

definición que da Robot Industries Association (RIA) es la aceptada por la mayoría de los expertos y especialistas en el tema y lo define de la siguiente manera:

**Manipulador automático, reprogramable, multifuncional o polivalente, con servosistemas de posición, capaz de posicionar y orientar materiales, piezas, útiles o dispositivos especiales a lo largo de movimientos variables y programables para la ejecución de tareas variadas.**

Un robot puede ser descompuesto en un conjunto de subsistemas funcionales tales como: procesos, planeación, control, sensores, sistemas eléctricos, y sistemas mecánicos.

El Software es una parte implícita de los subsistemas de sensores, planeación, y control; que integra todos los subsistemas como un todo.

El **Subsistema de Procesos** incluye las tareas que lleva a cabo el robot, en el ambiente en el cual es colocado, y la interacción entre éste y el robot, antes de que un robot pueda realizar una tarea, se debe tener la secuencia de pasos que pueda ejecutar.

El **Subsistema de Planeación**, realiza la tarea de búsqueda la cual incluye los modelos de procesos inteligentes, percepción y planeación. En el modelo de procesos, los datos que se obtienen de una variedad de sensores son fusionados (Integración Sensorial) con modelos matemáticos de las tareas para formar un modelo del sistema real. Al usar este modelo del sistema real, el proceso de percepción selecciona la estrategia para ejecutar la tarea. Estas estrategias son convertidas dentro de los programas de control del robot durante el proceso de planeación.

El **Subsistema de Control**; ejecuta los programas anteriores, los comandos de alto nivel son convertidos en referencias para actuadores físicos, los valores retroalimentados son comparados contra estas referencias, y los algoritmos de control estabilizan el movimiento de los elementos físicos.

Al realizar ésta tarea los mecanismos son modelados, el proceso es modelado, la ganancia de lazo cerrado puede ser adaptada, y los valores

medidos son utilizados para actualizar los procesos y los modelos de los mecanismos.

El **Subsistema Eléctrico**, desde el subsistema de control se alimenta las referencias de los actuadores a este subsistema, el cuál incluye todos los controles eléctricos de los actuadores. Los actuadores hidráulicos y neumáticos son usualmente manejados por electroválvulas controladas. También, este subsistema contiene computadoras, interfaces, y fuentes de alimentación.

El **Subsistema Mecánico** Los actuadores manejan los mecanismos en este subsistema para operar en el medio ambiente, esto es realizar una tarea determinada.

El **Subsistema de Sensores**; Los parámetros dentro del robot y del medio ambiente son monitoreados por este subsistema; ésta información sensorica se utiliza como retroalimentación en las ganancias de lazo cerrado para detectar potencialmente las situaciones peligrosas, para verificar que las tareas se realizan correctamente, y para construir un modelo del sistema real.

### 1.5.2. CLASIFICACIÓN

La Asociación de Robots Japonesa (JIRA) ha clasificado a los robots dentro de seis clases sobre la base de su nivel de inteligencia:

- 1.- **Dispositivos de manejo manual**, controlados por una persona.
- 2.- **Robots de secuencia arreglada**.
- 3.- **Robots de secuencia variable**, donde un operador puede modificar la secuencia fácilmente.
- 4.- **Robots regeneradores**, donde el operador humano conduce el robot a través de la tarea.
- 5.- **Robots de control numérico**, donde el operador alimenta la programación del movimiento, hasta que se enseñe manualmente la tarea.
- 6.- **Robots inteligentes**, los cuales pueden entender e interactuar con cambios en el medio ambiente.

Los programas en el controlador del robot pueden ser agrupados de acuerdo al nivel de control que realizan.

**1.- Nivel de inteligencia artificial**, donde el programa acepta un comando como "levantar el producto" y descomponerlo dentro de una secuencia de comandos de bajo nivel basados en un modelo estratégico de las tareas.

**2.- Nivel de modo de control**, donde los movimientos del sistema son modelados, para lo que se incluye la interacción dinámica entre los diferentes mecanismos, trayectorias planeadas, y los puntos de asignación seleccionados.

**3.- Niveles de servosistemas**, donde los actuadores controlan los parámetros de los mecanismos con el uso de una retroalimentación interna de los datos obtenidos por los sensores, y la ruta es modificada sobre la base de los datos que se obtienen de sensores externos. Todas las detecciones de fallas y mecanismos de corrección son implementados en este nivel.

En la clasificación final se considerará el nivel del lenguaje de programación. La clave para una aplicación efectiva de los robots para una amplia variedad de tareas, es el desarrollo de lenguajes de alto nivel. Existen muchos sistemas de programación de robots, aunque la mayoría del software más avanzado se encuentra en los laboratorios de investigación. Los sistemas de programación de robots caen dentro de tres clases:

**1.- Sistemas guiados**, en el cual el usuario conduce el robot a través de los movimientos a ser realizados.

**2.- Sistemas de programación de nivel-robot**, en los cuales el usuario escribe un programa de computadora al especificar el movimiento y el sentido.

**3.- Sistemas de programación de nivel-tarea**, en el cual el usuario especifica la operación por sus acciones sobre los objetos que el robot manipula.

### **1.5.3. APLICACIONES**

Los robots son utilizados en una diversidad de aplicaciones, desde robots tortugas en los salones de clases, robots soldadores en la industria automotriz, hasta brazos tele operados en el transbordador espacial.

Cada robot lleva consigo su problemática propia y sus soluciones afines, es un hecho innegable que la introducción de la tecnología robótica en la industria, ha causado un gran impacto. En este sentido la industria Automotriz desempeña un papel preponderante.

## **1.6. AUTOMATIZACIÓN**

### **1.6.1. CONCEPTOS**

En un contexto industrial se puede definir la automatización como una tecnología que está relacionada con el empleo de sistemas mecánicos-eléctricos basados en computadoras para la operación y control de la producción. En consecuencia la robótica es una forma de automatización industrial.

Al respecto (Velezmoro, 2001) define a la automatización como “la mecanización de un sistema de tal forma que puede ser operado, regulado y operado sin la intervención del hombre” a fin de lograr mantenimiento de la calidad del producto, aumento de la seguridad en el proceso, reducción de costos operativos y mejora de la producción.

De acuerdo con (Piedrahita, 2000), en la industria actual, la mayor parte de los procesos de fabricación son automatizados. En los sistemas automatizados la decisión, la inteligencia que realiza las acciones de fabricación no las realiza el ser humano. La inteligencia del proceso está contenida en la unidad de control o mando del sistema de fabricación (Cibernética).

La realización tecnológica de esa inteligencia ha adoptado diferentes formas o implementaciones a lo largo de la historia industrial. Desde automatismos puramente mecánicos, hasta los robots programables actuales.

En el momento actual se puede afirmar que la mayoría de los procesos automatizados están controlados por robots programables y en menor medida por computadores de control de proceso y reguladores industriales.

En opinión de (Krajewski, 2000), la tecnología es el conocimiento práctico, los objetos físicos y los procedimientos para generar productos y servicios. El conocimiento práctico es el hecho práctico de saber y juzgar cómo, cuándo y por qué utilizar el equipo y los procedimientos. La destreza y la experiencia están incorporadas a este conocimiento y con frecuencia pueden escribirse en manuales o guías de rutinas. Los objetos físicos son el equipo y las herramientas. Los procedimientos son las reglas y técnicas para operar el equipo y realizar el trabajo. Los tres componentes trabajan juntos.

- Asimismo añade Krajewski que: dentro de una organización, las tecnologías reflejan en que trabajan las personas y que elementos utilizan para realizar ese trabajo. La visión más generalizada de tecnología es la tecnología del producto, que desarrollan los grupos de ingeniería e investigación de una empresa cuando crean nuevos productos y servicios. Otra visión es la de tecnología de proceso, que aplican los empleados de una compañía para realizar su trabajo. Una tercera área, que se está volviendo cada día más importante, es la aplicación de la Cibernética a través de la tecnología de información, que usan los empleados de una empresa para adquirir, procesar y comunicar información. La forma de clasificar una tecnología específica depende de su aplicación.

### **1.6.2 CLASES DE AUTOMATIZACIÓN**

Hay tres clases muy amplias de automatización industrial: automatización fija, automatización programable, y automatización flexible.

**La automatización fija** se utiliza cuando el volumen de producción es muy alto, por lo tanto se puede justificar económicamente el alto costo del diseño de equipo especializado para procesar el producto con un rendimiento alto y tasas de producción elevadas. Además de esto, otro inconveniente de la automatización fija es su ciclo de vida que va de acuerdo a la vigencia del producto en el mercado.

**La automatización programable** se emplea cuando el volumen de la producción es relativamente bajo y hay una diversidad de producción a obtener. En este caso el equipo de producción es diseñado para adaptarse a las variaciones de configuración del producto, ésta adaptación se realiza por medio de un programa ( software ).

**La automatización flexible**, por su parte, es más adecuada para un rango de producción media. Estos sistemas flexibles poseen características de la automatización fija y de la automatización programada.

Los sistemas flexibles suelen estar constituidos por una serie de estaciones de trabajo interconectadas entre si por sistemas de almacenamiento y manipulación de materiales, controlados en su conjunto por una computadora.

De los tres tipos de automatización, la robótica coincide más estrechamente con la automatización programable.

## **1.7. MICRONTROLADOR**

El micro controlador es un dispositivo que contiene los elementos de un computador básico, se emplea para controlar el funcionamiento de una tarea determinada y, debido a su reducido tamaño, suele ir incorporado en el hardware que constituyen las tarjetas de los módulos de un sistema de control de un equipo.

El Micro controlador es el componente electrónico más versátil que existe, sus aplicaciones solo están limitadas solo por la imaginación y obviamente la Automatización Industrial no se podía quedar fuera de esta tecnología.

Dispositivos como los PLC, cuentan en su estructura interna con un Microcontrolador, que constituye como el elemento principal para su funcionamiento.

Del Microcontrolador se aprovechan todas sus propiedades y módulos internos tales como conversores A/D, puertos seriales y paralelos, temporizadores, módulos PWM, interrupciones, etc.

Con esta tecnología se pueden realizar desarrollos de Automatización, Instrumentación y control sin acudir a dispositivos comerciales costosos, la

cual es una solución interesante y económica ya que se puede obtener resultados de buena calidad y con alto grado de personalización, según los requerimientos específicos de cada caso.

En el proceso de deshidratación, se necesitan controlar los parámetros de temperatura, tiempo, humedad relativa, y especialmente la humedad final del producto.

La Automatización del Deshidratador de Cabina en el proyecto se realizó usando el Microcontrolador PIC16F877 de la empresa MICROCHIP.

El Deshidratador posee una interface para monitorear y dar reportes en línea de los parámetros que están involucrados como la temperatura, humedad relativa y tiempo en la computadora a través de un Software desarrollado en Visual Basic.

Este reporte será una herramienta para el análisis, y estadísticas de los procesos de Deshidratación.

Para adaptarse a las necesidades de los usuarios, Microchip oferta tres gamas de microcontroladores de 8 bits

Con las tres gamas de PIC se dispone de gran diversidad de modelos y encapsulados, pudiendo seleccionar el que mejor se adecue a las necesidades de capacidad de las memorias, el número de líneas de E/S y las funciones auxiliares precisas. Sin embargo, todas las versiones están construidas alrededor de una arquitectura común, un repertorio mínimo de instrucciones y un conjunto de opciones como el bajo consumo de energía y el amplio margen del voltaje de alimentación.

**Arquitectura de Microcontrolador PIC.** Este micro controlador tiene una arquitectura conocida como Harvard, donde la CPU está conectado a dos memorias por intermedio de dos buses separados. Una de las memorias contiene solamente las instrucciones del programa, y es llamada Memoria de Programa. La otra memoria solo almacena los datos y es llamada Memoria de Datos. Ambos buses son totalmente independientes y pueden ser de distintos anchos.

El PIC también tiene una arquitectura RISC (Reduced Instrucción Set Computer), y una estructura de Pipeline de dos niveles permitiendo que la CPU puede estar accediendo a los datos para completar la ejecución de una instrucción, y al mismo tiempo estar leyendo la próxima instrucción a ejecutar.

## **1.8. CONTROL AVANZADO**

### **1.8.1. CONCEPTOS**

El permanente desarrollo de dispositivos y equipos basados en la técnica digital, tales como microcontroladores, tarjetas de desarrollo para procesamiento digital de señales, sistemas encapsulados, computadores industriales, sistemas de adquisición de datos, entre otros. Tales dispositivos y equipos, que cada vez son más pequeños y de menor costo, pero paradójicamente más potentes, han provocado que actualmente la mayoría de los sistemas de control se diseñen basados en técnicas digitales.

Con respecto a las técnicas empleadas en el diseño de los sistemas de control, podemos observar en la industria que cada vez son más las aplicaciones basadas en técnicas no tradicionales, las cuales se denominan técnicas de control avanzado, de las cuales la que han logrado mayor aceptación son las siguientes: Control óptimo, control adaptivo y control predictivo, todas ellas se basan en la implementación de algoritmos computacionales para lograr el objetivo.

### **1.8.2. SISTEMAS DE CONTROL DIGITAL**

El esquema básico de un sistema de control digital, se muestra en la fig 1.3 el sistema incluye control pre alimentado y realimentado. La estrategia de control a usar depende del diseñador, en función a una determinada aplicación.

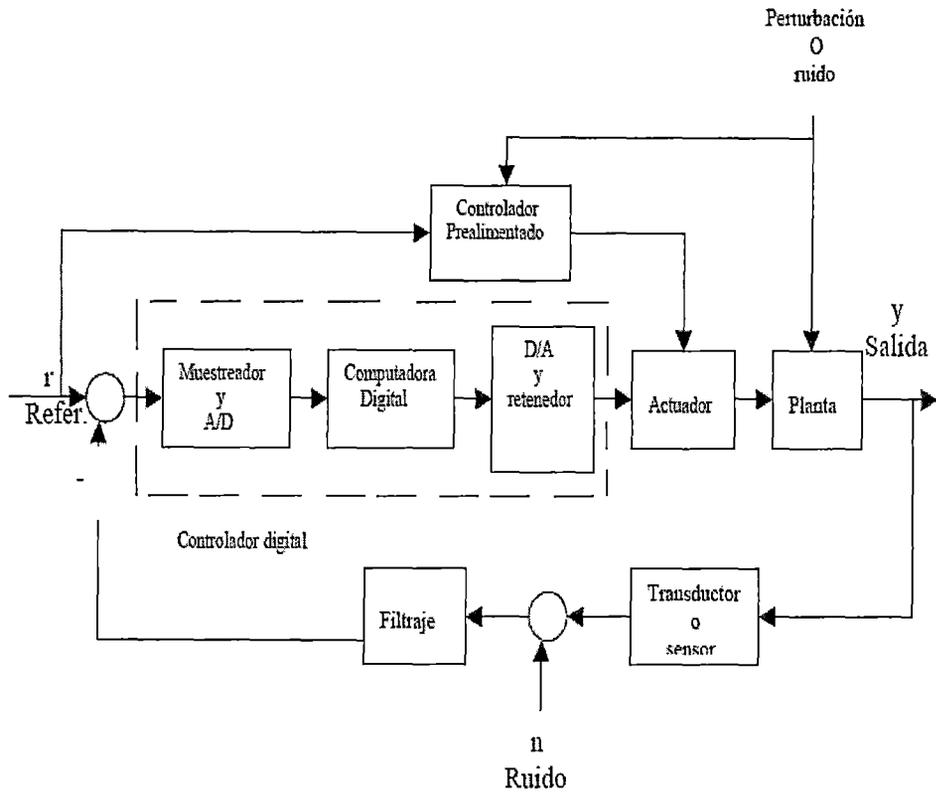
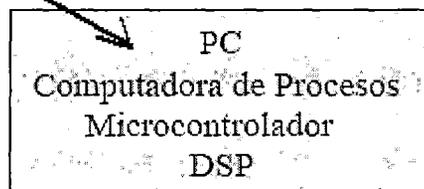


Fig. 1.3 Esquema básico de un control digital

La implementación de un determinado algoritmo de control puede ser materializado usando computadora de procesos, microcontrolador o procesador digital de señales.

Implementación del algoritmo de control



El proceso de muestreo es sumamente útil en sistemas de control donde se usa control digital. El muestreo de señales consiste en tomar muestras en puntos discretos de tiempo, que luego son cuantificadas por un proceso de

retención, para luego pasar a un convertidor analógico/digital, produciéndose su conversión en códigos binarios, tales códigos pueden ser procesados por el computador o un microcontrolador para producir una determinada decisión.

En la mayoría de las aplicaciones de control realimentado los procesos utilizan actuadores que son controlados por señales analógicas, situación que hace necesario la reconversión de la señal digital hacia analógico. Tal propósito se logra por un proceso de conversión digital/analógico y luego por un retenedor, que hace posible la reconstrucción de la señal analógica, la cual activa al actuador controlando directamente el proceso. En la fig. 1.4 se muestra un diagrama de bloques de un sistema de adquisición de datos y en la fig. 1.5 se muestra un diagrama de bloques de un sistema de reconstrucción de la señal analógica.

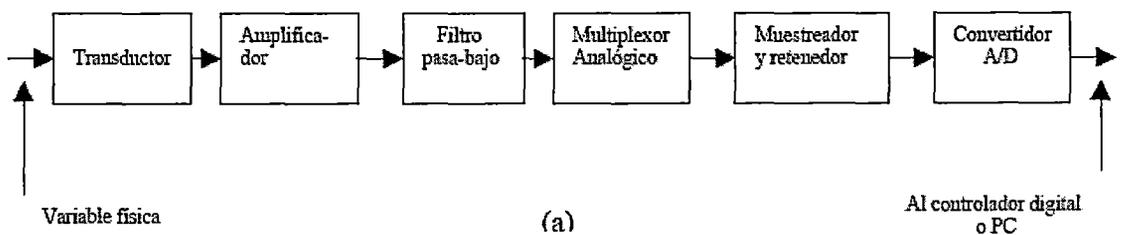


Fig. 1.4 Diagrama de bloques de un sistema de adquisición de datos

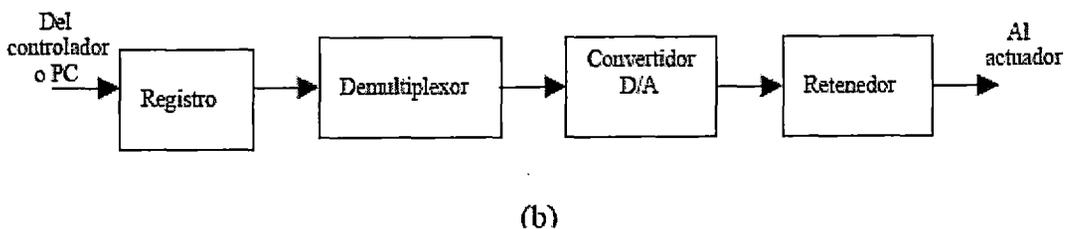


Fig. 1.5 Diagrama de bloques de un sistema de reconstrucción de la señal Analógica.

## 1.9 REDES DE PETRI

Una Red de Petri es un grafo orientado con dos tipos de nodos:

Lugares (representados mediante circunferencias) y Transiciones (representadas por segmentos rectos).

Los lugares y las transiciones se unen mediante arcos o flechas, un arco une siempre lugares con transiciones y nunca dos lugares o dos transiciones.

Una transición puede ser destino de de varios lugares y un lugar puede ser destino de varias transiciones.

Los lugares pueden presentar marcas (una marca se representa mediante un punto en el interior de la circunferencia).

Cada lugar tiene asociada una acción o salida, los lugares que contiene marcas se consideran lugares activos y a las transiciones se les asocia eventos, Una transición se dice que esta sensibilizada cuando todos sus lugares origen están marcados. Cuando ocurre un evento asociado a una transición, se dice que la transición esta validada.

Las PN son consideradas como una herramienta para el estudio de los sistemas, y ayuda modelar el comportamiento y la estructura de un sistema, y llevar el modelo a condiciones límite, que en un sistema real son difíciles de lograr o muy costosas.

Comparada con otros modelos de comportamiento dinámico gráficos, como los diagramas de las máquinas de estados finitos, las PN ofrecen una forma de expresar procesos que requieren sincronía, quizás lo más importante es que las PN pueden ser analizadas de manera formal y obtener información del comportamiento dinámico del sistema modelado. Para modelar un sistema se usan representaciones matemáticas logrando una abstracción del sistema, esto es logrado con las PN, que además pueden ser estudiadas como autómatas e investigar sus propiedades matemáticas.

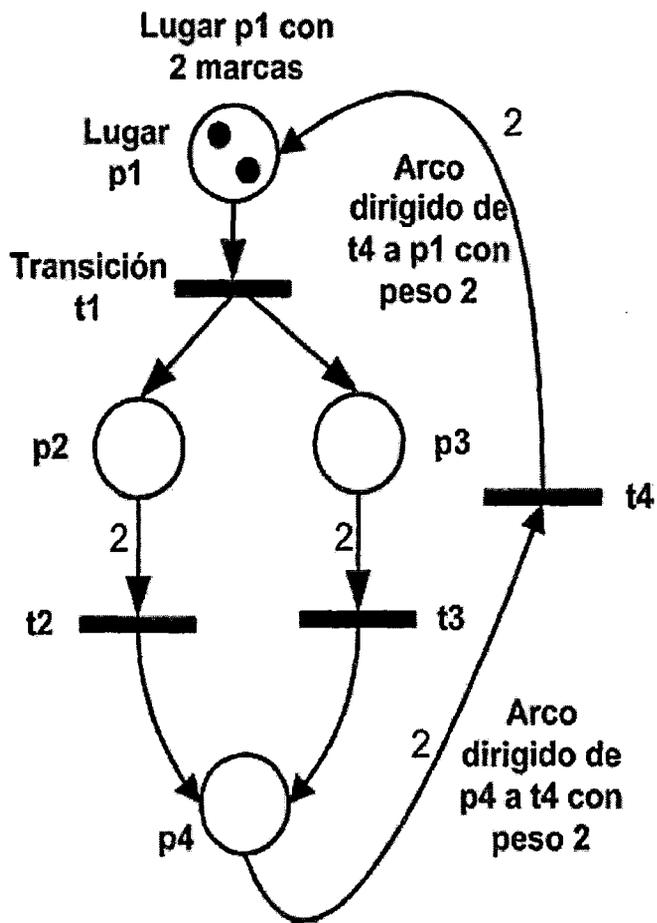


Fig. 1.6 Red de Petri mostrando marcas

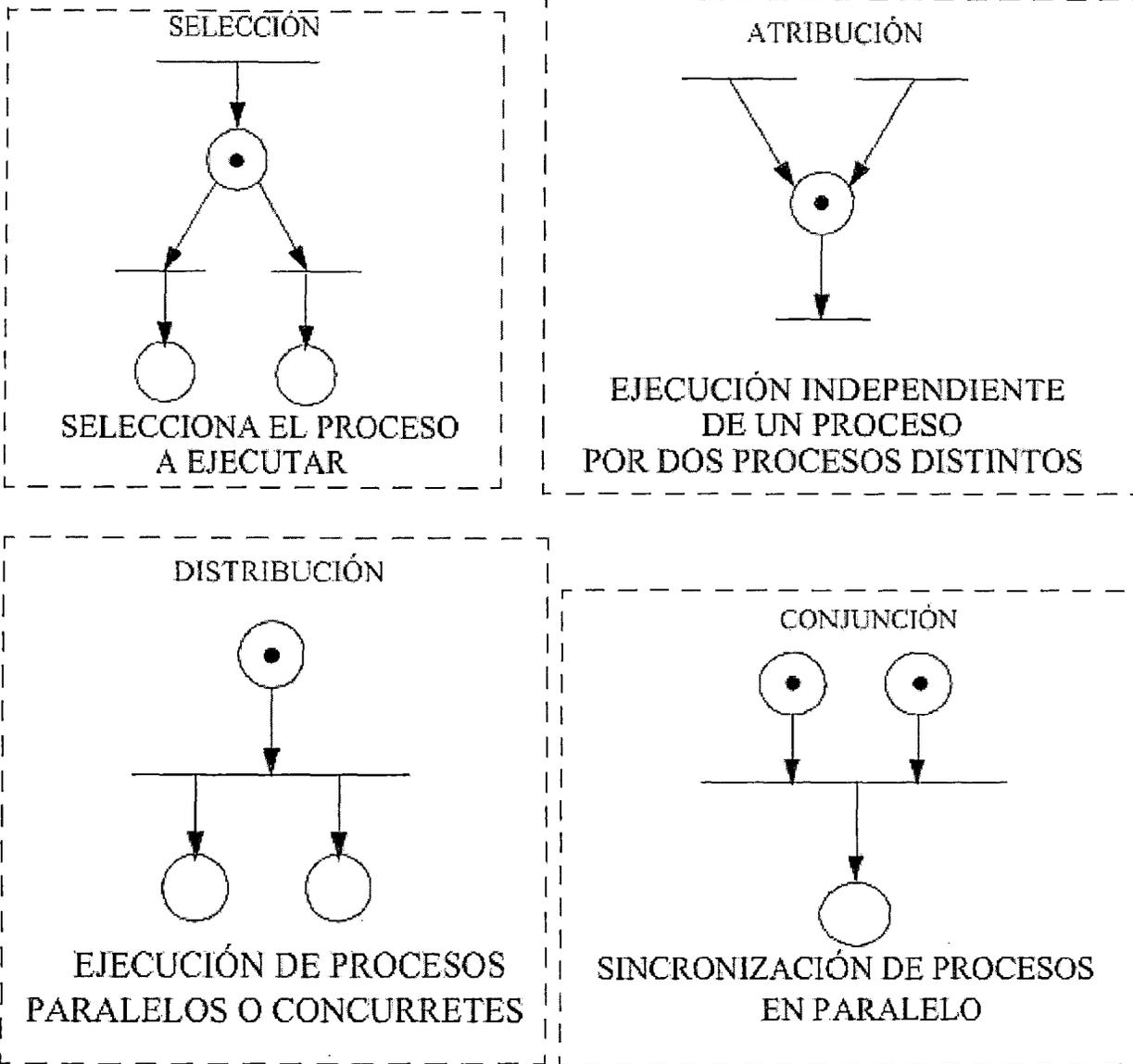


Fig. 1.7 Estructuras Basicas de Redes de Petri

Típicamente, los estados representan algún tipo de condición en el sistema, y una transición representa un evento. Un lugar de entrada (salida) a una transición representan las pre- (post-) condiciones. Los tokens pueden tener muchas interpretaciones. Por ejemplo, cuando un lugar está marcado con un token, este puede representar que la correspondiente condición es verdadera.

Formalmente, una Red de Petri se define como una quintupla,  $PN = (P, T, F, W, M_0)$ , donde:

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$  es un conjunto finito de lugares.

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$  es un conjunto finito de transiciones.

$F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$  es un conjunto de arcos dirigidos.

$W: F \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$  es una función de pesos de los arcos.

$M_0: P \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$  es el marcado inicial de la red.

$P \cap T = \emptyset$  y  $P \cup T \neq \emptyset$ .

El marcado inicial de una PN son las marcas que posee cada lugar de la red en su inicio.

El comportamiento de los sistemas puede ser descrito en términos de sus estados y sus cambios.

De manera formal, una marcación M es definida como  $M : P$

También es conveniente, en algunos casos, el denotar una marcación M de m lugares como un vector-m donde el i-ésimo componente es denotado como  $M(p_i)$ , por ejemplo  $M = \langle M(p_1), \dots, M(p_m) \rangle$ . Una transición t está habilitada con una marcación M si cada sitio de entrada p está marcado con al menos  $W(p, t)$  tokens. Una transición puede o no ser disparada al habilitarse.

Cuando más de una transición es habilitada, alguna de ellas es seleccionada de manera no-determinística dependiendo del modelo empleado. Conforme las transiciones son disparadas, el número total de tokens distribuidos a lo largo de la red puede variar, esto es, la conservación de los tokens no siempre sucede.

### 1.9.1 PRINCIPALES PROPIEDADES DINAMICAS

**ALCANZABILIDAD:** Es la principal propiedad dinámica y consiste en que cada disparo de una transición habilitada modifica la distribución de los marcados dentro de la red, de acuerdo con las reglas de disparo.

Una secuencia de disparos generará una secuencia de marcados. Se dice que un marcado  $M_n$  es alcanzable desde el macado  $M_0$  si y solo si existe una secuencia de disparos que transforme  $M_0$  en  $M_n$ .

El conjunto de todos los marcados posibles a partir de  $M_0$  es denotado por  $R(M_0)$  y el conjunto de todos los posibles disparos desde  $M_0$  es denotado como  $L(M_0)$ . El problema de alcanzabilidad consiste en encontrar un  $M_n \in R(M_0)$ .

**LIMITABLE O ACOTADA:** Una red se dice limitada si el número de marcas de la red en cada lugar no excede un número finito  $k$  para cualquier marcado alcanzable desde  $M_0$ .

**VIVACIDAD:** Se dice que una red es viva si no importa cual marcado ha sido alcanzado, siempre será posible una nueva secuencia de disparos y alcanzar un nuevo marcado. Una red viva garantiza una operación libre de bloqueos.

**REVERSIBILIDAD Y ESTADO INICIAL:** Una Red de Petri se dice que es reversible si para cada marcado  $M_n$  existente dentro de  $R(M_0)$ ,  $M_0$  es alcanzable desde  $M_n$ . De esta forma una PN reversible es aquella donde siempre es posible alcanzar nuevamente el marcado inicial o estado inicial del sistema.

### 1.9.2 METODOS DE ANALISIS DE PROPIEDADES DINAMICAS

**EL ÁRBOL DE COBERTURA:** Dada la Red de Petri con marcado inicial  $M_0$ , se puede obtener tantos nuevos marcados como transiciones habilitadas disparadas. Este proceso resulta en un árbol de marcados infinito para una PN no acotada y para redes acotadas, el árbol de cobertura es llamado árbol de alcanzabilidad.

**MATRIZ DE INCIDENCIA:** Para una Red de Petri PN con  $n$  transiciones y  $m$  lugares, la matriz de incidencia es una matriz de enteros de  $n \times m$ , llamada  $A = [a_{ij}]$ , y  $a_{ij}$  está dada por:  $a_{ij} = a_{ij}^+ - a_{ij}^-$  donde:

$A_{ij}^+ = w(i, j)$  son los pesos de los arcos de las transiciones  $i$  a los lugares de salida

$A_{ij} = w(j, i)$  son los pesos de los arcos de los lugares de entrada  $j$  a la transición  $i$ .

La ecuación de estados de una PN es una ecuación matricial que define el estado de la red, dado un marcado inicial y una secuencia de disparos de transiciones habilitadas.

La ecuación fundamental de una PN es:

$$M_d = M_0 + A^T \sum_{k=1}^d U_k$$

Donde  $M_d$  es un vector columna de  $m \times 1$ , el vector de control o vector de disparo llamado  $U_k$  es un vector también columna de  $n \times 1$ .

$A$  es la matriz de incidencia por que denota como cambiara el marcado.

### 1.9.3 VENTAJAS:

- El sistema completo frecuentemente es fácil de entender debido a la naturaleza gráfica y precisa del esquema de representación.
- El comportamiento del sistema se puede analizar usando la teoría de red de Petri.
- Puesto que las redes de Petri pueden ser sintetizadas usando los enfoques ascendente (bottom-up) y descendente (top-down), es posible especificar sistemáticamente aquellos sistemas cuyo comportamiento es conocido o fácilmente verificable.

### 1.9.4 DESVENTAJAS:

- Las redes de Petri generales no pueden modelar ciertas situaciones de prioridad.
- En general, el problema de alcanzabilidad en redes de Petri, aunque decidable, se ha visto, que es de tiempo exponencial y fuerte consumidor de espacio.
- Sin embargo, para esta última desventaja, si se encuentran problemas en el análisis, esto es un reflejo de la complejidad del sistema a ser modelado y no debe considerársele como una desventaja.

- Existen muchas variedades de Redes de Petri que pueden agruparse en dos campos o clases; generalización de Redes de Petri y subclases del modelo general.
- Las primeras, llamadas "Modelos Generales", tienen algunas ventajas para el modelado, mientras que las segundas, llamadas "Modelos Específicos" tienen ventajas para analizar el comportamiento de sistemas específicos.
- Los modelos generales de Redes de Petri, utilizan la concepción original de Petri. Los modelos específicos, han surgido con diferentes adjetivos y que sus autores han modificado o extendido del original para resolver determinados problemas.

#### **1.9.5 APLICACIONES**

- Modelamiento de sistemas o aplicaciones que se ejecutan en tiempo real.
- Sistemas operativos y compiladores.
- Hardware y Software de computadores.
- Redes de libre elección, que permiten modelar ambientes industriales de producción.
- Diagramas de Flujo de Datos (DFD).
- Protocolos de Comunicación.
- Bases de Datos.

## **CAPITULO II**

### **ASPECTOS METODOLOGICOS**

#### **2.0 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

##### **2.1 DIAGNOSTICO Y ENUNCIADO DEL PROBLEMA**

Una de las alternativas para mejorar la rentabilidad de los agentes involucrados en la actividad agroindustrial es mejorar su competitividad, como en el caso de frutas deshidratadas para el mercado nacional, que son abastecidos en un 99% por Chile y Argentina, esta actividad de deshidratación en el país se viene efectuando en el ámbito de las Pequeñas y Medianas Empresas (PYMES) aún en forma incipiente. Evaluada la actividad de deshidratación de productos agroindustriales por parte de las PYMES, se ha podido constatar que su estructura actual de funcionamiento e implementación de sus líneas de producción no les permiten desarrollar la actividad en forma competitiva.

Al respecto, existe un mercado interno potencial y creciente, que requiere ser abastecido con volúmenes adecuados y de diversos productos, que además exige a las empresas dedicadas a esta actividad a actuar con flexibilidad y operatividad. Para acceder al mercado exterior se requiere adecuar la capacidad instalada con posibilidades de crecimiento modular, de manera que lograda la introducción y posicionamiento del producto, la empresa pueda afrontar los incrementos de la demanda sin incurrir en excesivos costos.

Ante la problemática expuesta, resulta conveniente y es el motivo del presente estudio, posibilitar el desarrollo de un Sistema de Control Automático que optimice el proceso de Deshidratado y esté de acorde a la

realidad de las PYMES dedicadas a la deshidratación de productos frutícolas.

## 2.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En general, el desarrollo agroindustrial de deshidratados en el Perú es muy débil.

De acuerdo a (Viani, 2006) la gran mayoría de PYMES usuarias de deshidratadoras de bandejas las utilizan para productos alimenticios. De un total de 31 empresas, el 84% las usan para productos alimenticios como papas, plátanos, hierbas, castañas, cochinilla, carnes; etc. El resto las utiliza para productos no alimenticios. Muchos usuarios son empresas privadas ubicadas en Lima y en otros importantes centros urbanos del Perú.

La capacidad de las deshidratadoras es muy limitada y, por lo tanto, tienen bajo volumen de producción, por consiguiente la mayoría de usuarios están en el rango de las PYMES.

Para solucionar la capacidad limitada de estos deshidratadores de bandejas, algunas empresas medianas han comprado más de una deshidratadora y las usan paralelamente (Secchi, LOPESA, etc.)

En la tabla N° 2.1 se presentan las Pymes visitadas en el presente estudio.

**TABLA N° 2.1**

### Empresas Deshidratadores Visitadas

Empresa	Dirección	E-mail	Telefono
Industrias Ventura S.A.C		<a href="mailto:industriasventura@hotmail.com">industriasventura@hotmail.com</a>	2874353
Representaciones Agro Industriales S. R.L	Av. Alameda Sur Nro 359 Chorrillos	<a href="mailto:rai_srl@hotmail.com">rai_srl@hotmail.com</a>	2540722 / 8353321 / 8353326
V & O Foods S. A. C.		<a href="mailto:vyfoods@ec-red.com">vyfoods@ec-red.com</a>	2656184/2655134
Fructus Terrum S.A.	AV. Del Parque Norte 480 - Urb. Corpac San Isidro		
Monha Service S.A.C	Av. Nicolas Ayllon 2287 Ate		
Torno Tecnic S.R.L.	Av. Heroes del Alto CENEPA Lote 5 - C Comas		5372737
BIOCON del Peru	Calle Omicrón No. 512 - Callao	Rep. Juan Herrera Robledo	4517865 - 4510195
EFADA	Calle Vargas Machuca 437 Urb. Los Ficus Lima 43		3625512

La situación expuesta representa una buena oportunidad en el mediano plazo para el productor y exportador de frutas de nuestro país, de generar oferta organizada competitiva en calidad y precios, aprovechando los remanentes de materias primas que se generan a nivel de campo y en las labores de empaque para la exportación al estado fresco (por no cumplir con especificaciones técnicas). Respecto al mercado interno del Perú, importamos una cantidad considerable de productos deshidratados como hongos, especias, hortalizas principalmente. Reviste singular importancia el caso de las frutas deshidratadas como son los guindones, medallones de durazno, pasas, cocos, etc. que son usados en repostería peruana (mazamorra morada, mazamorra de durazno, arroz con leche, budín entre otros) en la industria panificadora ( queques, panetones, panes dulces), papillas para bebés y snack.

En el cuadro N° 2.1 se muestran las importaciones de los últimos años de frutas de mayor importancia.

**CUADRO N° 2 .1 Importaciones de Frutas Deshidratadas**

	<b>2007(t)</b>	<b>2008(t)</b>	<b>2009(t)</b>	<b>2010(t)</b>
Pasas	3991	5965.633	6202.348	6493.029
Duraznos deshid.*	70	--	66.600	---
Ciruelas	1051	857	1046.559	1067.112

**\* Incluye orejones, medallones, huesillo y durazno sin carozo.**

**Fuente: SUNAD, MERCOSUR**

Se observa que en el año 2009 Perú importó la cantidad de 66600 Kg. de durazno deshidratado en forma de medallones, orejones, huesillo y sin carozo con un valor CIF de 158,426 dólares.

Con respecto a las pasas, el Perú es un gran consumidor de éstas, las mismas que tienen una demanda creciente desde el año 2007, en el año 2007 se importaron 3,991 toneladas con un valor CIF de US\$ 4 279, 518. Los principales proveedores del Perú de frutas deshidratadas son los países de Chile y Argentina, constituyéndose nuestro país en el principal importador a pesar de disponer de potencial frutícola que posibilitaría generar oferta para cubrir en primer término el mercado interno así como generar oferta exportable.

### **2.2.1. DEFINICIÓN NOMINAL**

De acuerdo al análisis hay un mercado nacional e internacional creciente para productos horto frutícolas deshidratados, no existe una oferta nacional de productos hortofrutícolas deshidratados estándar, ya que nuestro país importa el 99% de productos deshidratados de Chile y Argentina, a pesar de que tenemos diversos micro climas producción sostenida de frutas y hortalizas, y las PYMES Agro industriales dedicadas a la deshidratación no tienen la tecnología apropiada en sus equipos deshidratadores, para tener una mayor productividad y estandarización del producto.

### **2.2.2. DEFINICIÓN OPERACIONAL**

¿Hasta qué punto el diseño y desarrollo de un sistema de control automático, usando conceptos de Cibernética y Robótica optimizaría el proceso de deshidratado?

### **2.2.3. SUBPROBLEMAS**

**SP1.-** ¿Cómo es el nivel tecnológico en el sistema de control de parámetros de los equipos deshidratadores que tienen las PYMES Agroindustriales?

**SP2.-** ¿Cuáles son los criterios para evaluar los diversos métodos de control de parámetros en los equipos deshidratadores, que permita seleccionar el más óptimo?

**SP3.-** ¿Hasta qué punto la automatización del control de parámetros en el proceso de deshidratación optimiza el proceso?

**SP4.-** ¿Cuáles son las ventajas del diseño de un prototipo de deshidratador con automatización del sistema de control basado en la cibernética y la robótica con relación a los deshidratadores tradicionales que tienen las PYMES Agro Industriales?

## **2.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **2.3.1. OBJETIVO GENERAL**

Diseñar un sistema de control automático para optimizar el proceso de deshidratado a través del uso de la tecnología, introduciendo conceptos de Cibernética y Robótica en el proceso de deshidratación de productos frutícolas.

### **2.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

**OE1.-** Diagnosticar la situación actual de los deshidratadores de frutas con las que opera la agroindustria, mediante la observación de funcionamiento para proponer mejoras.

**OE2.-** Introducir el componente tecnológico en el marco de conceptos de robótica y cibernética para la optimización del proceso de Deshidratado.

**OE3.-** Automatizar el equipo deshidratador para la producción de frutas deshidratadas de las PYMES, utilizando el sistema de control de parámetros del proceso de deshidratación.

**OE4.-** Desarrollar las pruebas de deshidratación utilizando en el proceso un deshidratador automatizado y otro tradicional.

## **2.4. JUSTIFICACIÓN Y DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

La Automatización de procesos industriales todavía no está interiorizado a nivel de los responsables de las PYMES agroindustriales, desarrollándose esta en el concepto de diversificación y producción no planificada, mayormente en el marco de la informalidad.

Al respecto se pudo observar que la actividad productiva de deshidratación de frutas en el Perú se lleva a cabo a nivel de la PYMES, en base a sus

recursos disponibles y con la incorporación del componente tecnológico automático basado en conceptos de robótica y la cibernética en el equipo de mayor relevancia en el funcionamiento de la línea de producción. El aporte más importante de este proyecto es el desarrollo del software de control que es el que va permitir el autocontrol del sistema deshidratador una vez programado los valores de referencia para los parámetros daría como resultado un proceso más óptimo.

## **2.5. MARCO DE REFERENCIA DE LA INVESTIGACIÓN**

La investigación se desarrollo en el taller de Ingeniería Industrial de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de San Martín de Porres en el distrito de la Molina, y la empresa Representaciones Agro Industriales SRL en el distrito de Chorrillos. Los resultados de este proyecto como paquete tecnológico van dirigidos a las PYMES Agro Industriales dedicadas al deshidratado de productos hortofrutícolas del departamento de Lima.

### **Antecedentes a Nivel Nacional.**

La mayoría de fabricantes de deshidratadores en nuestro país priman por un equipo electromecánico con controles básicos de parámetros y no tienen aun una tecnología apropiada.

### **Antecedentes a Nivel internacional**

Existe Fabricantes de deshidratadores en Italia. México y Argentina de gran capacidad y elevado costo y con alta tecnología cuya adquisición no es posible por parte de las PYMES Agro industriales de nuestro medio.

## **2.6. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN**

Se ha planteado para este trabajo una hipótesis general y cuatro sub hipótesis.

## **2.6.1. DEFINICIÓN DE LAS HIPÓTESIS**

**2.6.1.1. HIPOTESIS GENERAL.-** El diseño y desarrollo de un sistema de control automático usando los conceptos de cibernética y robótica lograría la optimización del proceso de deshidratado.

### **2.6.1.2. SUB HIPÓTESIS**

**SH1.-** El diagnóstico de los deshidratadores que tienen las PYMES permitiría conocer el nivel tecnológico del control de parámetros.

**SH2.-** La evaluación de los diferentes métodos de control de parámetros, y conceptos de cibernética y robótica permitiría la selección de componentes tecnológicos adecuados.

**SH3.-** La automatización del control de parámetros, mejoraría el proceso de deshidratado.

**SH4.-** El desarrollo de las pruebas de deshidratación usando un deshidratador automatizado y otro tradicional permitiría demostrar las ventajas de la automatización.

## **2.6.2. DEFINICIÓN CONCEPTUAL DE LAS VARIABLES**

**Para la Hipótesis General:**

**V. Independiente:**

- Diseño y desarrollo de un sistema de control automático usando conceptos de cibernética y robótica.

**Definición:** Es el procedimiento para el diseño de un sistema de control de parámetros, basado en la cibernética donde el software permite la adquisición de datos desde los sensores para procesarlo en base a la lógica del programa, para luego activar los accionamientos mediante conceptos de robótica, según las condiciones y requerimientos del sistema.

**V. Dependiente:**

- Optimización del Proceso de Deshidratado

**Definición:** Es un modelo de control que basado en acciones inteligentes programadas permiten el uso racional de los recursos que se tiene, para permitir la optimización del proceso en el funcionamiento del deshidratador.

### **Para la Subhipotesis1:**

#### **V. Independiente:**

- Diagnostico de los deshidratadores.

**Definición:** Proceso de análisis de los actuales sistemas de control con los que operan los deshidratadores

#### **V. Dependiente:**

-Nivel tecnológico del sistema de control de parámetros.

**Definición:** Procedimiento que permite evaluar y comparar con los indicadores estándares para fijar el rango o nivel de tecnología que se tiene.

### **Para la Subhipotesis 2:**

#### **V. Independiente:**

- Evaluación de los diferentes métodos de control de parámetros y conceptos de robótica y cibernética.

**Definición:** Son conjunto de procesos, componentes y accesorios que permiten su evaluación para ver las ventajas y desventajas de cada método.

#### **V. Dependiente:**

- Selección de componentes tecnológicos adecuados

**Definición:** Procedimiento que permiten evaluar las ventajas de un componente y justificar su aplicación.

### **Para la Subhipotesis 3:**

**V. Independiente:** Automatización del sistema de control de parámetros.

**Definición:** Son acciones que permiten reemplazar tareas rutinarias a través de componentes electrónicos, controlados por software, cuyo funcionamiento depende del programa elaborado y grabado en el sistema.

**V. Dependiente:** Mejora del Proceso del deshidratado.

Son acciones que permiten mejorar el proceso vía programas grabados en el sistema.

**Para la Subhipotesis 4:**

**V. Independiente:** El desarrollo de las pruebas de deshidratación usando un deshidratador automatizado y otro tradicional.

**Definición:** Es un conjunto de procedimientos que permiten realizar pruebas de deshidratación.

**V. Dependiente:** Ventajas de la automatización.

Son acciones que permiten mostrar los resultados del proceso de automatización.

**2.6.3. DEFINICIÓN OPERACIONAL DE LAS VARIABLES**

Para la hipótesis general

Variables	Dimensión	Indicadores
<b>V.I:</b> Diseño y desarrollo de un sistema de control automático usando conceptos de Cibernética y Robótica.	Control	- métodos
<b>V.D:</b> Optimización del proceso de deshidratado	- Proceso -Tiempo	- Índice de comparación - Horas

Para la Subhipótesis1

Variables	Dimensión	Indicadores
<b>V.I:</b> Diagnostico de los deshidratadores	Diagnostico	- Reporte de funcionamiento. - índice de funcionamiento.
<b>V.D:</b> Nivel tecnológico de control de parámetros	Tecnología	- Índices normalizados

Para la Subhipótesis2

Variables	Dimensión	Indicadores
V.I: Evaluación de los diferentes métodos de control de parámetros y conceptos de Cibernética y Robótica.	- Evaluación	-Índice de comparación
V.D: Selección de Componentes tecnológicos adecuados	- Tecnología	-Grado de optimización

Para la Subhipótesis3

Variables	Dimensión	Indicadores
V.I: Automatización del control de parámetros.	-Tiempo de deshidratado	-Horas
V.D: Mejora el proceso de deshidratado	-Consumo de energía	- KWH.

Para la Subhipótesis4

Variables	Dimensión	Indicadores
V.I: Desarrollo de las pruebas de deshidratación usando un deshidratador automatizado y otro tradicional.	- Costo -Tecnología	- Índice de comparación.
V.D: Ventajas de la automatización.	-Tiempo de deshidratado - Costo	- Horas - Nuevos soles.

Fuente: Elaboración propia

## **2.7. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

### **2.7.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN**

Es una investigación aplicada de nivel descriptivo que muestra la optimización del proceso de deshidratado contando con la automatización del control de parámetros.

### **2.7.2. POBLACIÓN Y MUESTRA**

Para el presente estudio se tomó en cuenta la mayoría de PYMES que realizan el proceso de deshidratado dentro del ámbito del departamento de Lima, quienes tienen como equipo fundamental al deshidratador, entonces al realizar el estudio de estas empresas se puede generalizar o transferir los avances de la investigación a las empresas dedicadas a esta labor a nivel nacional e internacional.

### **2.7.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS**

Entre las técnicas e instrumentos que se usaron se tiene:

**La observación,** Como la investigación es de carácter tecnológico, la observación de los fenómenos y luego el registro de datos en una guía previamente preparada se adecua perfectamente al tipo de investigación que se tiene.

**Las entrevistas,** Como otra fuente de información acerca del estado de las empresas Agro industriales se realizaron entrevistas en dos niveles:

A los gerentes para tener su opinión al respecto.

Al personal técnico operativo que trabaja con el deshidratador directamente para tener información, acerca del funcionamiento del equipo.

Para este procedimiento se preparó un formato de entrevista diferente para los gerentes y el personal técnico por qué se quiere obtener diferente tipo de información.

**La experimentación,** Esta técnica es de suma importancia para esta investigación ya que se realizará simulaciones de funcionamiento de los diversos métodos de control. Así mismo luego de la implementación se realizó, pruebas de puesta en marcha del equipo y reajustes del diseño. También se realizará varias corridas del proceso de deshidratado de diversos tipos de frutas y hortalizas con la finalidad de establecer el mejor programa de secado para un producto lo cual permitirá la repetitividad del proceso.

#### **2.7.4. ANÁLISIS Y TRATAMIENTO DE LOS DATOS**

Se usará la técnica del análisis documental, y análisis cuantitativo que consiste en elaborar tablas estadísticas como resultado de la experimentación y simulación la cual debe ser interpretada y tomada como referencia para mejorar el proceso de Deshidratado.

## **CAPITULO III**

### **ENFOQUE SISTEMICO DEL PROCESO DE DESHIDRATADO DE FRUTAS**

#### **3.0. Proceso de deshidratado de frutas**

Desde el punto de vista de enfoque sistémico el sistema de deshidratado de frutas, esta interrelacionado con otros sistemas tales como:

**El Sistema alimentario**, que requiere contar con productos deshidratados de buena calidad para el régimen alimenticio de las personas.

**El sistema de salud**, que necesita un alimento sano libre de grasas, azúcar y sustancias nocivas para la salud.

**El sistema laboral** necesita de la creación de nuevos puestos de trabajo, la cadena productiva relacionada con la deshidratación de productos genera puestos de trabajo.

**El sistema agrícola**, debe producir productos frutícolas de excelente calidad para la deshidratación, para ello debe contar con buenas semillas, tierras de cultivo, buenas técnicas de tratamiento contra las plagas, y sistema de riego adecuado.

**El Sistema energético**, que proporciona energía al sistema de deshidratación para su funcionamiento y cumplir con su objetivo.

**El sistema de industrias Químicas**, que proporcionan los insumos químicos requeridos para el tratamiento y acondicionamiento de las materias primas para el proceso de deshidratado.

**Medio ambiente**, El sistema de deshidratación de frutas realiza un intercambio de aire húmedo que sale del sistema hacia el medio ambiente e ingresa aire seco desde el medio ambiente.

En la fig. 3.1 se muestra las relaciones entre los sistemas mencionados.

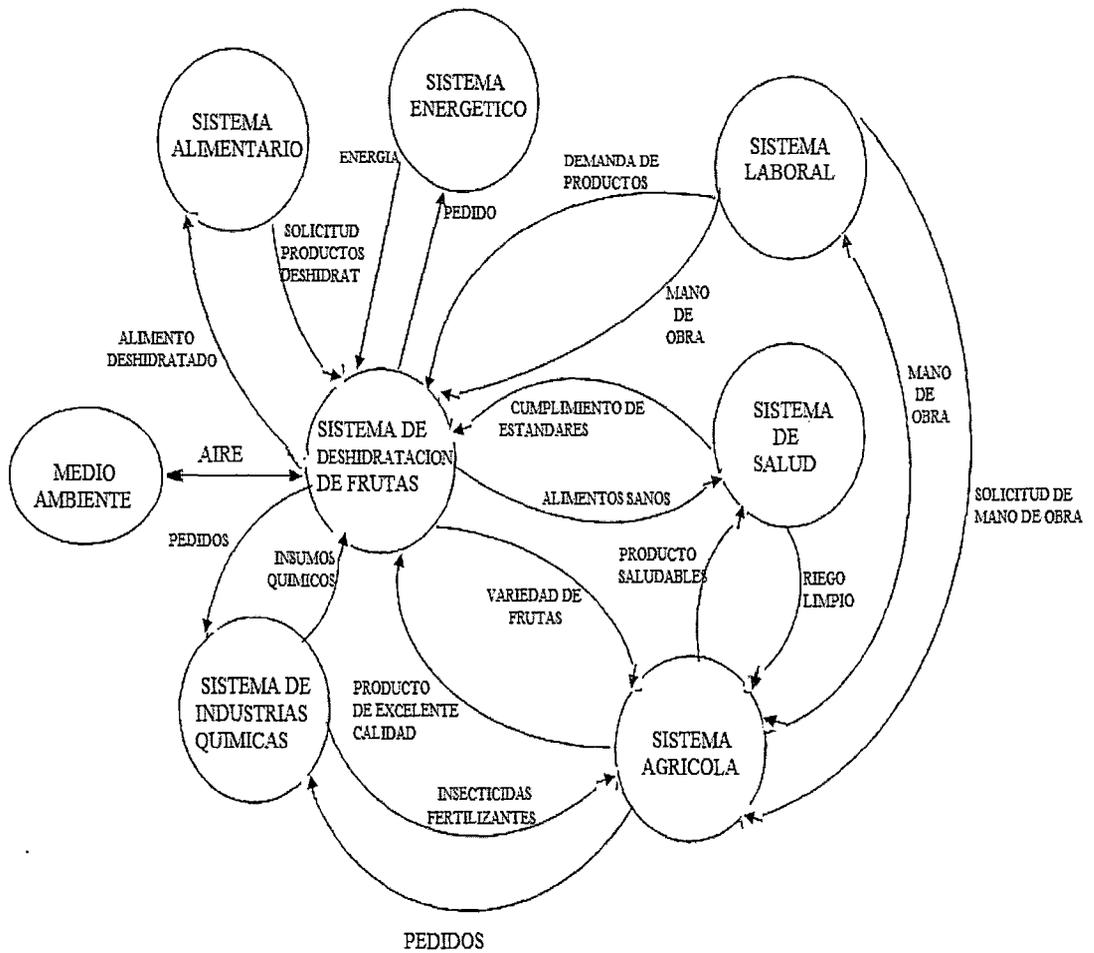


Fig. 3.1 Diagrama de Contexto de un Sistema de deshidratado de Frutas

### 3.1 SISTEMA DE DESHIDRATADO DE FRUTAS

El sistema de deshidratado de frutas tiene como entradas:

**La materia prima**, que es proporcionada por el sistema agrícola, la calidad de la materia prima influye directamente en calidad del producto final.

**La mano de obra**, que es proporcionada por el sistema laboral cumple una función muy importante, porque es necesario el operador para realizar la

programación del equipo y hacer el seguimiento del funcionamiento durante el proceso, así mismo es necesario la mano de obra para los procesos de pesado, selección, lavado, cortado y tratamiento con insumos químicos, también para la colocación de la fruta troceada en las bandejas y su colocación respectiva en las porta bandejas del equipo deshidratador.

**Insumos químicos,** Proporcionado por las empresas de industrias químicas y que sirven para el tratamiento de las frutas troceadas.

**Equipo deshidratador,** El equipo deshidratador cumple una función muy importante en el sistema, ya que en dicho equipo se realiza el proceso de deshidratado de las frutas.

**La energía,** La energía es proporcionada desde el sistema energético, sirve para energizar los componentes eléctricos y electrónicos del sub sistema de control, también se transforma en energía térmica en las resistencias del mecanismo de calefacción que permiten el calentamiento del aire cada vez que ingresa a la cámara de secado del deshidratador.

Así mismo la energía también hace funcionar los motores de los ventiladores axiales, centrífugo y del mecanismo de intercambio del aire.

**El aire,** cumple una función muy importante en el proceso ya que el aire caliente que pasa a través del producto transfiere calor para que el agua contenido en el producto pueda salir como vapor.

El aire absorbe la humedad del producto y lo evacua al medio ambiente

**Como salida** el sistema entrega producto deshidratado, con un cierto porcentaje de humedad final apto para ser consumido, almacenado o procesado para otros fines.

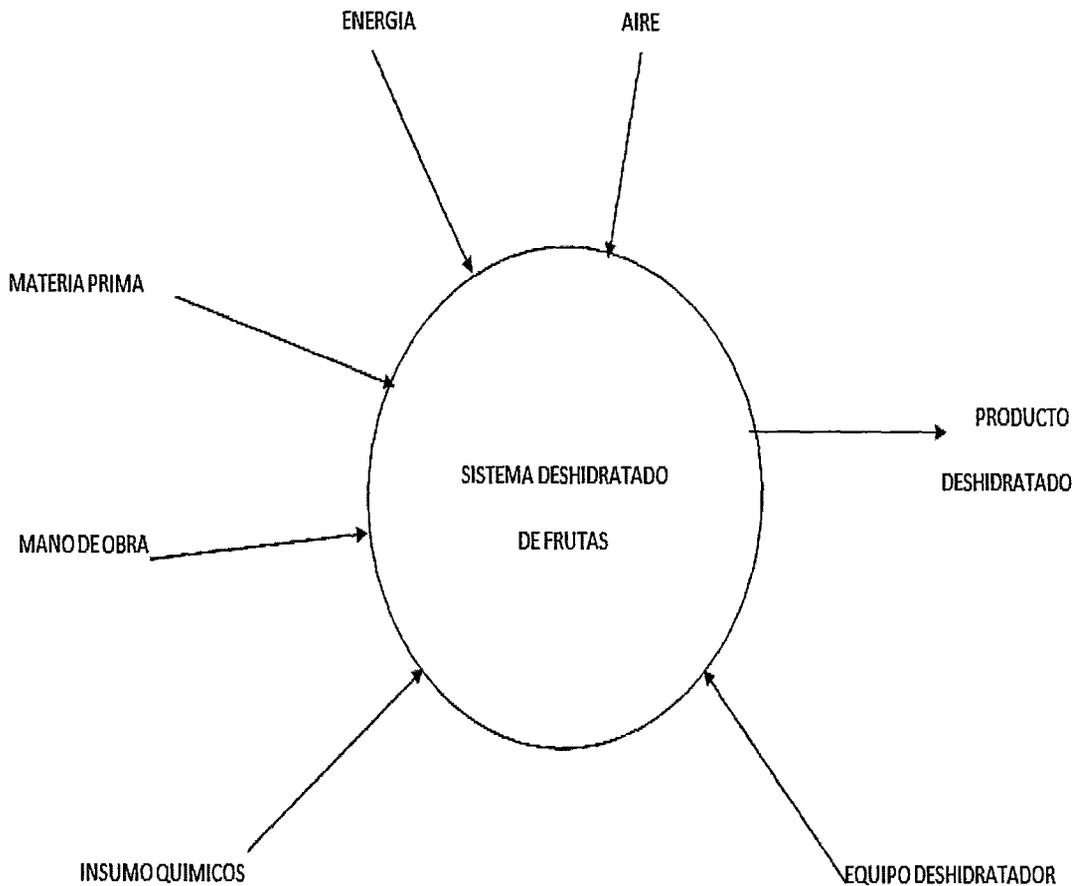


Fig. 3.2 Sistema de deshidratado de frutas

### 3.2 SUB SISTEMAS DEL SISTEMA DE DESHIDRATADO DE FRUTAS

El sistema de deshidratado de frutas consta de cinco sub sistemas que son:

**El sub sistema de acondicionamiento de materia prima**, cuya función es la preparación y tratamiento de la materia prima antes de ingresar al equipo deshidratador, la preparación involucra: la recepción, selección, lavado, cortado y tratamiento químico de la fruta.

**El sub sistema de mano de obra**, cuya función es realizar la programación del equipo deshidratador para su funcionamiento, también realizar las actividades relacionadas con el acondicionamiento de la materia prima.



### 3.3 SUB SISTEMAS DEL EQUIPO DESHIDRATADOR

El equipo deshidratador tiene las siguientes partes:

**Cabina deshidratadora**, cuya función es almacenar la materia prima acondicionada, interactuar con los demás componentes para cumplir con el objetivo propuesto.

**Sensores**, tienen la función de sensar el valor de los parámetros en el deshidratador acondicionar las señales y proporcionar la información del estado de los sensores al sub sistema de control.

**El control**, cuya función es recibir la información de los diferentes tipos de sensores, analizar la lógica de programación y generar señales de control para tomar las acciones en los actuadores.

**Actuadores**, tienen la función de realizar acciones sobre los motores, contactores, TRIACs y mecanismo de intercambio del aire dependiendo de las señales que proporciona el sub sistema de Control.

**Mecanismo de Recirculación del aire**, cuya función es mantener circulando constantemente el aire caliente dentro de la cabina deshidratadora y a través del ducto de recirculación del aire con la finalidad de que pase por las rodajas de frutas colocadas en las bandejas dentro de la cabina deshidratadora y así realizar la transferencia de calor a la fruta.

**Mecanismo de calefacción**, tiene la función de calentar el aire cada vez que ingresa a la cabina deshidratadora mediante resistencias de calefacción.

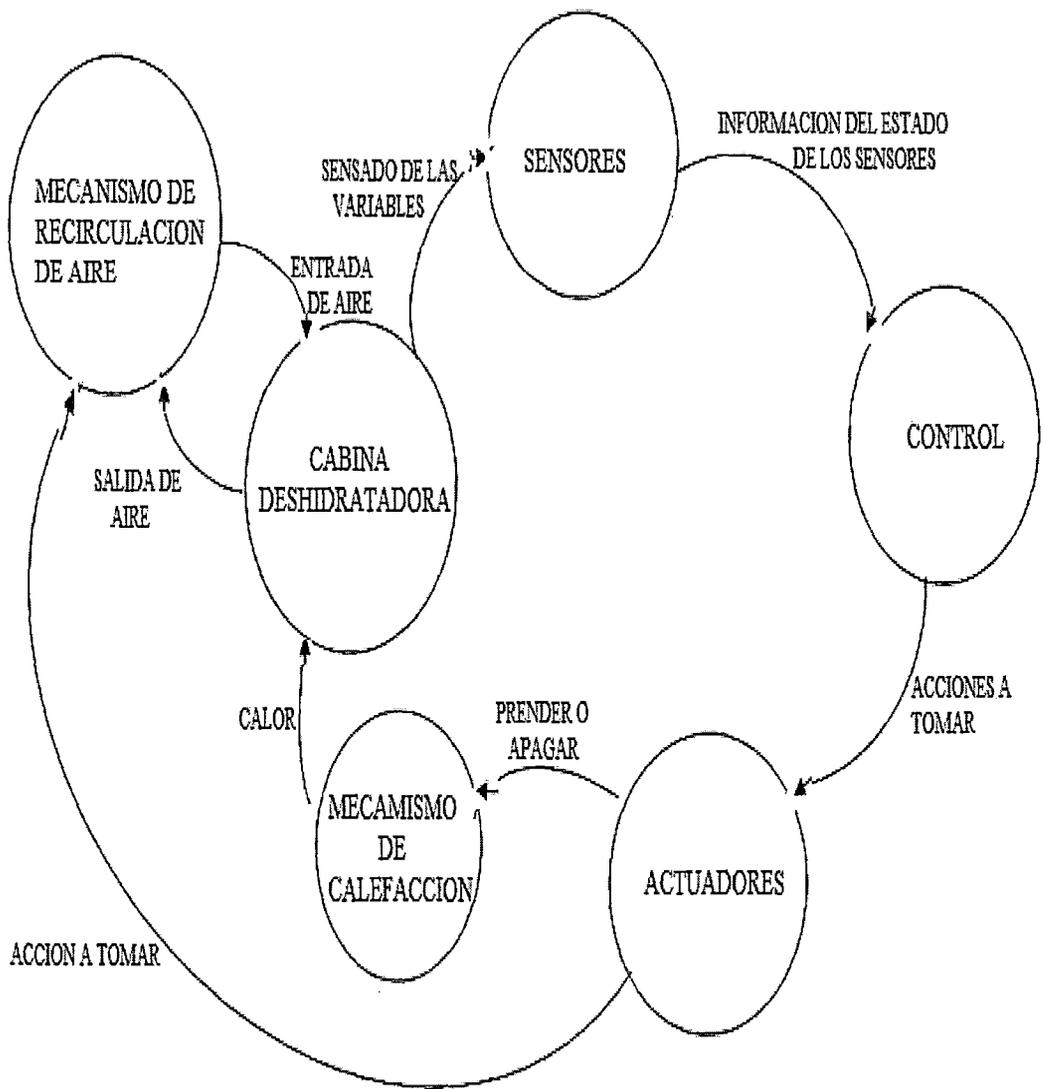


Fig. 3.4 Subsistemas del equipo deshidratador

### 3.4 COMPONENTES DEL SUB SISTEMA DE CONTROL

El sub subsistema del control tiene las siguientes partes:

**El procesador**, tiene la función de recibir la información proveniente desde los sensores de temperatura, humedad relativa y de peso, cuyos valores de los diferentes parámetros son convertidos de señal analógica a señal digital para realizar el procesamiento de acuerdo a los algoritmos del programa almacenados en su memoria.

**Sensor de temperatura**, Tiene la función de monitorear este parámetro dentro de la cabina deshidratadora, realizar la transducción a señal eléctrica y entregar al procesador para que realice el procesamiento de esta información.

**Sensor de humedad relativa**, cuya función es monitorear el valor de este parámetro en el aire que recircula, ya que el aire al pasar constantemente a través del producto va absorbiendo la humedad de la fruta, luego de realizar la transducción, esta señal es entregada al procesador.

**Sensor de peso**, tiene la función de realizar la transducción de este parámetro del peso de la muestra representativa dentro de la cabina deshidratadora, que es entregada al procesador para que realice el procesamiento mediante el algoritmo del programa.

**Actuadores**, cuya función es realizar las acciones sobre los componentes involucrados con el cierre o apertura de los contactores para el manejo de los motores, el mecanismo de activación y desactivación del circuito de calefacción y el apagado del equipo deshidratador al cumplirse las condiciones realizadas durante la programación del funcionamiento del equipo.

**Temporización**, tiene la función de controlar las rutinas de tiempo que necesitan las diferentes partes del equipo deshidratador, así mismo mantener el tiempo programado para las diferentes fases del proceso.

**Unidad de visualización**, tiene la función de mostrar en todo momento los valores de los parámetros que se está monitoreando en el proceso, así mismo los valores de los parámetros de referencia programados al inicio del proceso.

**Fin de Proceso**, tiene la función de verificar las condiciones programadas y dar por finalizado el proceso apagando el equipo deshidratador.

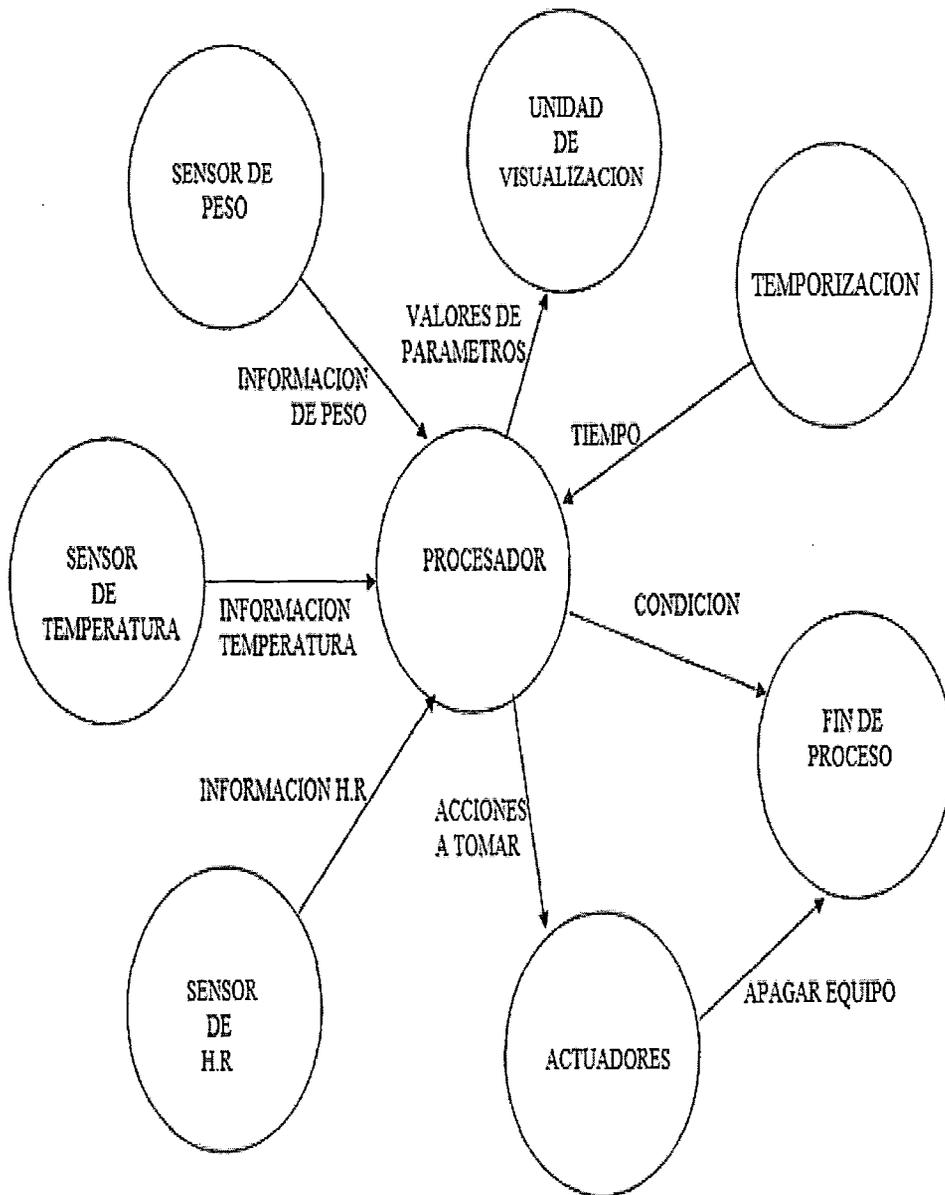
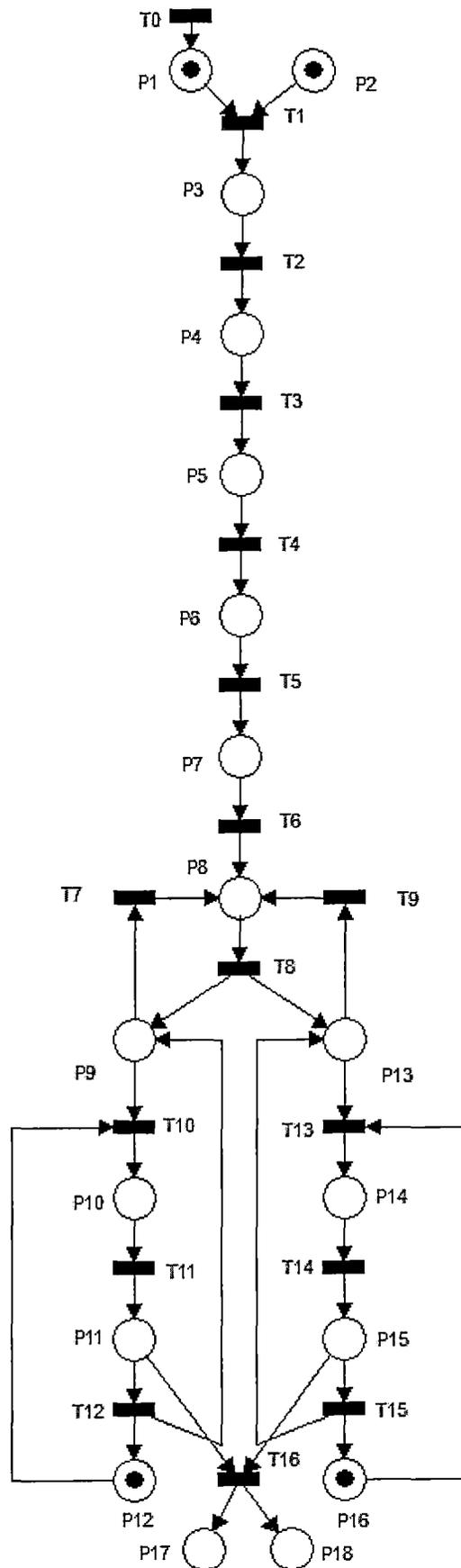


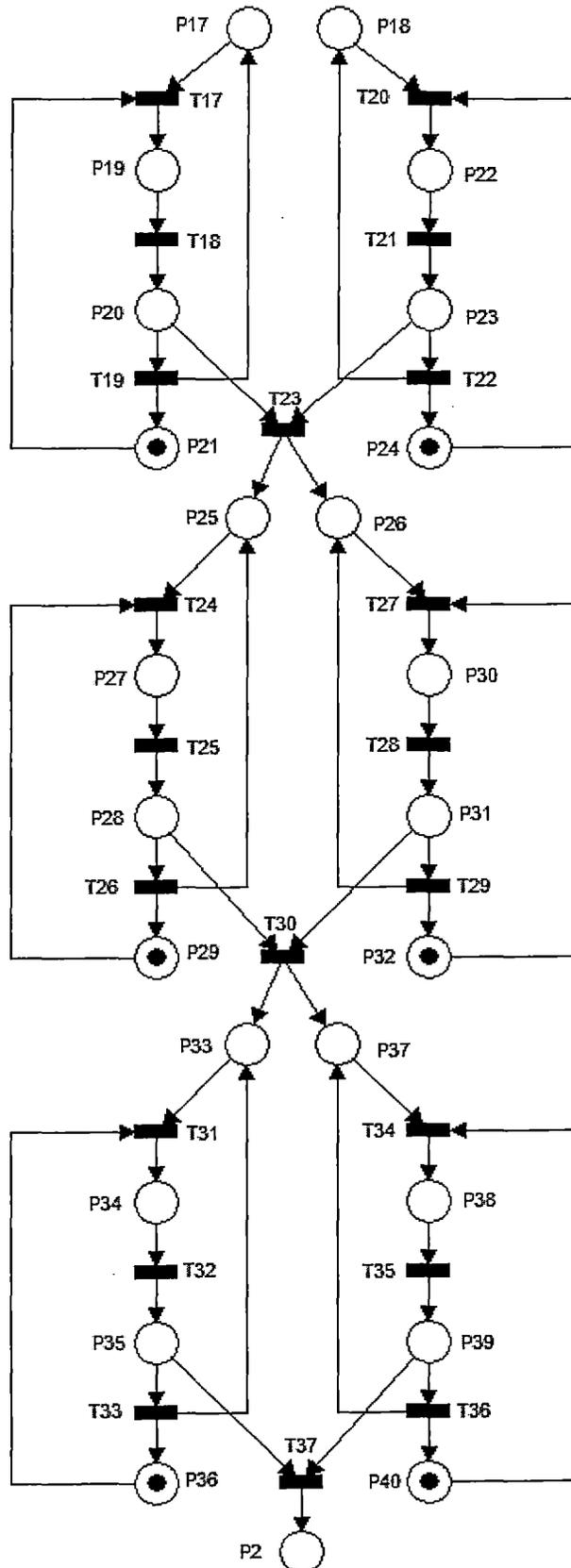
Fig 3.5 Componentes del Subsistema de control

### **3.5 MODELO DEL PROCESO DE DESHIDRATADO MEDIANTE REDES DE PETRI**

Las Redes de Petri (PN), como se describe en el marco teórico constituye una herramienta gráfica y matemática para la descripción y estudio del comportamiento de Sistemas Dinámicos de Eventos Discretos.

El caso del proceso de deshidratación de frutas, donde se tiene diferentes subprocesos ejecutándose en forma concurrente y en tiempo real las redes de Petri permitió el modelado tal como se muestra en el siguiente gráfico.





Graf 3.1 Red de Petri del sistema de deshidratado de frutas

## ESPECIFICACION DE LOS LUGARES

P1= Orden de deshidratado esperando

P2= Deshidratador libre

P3= Llenando bandejas

P4= Espera

P5= Programación de fases y parámetros

P6= Espera

P7= Espera

P8= Motor centrifugo, Motor axial funcionando

P9= Cargando parámetros de Humedad relativa para fase 1

P10= Motor cerrando compuerta de intercambio de aire para fase 1

P11= Motor abriendo compuerta de intercambio de aire para fase 1

P12= Espera

P13= Cargando parámetros de temperatura para fase 1

P14= Resistencia funcionando para fase 1

P15= Resistencia apagada para fase 1

P17= Cargando parámetros de Humedad relativa para fase 2

P18= Cargando parámetros de temperatura para la fase 2

P19= Motor cerrando compuerta de intercambio de aire para fase 2

P20= Motor abriendo compuerta de intercambio de aire para fase 2

P21= Espera

P22= Resistencia funcionando para fase 2

P23= Resistencia apagada para fase 2

P24= Espera

P25= Espera

P26= Cargando Parámetros para fase 3

P27= Motor cerrando compuerta de intercambio de aire para fase 3

P28= Motor abriendo compuerta de intercambio de aire para fase 3

P29= Espera

P30= Resistencia funcionando para fase 3

P31= Resistencia apagada para fase 3

P32= Espera

P33= Espera

P34= Motor cerrando compuerta de intercambio de aire para fase 4

P35= Motor abriendo compuerta de intercambio de aire para fase 4

P36= Espera

P37= Parámetros F4 cargando

P38= Resistencia funcionando para fase 4

P39= Resistencia apagada para fase 4

P40= Espera

## **ESPECIFICACION DE LAS TRANSICIONES**

T1= Comienzo de llenado de bandejas

T2= Fin de llenado de bandejas

T3= Inicio de programación de parámetros

T4 =Fin de programación de parámetros

T6 =Se presiona el pulsador de inicio de proceso (Start)

T10 =Humedad relativa actual menor que humedad relativa programada  
fase1 ( $H_r < H_{rF1}$ )

T11=Humedad relativa actual mayor que humedad relativa programada  
fase1 ( $H_r > H_{rF1}$ )

T12=Tiempo de proceso menor que tiempo programado fase 1 ( $T_{ip} < T_{iF1}$ )

T13=Temperatura actual menor que temperatura programada para fase 1  
( $T < T_{F1}$ )

T14=Temperatura actual mayor que temperatura programada para fase 1  
( $T > T_{F1}$ )

T15 =Tiempo de proceso menor que tiempo programado fase 1 ( $T_{ip} < T_{iF1}$ )

T16 =Tiempo de proceso igual que tiempo programado fase 1 ( $T_{ip} = T_{iF1}$ )

T17=Humedad relativa actual menor que humedad relativa programada  
Fase 2 ( $H_r < H_{rF2}$ )

T18=Humedad relativa actual mayor que humedad relativa programada  
Fase 2 ( $H_r > H_{rF2}$ )

- T19=Tiempo de proceso menor que tiempo programado fase 2 (Tip <TiF2)
- T20= Temperatura actual menor que temperatura programada para fase 2  
(T < TF2)
- T21=Temperatura actual mayor que temperatura programada para fase 2  
(T > TF2)
- T22= Tiempo de proceso menor que tiempo programado fase 2 (Tip <TiF2)
- T23= Tiempo de proceso igual que tiempo programado fase 2 (Tipo =TiF2)
- T24= Humedad relativa actual menor que humedad relativa programada  
Fase 3 (He < HrF3)
- T25= Humedad relativa actual mayor que humedad relativa programada  
Fase 3 (He > HrF3)
- T26= Tiempo de proceso menor que tiempo programado fase 3 (Tipo <TiF3)
- T27= Temperatura actual menor que temperatura programada para fase 3  
(T < TF3)
- T28= Temperatura actual mayor que temperatura programada para fase 3  
(T > TF3)
- T29= Tiempo de proceso menor que tiempo programado fase 3 (Tipo <TiF3)
- T30= Tiempo de proceso igual que tiempo programado fase 3(Tipo =TiF3)
- T31= Humedad relativa actual menor que humedad relativa programada  
Fase 4 (He < HrF4)
- T32= Humedad relativa actual mayor que humedad relativa programada  
Fase 4 (He > HrF4)
- T33=Tiempo de proceso menor que tiempo programado fase 4 (Tipo <TiF4)
- T34= Temperatura actual menor que temperatura programada para fase 4  
(T < TF4)
- T35= Temperatura actual mayor que temperatura programada para fase 4  
(T > TF4)
- T36= Tiempo de proceso menor que tiempo programado fase 4 (Tipo <TiF4)
- T37= Tiempo de proceso igual que tiempo programado fase 4 (Tipo =TiF4)

## **CAPITULO IV**

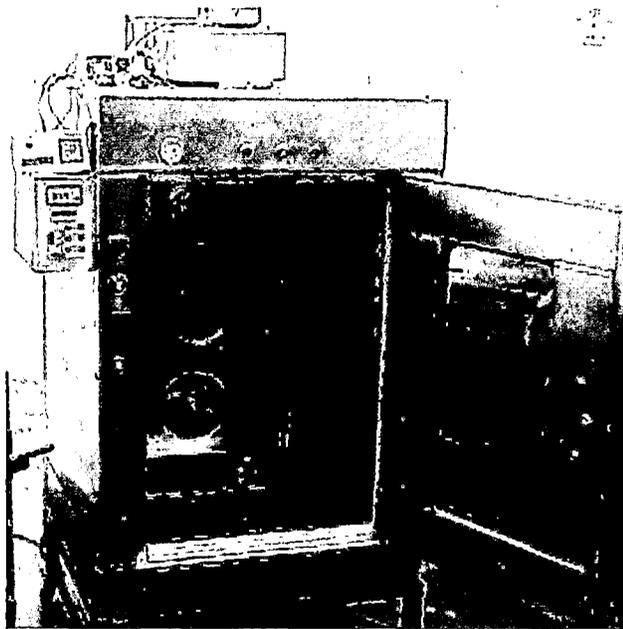
### **ANTECEDENTES DEL PROYECTO**

#### **4.0. ANTECEDENTES**

Como antecedente al proyecto en el 2003 se desarrollo un trabajo de investigación denominado automatización digital de un deshidratador de cabina por un equipo multidisciplinario de la escuela profesional de ingeniería industrial de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la USMP En dicho proyecto el deshidratador tuvo la configuración básica que consiste en:

- a.- Una cabina con 10 bandejas sobre las cuales se colocan frutas u hortalizas troceadas.
- b.- Un ventilador centrífugo, cuya función es hacer recircular el aire que se encuentra dentro de la cabina, el aire es calentado a la entrada del deshidratador mediante una fuente de calor, La circulación del aire caliente a través del producto permite quitar el agua desde el producto.
- c.- Ventiladores Axiales, cuya función es homogenizar la circulación del aire dentro de la cabina deshidratadora.
- d.- Fuente de calefacción, formada por resistencias eléctricas, que sirven para calentar el aire que ingresa a la cabina, el encendido y apagado de las resistencias es controlado mediante el control ON/OFF, dependiendo de las condiciones de temperatura dentro de la cabina.
- e.- El sensor de temperatura, colocado dentro de la cabina, cuya función es informar a la unidad de control acerca de la temperatura dentro de la cabina deshidratadora.

- f.- Sensor de humedad relativa colocado en el ducto de recirculación del aire cuya función es informar al microcontrolador a cerca del valor de la humedad relativa que tiene el aire dentro de la cabina deshidratadora.
- g.- Compuerta de intercambio de aire con funcionamiento manual
- h.- Módulo de control.
- i.- Panel de Control.



**Fig. 4.1 Deshidratador de cabina**

#### **4.1. AUTOMATIZACIÓN DEL CONTROL DE PARÁMETROS DEL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN**

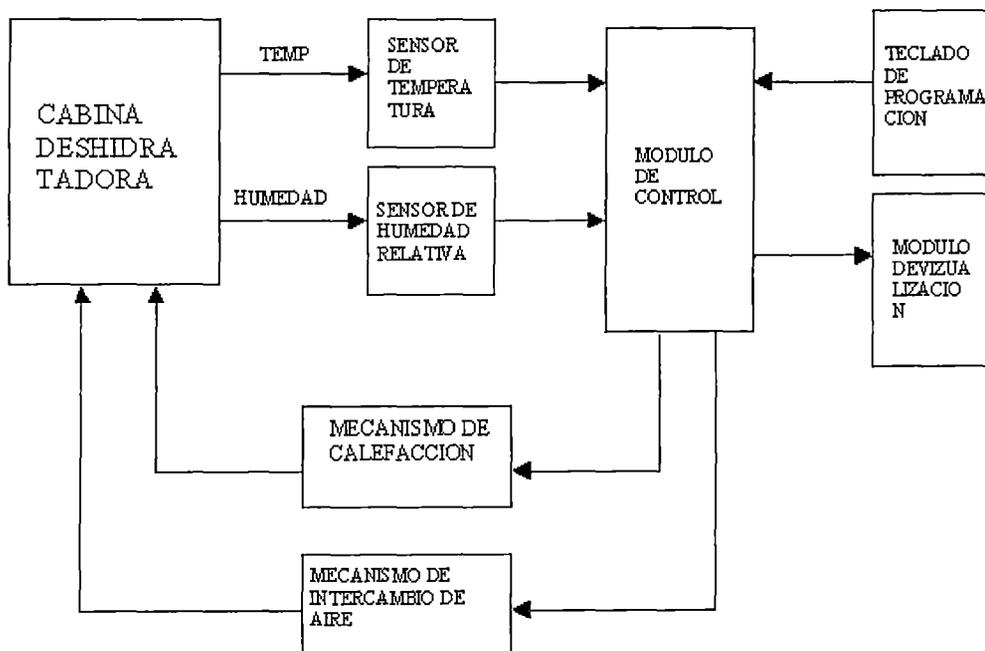
Los parámetros monitoreados dentro de la cabina deshidratadora, fueron: Temperatura y Humedad relativa.

El diagrama de bloques del deshidratador de cabina automatizado se presenta en el gráfico N° 4.2 En dicha figura se puede observar, para el control de las mediciones de estos parámetros, se diseñó un sistema de

control basado en un microcontrolador PIC de Microchip, cuyo diagrama del circuito se presenta en la fig. 4.3

El microcontrolador recibe la información desde el sensor de temperatura y acciona los actuadores del mecanismo de calefacción que funcionan mediante el control ON/OFF.

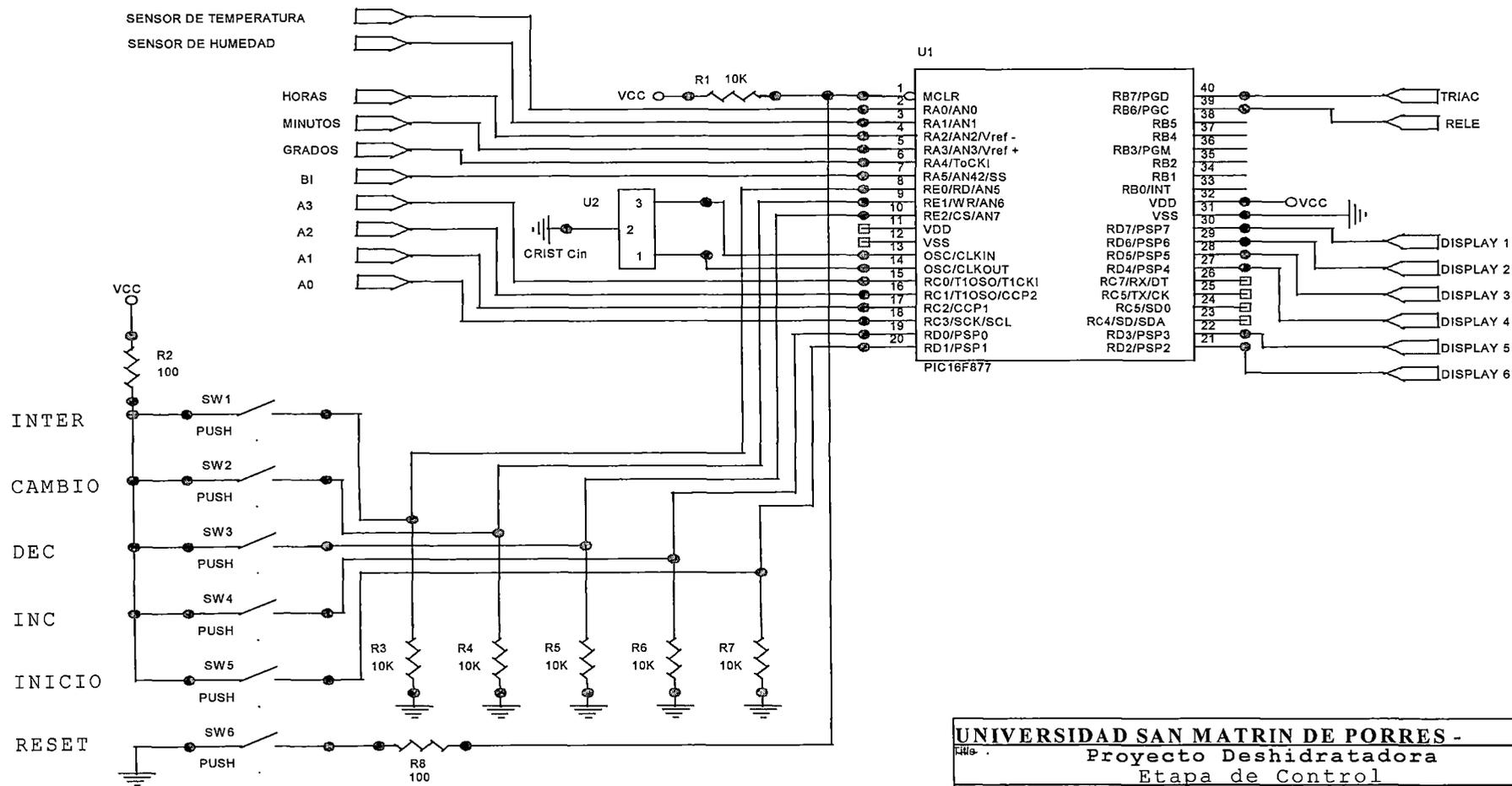
La compuerta de intercambio de aire se acciona manualmente, cuando los niveles exceden al valor de humedad relativa programada para el proceso que se va observando en el indicador respectivo.



**Fig. 4.2 Diagrama de bloques del Deshidratador Automatizado**

Fig. 4.3

CIRCUITO DE CONTROL CON EL PIC16F877



UNIVERSIDAD SAN MATRIN DE PORRES -		
Proyecto Deshidratadora		
Etapa de Control		
Size	Document Number	Rev
A4	PJT-001-01-C	
Date:	Sheet	1 of 6

## 4.2 FUNCIONAMIENTO DEL DESHIDRATADOR AUTOMATIZADO.

El proceso de deshidratado de frutas y hortalizas se hace por etapas o fases donde inicialmente para cada fase se programa los valores de referencia para los parámetros a controlar, estos valores debido al funcionamiento del sistema empiezan a variar con el tiempo, por ejemplo la temperatura y la humedad relativa debido a la vaporización del agua que se encuentra en el producto. El sistema de control debe mantener dichos valores programados durante el tiempo indicado.

Cada producto tiene su programa óptimo de secado, para lo cual se debe programar los parámetros tal como se muestra.

FASE	T °C	HR %	TI hrs
F1	30	90	2
F2	35	85	3
F3	40	80	2.5
F4	45	75	3

Donde:

F1,..F4: son las distintas fases del proceso.

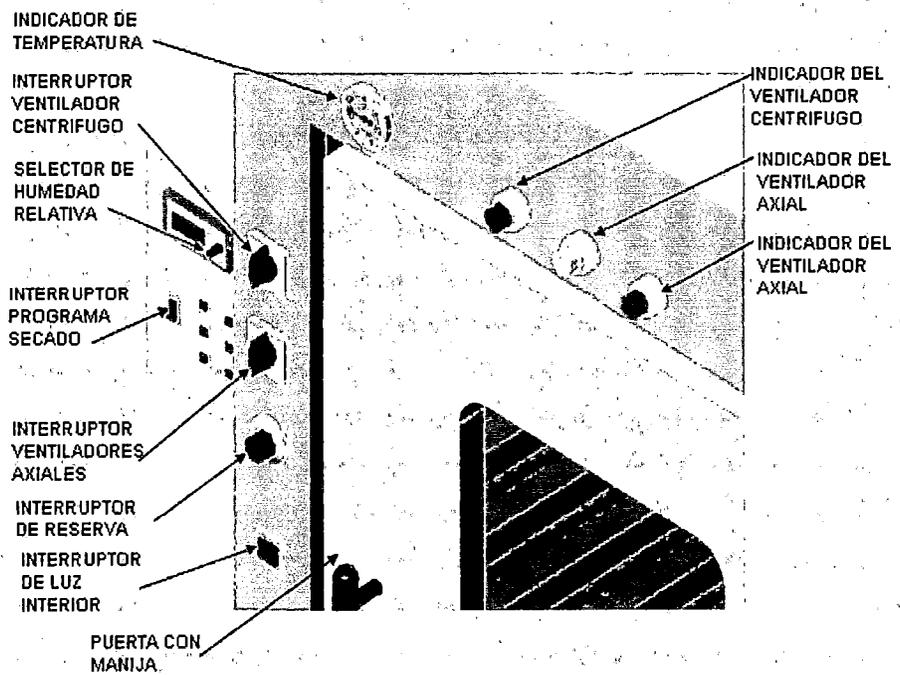
T °C: Temperatura dentro de la cabina

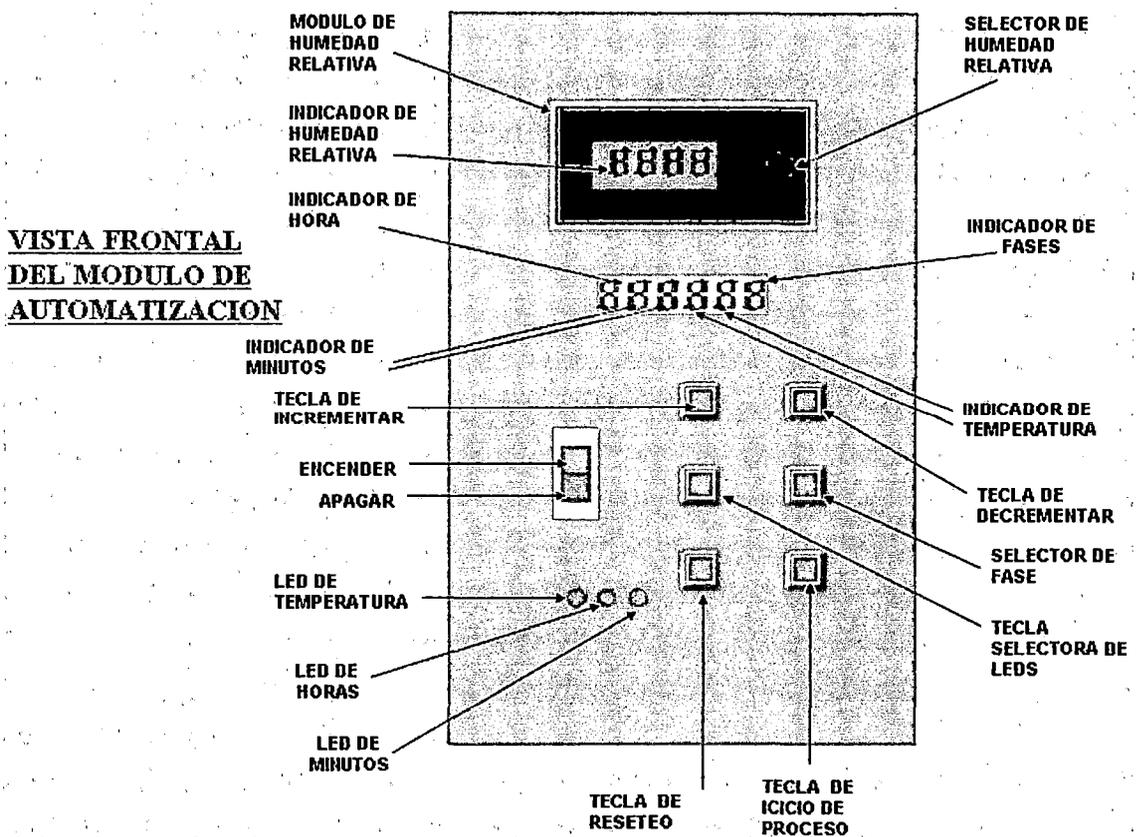
HR. Humedad relativa dentro de la cabina

TI. Tiempo durante el cual se debe mantener los parámetros de Temperatura y humedad relativa en los valores programados Respectivamente.

Fig. 4.4

**DESCRIPCION DE LOS INDICADORES ELECTRONICOS Y  
DISPOSITIVOS DE ACCIONAMIENTO DE LA CABINA  
DESHIDRATADORA**





**Fig. 4.5 Panel de Control y Visualización**

#### 4.2.1 MANEJO DEL PANEL DE CONTROL

El panel de control y visualización se muestra en la parte superior una pantalla LCD para indicar la humedad relativa.

Debajo del LCD se tiene un display de 7 segmentos acondicionados para mostrar 6 dígitos. Estos se localizan en forma consecutiva de derecha a izquierda para indicar:

- Número de fase : (1 dígito)
- Temperatura en grados centígrados: (2 dígitos)
- Tiempo correspondiente a minutos : (2 dígitos)
- Tiempo correspondiente a horas : (1 dígito)

La implementación del programa de secado se logra mediante el siguiente procedimiento:

1. Al encender el control de ON/OFF o al Pulsar el botón "RESET", aparece el número 1 en el display correspondiente a la fase, presionando la tecla INCR se puede incrementar el número de fases hasta un máximo de 4.
2. Pulsar el botón "CAMBIO" que enciende uno de los tres leds que registran de derecha a izquierda:
  - Tiempo en minutos: (m)
  - Tiempo en horas : (H)
  - Temperatura : (°C)Se continuará pulsando hasta que quede prendido el led correspondiente al tiempo en minutos (m), quedando apto el sistema para programar los minutos.
3. Se programa el valor para los minutos requeridos para la primera fase, aumentando o disminuyendo pulsando respectivamente las teclas "INCRE" o "DECRE".
4. Para programar el número de horas se procede como en el paso 2 hasta que el led indicador de horas (H) se encienda, quedando apto el sistema para programar las horas requeridas.
5. Para programar la temperatura se procede como en el paso 2, hasta que el led indicador de temperatura (°C) se encienda, quedando apto el sistema para programar la temperatura.
6. Se programa la referencia para la humedad relativa en el controlador correspondiente.
7. Se continúa con la programación de las otras fases con sus respectivos parámetros de tiempo, temperatura y humedad relativa, procediéndose como en los pasos 2 al 6.
10. Pulsar la tecla "FASES" hasta obtener el número 1 que corresponde a la primera fase.
11. Para dar inicio al proceso de deshidratación finalmente se pulsará el Botón RUN.

## **CAPITULO V**

### **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO PARA LA OPTIMIZACION DEL PROCESO DE DESHIDRATADO**

#### **5.0. RAZONES PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO DE AUTOMATIZACION BASADO EN LA CIBERNETICA Y LA ROBOTICA**

Después de una evaluación del funcionamiento de la versión presentada en el capítulo IV como antecedentes del proyecto.

Frente a una problemática presentada por las PYMES dedicadas a la deshidratación de frutas y teniendo la configuración básica del deshidratador mencionado en el capítulo IV donde la automatización del control de temperatura, se basó en un control ON/OFF, para el manejo del sistema de calefacción con lo cual se tenía un cambio de la temperatura, en forma brusca que no era lo deseable para el proceso.

En lo que respecta al control de humedad relativa se utilizó un controlador que permitía la lectura y luego manejar en forma manual el mecanismo de intercambio de aire.

En lo referente a la humedad final del producto las pruebas se realizaban exteriormente, extrayendo y pesando las muestras.

Todas estas operaciones han motivado introducir nuevos conceptos y técnicas para mejorar el funcionamiento del deshidratador que constituye el elemento relevante dentro del proceso de deshidratación de frutas.

Por todo lo mencionado anteriormente se ha visto por conveniente realizar el proyecto presentado

## **5.1. CARACTERÍSTICAS Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS**

- Para el control de temperatura el sistema de conmutación es controlado por Dispositivos de estado sólido (TRIACs)
  - Para el control de humedad relativa los actuadores son controlados mediante contactores.
  - Indicadores luminosos con focos de Neón que indican el estado de conmutación de la compuerta de intercambio de aire y la conmutación de los dispositivos de estado sólido para el control de temperatura.
  - Sistema de Visualización mediante pantalla LCD, que muestra el valor de los parámetros en cada instante, así mismo los valores de referencia programados y la fase en que se encuentra el proceso.
  - Teclado matricial para la programación de los valores de referencia para los parámetros.
  - El circuito de control está basado en un microcontrolador que toma las decisiones en base a las señales entregadas por los sensores y la lógica del programa que se encuentra almacenado en su memoria.
- El circuito de control, se encuentra aislada de las etapas de potencia mediante opto acopladores lo que reduce la posibilidad de fallas y hacer más seguro un servicio de mantenimiento o reparación.
- Filtro de línea contra interferencias de altas frecuencias
  - El sistema es modular, el uso de conectores permite un cómodo ensamblaje y en caso de fallas una rápida sustitución del módulo defectuoso.

## **5.2 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL DESHIDRATADOR MEJORADO**

Antes de entrar en detalles, es conveniente tener una visión en conjunto. Mediante un diagrama de bloques que se muestra en la fig. 5.1, a continuación se describe cada componente del diagrama.

- Cabina deshidratadora, Es el ambiente donde se tiene 10 bandejas de 1m x1m. Y separadas 10 cm. entre cada una de ellas, en cada bandeja se coloca la fruta troceada en rodajas u hortalizas, a través de estas bandejas circula aire caliente que transfiere calor a las rodajas de frutas mediante la

cual se obliga a salir el contenido de agua de las frutas desde el interior hacia la superficie.

En la parte superior de la cabina se encuentra un ventilador centrífugo cuya función es hacer recircular el aire dentro de la cabina deshidratadora.

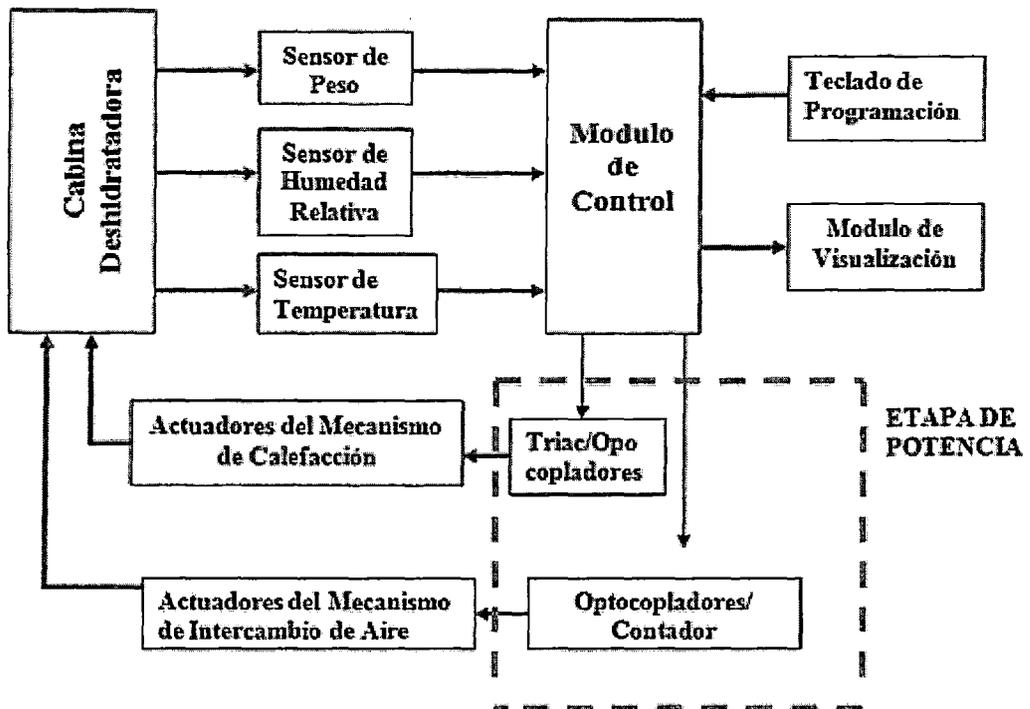


Fig. 5.1 Diagrama de bloques del deshidratador Mejorado.

En la parte inferior tiene un mecanismo de calefacción, cuya función es calentar el aire cada vez que pasa por la parte inferior de la cabina, el aire recircula a través de un ducto colocado en el exterior de la cabina entre el ventilador centrífugo y el sistema de calefacción.

Al salir vapor de agua desde la fruta u hortaliza aumenta la humedad relativa del aire dentro de la cabina deshidratadora, para controlar este aumento se realiza un intercambio entre el aire cargado de humedad que se encuentra dentro de la cabina con el aire del exterior con menor porcentaje de humedad, esto se hace a través de la compuerta de intercambio de aire.

La cabina contiene tres ventiladores axiales colocados en la parte posterior interna con la finalidad de homogenizar la recirculación del aire dentro de la cabina deshidratadora.

- Módulo de Control.

Es la parte más importante del sistema y está constituido por un Microcontrolador PIC de Microchip, cuya función es almacenar en su memoria el programa de control desarrollado en lenguaje ensamblador del microcontrolador.

Este programa ha sido desarrollado para una aplicación específica del equipo deshidratador de frutas y hortalizas. El módulo de control recibe información desde el sensor de temperatura, el sensor de humedad relativa y el sensor de peso, esta información es entregada al microcontrolador a través de sus entradas analógicas, la cual es tomada por las rutinas del programa que están permanentemente en ejecución, luego de procesarlas y comparar los valores de los parámetros sensados con los valores de referencia programados, ordena a los actuadores dependiendo de las condiciones previamente establecidas durante la programación.

- Sensor de temperatura.

Realiza la transducción del valor de la temperatura dentro de la cabina y entrega esta información al microcontrolador, este sensor se encuentra ubicado dentro de la cabina deshidratadora.

- Sensor de humedad relativa.

Realiza la transducción del valor de humedad relativa del aire que se encuentra dentro de la cabina y entrega al microcontrolador a través de una de las entradas analógicas, este sensor se encuentra ubicado en el ducto de recirculación del aire.

-Sensor de peso.

Entrega información al microcontrolador, para que a través del algoritmo de la subrutina calcule la humedad final del producto y realice las acciones correspondientes.

- Módulo de opto acopladores TRIAC.

Este bloque permite aislar el sistema de control del sistema de potencia ya que están trabajando a diferentes niveles de voltaje, este bloque es activado desde el módulo de control y sirve para accionar los actuadores de calefacción para el calentamiento del aire.

- Módulo opto acopladores Contactor.

Este bloque es activado desde el modulo de control dependiendo de las condiciones relacionadas con la humedad relativa, y acciona sobre los actuadores del mecanismo de intercambio de aire, cuya función es manejar el grado de apertura de la compuerta de intercambio de aire.

- Actuadores del mecanismo de calefacción.

Es activado por los opto acopladores TRIAC, cuya función está relacionado con el control de temperatura.

- Actuadores del mecanismo de intercambio de aire.

Es activado por los opto acopladores contactor, que acciona a los actuadores del mecanismo de intercambio de aire, con la finalidad de controlar la humedad relativa del aire dentro de la cabina deshidratadora.

- Teclado de programación.

Este módulo permite el ingreso de los parámetros de referencia que se programa por cada fase, durante la programación del proceso por el usuario, así mismo a través de este módulo se da la orden de inicio del proceso al presionar la tecla correspondiente, tiene una opción de RESET del sistema en caso de error de ingreso de parámetros de referencia.

- Módulo Visualización.

A través de este módulo el sistema muestra el valor actual de la temperatura, humedad relativa, peso, humedad final del producto y el tiempo transcurrido en el proceso, así mismo muestra los valores de referencia programados.

### **5.3. DISEÑO DEL HARDWARE**

#### **5.3.1 DISEÑO DEL SUB SISTEMA DE CONTROL**

El circuito de control está constituido por el microcontrolador PIC 16F877 de Microchip, el cual a través del puerto RA0 recibe la señal desde el sensor de temperatura, la entrada RA0 constituye la entrada del canal 0 del conversor A/D interno del microcontrolador, con esta información se controla la temperatura dentro de la cabina deshidratadora.

A través del puerto RA5 que es el canal 4 de entrada analógica del conversor A/D recibe la señal desde el sensor de humedad relativa, por el puerto RA2 se tiene la señal de voltaje de referencia negativa y por el puerto RA3 la señal de voltaje de referencia positiva, estos voltajes de referencia se usan para el conversor A/D interno del microcontrolador.

Por el puerto RC2 mediante modulación por ancho de pulsos se acciona el circuito de conmutación para la activación o desactivación de las resistencias de calefacción.

Por los puertos RC0 y RC1 se controlan el sub sistema de intercambio de aire mediante el cual se regula el cierre y la apertura de la compuerta para controlar la humedad relativa en el sistema.

Mediante el puerto RD se interconecta al sub sistema de visualización que está formado por el módulo LCD, a través del puerto RB se interconecta con el teclado matricial mediante el cual se realiza la programación de los parámetros de referencia.

En la memoria de programa del microcontrolador se graba el programa de control desarrollado en el lenguaje ensamblador del PIC 16F877, dicho programa recibe la información desde los sensores a través de los puertos indicados anteriormente y acciona sobre los actuadores dependiendo de las condiciones del proceso, previamente programado mediante el ingreso del valor de referencia para los parámetros.

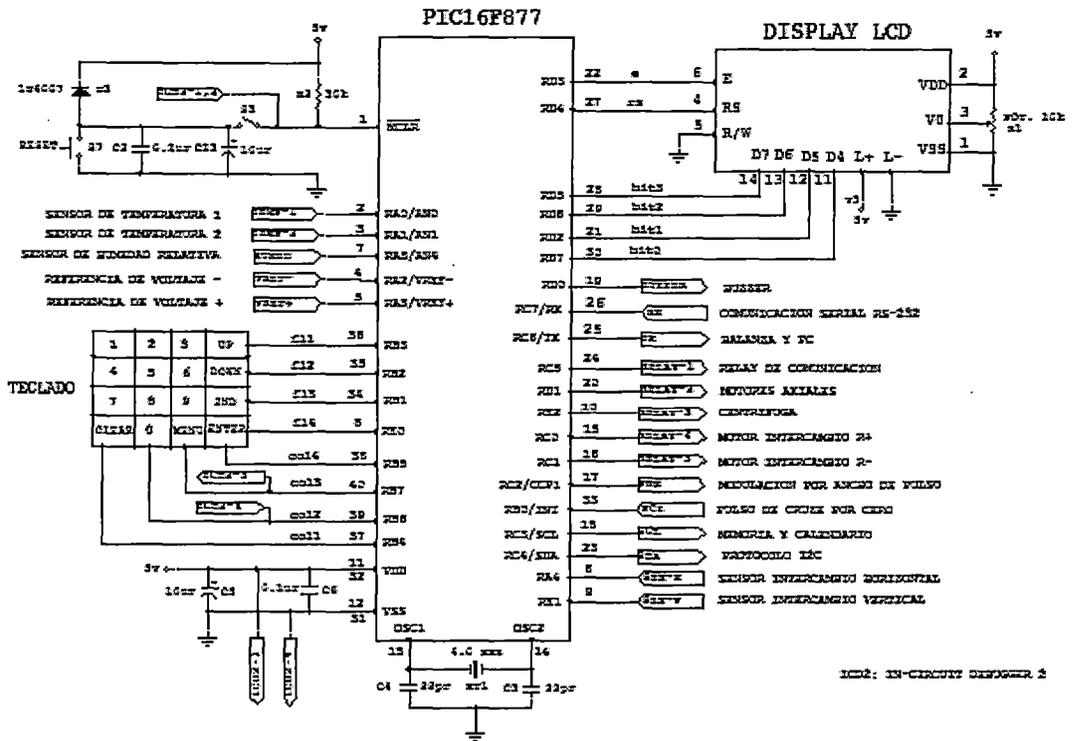


Fig. 5.2 Circuito de control del deshidratador mejorado.

### 5.3.2 DISEÑO DEL SUB SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA

Para este sub sistema se utiliza el LM335 protegida por una vaina de acero inoxidable, montado en una cápsula tipo TO92 de 3 pines que actúa como un diodo zener cuya tensión de ruptura es directamente proporcional a la temperatura absoluta del mismo, una vez polarizado el dispositivo su tensión de salida es:

$$V_o = 10 \text{ mV/}^\circ\text{K} * T (^\circ\text{K})$$

Por cada grado Kelvin de temperatura, el LM335 varía su voltaje en 10mV, presentando teóricamente una lectura de 0V a 0 °K. (-273°C), para conseguir una variación de 10mV del sensor LM335 por grado Centígrado. Por ello se debe analizar la conversión de °K. A °C. Por ejemplo si la Temperatura es de 300 °K (27 °C) el sensor nos entregara 3V.

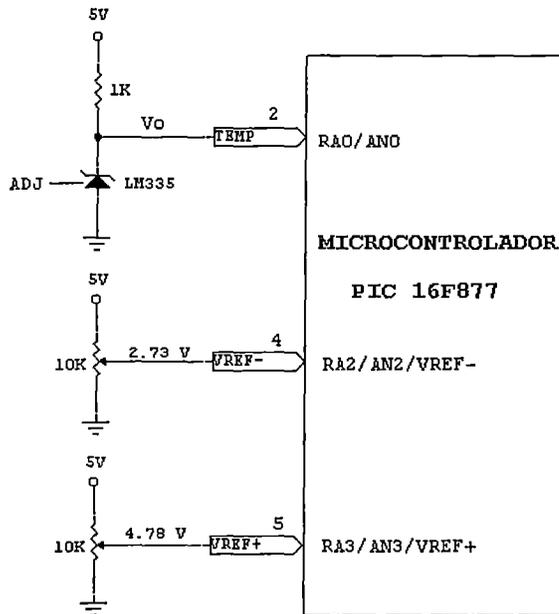


Fig. 5.3 Sub sistema de control de Temperatura

La sensibilidad del sensor LM335 según el manual del fabricante es:

$$V_o = 10 \text{ mV/}^\circ\text{K} * T \text{ }^\circ\text{K} \quad \dots (1)$$

$V_o$ : Voltaje Generado por el sensor

Conversión de Grados Kelvin a Grados Celsius

$$T \text{ }^\circ\text{K} = (T \text{ }^\circ\text{C} + 273^\circ\text{C}) (\text{ }^\circ\text{K} / \text{ }^\circ\text{C}) \quad \dots (2)$$

Reemplazando (2) en (1):

$$V_o = 10 \text{ mV/}^\circ\text{K} * (T \text{ }^\circ\text{C} + 273^\circ\text{C}) (\text{ }^\circ\text{K} / \text{ }^\circ\text{C})$$

$$V_o = 10 \text{ mV/}^\circ\text{C} * (T \text{ }^\circ\text{C} + 273^\circ\text{C})$$

$$V_o = 10 \text{ mV/}^\circ\text{C} * T \text{ }^\circ\text{C} + 2.73 \text{ V} \quad \dots (3)$$

Como podemos apreciar de la ecuación (3), que por cada variación de grado Centígrado tenemos una variación de 10mV incrementado de 2.73V, en el caso de 27 °C (300°K), tendremos  $27^\circ\text{C} * 10\text{mV/}^\circ\text{C} + 2.73\text{V} = 3.0\text{V}$

El Microcontrolador PIC 16F877 posee entradas analógicas, y entradas diferencial,  $V_{REF+}$  y  $V_{REF-}$

La referencia  $V_{REF-}$  se colocará a un voltaje de 2.73 V para hacer coincidir el valor inicial del conversor analógico digital representados por los registros especiales.

ADRESH: ADRESL = 00 0000 0000 del microcontrolador para que

Coincida con la Temperatura de 000.0 °C

Por tanto con este recurso del Microcontrolador el sensor tendrá la sensibilidad de:

$$V_i = 10 \text{ mV/}^\circ\text{C} * T \text{ }^\circ\text{C}$$

Donde  $V_i$  es el voltaje que ingresa al conversor A/D.

Por ser la conversión Analógica Digital de 10 bits de Resolución:

$$\text{Resolución} = (V_{REF+} - V_{REF-}) / 1024$$

Suponiendo:  $V_{REF+} = 5 \text{ V}$  y  $V_{REF-} = 0 \text{ V}$

$$\text{Reemplazando: } 5\text{V} / 1024 \text{ bit} = 4.88 \text{ mV}$$

Es decir una variación de voltaje en 4.88 mV en la entrada del convertidor A/D producirá un incremento de 1 bit.

ADRESH: ADRESL = 00 0000 0001

El manual indica lo siguiente:

$$V_{DD} \geq (V_{REF+} - V_{REF-}) \geq 2\text{V} \dots \dots \dots (4)$$

Si se desea una Resolución de 0.1 °C, se tiene:

$$1024 * 1\text{mV} (0.1 \text{ }^\circ\text{C}) = 1.024 \text{ V}$$

Lo cual no cumpliría con la condición (4).

Por lo tanto se busca una mayor resolución 0.2 °C

$$1024 * 2\text{mV} (0.2 \text{ }^\circ\text{C}) = 2.048 \text{ V}$$

Lo cual si cumpliría con la condición (4).

Por lo tanto se puede medir hasta 204.8 °C, teóricamente.

Pero como el sensor de temperatura solo tiene un rango de -40°C a +100°C

Por lo tanto se puede medir de -0°C a +100°C con una resolución de 0.2 °C

Con este análisis basta hacer la conversión y multiplicar por 2 para obtener rápidamente el valor de la temperatura.

ADRESH: ADRESL = 00 0000 0001 \* 2 = 2 Por lo tanto la temperatura será igual a 0.2 °C, el punto decimal se coloca en la presentación del display

En el Proceso de Deshidratación la temperatura máxima utilizada es de 80°C. Es por esta razón por ser más comercial y de bajo costo se seleccionó el LM 335.

$$\text{La referencia } V_{REF+} = 1024 * 0.2 \text{ mV} + 2.73\text{V} = 2.48\text{V} + 2.73\text{V} = 4.778 \text{ V}$$

Por lo tanto  $V_{REF+} = 4.78 \text{ V}$ .

La Resolución es:

$V_{REF+} = 4.78 \text{ V}$  y  $V_{REF-} = 2.73 \text{ V}$

Reemplazando:  $(4.78\text{V} - 2.73\text{V}) / 1024 \text{ bit} = 2.00 \text{ mV/bit}$  o

Por cada  $0.2^\circ\text{C}$  se tiene  $2.0 \text{ mV}$

En la versión del prototipo inicial el mecanismo de control sobre los actuadores fue mediante un control ON /OFF, luego de evaluar las desventajas de este método se ha realizado ciertas mejoras que a continuación se muestra:

### 5.3.2.1. CRUCE POR CERO PARA EL CONTROL POR FASE o PWM

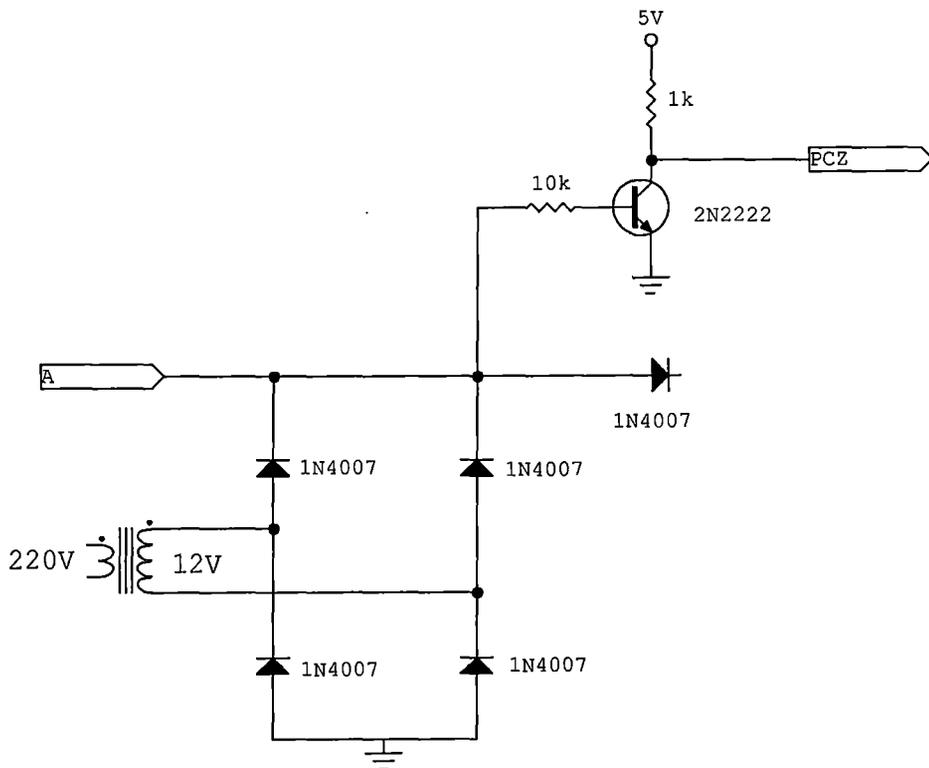


Fig. 5.4 Circuito de cruce por cero

En la Fig. 5.4 se puede observar una parte de la Fuente de alimentación, en el punto A se obtiene una señal de onda completa como se aprecia en la Fig. 5.5.

Esta señal ingresa a la base del transistor el cual está saturado en casi la totalidad de la señal generando un nivel bajo en el colector del transistor pero en los cruces por cero se va al corte generando un nivel alto en el colector.

Esta señal indicada como PCZ sirve para informar al Microcontrolador el momento en que el voltaje AC de entrada se encuentra en su nivel más bajo, de esta manera saber cuándo disparar exactamente el TRIAC de potencia que controla las resistencias de calefacción del Deshidratador, estas formas de onda las podemos apreciar en la fig. 5.7.

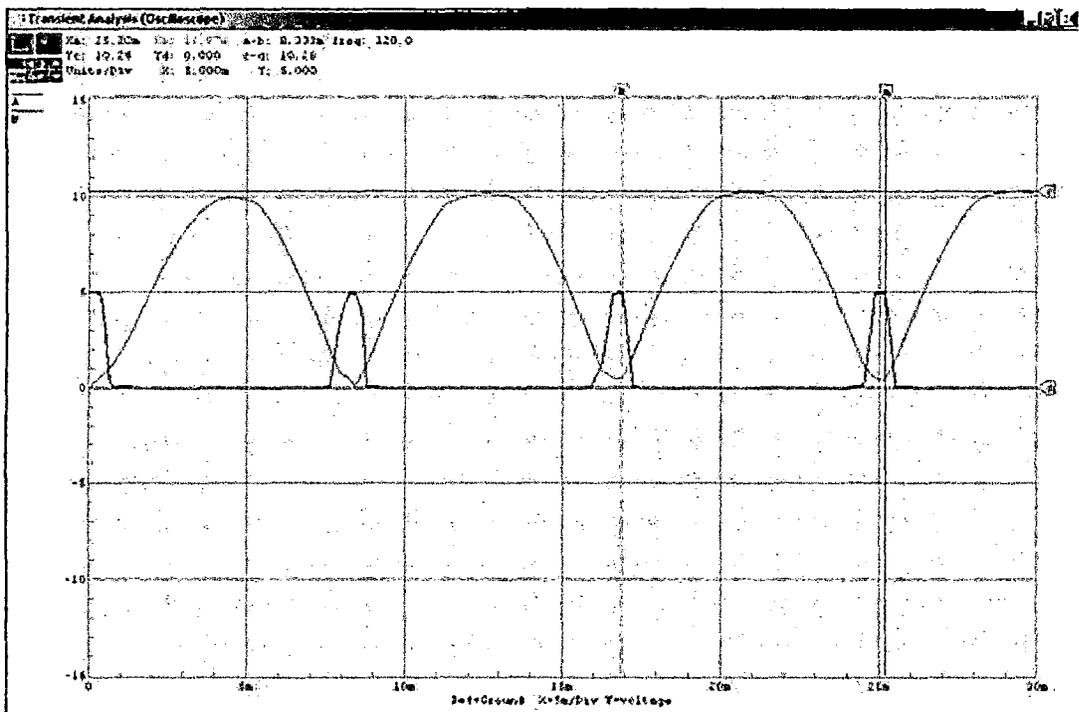


Fig. 5.5 Formas de onda en la base del transistor

El control por fase entregada a las resistencias de calefacción se realiza por Modulación por ancho de pulso PWM, que es obtenida desde el Microcontrolador PIC16F877.

El cruce por cero se coloca en el pin RB0/INT que tiene interrupción por flancos.

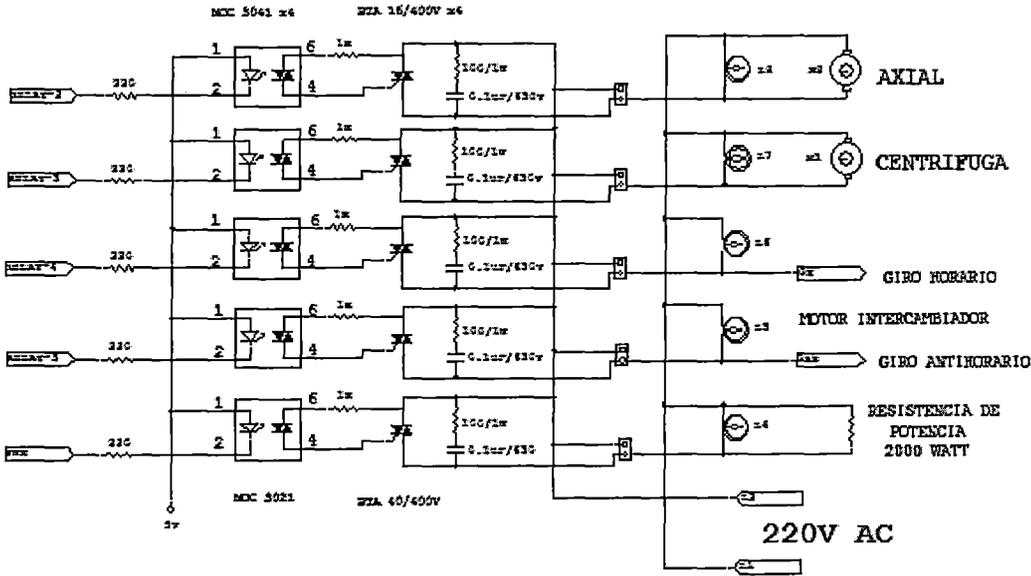


Fig. 5.6 Circuito de Potencia

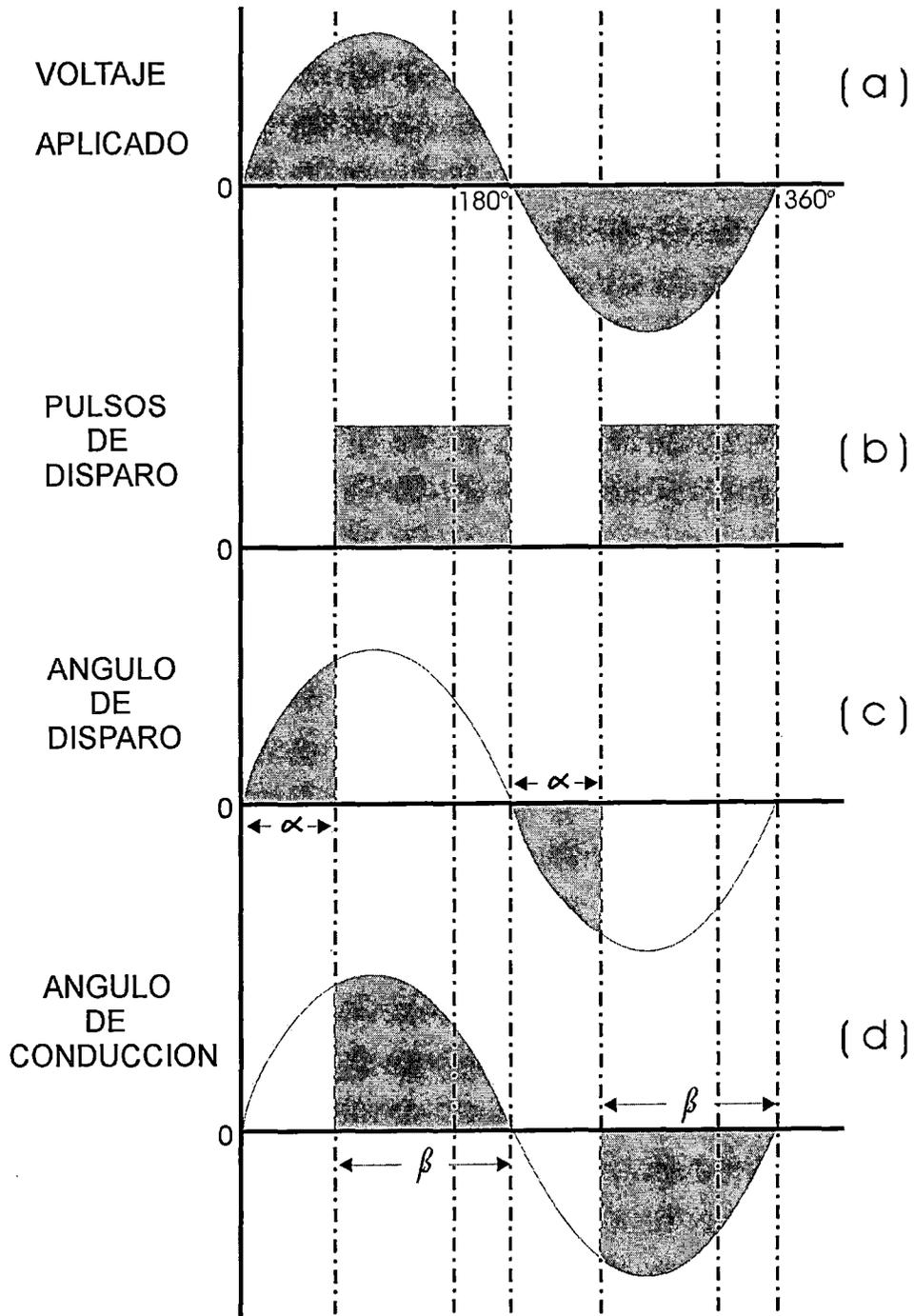
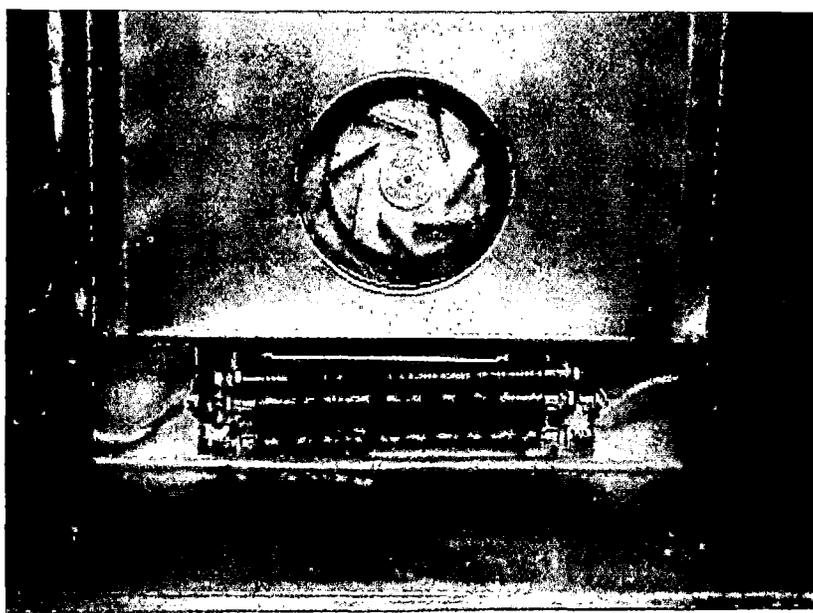


Fig. 5.7 Formas de Onda de: pulso de disparo, ángulo de disparo y ángulo de conducción por los TRIACS.

El calentamiento del aire se lleva a cabo utilizando varias resistencias eléctricas de 1000 watts de potencia cada uno provistos de aletas helicoidales que permiten aumentar la superficie de transferencia de calor. La activación de estas resistencias son controlados por los TRIACS que son manejados por PWN, el número de resistencias que se activan depende de los requerimientos de temperatura dentro del deshidratador.



**Fig. 5.8 Ubicación de las Resistencias de calefacción**

### **5.3.3. DISEÑO DEL SUB SISTEMA DE CONTROL DE HUMEDAD RELATIVA**

Al contenido de agua en el aire se le conoce como humedad relativa y se define como el porcentaje de saturación del aire con vapor de agua, es decir, es la relación entre la cantidad de vapor de agua que contiene un metro cúbico de aire en condiciones determinadas de temperatura y presión. La capacidad del aire para absorber humedad varía con la temperatura, la humedad relativa aumenta cuando desciende la temperatura, aunque la humedad absoluta se mantenga invariable. En el proyecto se está usando una sonda de humedad relativa que proporciona una señal de humedad

relativa al microcontrolador por un puerto de entrada A/D. Como en el proyecto el rango de temperatura está entre temperatura ambiente y 80°C entonces las aplicaciones del proceso están dentro del rango de funcionamiento del dispositivo mencionado, en la figura 5.9, se muestra la interconexión del modulo controlador de humedad relativa con el microcontrolador.

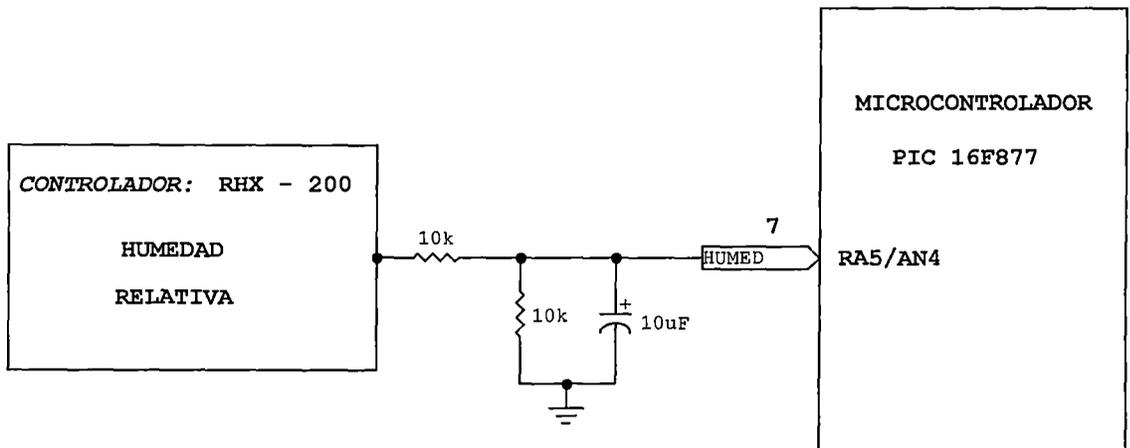


Fig. 5.9 Sub sistema de control de humedad relativa

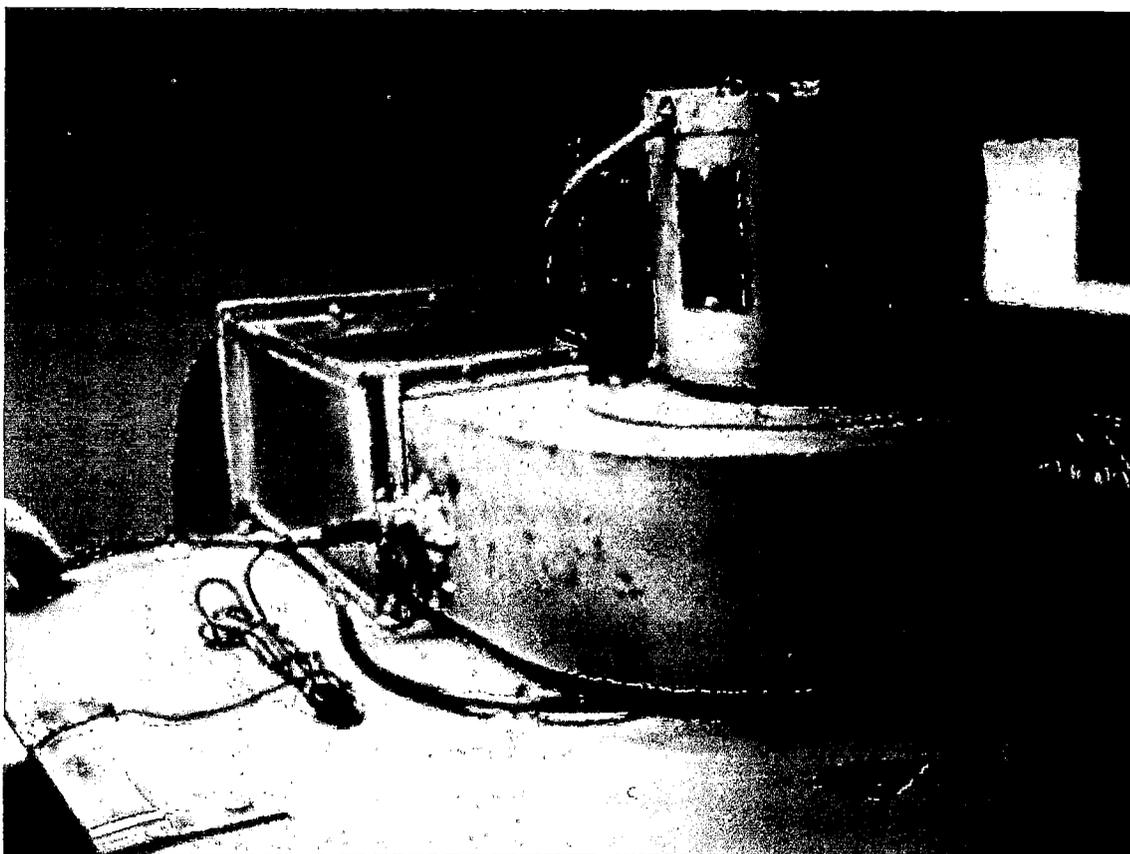
El sensor entrega según sus características 0V a 0% HR y 10V a 100% HR  
 El Microcontrolador no soporta este voltaje entonces se realizó un divisor de voltaje usando dos resistencias de 10k, y se tiene 0V a 0% HR y 5V a 100% HR Por lo tanto usando el conversor A/D de 10 bits se tiene  

$$:100\% \text{ HR} = (1024) * \text{FC}$$

FC: Factor de conversión

$\text{FC} = 100/1024 = 0.09765$ . Redondeando  $\text{FC} = 0.097$

En el programa para calcular el valor de la Humedad Relativa entregada por el sensor, se realiza la conversión A/D y al valor de la conversión se multiplica por 97, luego en la presentación se coloca el punto decimal en posición correspondiente  $\text{ADRESH: ADRESL} * 97$



**Fig. 5.10 Ubicación del Sensor de Humedad relativa**

#### **5.3.4. MODULO DE CONTROL DE PESO**

Después de la evaluación del funcionamiento del deshidratador se ha visto otro parámetro importante a controlar que es el peso, mediante el cual se puede determinar la humedad final del producto en el proceso que es una información relevante. El peso y la humedad final del producto debe ser monitoreado constantemente.

Para el modulo de control de peso en línea y determinar la humedad final del producto deshidratado se requiere un sensor de peso que entregue la información y así poder calcular la humedad del producto en todo momento, esta información es entregada a la tarjeta principal del deshidratador, donde será procesada por el microcontrolador.

Antes de la inclusión del módulo de control de peso, se requería la experiencia y la supervisión constante de un operario, quien tenía que sacar parte del producto desde el Deshidratador para pesarlo, comprobar la pérdida de agua y así estar seguro de la calidad del producto, algunas veces no se realizaba esta operación por los inconvenientes que causaba al estar abriendo la puerta del deshidratador y sacar el producto para pesar constantemente con la correspondiente pérdida de calor. El control se realizaba principalmente por tiempo y temperatura, por lo tanto con la inclusión del módulo de control de peso, se mejora el funcionamiento del equipo.

El valor de la humedad final, es la que determinará el fin del proceso, también se consideran las fases del proceso, es decir concluidas las cuatro fases si el Producto no tiene la humedad final programada continuará el proceso utilizando los parámetros programados en la última fase, puede suceder también que el control finalice el proceso durante cualquier fase, siempre y cuando la humedad del producto sea igual a la humedad final programada.

Para la implementación del módulo de control de peso se ha tenido en cuenta lo siguiente:

- Acondicionamiento de la parte física:

De las bandejas representativas para el peso

De las tarjetas de sistema de adquisición de datos

De los sensores de peso

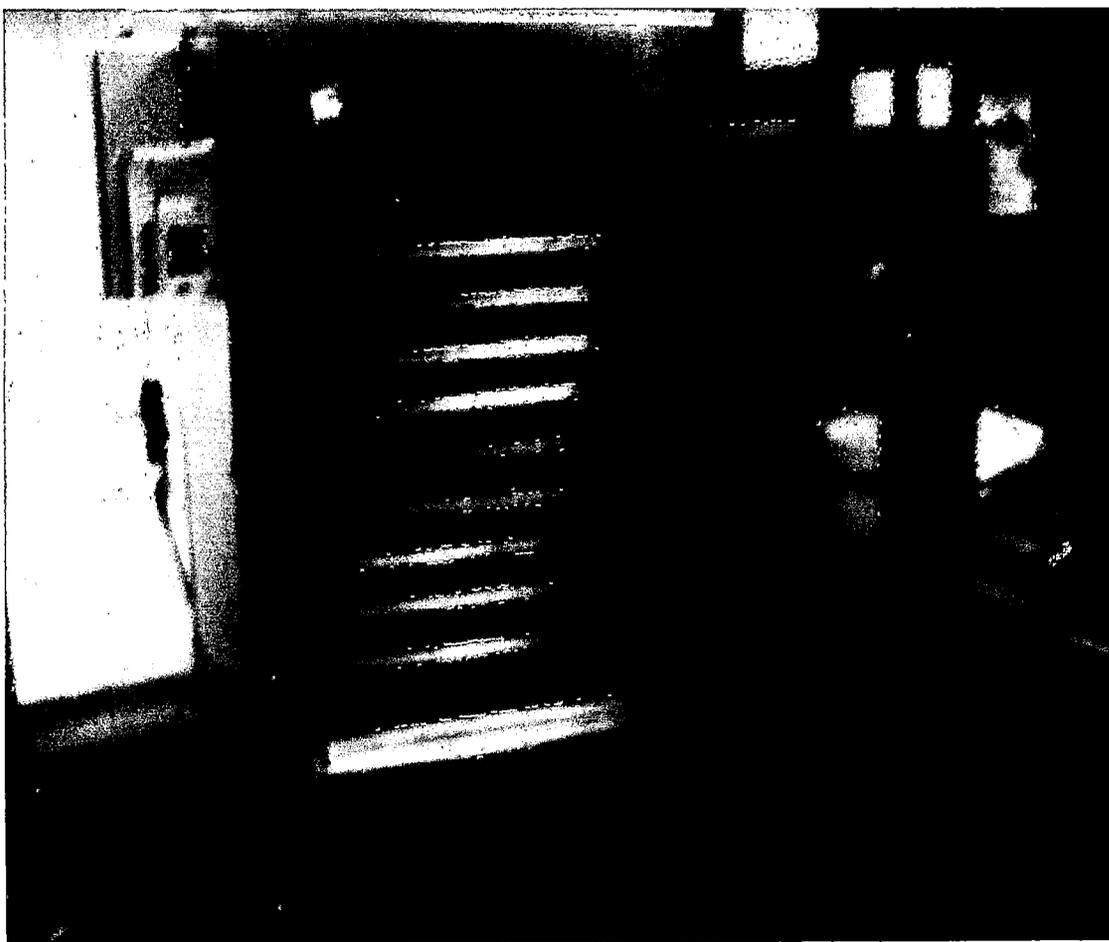
- Acondicionamiento de la parte del software:

Modificación del programa del deshidratador para que tome en cuenta la información entregada por el sensor de peso.

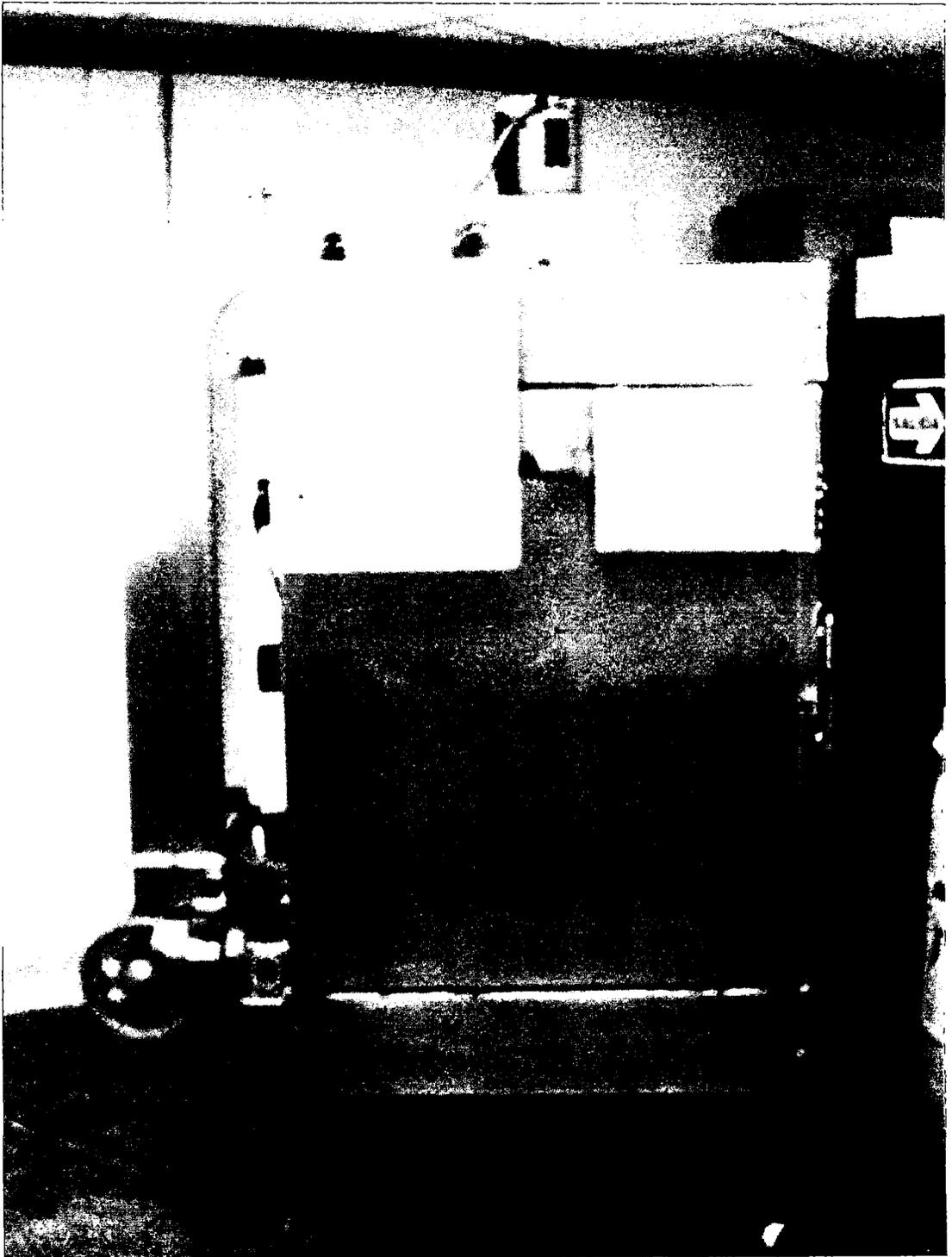
### **5.3.5. MEJORA EN EL FUNCIONAMIENTO DEL DESHIDRATADOR**

El deshidratador de cabina fue mejorado en su funcionamiento presentando las siguientes características:

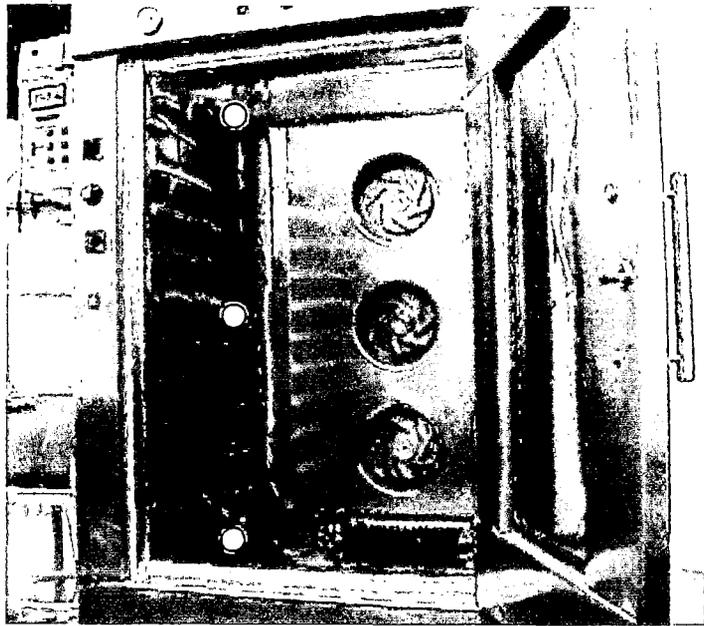
- Está constituido por una cámara de secado central provista de guías porta bandejas, las que sirven de soporte para las bandejas conteniendo el producto distribuido en forma homogénea.



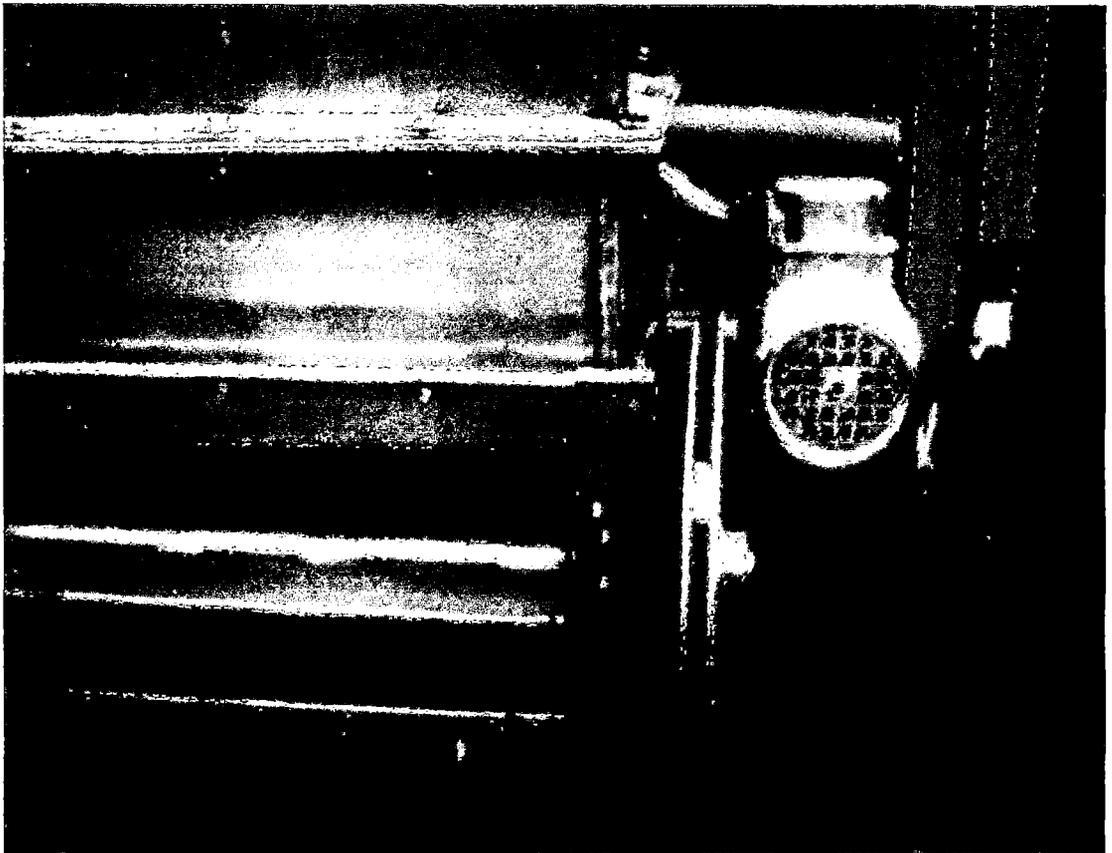
**Fig. 5.11 Vista frontal del Deshidratador mostrando las bandejas**



**Fig. 5.12 Vista lateral del Deshidratador**



**Fig. 5.13 Ubicación de los Sensores de Temperatura**



**Fig. 5.14 Mecanismo de intercambio de aire**

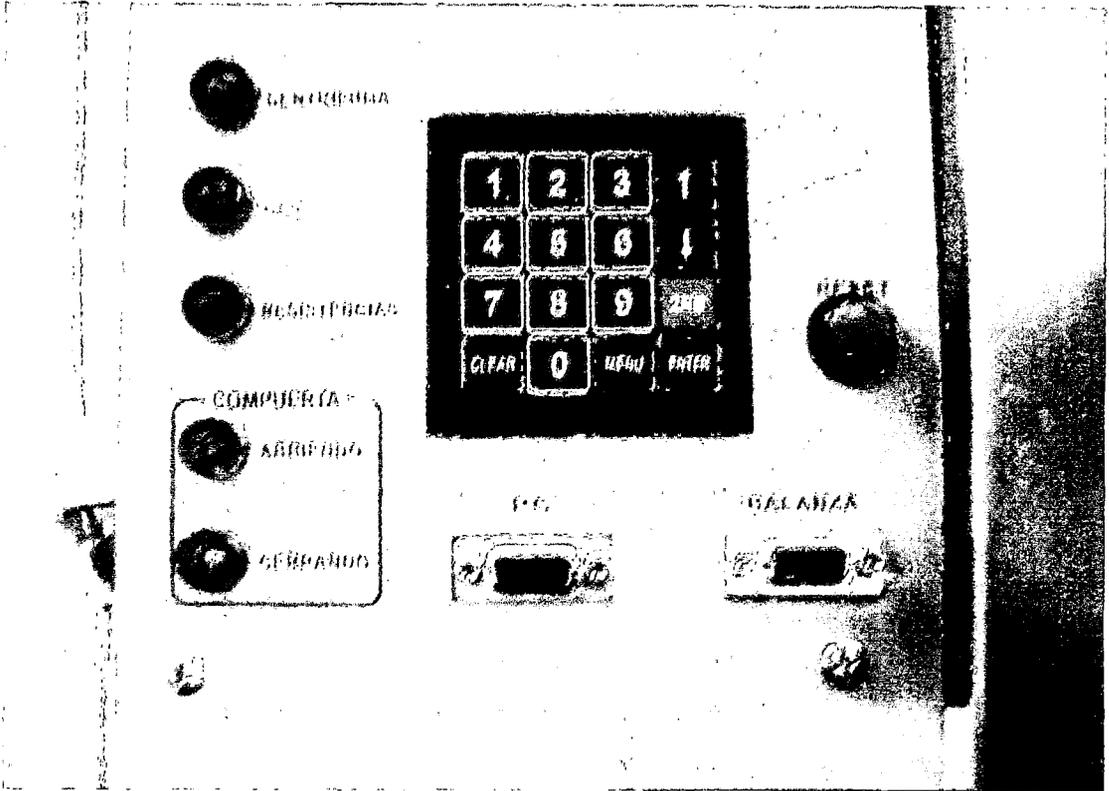


Fig. 5.15 Panel de control mejorado

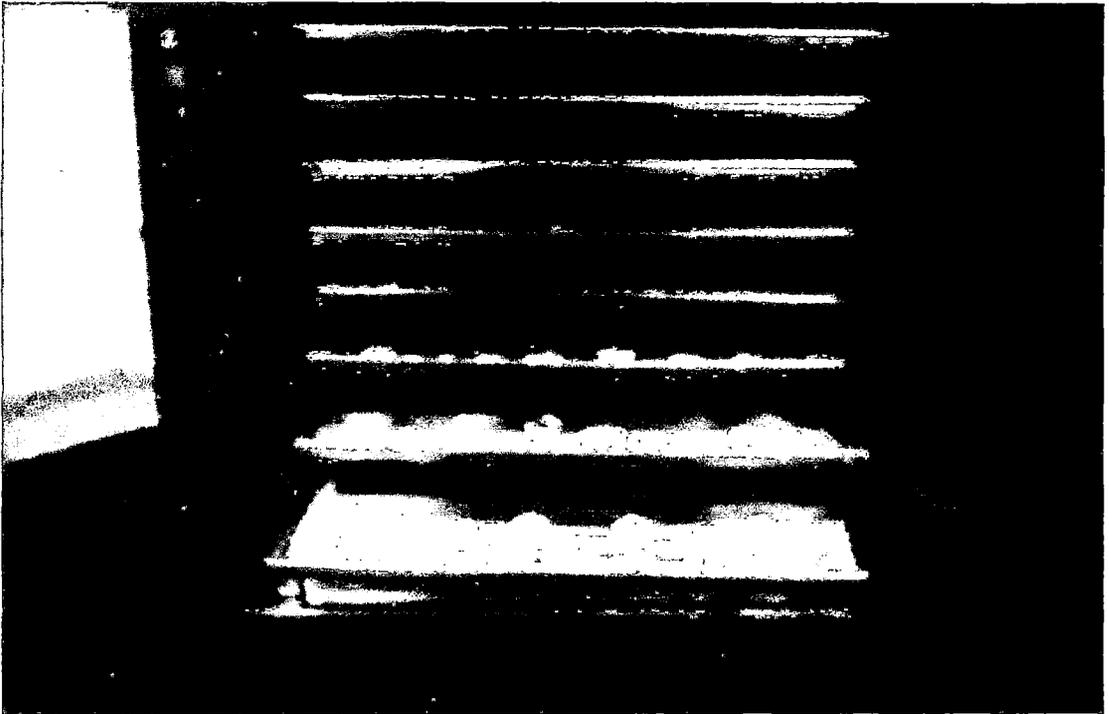


Fig. 5.16 Producto final del proceso de deshidratado.

## **5.4 DISEÑO DEL SOFTWARE**

### **5.4.1 ESPECIFICACIONES DEL SOFTWARE DE CONTROL DEL DESHIDRATADOR**

El software, permite el control de las operaciones del proceso de deshidratación. Está constituido por un programa que ha sido desarrollado usando el lenguaje ensamblador del microcontrolador PIC y grabado en su memoria de programa.

Existen una variedad de microcontroladores cada uno con sus características y lenguaje ensamblador propios.

El microcontrolador PIC 16F887 utilizado en el proyecto se ha seleccionado evaluando los recursos de su arquitectura interna y por la facilidad y flexibilidad en la programación.

El programa está formado por las siguientes rutinas:

#### **5.4.2 RUTINAS DEL SOFTWARE DE CONTROL**

##### **a.- Rutina de captura de información**

Dispensada por los sensores la que se encarga de recibir la información proveniente de estos para realizar la comparación con los valores programados. Entre estos sensores tenemos:

- Sensor de temperatura que está localizado en el interior de la cabina deshidratadora, que proporciona información de la temperatura actual del proceso.
- Sensor de Humedad relativa localizado en el ducto de recirculación del aire de secado ubicado en la parte superior de la cabina, que proporciona información de la humedad relativa actual del aire, con lo cual el microcontrolador actúa de acuerdo a la lógica del programa sobre un motor reductor que apertura y cierra una compuerta de evacuación de aire húmedo e ingreso de aire del medio ambiente.
- Sensor de peso localizado, en la parte superior de la cabina que conjuntamente con el acondicionamiento mecánico realizado en las bandejas, proporciona información al microcontrolador para la ejecución de la lógica del programa relacionada con esta parte.

b).- Rutina de acondicionamiento de actuadores

- Energización de resistencia eléctrica, a través de los TRIACs que abre y cierra el circuito eléctrico correspondiente dependiendo del requerimiento de calor dentro de la cabina durante el proceso de acuerdo a la rutina de manejo del PWM
- Accionamiento de cierre y apertura de compuerta de intercambio de aire, que es accionada por el motor reductor el cual opera mediante el cierre y apertura del circuito eléctrico constituido por un contactor.

c).- Rutina de visualización, cuya función es acondicionar la información y mostrar en formatos adecuados en la pantalla del display LCD, donde se muestran los valores de referencia programados y los valores actuales de los diferentes parámetros del proceso ( temperatura, humedad relativa, tiempo y humedad final), por cada fase del programa de deshidratado.

d).- Rutina de temporización, cuya función es generar lazos de retardo con la finalidad de tener tiempos adecuados para el funcionamiento de las diferentes fases del proceso.

e).- Rutina de conversión Analógico / Digital.

Cuya función es realizar la conversión de señales analógicas (que son señales continuas en el tiempo) proveniente de los sensores en señales digitales (señales discretas), que serán procesadas durante la ejecución del programa de control.

#### **5.4.3 CAPACIDAD DE MEMORIA PARA EL PROGRAMA DE CONTROL**

La capacidad de memoria requerida para almacenar el programa es de 4 KBytes lo cual equivale a 4096 bytes la que está almacenada en forma permanente en la memoria de programa del microcontrolador.

Para el proceso de grabado del programa se utilizó un grabador PIC STAR PLUS de Microchip, que se conecta mediante un cable al computador a través del puerto serial.

#### **5.4.4 PROCEDIMIENTO PARA EL USO DEL SOFTWARE DE CONTROL**

El programa fue desarrollado usando el lenguaje ensamblador de los microcontroladores PIC de Micro chip.

Para el uso del software se sigue los siguientes pasos:

- 1.- Cargar en la computadora el programa MPLAB
- 2.- Cargar el software del deshidratador en el ambiente del MPLAB
- 3.- Grabar en la memoria del microcontrolador usando un Grabador PIC STAR PLUS.
- 4.- El microcontrolador con el programa grabado debe ser colocado en la tarjeta del módulo de control diseñado.
- 5.- El programa al ejecutarse, constantemente verifica el estado de los diferentes sensores y dependiendo de los valores que tenga ejecutará rutinas ya programadas de acuerdo a una lógica pre establecida y accionar a los diferentes actuadores que tiene el sistema.
- 6.- El programa permite ingresar los valores de referencia de los parámetros necesarios para el proceso de deshidratado, tales como: temperatura, humedad relativa, tiempo y humedad final por cada fase.

#### **5.4.5 DIAGRAMAS DE FLUJO**

Los diagramas de flujo permiten mostrar generalidades de la lógica de la programación.

**Fig. 5.17 Diagramas de Flujo**  
**Diagrama de flujo General del Deshidratador**

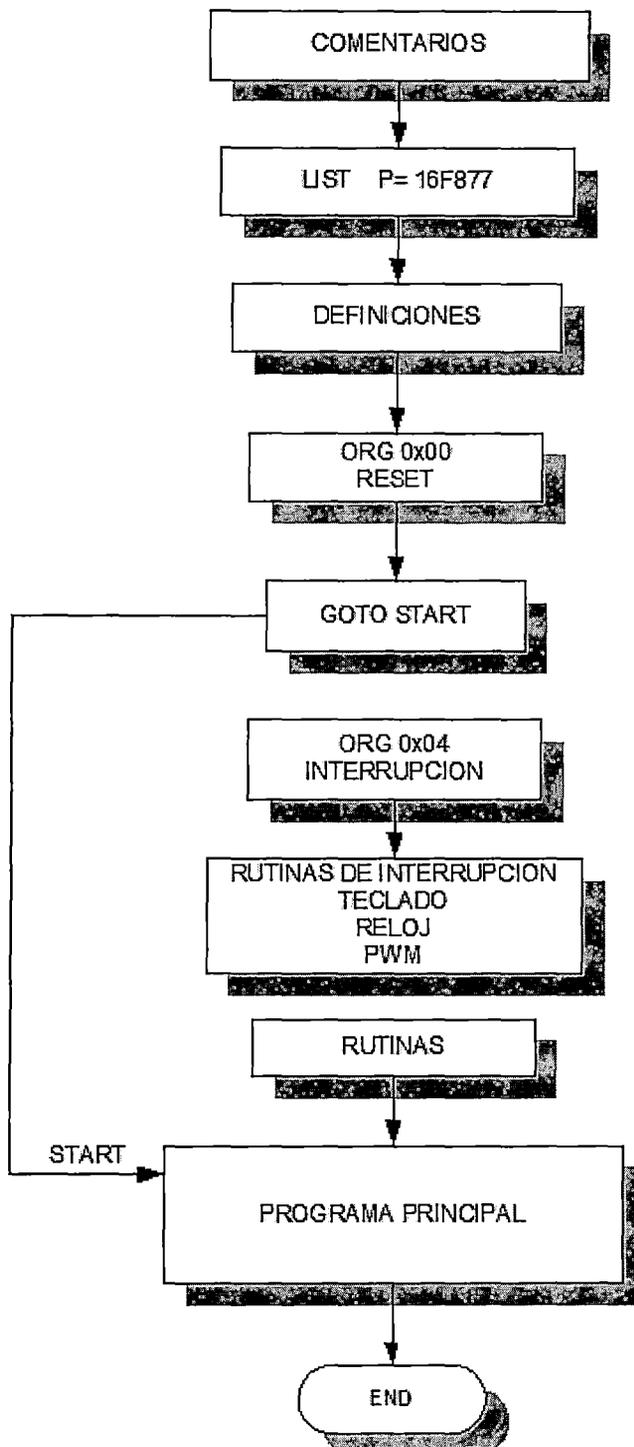
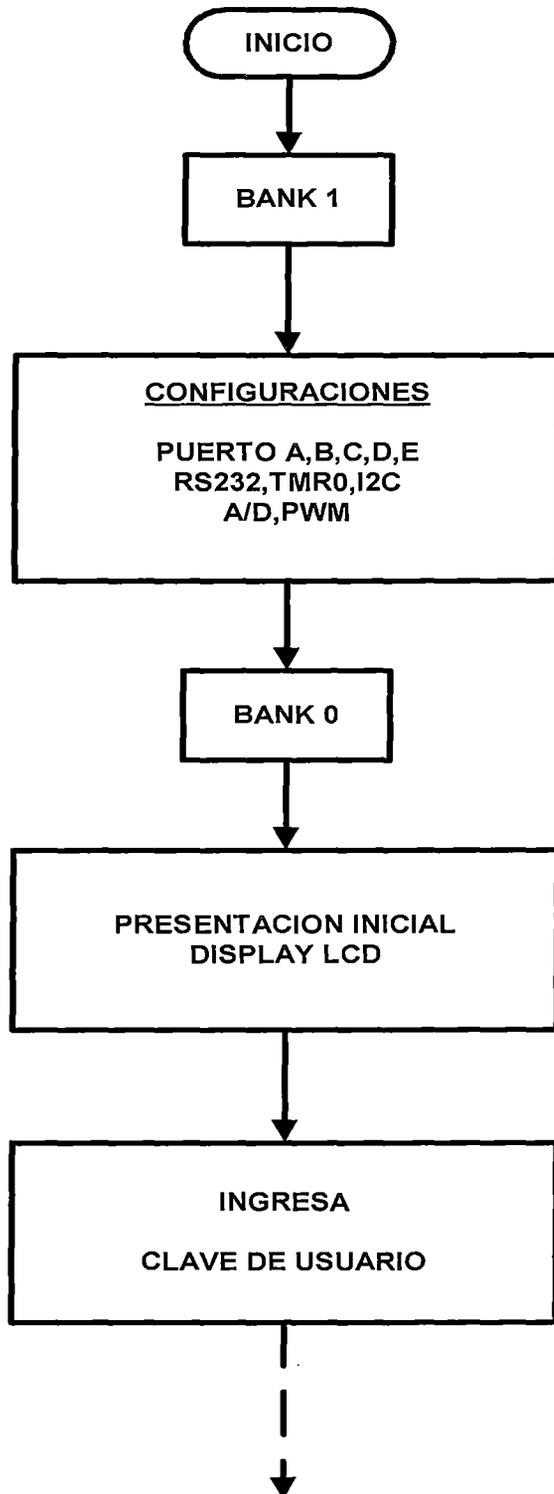
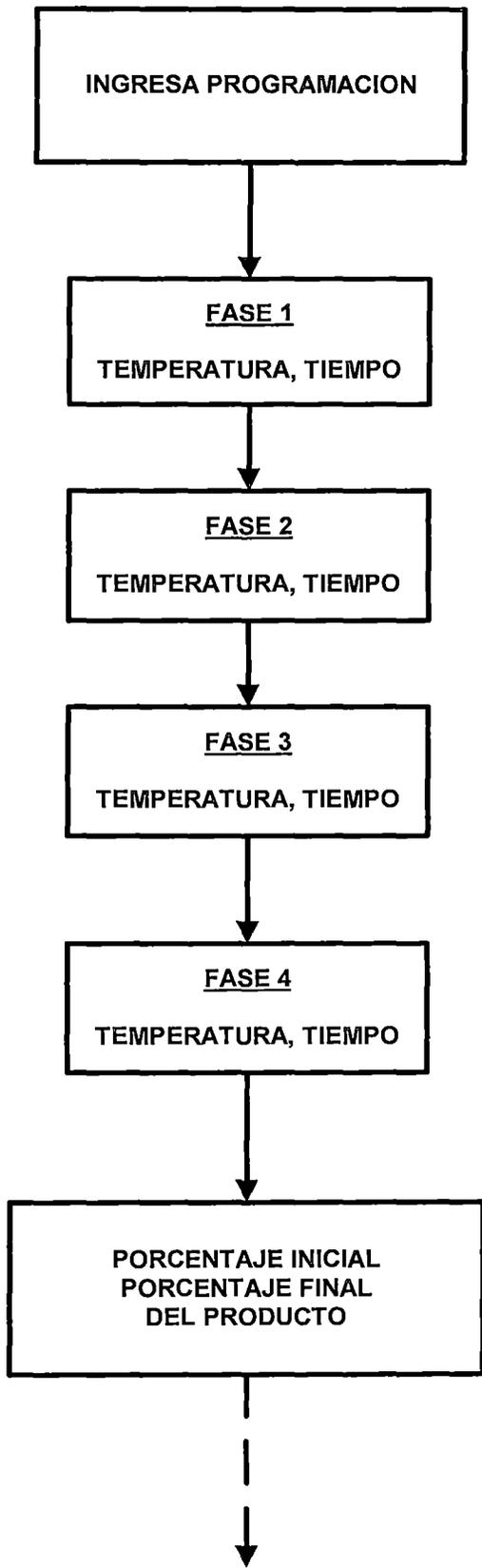


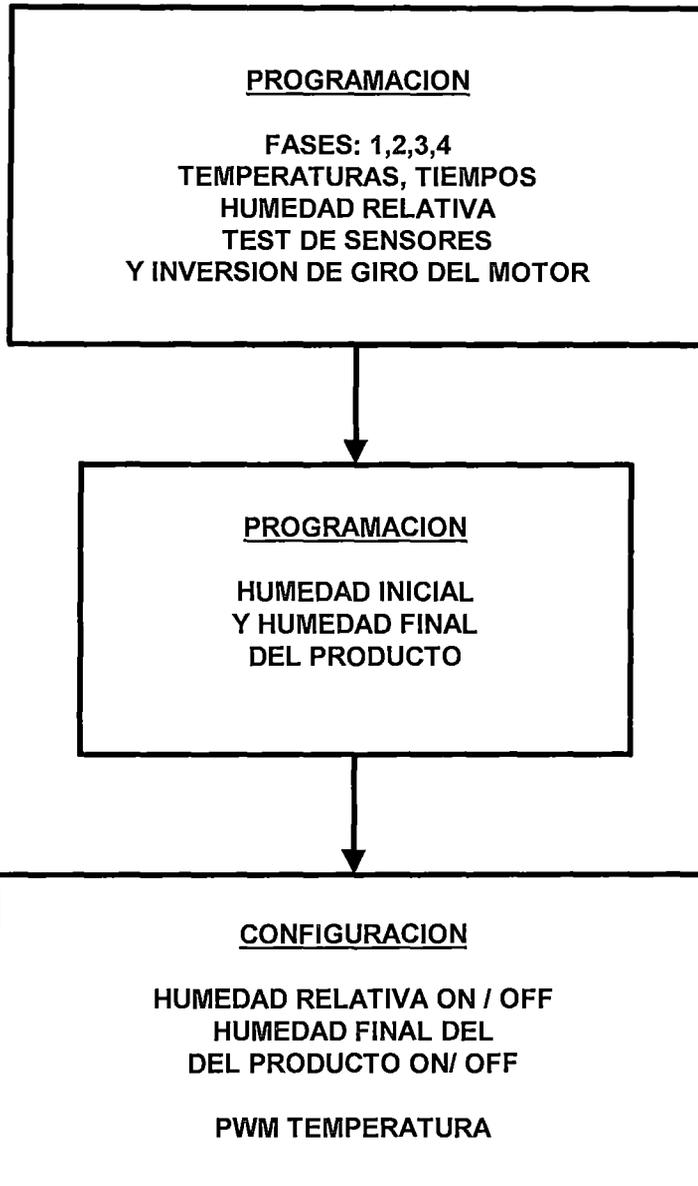
Diagrama de flujo del programa principal

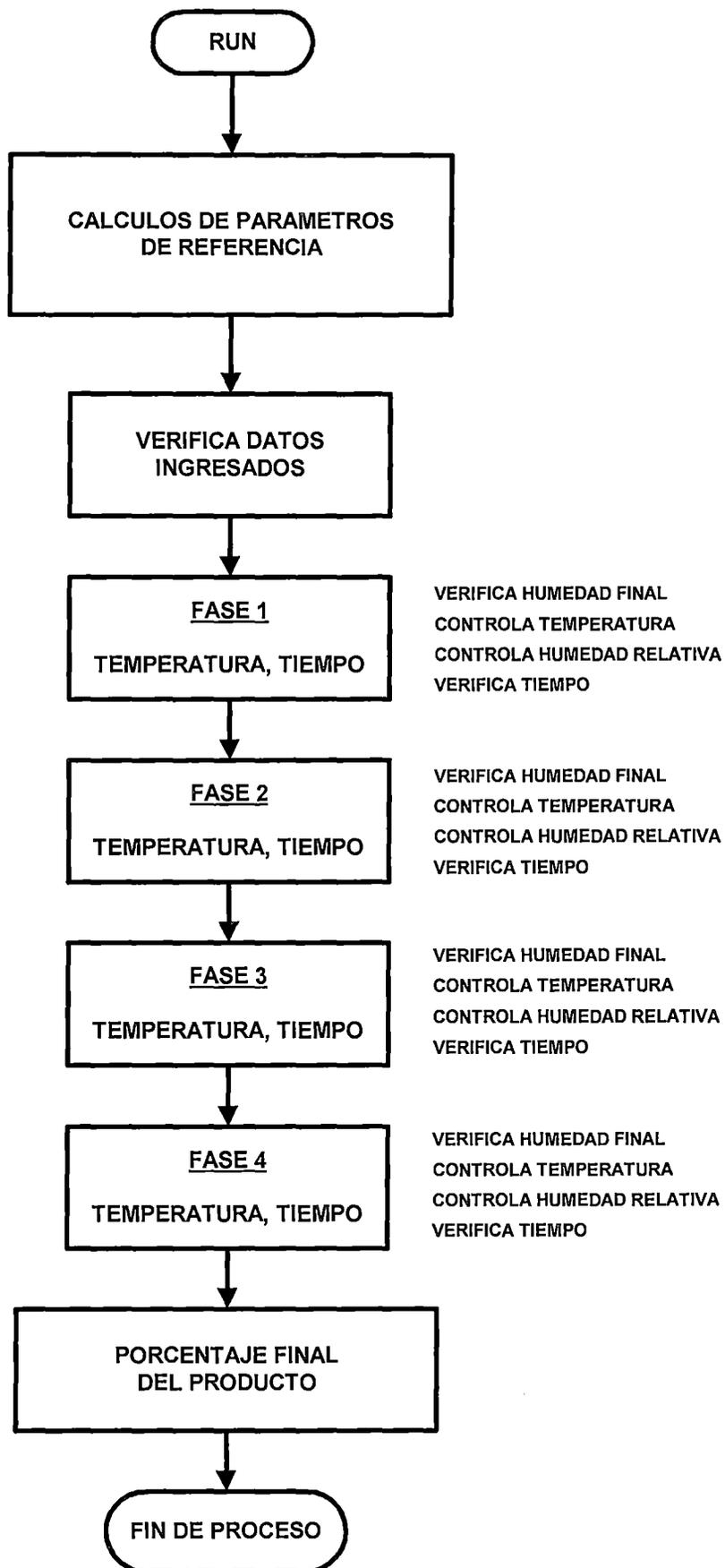
PROGRAMA PRINCIPAL

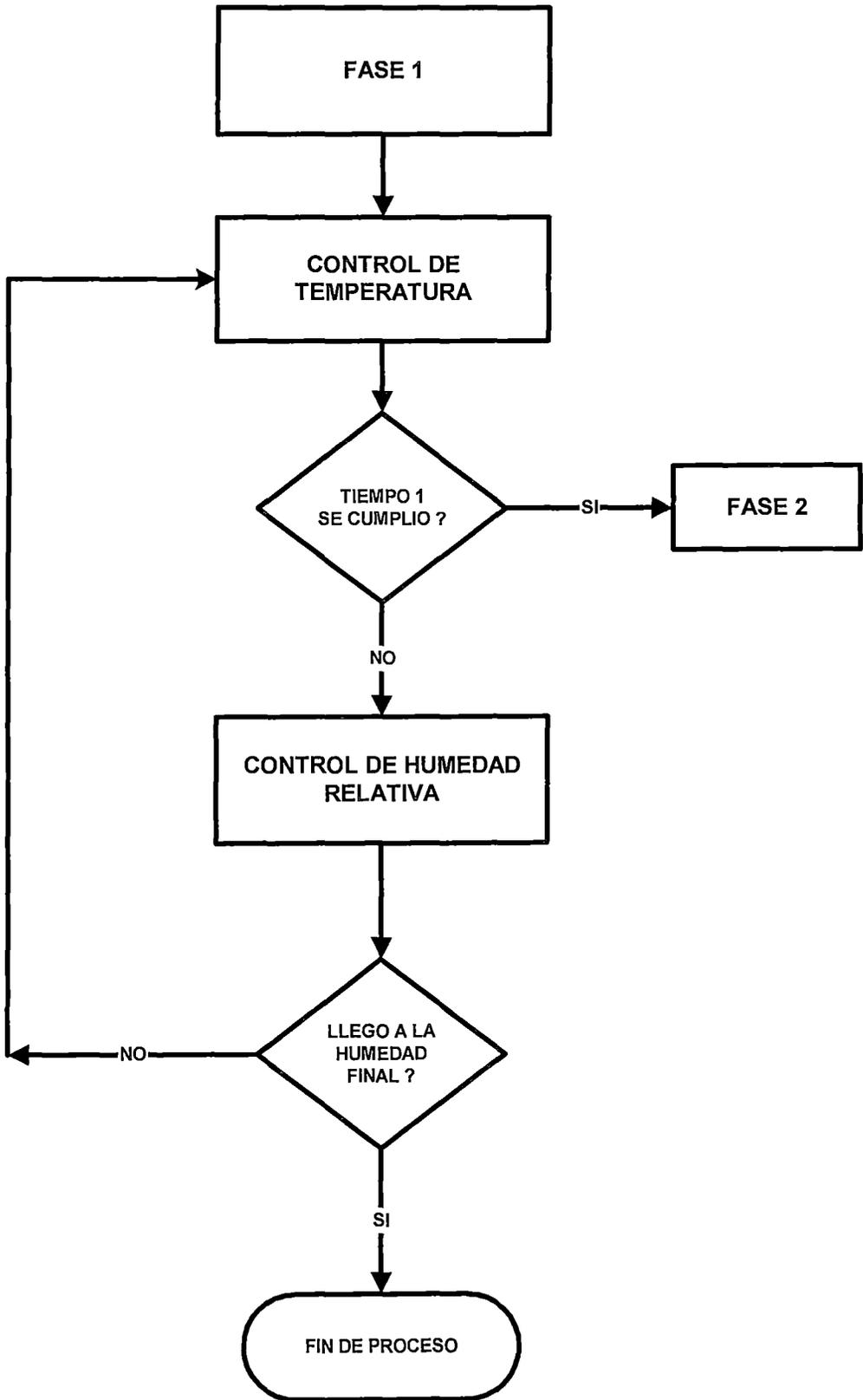




**Programación de las Fases**







#### **5.4.5.1. DESCRIPCION DE FUNCIONAMIENTO DE LA FASE 1**

El sistema controla la temperatura mediante PWM modulación por ancho de pulso (control por ángulo de fase) para la activación del circuito de las resistencias de calefacción.

En este caso el control es más fino que el sistema inicial ON / OFF por qué se puede dosificar la potencia, con el correspondiente ahorro de energía y el producto se obtendrá con mejor calidad.

El control de la humedad relativa se realiza a través del mecanismo de cierre y apertura de la compuerta de intercambio del aire, para lo cual el transductor instalado entrega una variación en voltaje de 0 a 10v según la humedad relativa proporcional a 0% a 100%.

Para el caso del control de peso el microcontrolador recibe la información desde la celda de carga, y a través del algoritmo calcula la humedad final del producto en línea, si esta humedad final es igual a la humedad programada termina el proceso.

Si se cumple el tiempo de la fase 1, continúa con la fase 2 y así continuaría con todas las fases programadas, si al terminar la última fase no se ha llegado a la humedad final programada continua deshidratando con los datos (temperatura) de la última fase programada, no necesariamente se tienen que programar todas las fases.

#### **5.5. ROBOTICA APLICADA AL PROCESO DE DESHIDRATACION DE FRUTAS**

Al inicio del proceso las bandejas conteniendo frutas troceadas, deben ser colocadas dentro del deshidratador, así mismo cuando finaliza el proceso dichas bandejas conteniendo el producto deshidratado debe ser sacado desde el deshidratador para recoger el producto final y luego colocar el producto dentro de las bolsas previamente acondicionadas, sellarlas y tener listo para el consumo.

Esta parte del proceso se hace manual, y con la finalidad de optimizar el tiempo, se ha planteado automatizar usando un brazo robótico.

Para el diseño de esta parte se ha partido teniendo en cuenta el modelo de brazo robótico tipo SCARA (Selective Compliance Arm For Robotic Assembly) de cuatro grados de libertad que se muestra en la figura 5.18. Con lo cual es posible los desplazamientos verticales y horizontales así mismo las rotaciones, dichas combinaciones y el elemento terminal o pinza permitirían cumplir con el objetivo.

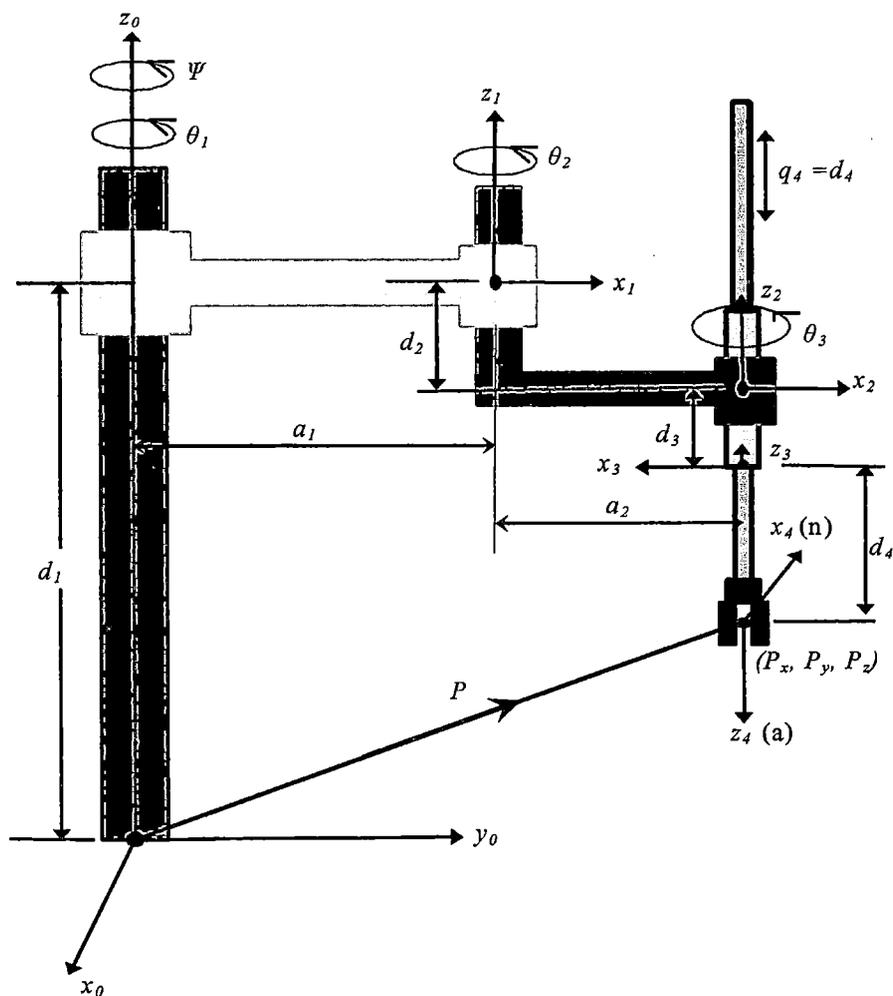


Fig. 5.18 Robot SCARA de cuatro grados de libertad

La matriz que relaciona la posición final de la herramienta de agarre con las coordenadas de referencia es la siguiente:

$${}^0T^4(q) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & -\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & 0 & a_1 \cos(\theta_1) + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & 0 & a_1 \sin(\theta_1) + a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ 0 & 0 & -1 & d_1 - d_2 - d_3 - d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matriz anterior de forma simplificada se muestra como sigue

$${}^0T^4(q) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 & P_x \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 & P_y \\ 0 & 0 & -1 & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Las tres primeras articulaciones del robot son rotacionales  $(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$  y la cuarta articulación es prismática  $d_4$ .

La cinemática directa se expresa como:

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \cos(\theta_1) + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ a_1 \sin(\theta_1) + a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ d_1 - d_2 - d_3 - d_4 \\ \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \end{bmatrix}$$

O sea  $x(t) = f(q(t))$

El punto de posicionamiento de la herramienta se especifica mediante las coordenadas  $p_x, p_y, p_z$  y la orientación de la herramienta se utiliza la componente de orientación  $\psi$ .

La cinemática inversa del robot se obtiene como sigue

$$p_x \cos q_1 + p_y \sin q_1 = \frac{p_x^2 + p_y^2 + a_1^2 - a_2^2}{2a_1} = Z$$

$$q_1 = \theta_1 = \arctan\left(\frac{p_y}{p_x}\right) + \arctan\left(\frac{\pm \sqrt{p_x^2 + p_y^2 - Z^2}}{Z}\right)$$

$$q_2 = \theta_2 = \arctan\left(\frac{p_y - a_1 \sin q_1}{p_x - a_1 \cos q_1}\right) - q_1$$

$$q_3 = \theta_3 = \varphi - q_1 - q_2$$

$$q_4 = d_4 = d_1 - d_2 - d_3 - p_z$$

La evaluación de la dinámica y de las ecuaciones de control para el *robot propuesto* se resuelve computacionalmente mediante el algoritmo *Lagrange-Euler*, haciendo uso de las magnitudes instantáneas de las articulaciones, velocidades y aceleraciones y de todas las magnitudes (valores de las masas, centros de masas, momentos de inercias, matrices de rotación, etc., valores de fricción viscosa, etc.)

Desarrollando analíticamente, también se obtiene la dinámica para el *robot SCARA*, en términos funcionalmente explícitos, mediante una expresión matricial-vectorial estructurada, que está en función de sus parámetros fijos y variables como una función del tiempo y con una interpretación física de sus términos, que simplificando se expresa:

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ f_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11}(q) & d_{12}(q) & d_{13}(q) & 0 \\ d_{21}(q) & d_{22}(q) & d_{23}(q) & 0 \\ d_{31}(q) & d_{32}(q) & d_{33}(q) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \\ \ddot{q}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1(q, \dot{q}) \\ c_2(q, \dot{q}) \\ c_3(q, \dot{q}) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ h_4(q) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1(\dot{q}_1) \\ b_2(\dot{q}_2) \\ b_3(\dot{q}_3) \\ b_4(\dot{q}_4) \end{bmatrix}$$

La expresión de la dinámica se puede expresar de forma general y simbólica como :

$$\tau(t) = D(q(t)) \ddot{q}(t) + c(q(t), \dot{q}(t)) + h(q(t)) + b(\dot{q}(t))$$

Donde:

$q$  : Vector de posición articulación del robot.

$\dot{q}$  : Vector de velocidad articular del robot.

$\ddot{q}$  : Vector de aceleración articular del robot.

$\tau(t)$  : Vector fuerza o torque que actúa sobre el vector articular del robot.

$D(q)$  : Matriz simétrica no singular que relaciona el efecto inercial de los enlaces y expresa la fuerza inercial debido al movimiento del robot.

$c(q, \dot{q})$  : Vector fuerza generado por la reacción de los efectos centrífugo y de Coriolis, debido al acoplo de velocidades durante el movimiento del robot.

$h(q)$  : Vector fuerza, generado por la acción de la gravedad que actúa sobre los elementos del robot.

$b(\dot{q})$  : Vector de fuerzas de fricción, que se oponen al desplazamiento de las articulaciones del robot.

Para la estructura de control de la trayectoria de la pinza de agarre del robot se puede escoger un sistema de control usando un controlador PID en el espacio de trabajo del robot que se representa en el siguiente diagrama de bloques.

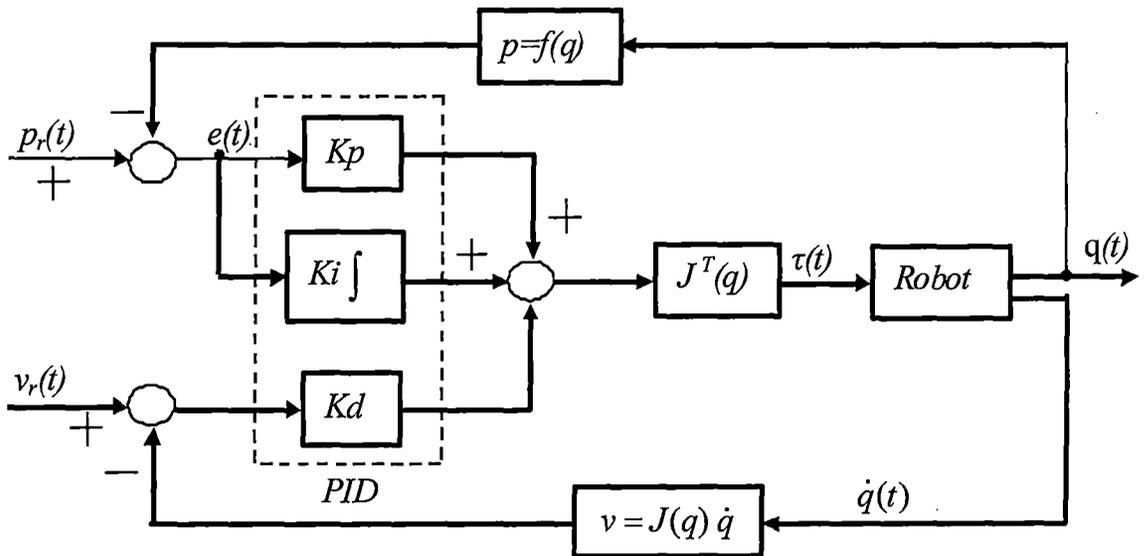


Gráfico 5.19 Diagrama de bloques de un Sistema de control de trayectoria espacial mediante controlador PID

Para controlar la trayectoria espacial se puede realizar una interpolación polinómica cúbica para unir dos puntos especificados. Cuando el robot se mueve desde un punto inicial  $p_0$  a un punto final  $p_f$  en el espacio de la configuración espacial en un intervalo de tiempo total  $[t_0, t_f]$ , presentando una mayor velocidad en la zona intermedia de la trayectoria.

Donde  $J$  es la matriz jacobiana correspondiente a la posición y se expresa como:

$$J(q) = \frac{dx(q)}{dq} = \begin{bmatrix} -a_1 \sin(q_1) - a_2 \sin(q_1 + q_2) & -\sin(q_1 + q_2) & 0 & 0 \\ a_1 \cos(q_1) + a_2 \cos(q_1 + q_2) & \cos(q_1 + q_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

El polinomio que representa una trayectoria cúbica es de tercer grado en el espacio de operación del robot en función del tiempo normalizado  $\tau(t)$  se expresa como sigue:

$$p(t) = a_3 t^3(t) + a_2 t^2(t) + a_1 t(t) + a_0$$

La velocidad espacial  $v(t)$  o primera derivada de  $p(t)$  en función de  $t$  se representa como:

$$v(t) = \frac{d'p(\tau)}{dt} = 3a_3 t^2 + 2a_2 t + a_1$$

La aceleración espacial  $a(t)$  o segunda derivada de  $p(t)$  en función de  $t$ , se expresa de la siguiente manera:

$$a(t) = 6a_3 t + 2a_2$$

Las ligaduras de posición espacial en los puntos inicial y final de la trayectoria son  $p(t_0) = p_0$  y  $p(t_f) = p_f$  respectivamente y las ligaduras de velocidad espacial en estos puntos son velocidad inicial  $v(t_0) = v_0$  y velocidad final  $v(t_f) = v_f$  respectivamente.

En la figura 5.20, se aprecia en forma gráfica la trayectoria polinómica cúbica la posición con su respectiva velocidad y aceleración.

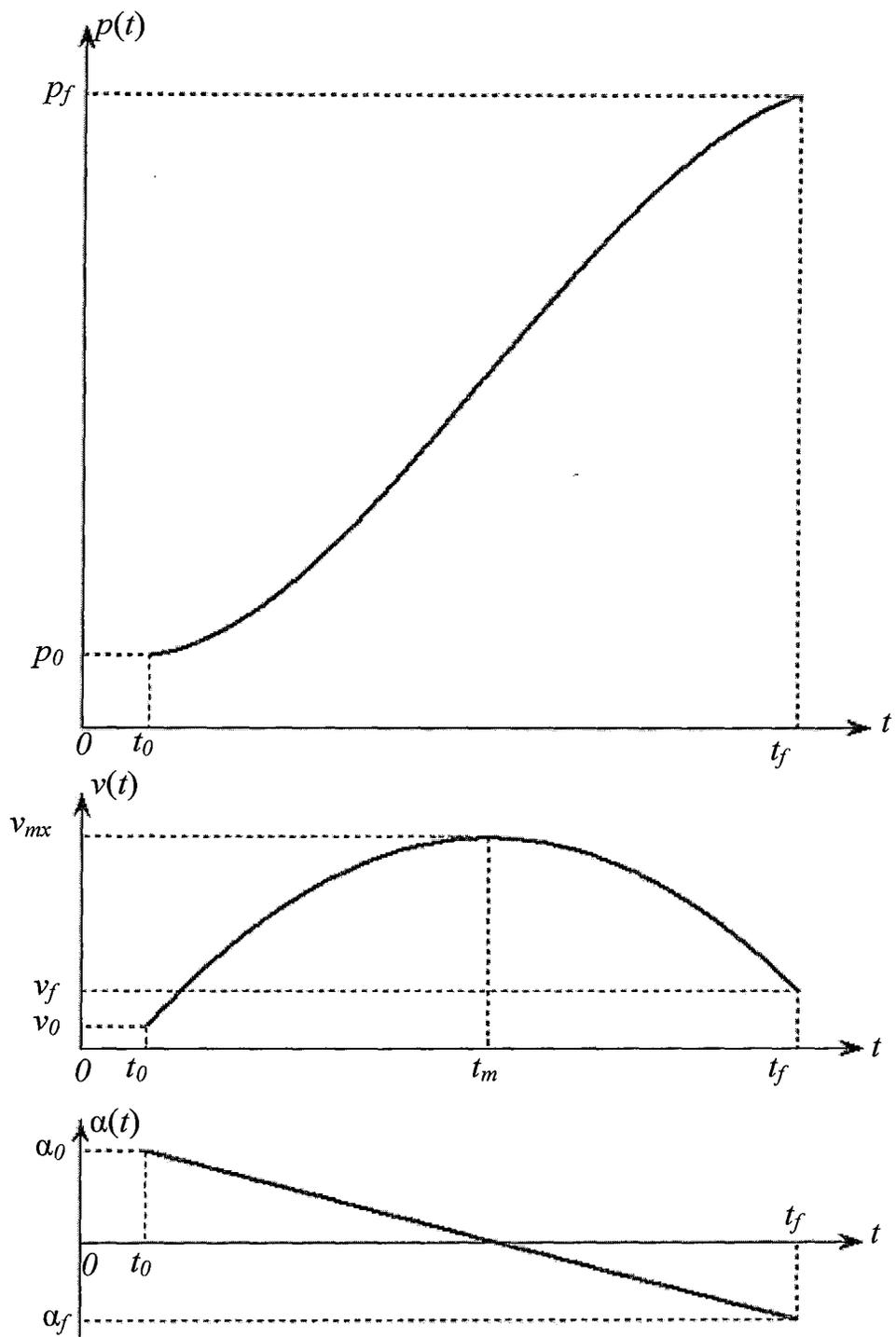


Fig. 5.20 Interpolación cúbica de: posición articular, velocidad y aceleración.

## **CAPITULO VI**

### **ANALISIS DE RESULTADOS**

#### **6.1. NIVEL TECNOLÓGICO EN EL CONTROL DE PARÁMETROS DE LOS DESHIDRATADORES QUE TIENEN LAS PYMES AGROINDUSTRIALES**

Algunas de las empresas visitadas tienen un sistema de control de parámetros muy incipiente por ejemplo para el control de temperatura utilizan un termostato que constantemente van manipulando de acuerdo a sus requerimientos, y para el control de humedad relativa ninguno.

Habiéndose determinado que en la línea de deshidratación el equipo de mayor relevancia es el deshidratador, se planteo llevar a cabo la automatización del mencionado equipo afín de lograr mejorar el control de los parámetros al interior de la cámara, temperatura y humedad relativa; así como de funcionamiento del equipo.

Las deficiencias detectadas en el funcionamiento del deshidratador de cabina sin automatización a ser utilizado en la etapa experimental en la PYME (Representaciones Agro Industriales SRL) fueron respecto al control de la temperatura, específicamente en la falta de homogeneidad al interior de la cámara, lo que ocasionaba incremento en el tiempo de proceso dado que algunas bandejas presentaban frutas aun húmedas, se determinó realizar como actividad previa a la automatización consistente en una mejora en el funcionamiento del equipo deshidratador.

Para el control de la temperatura al interior de la cámara se analizó el comportamiento y disponibilidad de sensores de temperatura, costo y adaptabilidad, procediéndose luego a su instalación afín de controlar la temperatura del proceso de deshidratación.

Para lograr mantener la uniformidad de la temperatura en todos los espacios al interior de la cámara de secado se evaluó la incorporación de ventiladores axiales, que permitieron asimismo optimizar el uso del aire caliente en un sistema de recirculación de aire.

Una vez logrado la mejora del funcionamiento del deshidratador de cabina se procedió como segunda etapa, la automatización digital del control de parámetros del proceso de deshidratación: temperatura, humedad relativa y humedad final del producto. Según Viani (Viani, 2006) en su “Estudio Sobre la Difusión de la Tecnología de Secado en Bandejas en el Perú, ITDG-Perú, 2007”, reporta que en la deshidratación de frutas en el medio rural se utilizan diversas clases de deshidratadores. Para producción a pequeña y mediana escala, los deshidratadores de bandejas y de túnel son los más comunes; dándose el caso de que en algunos valles productores de frutas para producciones a pequeña escala (a nivel familiar) se prefiere el secado solar.

**TABLA N° 6.1**

<b>Algunas secadoras para pequeñas y medianas escalas utilizadas en el Perú</b>					
<b>Sistemas de secado</b>	<b>Transferencias de</b>	<b>Productos</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Combustibles</b>	<b>Capacidad de secado</b>
Solar	Directa	Café, arroz, otros	Rural	Ninguno	Pequeña
Cama fija	Directa 1	Café	Rural	Madera	Pequeña/mediana
De bandejas	Indirecta	Productos alimenticios	Urbana	diesel, gas	Mediana 4
Tambor rotativo 2	Indirecta	Productos alimenticios 3	Urbana	diesel, gas	Mediana

1. - Aire caliente y combustión de gases pasan a la cámara de secado  
2. - Importado  
3.- Utilizado para deshidratar productos

**Fuente:** Viani 2007 ITDG

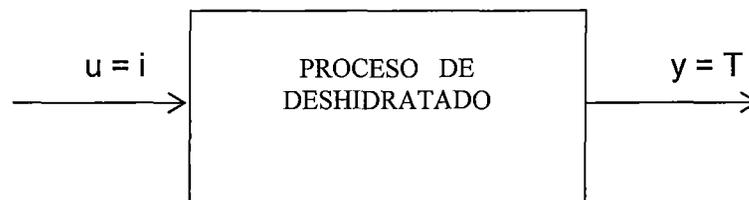
## 6.2. APLICACIÓN DE METODOS DE CONTROL AVANZADO EN EL DISEÑO DE CONTROL DE PARAMETROS DEL DESHIDRATADOR

### 6.2.1. MODELO MATEMATICO

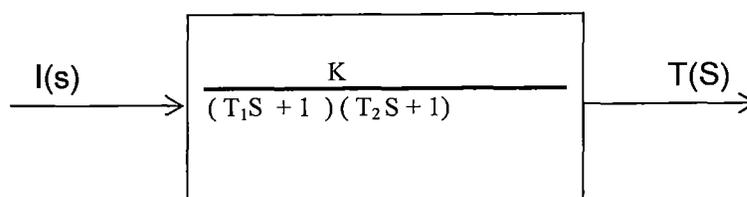
Entre los parámetros a controlar resulta la temperatura ser la más importante ya que es la que permite la evaporación del agua desde el interior del producto y en consecuencia influye directamente sobre la humedad relativa del aire dentro de la cabina deshidratadora.

Después de un análisis del proceso se determinó como la fase crítica la fase F1 donde la temperatura juega un papel muy importante ya que el aumento excesivo fuera del valor programado produce el encostramiento de la superficie de la fruta, lo cual evita que el agua pueda salir malogrando el producto durante el proceso.

El proceso a modelar con la señal de entrada  $u$  que está relacionada con la corriente que controla el sistema de accionamiento de las resistencias de calefacción, con la señal  $Y$  que representa la temperatura como salida del proceso.



La variación de la temperatura dentro de la cabina, se controla activando o desactivando el mecanismo de calefacción que está formado por resistencias eléctricas cuyo encendido y apagado es controlado por TRIACs que es manejado por corriente. Por lo tanto como entrada al proceso se tiene la corriente y como salida a la temperatura dentro de la cabina. Experimentalmente se identifica el proceso como:



$$K = \frac{\Delta T}{\Delta I} ; \text{Ganancia}$$

- $T_1$  : Tiempo que demora en variar la temperatura dentro de la cabina.  
 $T_2$  : Tiempo que demora en absorber el producto el cambio de temperatura.

$$\frac{T(S)}{I(S)} = \frac{K}{(T_1 S + 1)(T_2 S + 1)} \quad \text{ec. (6.1)}$$

$$I(S) = U(S)$$

$$T(S) = Y(S)$$

$$K U(S) = (T_1 T_2 S^2 + (T_1 + T_2) S + 1) Y(S) \quad \text{ec. (6.2)}$$

$$K u(t) = (T_1 T_2) \ddot{y}(t) + (T_1 + T_2) \dot{y}(t) + y(t) \quad \text{ec. (6.3)}$$

Como es de 2° Orden entonces se tiene 2 variables de estado.

$$X_1 = y \quad \text{.....EC(6.4)}$$

$$X_2 = \dot{y} \quad \text{.....EC(6.5)}$$

$$\text{De 6.4 y 6.5} \quad \dot{X}_1 = X_2$$

$$\dot{X}_2 = \dot{y}$$

De 6.5 y 6.3 se tiene:

$$\dot{X}_2 = \frac{K}{T_1 T_2} u - \frac{(T_1 + T_2)}{T_1 T_2} X_2 - \frac{1}{T_1 T_2} X_1 \quad \text{ec. (6.6)}$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{T_1 T_2} & -\frac{(T_1 + T_2)}{T_1 T_2} \end{bmatrix} \mathbf{X} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K}{T_1 T_2} \end{bmatrix} u \quad \text{ec. (6.7)}$$

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = [ 1 \quad 0 ]x + [ 0 ] u \quad \text{ec. (6.8)}$$

$$y = Cx + Du \quad \text{ec. (6.9)}$$

Para la programación y simulación del modelo del proceso a ser controlado se utilizó el software MATLAB y el programa se encuentra en el anexo 01

## **6.2.2. PROGRAMACIÓN Y SIMULACIÓN DE LOS METODOS**

Usando la herramienta de software MATLAB se realizó la programación y simulación de los métodos de control moderno para el control del parámetro temperatura.

### **METODOS DE CONTROL AVANZADO**

1.- Los métodos de control a ser evaluados son:

- Control optimo
- Control adaptivo autosintonizado
- Control Predictivo

2.- La optimización es posible aplicando ciertos criterios dependiendo de los modelos:

#### **6.2.2.1. METODO DE CONTROL ÓPTIMO DISCRETO**

El control óptimo trata de determinar el mejor sistema de control empleando una técnica óptima de diseño. Esta técnica asume la formulación de una función matemática llamada función de costo.

El objetivo del control optimo es el de determinar una ley de control optima que minimice la función de costo.

En la mayoría de los casos, sin embargo la búsqueda de la función de costo involucra procedimientos de error y corrección, esto significa que no siempre podremos estar seguros acerca de la forma exacta que debería tener la función de costo. Dado que este proceso no tiene acción integradora, se diseñará un control óptimo proporcional integral.

La optimización depende de la elección de Q y R, porque J que es la función de costo depende de Q y R.

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} (X^T(k) Q X(k) + u^T(k) R u(k)) \quad \text{ec. (6.10)}$$

Luego la señal de control óptima es también función de Q y R, debido a que para diseñar el controlador óptimo se tiene que resolver la siguiente ecuación de Riccati.

$$P = Q + G^T P G - G^T P H [R + H^T P H]^{-1} H^T P G \quad \text{ec. (6.11)}$$

Y esta ecuación es función de Q y R

Y a su vez la ganancia del controlador es:

$$K = [R + H^T P H]^{-1} H^T P G \quad \text{ec. (6.12)}$$

La señal de control óptima será:

$$u = -K X(k) + K_i v(k) \quad \text{ec. (6.13)}$$

- En Control óptimo se selecciona adecuadamente las matrices de ponderación  $Q_a$  y R, donde:

$Q_a$  pondera a todos los estados ( $X_1$  y  $X_2$ )

R pondera a las señales de control

Estas ponderaciones se realizan aplicando ciertos criterios

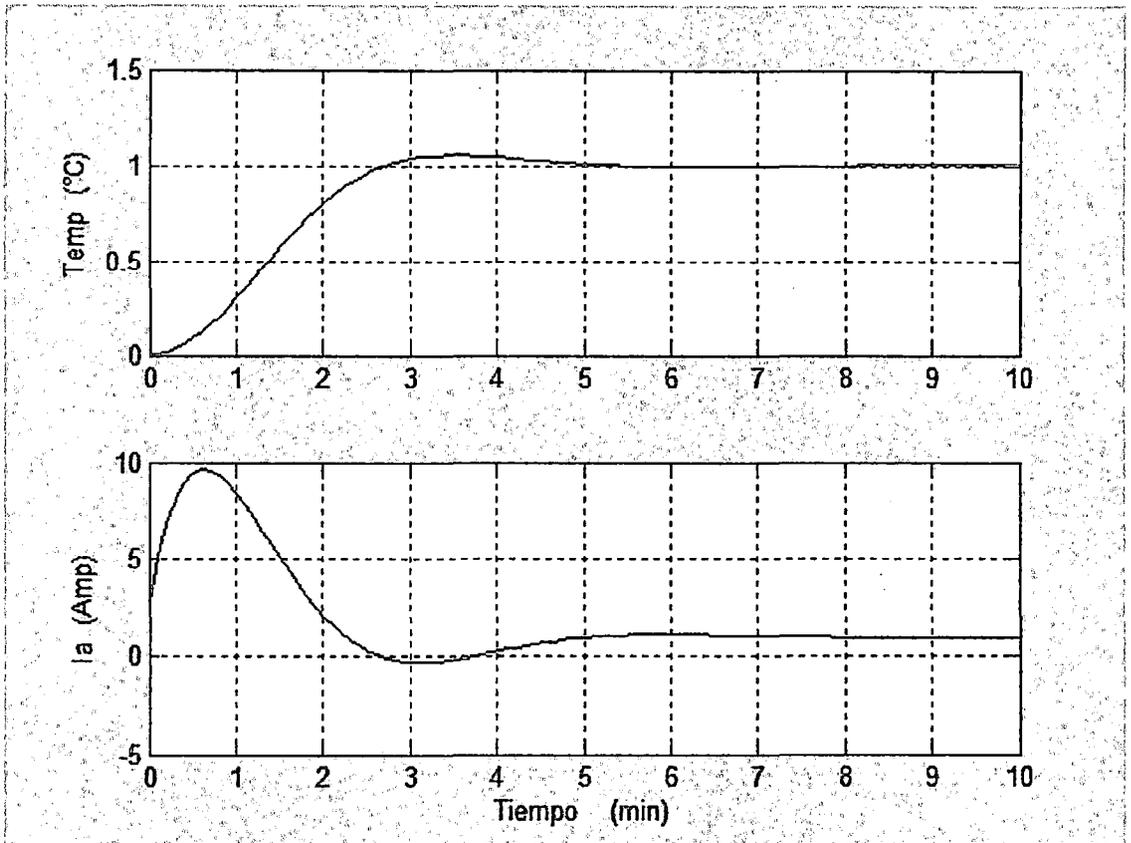
La optimización depende de la elección de Q y R, porque J que es la función de costo depende de Q y R, tal como se muestra en la ecuación (6.10)

La señal de control óptima será: La que se muestra en la ecuación (6.13).

La programación y simulación del método se encuentra en el anexo 01

Corriendo dicho programa se ha obtenido los gráficos siguientes para diferentes valores de la matriz R.

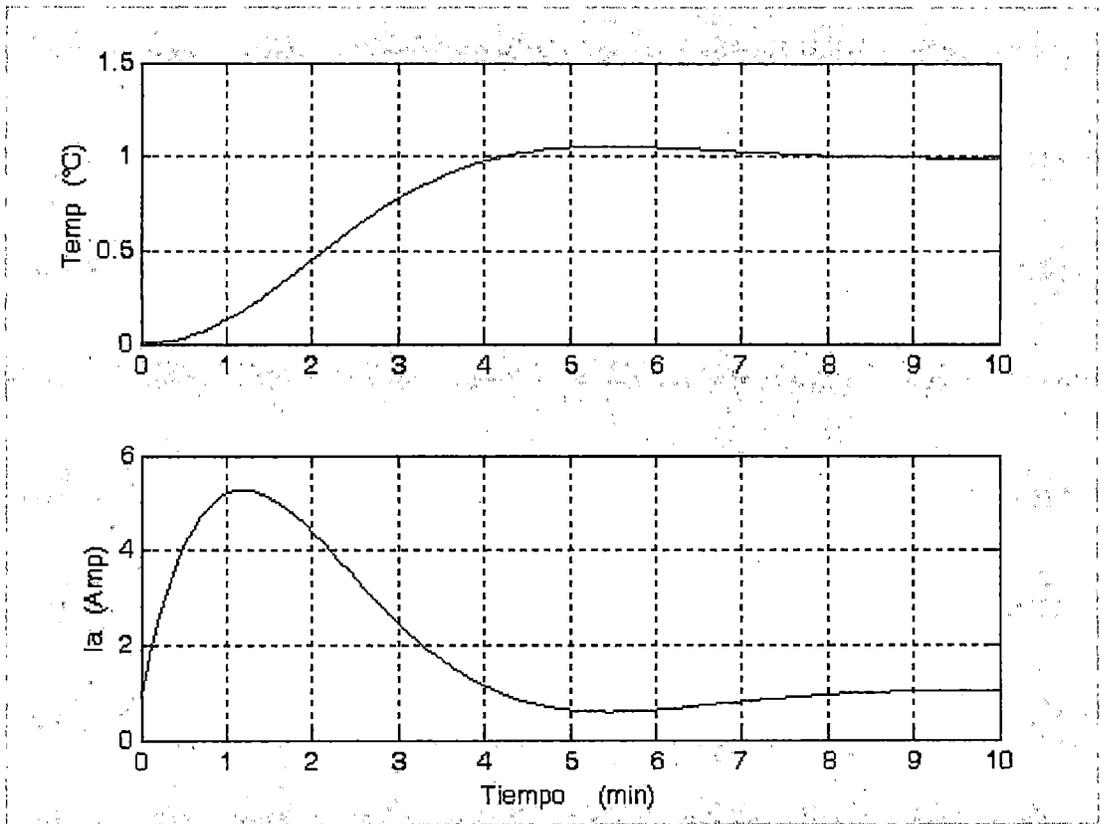
Se puede observar de las graficas el efecto de la matriz de ponderación R sobre los tiempos de respuesta.



Para las Matrices de ponderación

$$Q = [10 \ 0 \ 0; \ 0 \ 1 \ 0; \ 0 \ 0 \ 1]$$

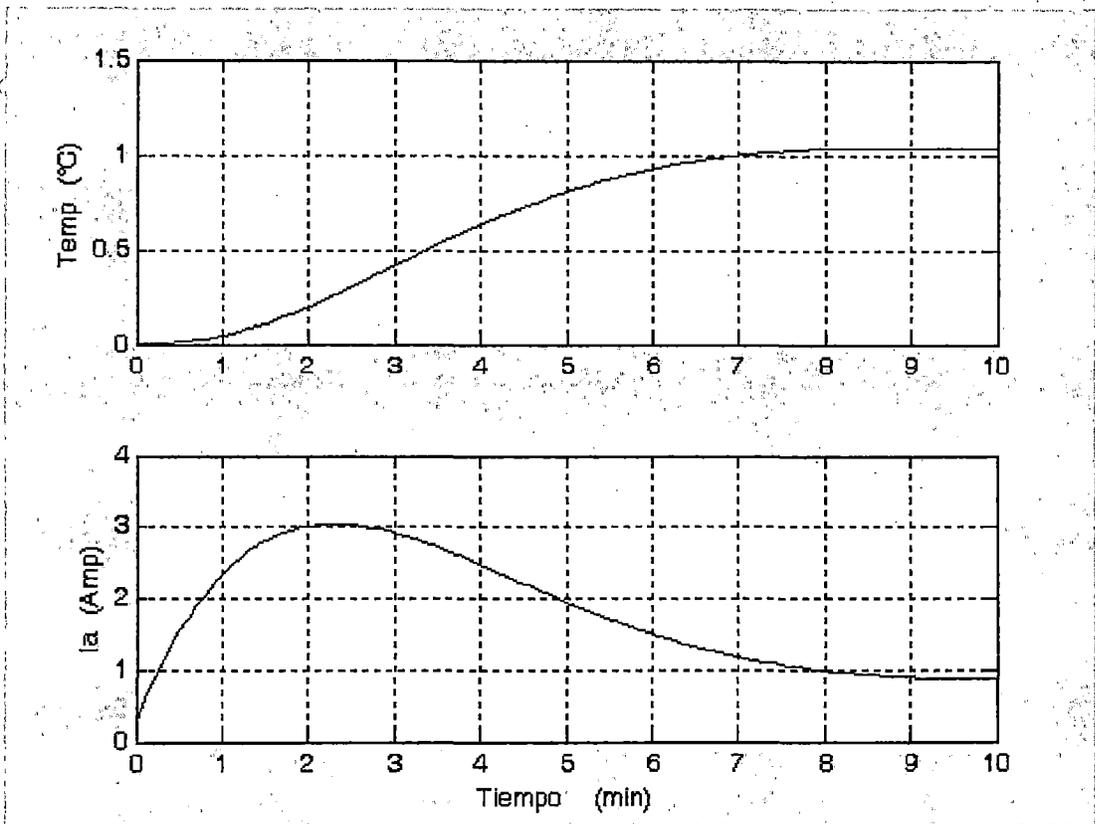
$$R = [0.1]$$



Para las Matrices de ponderación

$$Q = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R = [ 1 ]$$



Para las Matrices de ponderación

$$Q = [10 \ 0 \ 0; \ 0 \ 1 \ 0; \ 0 \ 0 \ 1]$$

$$R = [10]$$

### 6.2.2.2 MÉTODO DE CONTROL ADAPTIVO AUTOSINTONIZADO

El control adaptivo se puede aplicar en aquellos casos en que el modelo cambia continuamente por cambios de condiciones de funcionamiento. Los sistemas de control adaptivo modifican en tiempo real sus parámetros de acuerdo a las propiedades cambiantes del proceso y de las señales que interactúan sobre dicho proceso.

El control adaptivo autosintonizado consta de varios bloques funcionales:

- Modelo del proceso
- Estimador de parámetros (método del RLS mejorado)
- Estimador de estados (método del filtro de Kalman)
- Controlador optimo con autosintonización

La ley de control U, permitirá minimizar la diferencia entre la referencia y la salida del proceso.

La señal de control U actuante en el proceso, es la suma de la ley de control de equilibrio  $\bar{u}$  y la ley de control residual, expresada como  $U = \bar{u} + u$

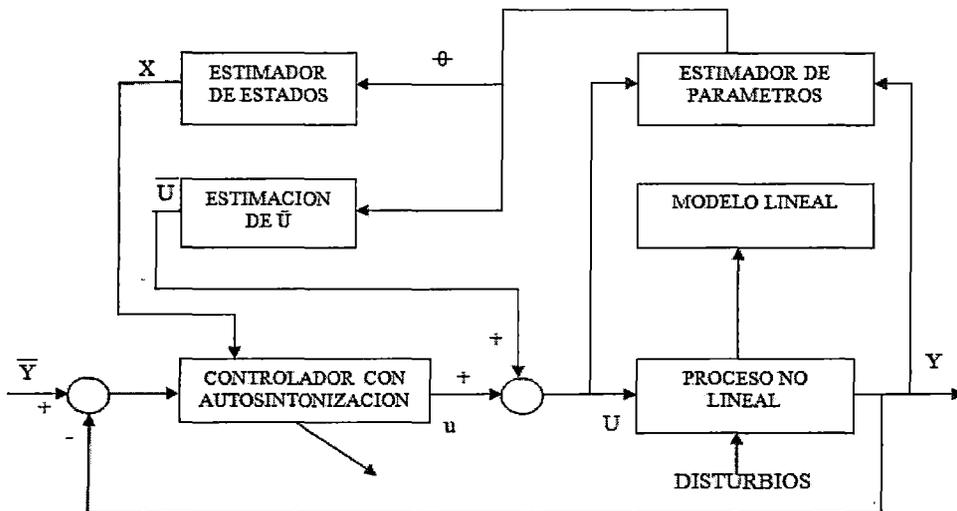


Grafico. 6.1 Sistema de control con Autosintonizacion

### Modelo del proceso

Para el siguiente proceso dinámico no lineal en tiempo continuo:

$$\dot{X} = f(X, U(t), v(x, t), t) \quad \text{ec. (6.14)}$$

$$Y = h(X, U(t), w(x, t), t) \quad \text{ec. (6.15)}$$

Donde:

X es el vector de estado

U(t) es la ley de control de orden uno

f(.) es una función no lineal que puede contener disturbios w(.) en la salida

linealizando las ecuaciones anteriores se obtiene el modelo lineal siguiente:

$$\dot{X}(t) = [A + \Delta A] X(t) + [B + \Delta B] U(t) + v(X,t) \quad \text{ec. (6.16)}$$

$$Y(t) = [C + \Delta C] X + w(X,t) \quad \text{ec. (6.17)}$$

Siendo:

A = Matriz de estado

B = Matriz de control

C = Matriz de salida

v = Vector de disturbios

w = disturbio de orden uno

Y(t)= Salida del proceso de orden uno

$\Delta A$ ,  $\Delta B$  y  $\Delta C$  son las correspondientes incertidumbres acotadas

La representación discretizada del proceso lineal continuo, es la siguiente:

$$X(k + 1) = GX(k) + HU(k) \quad \text{ec. (6.18)}$$

$$Y(k) = CX(k) \quad \text{ec. (6.19)}$$

Donde las matrices G y H son de la misma dimensión que las matrices A y B, respectivamente y k es el índice de tiempo discreto.

### **Estimación de parámetros por el método de los mínimos cuadrados recursivo (RLS) mejorado.**

Los pasos para su implementación se presenta a continuación:

- 1.- Obtener el vector de parámetros inicial  $\hat{\theta}(0)$  usando los valores de los parámetros del modelo del proceso.
- 2.- Obtener el valor inicial del parámetro  $C(0)$ , considerando  $\bar{u} = 0$  e Y igual a la señal de referencia.
- 3.- La matriz de covarianza inicial P, puede tener la forma  $P = \alpha I$ , donde I, es la matriz identidad y  $\alpha \gg 1$ .
- 4.- Tomar nuevas mediciones de Y(k) y de U(k) en el proceso, para obtener una nueva ecuación.
- 5.- Computar  $\rho(k) = \max(1, \frac{1}{\lambda + \|\Psi(k)\|^2})$ ;  $\Psi_n = \Psi / \rho(k)$

6.- Determinar la matriz  $N(k)$  aplicando factorización Cholesky en:

$$N(k)N(k)^T = P(k)$$

7.- determinar la matriz diagonal de escalamiento  $S(k)$  con elementos  $S_{jj}$  tal matriz minimiza el numero condicional del producto  $S(k)N(k)$  siempre que  $S_{jj} = 1/n_{jj}$ , donde cada  $n_{jj}$  se obtiene tomando el valor absoluto de la suma de los elementos de la fila  $j$  de  $N(k)$ .

8.- Computar  $P_s(k) = S(k)P(k)S(k)$

9.- Implementar el criterio para parar la estimación y para encontrar la nueva matriz de escalamiento.

### Estimación de estados

El modelo nominal del proceso con perturbaciones, puede ser descrito por:

$$X(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + v(k) \quad \text{ec. (6.20)}$$

$$Y(k) = Cx(k) + w(k) \quad \text{ec. (6.21)}$$

Usando los elementos del vector de parámetros estimado  $\hat{\theta}(k)$ , se puede reconstruir las matrices estimadas  $\hat{G}(k)$ ,  $\hat{H}(k)$  y  $\hat{C}(k)$

El vector de estado estimado  $\hat{x}(k)$  puede ser obtenido empleando el filtro de Kalman, con la siguiente ecuación de observación:

$$\hat{x}(k) = \bar{x}(k) + K_0(k)[y(k) - \hat{C}(k)\bar{x}(k)] \quad \text{ec. (6.22)}$$

Y la ecuación de actualización de estados será:

$$X(k+1) = \hat{G}(k)\hat{x}(k) + \hat{H}(k)u(k) \quad \text{ec. (6.23)}$$

La matriz de ganancia

$$K_0(k) = P_0(k)\hat{C}^T(k) [\hat{C}(k)\hat{C}^T(k) + R_0]^{-1} \quad \text{ec. (6.24)}$$

Donde  $P_0(k)$  es una matriz solución de la ecuación de Riccati

$$P_0(k+1) = Q_0 + \hat{G}^T(k)P_0(k)\hat{G}(k) - \hat{G}^T(k)K_0(k)\hat{C}(k)P_0(k)\hat{G}(k) \quad \text{ec. (6.25)}$$

Donde:

$Q_0$  y  $R_0$  son matrices de covarianza correspondiente a los disturbios  $v$  y  $w$  respectivamente.

### Ley de control

Como se está usando un controlador proporcional optimo cuadrático, se debe calcular una matriz de ganancia  $K_x$  que permite obtener una ley de

control optima  $u = K_x X(k)$ , como resultado de la minimización de la función de costo:

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} [X^T(k) Q X(k) + u^2(k) R] \quad \text{ec. (6.26)}$$

Donde las matrices  $Q = Q^T$  y  $R$  son semi definidas positiva, la matriz  $K_x$  se obtiene de:

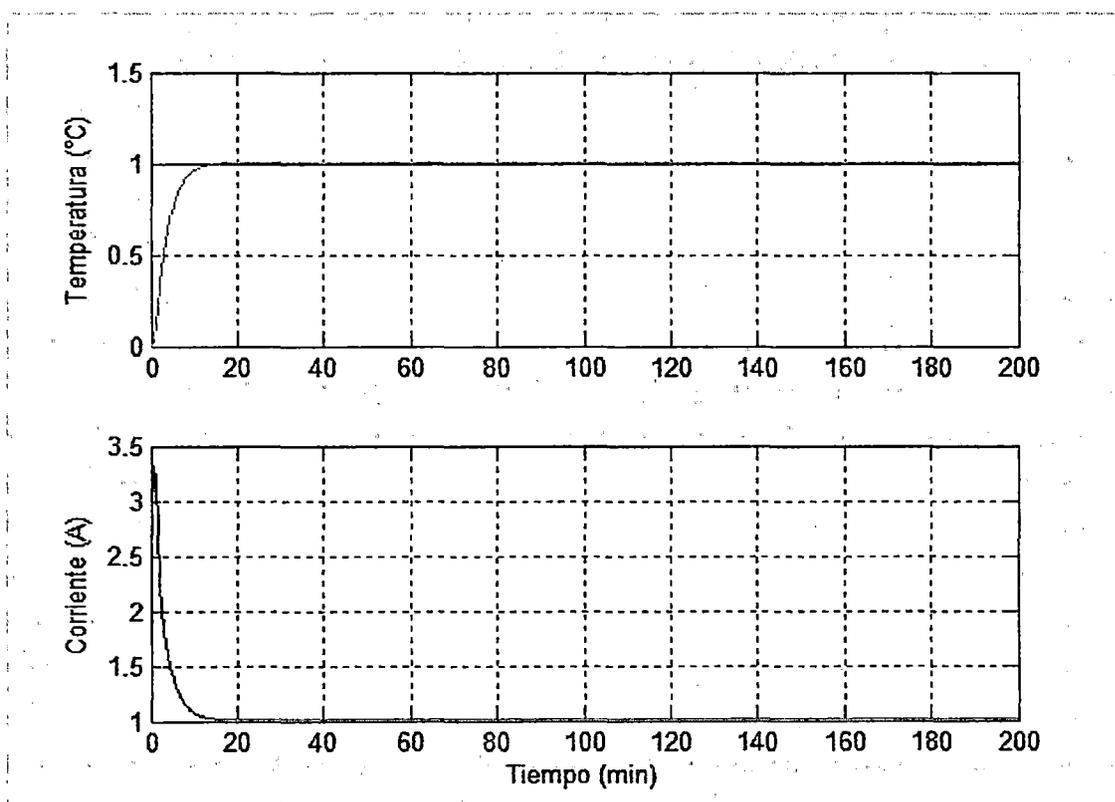
$$K_x = (R + H^T S H)^{-1} H^T S G \quad \text{ec. (6.27)}$$

Donde  $S$  es la matriz definida positiva solución única de la siguiente ecuación matricial de Riccati:

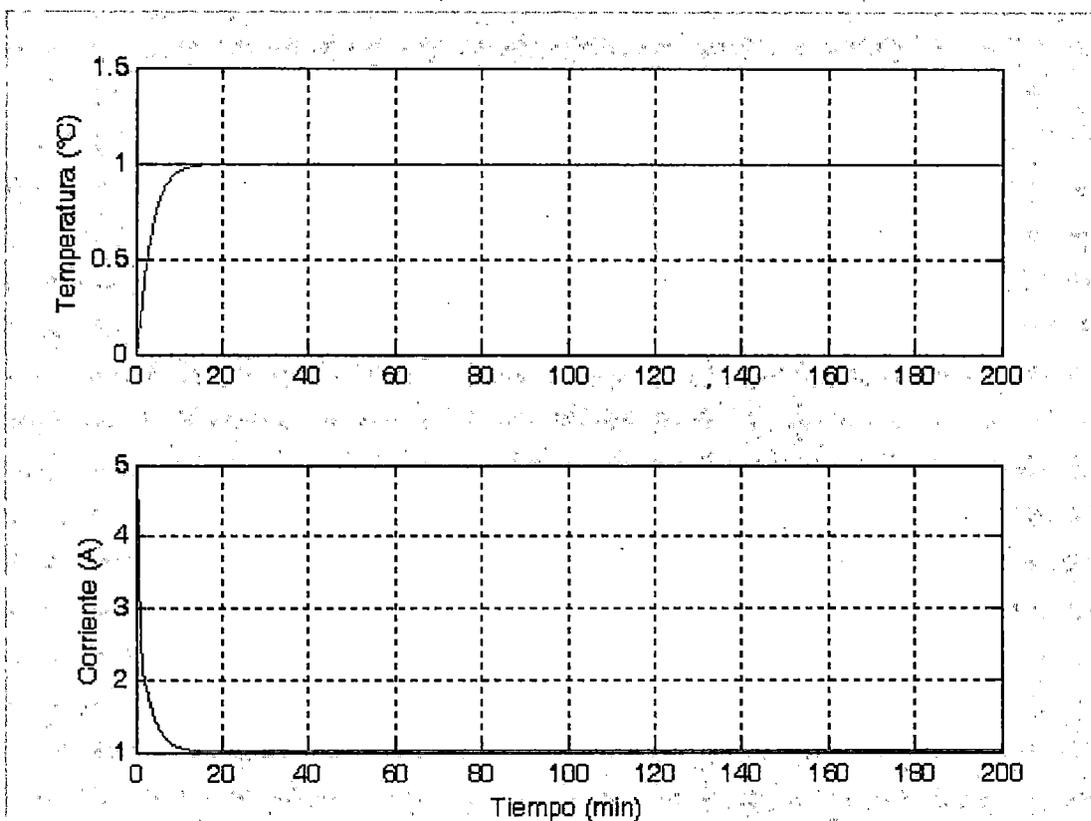
$$0 = S - G^T S G + G^T S H K_x \quad \text{ec. (6.28)}$$

La programación y simulación del método se encuentra en el anexo 01

A continuación se muestran los gráficos resultantes del MATLAB para dos valores de la matriz de ponderación  $R$ .



Para  $R = [100]$



Para  $R = [ 10 ]$

### 6.2.2.3 Método de control predictivo basado en modelos

El control predictivo basado en modelos ofrece un algoritmo de control que usa el modelo del proceso para calcular y optimizar las predicciones de las acciones de control y de la salida.

El control predictivo basado en un modelo (MBPC) es una metodología de control, desarrollada alrededor de ciertos principios comunes, entre los cuales se puede mencionar:

- 1.- Uso explícito de un modelo del proceso para pronosticar su salida a controlar en instantes de tiempo futuro.
- 2.- Cálculo de una acción de control óptima basada en la minimización de las funciones de costo, posiblemente incluyendo restricciones de las variables del proceso.

La optimización se da asumiendo la función de costo

$$J = \sum_{k=N1}^{N2} [r(t + \frac{k}{t}) - y(t + \frac{k}{t})]^2 + \lambda \sum_{k=0}^{Nu-1} [\Delta u(t + \frac{k}{t})]^2 \quad \text{ec. (6.29)}$$

$$\text{Donde: } \Delta u(t + \frac{k}{t}) = u(t + \frac{k}{t}) - u(t + k - \frac{t}{t})$$

$$\text{Con } \Delta u(t + \frac{k}{t}) = 0 \text{ para } k \geq Nu$$

La trayectoria de referencia está representada por la ecuación:

$$r(t + K/t) = \alpha r(t + k - 1/t) + (1 - \alpha)w(t + K/t) \quad \text{ec. (6.30)}$$

los parámetros de diseño son:

N1: Horizonte de predicción mínimo

N2: Horizonte de predicción máximo

Nu: Horizonte de control

$\lambda$ : Parámetro de ponderación

$\alpha$ : Parámetro de filtraje

La ley de control

La ecuación de costo se puede escribir como:

$$(R - Y)^T (R - Y) + \lambda U^T U = [(R - \bar{Y}) - GU]^T [(R - \bar{Y}) - GU] + \lambda U^T U \quad \text{ec. (6.31)}$$

La minimización por diferenciación resulta ser la solución óptima

$$U^* = (G^T G + \lambda I)^{-1} G^T (R - Y) \quad \text{ec. (6.32)}$$

Luego se logra obtener una señal de control optima predictiva

$$\Delta u(t) = \frac{\sum_{k=N1}^{N2} g [r(t + \frac{k}{t}) - y \text{ libre } (t + \frac{k}{t})]}{\sum_{k=N1}^{N2} g k^2 + \lambda} \quad \text{ec. (6.33)}$$

La optimización se da asumiendo la función de costo

$$J = \sum_{k=N1}^{N2} [r(t + \frac{k}{t}) - y(t + \frac{k}{t})]^2 + \lambda \sum_{k=0}^{Nu-1} [\Delta u(t + \frac{k}{t})]^2 \quad \text{ec. (6.34)}$$

$$\text{Donde: } \Delta u(t + \frac{k}{t}) = u(t + \frac{k}{t}) - u(t + k - \frac{t}{t})$$

Con  $\Delta u(t + \frac{K}{t}) = 0$  para  $K \geq U_n$

La trayectoria de referencia está representada por la ecuación:

$$r(t + K/t) = \alpha r(t + k - 1/t) + (1 - \alpha)w(t + K/t)$$

La ley de control

La ecuación de costo se puede escribir como:

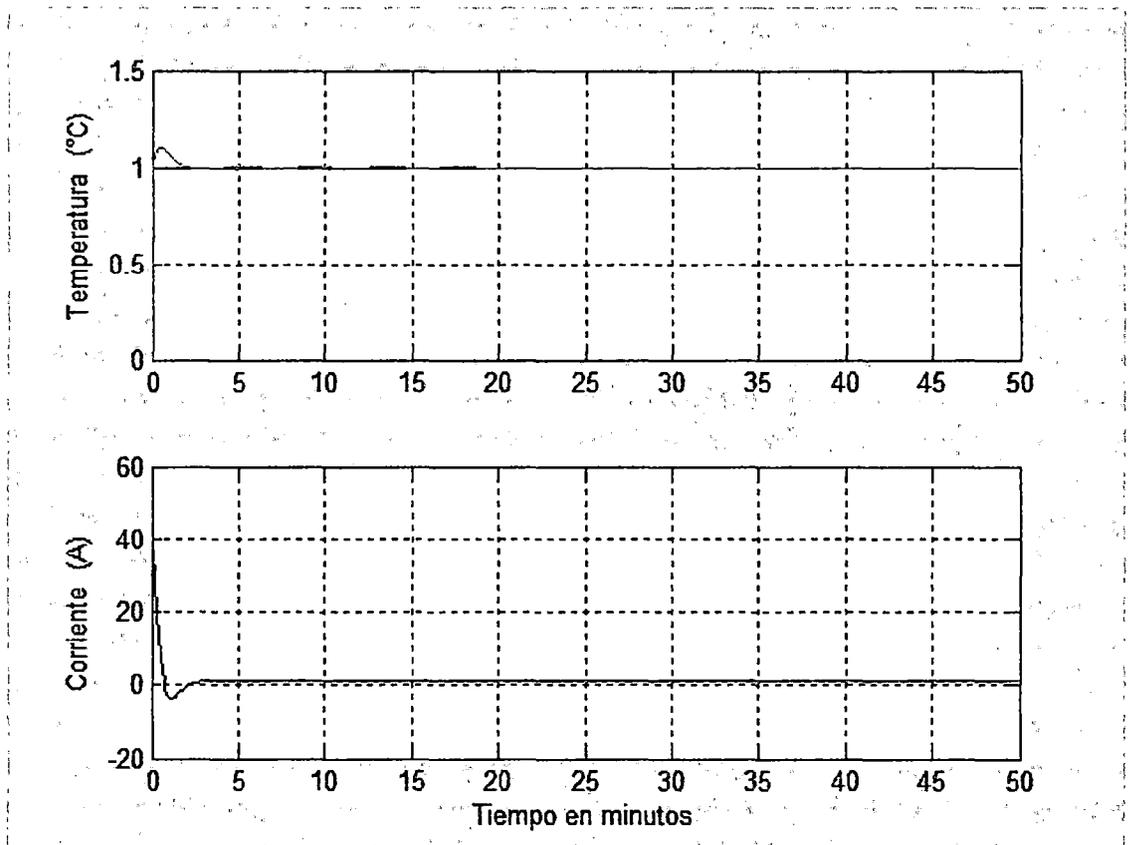
$$(R - Y)^T (R - Y) + \lambda U^T U = [(R - \bar{Y}) - GU]^T [(R - \bar{Y}) - GU] + \lambda U^T U \quad \text{ec. (6.35)}$$

La minimización por diferenciación resulta ser la solución óptima

$$U^* = (G^T G + \lambda I)^{-1} G^T (R - Y) \quad \text{ec. (6.36)}$$

Luego se logra obtener una señal de control óptima predictiva

$$\Delta u(t) = \frac{\sum_{k=N_1}^{N_2} [r(t + \frac{K}{t}) - y_{LBR}(t + \frac{K}{t})]}{\sum_{k=N_1}^{N_2} [k^2 + \lambda]} \quad \text{ec. (6.37)}$$



La programación y simulación del método se encuentra en el anexo 01

#### 6.2.2.4 Análisis de la Programación y simulación del proceso

Respecto a qué método de control es el más adecuado, se tiene la siguiente tabla:

METODO	TIEMPO DE ASENTAMIENTO (Seg.)	SOBREPICO (%)	CORRIENTE DE CONTROL EN EL TRANSITORIO (A)
CONTROL OPTIMO DISCRETO	5.5	10	9.8
CONTROL ADAPTIVO AUTOSINTONIZADO	15	0	3.4
CONTROL PREDICTIVO BASADO EN MODELOS	2.5	15	34

Tabla 6.2 Comportamiento de los métodos de control avanzado

Si consideramos que el deshidratador es un sistema de respuesta lenta o relativamente lenta, dependiendo del producto, del nivel de corriente a utilizar para controlar el proceso de deshidratado, así como el considerar la conveniencia de una respuesta suave (sin sobre picos) con optimización de control de corriente, se puede concluir de la tabla que el sistema de Control Adaptivo Autosintonizado es el más apropiado.

Este método utiliza como uno de los bloques conformantes al Controlador Optimo. Una segunda opción a considerar sería el Control Optimo Discreto. El Control Predictivo sería el menos recomendable, básicamente por el excesivo consumo de corriente en el transitorio.

## **6.3 MEJORA DEL PROCESO DE DESHIDRATADO DE FRUTAS**

### **6.3.1 MATERIALES Y MÉTODO**

#### **6.3.1.1 Materias Primas e Insumos**

Para las pruebas se han seleccionado las frutas: piña variedad "Chanchamayo", durazno variedad "Huayco" y manzana variedad "Delicia".

#### **6.3.2. Métodos de Análisis**

##### **6.3.2.1 Análisis Microbiológico**

- Mesófilos utilizando el método de Recuento estándar en placa de Microorganismos aerobios.
- Hongos y Levaduras, Método de Recuento estándar

##### **6.3.2.2 Análisis de Caracterización: Proximal**

Se llevaran a cabo análisis de humedad, proteína, cenizas, grasa, CHO, fibra y Kcal./g.

##### **6.3.2.3. Análisis Organoléptico**

Con la finalidad de medir la aceptabilidad de las frutas deshidratadas haciendo uso del deshidratador de cabina sin automatización y automatizado se llevo a cabo una prueba de evaluación sensorial.

Para la etapa de selección de panelistas se dispuso de aulas de clase con capacidad para 100 alumnos de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la USMP. Como parte de la metodología de aplicación de las pruebas de evaluación sensorial se expuso en cada aula los objetivos de las pruebas así como la forma de llenado de los formatos elaborados para este fin.

#### **Métodos de análisis**

##### **a) Encuesta de aceptabilidad del Producto**

De acuerdo a los objetivos del estudio se realizó una encuesta estructurada para evaluar la aceptabilidad de las frutas deshidratadas.

El método aplicado fue una encuesta a los consumidores finales para que identificaran que producto prefieren más.

### PRUEBA DE LA ESCALA HEDÓNICA

Nombre:.....

Producto:.....

Fecha:.....

Instrucciones:

Por favor, pruebe las muestras en el orden que se indica y ubique en la escala que se acompaña la intensidad de agrado o desagrado para cada una.

9. Gustó Extremadamente		
8. Gustó mucho		
7. Gustó moderadamente		
6. Gustó Ligeramente		
5. No gustó ni disgustó		
4. Disgustó ligeramente		
3. Disgustó moderadamente		
2. Disgustó mucho		
1. Disgustó extremadamente		

Comentarios:

---

---

---

**CUADRO N° 6.1 Formato de la Prueba de la Escala Hedónica**

b) Selección de los Jueces

Se contactaron individualmente a 100 personas del entorno de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la USMP, en su mayoría jóvenes, hombres y mujeres cuyas edades fluctuaban entre 18 y 22 años. Tras una breve explicación de la encuesta, en cada caso, se les proporcionó el formato (Cuadro N° 6.1) y se les solicitó que lo llenaran libremente y con la mayor sinceridad, pues los datos obtenidos serían usados confidencialmente.

Después de completar las 100 encuestas por producto y verificar los datos, se les dió a conocer la naturaleza general del estudio. Los datos obtenidos fueron tabulados obteniéndose los porcentajes de las principales respuestas para el grupo de personas encuestadas.

c) Diseño Estadístico

En el siguiente cuadro N° 6.2 se observa los productos que se utilizaron y los tamaños de muestras sugerido por Mendehall y et al (1994). Se utilizó la prueba de Wilcoxon de rangos con signos, esta se usa para observaciones clasificadas según dos criterios y que no se cumplan las suposiciones necesarias para el análisis paramétrico o cuando la escala de medición es débil. Esta prueba es apropiada siempre que los datos se midan al menos en una escala ordinal.

1	Manzana deshidratador tradicional	100
2	Manzana deshidratador automatizado	
3	Durazno deshidratador tradicional	100
4	Durazno deshidratador automatizado	
5	Piña deshidratador tradicional	100
6	Piña deshidratador automatizado	

**CUADRO N° 6.2 Descripción de las muestras**

## **6.4 ANÁLISIS DE CARACTERIZACIÓN DE LAS FRUTAS DESHIDRATADAS**

### **6.4.1 DESDE EL PUNTO DE VISTA MICROBIOLÓGICO**

En el cuadro N° 6.3 se presenta los análisis Microbiológicos referidos a Recuento de Mesófilos aerobios, y el Recuento de Levaduras de las frutas deshidratadas en la Empresa "Representaciones Agroindustriales SRL".

-En el cuadro en mención se observa mayores recuentos de Mesófilos aerobios así como de mohos y levaduras en las frutas deshidratadas en la línea tradicional, que con la línea mejorada que incluía el deshidratador de cabina automatizado.

-De acuerdo a normas internacionales de la FAO los recuentos de mesófilos aerobios para frutas deshidratadas son de  $< 3 \times 10^2$  UFC/g y de mohos y levaduras es de  $3 \times 10^2$  UFC/g. Respecto a la manzana deshidratada por ambos métodos los valores reportados por éstas exceden dichos valores.

### Proceso A

□ Recuento de Mesófilos aerobios:

1. MANZANA :-----  $2 \times 10^3$  UFC / g
2. PIÑA :----- 5 UFC / g
3. DURAZNO :-----  $3 \times 10$  UFC / g

□ Recuento de Levaduras:

1. MANZANA :-----  $1.5 \times 10^2$  UFC / g
2. PIÑA :-----  $3 \times 10$  UFC / g
3. DURAZNO :-----  $1.8 \times 10$  UFC / g

### Proceso B

□ Recuento de Mesófilos aerobios:

1. MANZANA :-----  $2.5 \times 10^3$  UFC / g
2. PIÑA :-----  $1.1 \times 10$  UFC / g
3. DURAZNO :-----  $5 \times 10$  UFC / g

□ Recuento de Mohos y Levaduras:

1. MANZANA :-----  $1.8 \times 10$  UFC / g
2. PIÑA :-----  $4.5 \times 10$  UFC / g
3. DURAZNO :-----  $2 \times 10^2$  UFC / g

**CUADRO N° 6.3 Análisis Microbiológico**

#### 6.4.2 ANÁLISIS PROXIMAL DE LAS FRUTAS DESHIDRATADAS

En el cuadro N° 6.4 se presenta los análisis de caracterización realizados con la manzana, durazno y piña deshidratada en la PYME haciendo uso de deshidratador de cabina automatizada (A) y sin automatizar (B), respecto a humedad, proteína, cenizas, grasa, fibra. CHO y Kcal. /g.

**CUADRO N° 6.4**  
**Resultados del Análisis Proximal de las Frutas Deshidratadas**

DETERMINACION	PROCESO A			PROCESO B		
	Manzana	Piña	Durazno	Manzana	Piña	Durazno
Humedad	11.8	18.6	20.42	16.91	24.02	17.05
Proteína	1.48	3.01	1.65	1.11	2.53	1.76
Cenizas	1.59	2.58	3.35	1.6	2.6	3
Grasa	0.34	0.44	0.33	0.32	0.5	0.47
Cho	84.79	75.37	74.25	80.06	70.35	77.72
Fibra	2.59	1.81	1.84	2.22	1.43	1.69
Kcal/g	348.12	317.46	306.55	327.54	296.02	322.13

#### 6.4.3. DE LA EVALUACIÓN SENSORIAL

El objetivo de las pruebas de evaluación sensorial fue comparar las características organolépticas de las frutas deshidratadas: manzana, durazno y piña, obtenidas en la línea de producción que uso deshidratador de cabina no automatizado, en relación a las obtenidas haciendo uso del deshidratador de cabina automatizada. Los resultados obtenidos se presentan en el cuadro N° 6.5 y la figura N° 6.1 para la manzana, en el cuadro N° 6.6 y la figura N° 6.2 para el durazno deshidratado, y en cuadro N° 6.7 y la figura N° 6.3 para la piña.

### 6.4.3.1 COMPARACIÓN DE LAS FRUTAS DESHIDRATADAS EN LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN HACIENDO USO DE DESHIDRATADOR SIN AUTOMATIZACIÓN Y AUTOMATIZADO

Los resultados de las pruebas de evaluación sensorial realizadas con las frutas deshidratadas: manzana, durazno y piña llevadas a cabo en la PYME "Representaciones Agroindustriales SRL" se presentan a continuación:

- **Manzana deshidratada con deshidratador automatizado y sin automatizar**

#### MANZANA

Proceso	N	Prome- dio	Media- na	Desv. Estándar	Máximo	Míni- mo
Automatizado(A)	100	7.27	7	1.370	9	2
No Automatizado(B)	100	6.15	6	1.696	9	2

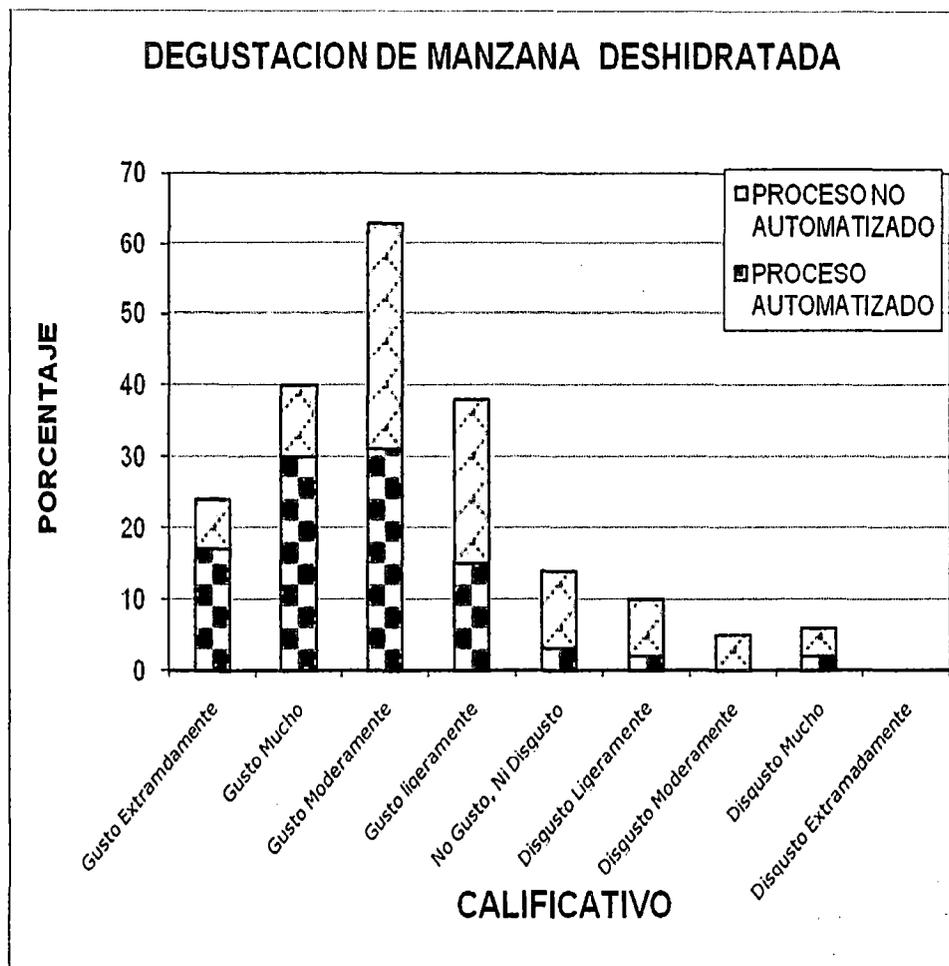
Comparación	<u>N</u>	T	p-value
Proceso A y B	100	6,28	0.0000

**CUADRO N° 6.5 Frecuencias de los calificativos de las hojuelas de manzana**

<b>Calificativo/ Proceso</b>	<b>Automatizado % degustadores</b>	<b>No Automatizado % degustadores</b>
Gusto Extremadamente	17	7
Gusto Mucho	30	10
Gusto Moderadamente	31	32
Gusto ligeramente	15	23
No Gusto, Ni Disgusto	3	11
Disgusto Ligeramente	2	8
Disgusto Moderadamente	0	5
Disgusto Mucho	2	4
Disgusto Extremadamente	0	0
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Fuente: Elaboración propia

**FIGURA N° 6.1 Aceptabilidad de las hojuelas de Manzana en Porcentaje**



De acuerdo al análisis estadístico existen diferencias significativas ( $\alpha = 0,05$  > P-Value = 0.000) entre los procesos automatizado y el proceso no automatizado en el deshidratado de los frutos de manzana.

Del cuadro N° 6.5 y la figura N° 6.1, se observa que el proceso automatizado esta mejor calificado que el proceso no automatizado, gusta extremadamente 17 % y 7 %; gusta mucho 30 y 10 por ciento respectivamente.

- Durazno deshidratado con deshidratador automatizado y sin automatizar

### DURAZNO

Proceso	N	Promedio	Mediana	Desv. Estándar	Máximo	Mínimo
Automatizado(A)	100	6.28	6	1.518	9	1
No Automatizado(B)	100	6.10	6	1.772	9	1

Comparación	N	T	p-value
Proceso A y B	100	0,77	0.441

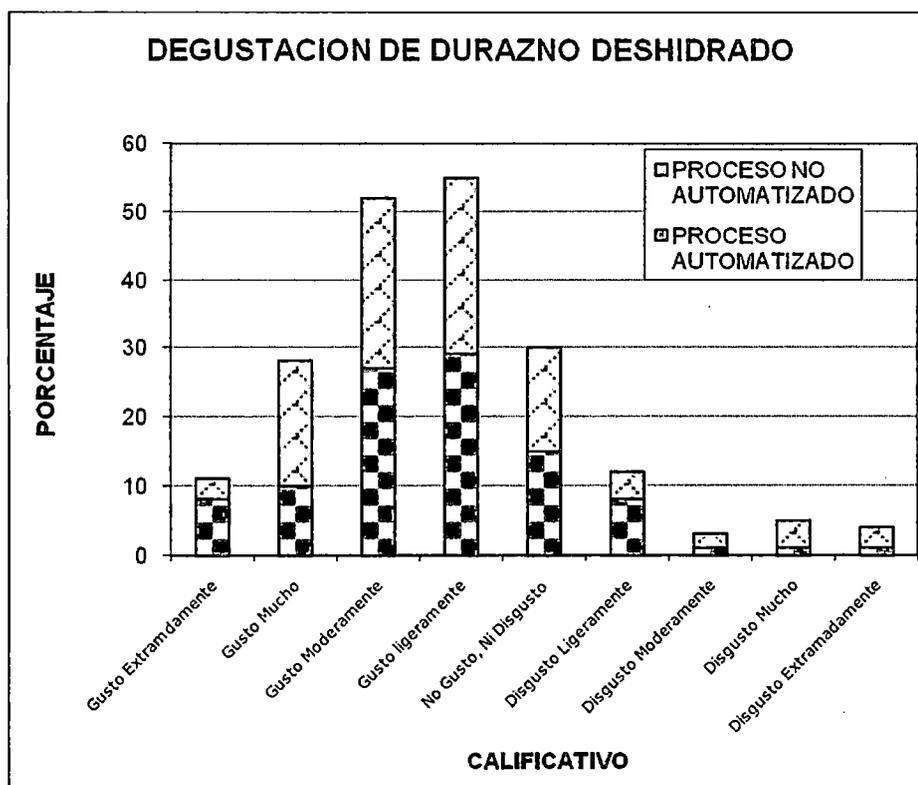
### CUADRO N° 6.6

#### Frecuencias de los Calificativos del Durazno Deshidratado

Calificativo/ Proceso	Automatizado % consumidores	No Automatizado % de consumidores
Gusto Extremadamente	8	3
Gusto Mucho	10	18
Gusto Moderadamente	27	25
Gusto ligeramente	29	26
No Gusto, Ni Disgusto	15	15
Disgusto Ligeramente	8	4
Disgusto Moderadamente	1	2
Disgusto Mucho	1	4
Disgusto Extremadamente	1	3
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Fuente: Elaboración propia.

**FIGURA N° 6.2 Aceptabilidad del Durazno Deshidratado en Porcentaje.**



Hay evidencia estadística para afirmar que no existen diferencias significativas ( $\alpha = 0,05 < P\text{-Value} = 0.441$ ) entre los procesos automatizado y el proceso no automatizado en las hojuelas de durazno, esto significa que son similares con respecto a la aceptabilidad del producto. Del cuadro N° 6.6 y la figura N° 6.2, se observa que el proceso automatizado y no automatizado son calificados en forma similar por los consumidores.

- Piña deshidratada con deshidratador automatizado y sin automatizar

### PIÑA

Proceso	N	Promedio	Mediana	Desv. Estándar	Máximo	Mínimo
Automatizado(A)	100	7.01	7	1.691	9	2
No Automatizado(B)	100	5.64	6	1.630	9	2

Proceso A y B	100	6,27	0.0000
---------------	-----	------	--------

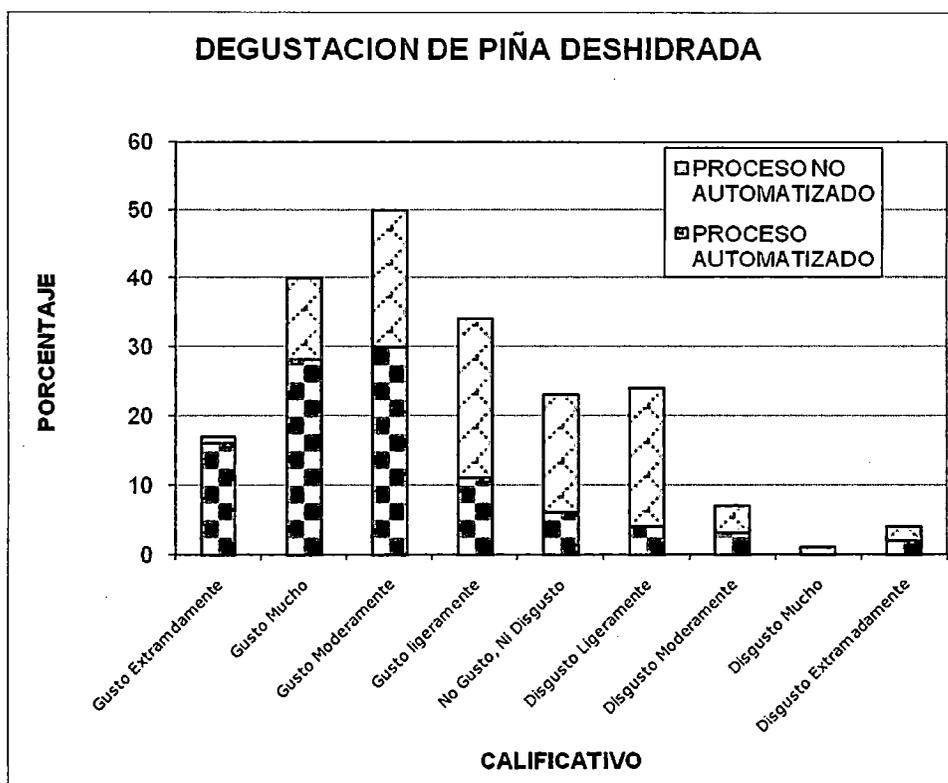
### CUADRO N° 6.7

#### Frecuencias de los Calificativos de la Piña Deshidratada

Calificativo/ Proceso	Automatizado % consumidores	No Automatizado % de consumidores
Gusto Extremadamente	16	1
Gusto Mucho	28	12
Gusto Moderadamente	30	20
Gusto ligeramente	11	23
No Gusto, Ni Disgusto	6	17
Disgusto Ligeramente	4	20
Disgusto Moderadamente	3	4
Disgusto Mucho	0	1
Disgusto Extremadamente	2	2
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Fuente: Elaboración propia.

**FIGURA N° 6.3 Aceptabilidad de la Piña Deshidratada en Porcentaje**



Para el caso de la piña deshidratada, el resultado del análisis estadístico indica que existen diferencias significativas ( $\alpha = 0,05 > P\text{-Value} = 0.000$ ) entre los procesos automatizado y el proceso no automatizado. Del cuadro N° 6.7 y la figura N° 6.3 se observa que el proceso con el equipo automatizado está mejor calificado que el procesado con el equipo tradicional, habiendo gustado extremadamente 16% y 1%, gusto mucho 28% y 12%, gusto moderadamente 30% y 20% respectivamente.

## **6.5. MEJOR RESPUESTA EN EL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN.**

### **6.5.1. COSTOS DE PRODUCCIÓN**

Los costos de producción de ambas líneas difieren a favor de la que utilizó el deshidratador automatizado como se puede observar en los cuadros comparativos que se presentan para cada fruta.

Como se puede apreciar en el Cuadro Comparativo N° 6.8 y Figura N° 6.4, los costos totales de la deshidratación para los frutos de durazno son menores en la línea que utilizó el deshidratador automatizado disminuyendo en aproximadamente el 14% de sus costos.

Respecto a la disminución de los costos, se observa que éste se debió al menor uso del recurso humano en las operaciones de cambio de bandejas y de control del funcionamiento del deshidratador que represento un ahorro de 33%; así mismo, en menores gastos de energía alrededor de 14%.

Para la deshidratación de los frutos de piña como se aprecia en el Cuadro N° 6.9 y Figura N° 6.5, los costos totales de la deshidratación para los frutos de piña difieren también a favor de la línea que utilizó el deshidratador automatizado, disminuyendo en aproximadamente el 17% de sus costos actuales. La disminución de los costos, se debe al menor uso de los recursos humanos en las operaciones (como en el caso anterior) ahorrándose el 33% y en menores gastos de energía alrededor de 14%.

La comparaciones que se puede apreciar en los costos totales de la deshidratación para los frutos de manzana que se presentan en el Cuadro N° 6.10 y Figura N° 6.6, difieren a favor de la línea que utilizó el deshidratador automatizado disminuyendo en aproximadamente el 30% de sus costos actuales. La disminución se debe al menor uso de los recursos humanos en las operaciones ahorrándose el 64% y en menores gastos de energía alrededor del 14%.

En cuanto a los resultados obtenidos con la evaluación de los costos de producción se puede explicar que el mayor uso de mano de obra en el proceso realizado con el deshidratador convencional, se debe a la presencia de un operario para realizar el control manual del parámetro de temperatura, para apagar el equipo deshidratador al termino del proceso, así como para el intercambio de bandejas al interior del equipo, dado que la temperatura en los diferentes niveles de la cámara no es uniforme, lo cual no ocurre con el equipo automatizado.

La diferencia en los costos por el consumo de energía total para el sistema automatizado fue de: 31 Kwh para el caso de la manzana y de 36 Kwh para el durazno y la piña.

Similar proceso llevado a cabo para los mismos productos en el equipo convencional reportó un consumo de: 36 Kwh para el caso de la manzana y de 42 Kwh para el caso de durazno y la piña.

Esta medición se llevó cabo haciendo uso del Medidor Trifásico Trifilar Tipo D6S5H, Marca ABB (60 Hz., 220v 15 A).

**CUADRO N° 6.8**  
**COSTOS DE PRODUCCION**

DESCRIPCIÓN DE COSTOS	Modulo Tradicional				Modulo Automatizado			COMPARA
	UNIDAD DE MEDIDA	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL	
<b>A. PERSONAL DURAZNO</b>				<b>SUBTOTALES</b>			<b>SUBTOTALES</b>	
A.1.2 SUELDOS	Nuevos Soles			<b>73.92</b>			<b>49.28</b>	<b>33.33%</b>
Personal Técnico	Horas	24.00	2.61	62.64	16.00	2.61	41.76	
A.1.3 LEYES SOCIALES	Nuevos Soles							
Personal Técnico	porcentaje	0.18	0.47	11.28	0.18	0.47	7.52	
<b>B. ALQUILER DE SERVICIOS</b>				<b>37.05</b>			<b>33.15</b>	<b>10.53%</b>
B.1. Factor de costo de luz por kw/hor	Kw/hora	42.00	0.65	27.30	36.00	0.65	23.40	<b>14.29%</b>
B.2. Factor de costo de agua por día	m3/día	1.00	3.00	3.00	1.00	3.00	3.00	
B.3. Factor de costo por herramientas	w/día	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
B.4. Factor de costo por Alquiler del local	día	1.00	5.75	5.75	1.00	5.75	5.75	
<b>C. ADQUISICIÓN DE MAQUINARIAS Y EQUIPOS</b>				<b>4.83</b>			<b>5.80</b>	<b>120.14%</b>
B.4. Factor de costo uso de instalaciones	depreciacion	1.00	2.40	2.40	1.00	2.40	2.40	
C.2. Uso y Depreciacion de la cabina deshidratadora	día	1.00	2.43	2.43	1.00	3.40	3.40	
<b>D. MATERIA PRIMA Y INSUMOS</b>				<b>56.69</b>			<b>57.30</b>	
D.1. Costo de Materia Prima	kilos	79.00	0.70	55.30	79.00	0.70	55.30	
D.2. Costo de Insumos y otros componentes del proceso	und	1.00	1.39	1.39	1.00	2.00	2.00	
<b>TOTAL COSTOS DIRECTOS (A+B+C+D)</b>				<b>172.48</b>			<b>145.53</b>	<b>15.63%</b>
<b>E. GASTOS ADMINISTRATIVOS</b>				<b>20.00</b>			<b>20.00</b>	
E.3 Administracion, y manejo del proceso	s/día	1.00	20.00	20.00	1.00	20.00	20.00	
<b>TOTAL COSTOS INDIRECTOS O</b>				<b>20.00</b>			<b>20.00</b>	
<b>F. IMPREVISTOS</b>	S/día	1	1	<b>1.00</b>	1	1	<b>1.00</b>	
<b>TOTAL GENERAL (A+B+C+D+E+F+G)</b>	Nuevos Soles			<b>193.48</b>			<b>166.53</b>	<b>13.93%</b>

**CUADRO N° 6.9  
COSTOS DE PRODUCCION**

DESCRIPCIÓN DE LOS COSTOS	Modulo Tradicional				Modulo Automatizado			COMPARA
	UNIDAD DE MEDIDA	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL	
<b>PIÑA</b>								
<b>A. PERSONAL</b>				<b>SUBTOTALES</b>			<b>SUBTOTALES</b>	
A.1.2 SUELDOS	Nuevos Soles			<b>73.92</b>			<b>49.28</b>	<b>33.33%</b>
Personal Técnico	Horas	24.00	2.61	62.64	16.00	2.61	41.76	
A.1.3 LEYES SOCIALES	Nuevos Soles							
Personal Técnico	porcentaje	0.18	0.47	11.28	0.18	0.47	7.52	
<b>B. ALQUILER DE SERVICIOS</b>				<b>37.05</b>			<b>33.15</b>	<b>10.53%</b>
B.1. Factor de costo de luz por kw/hor	Kw/hora	42.00	0.65	27.30	36.00	0.65	23.40	<b>14.29%</b>
B.2. Factor de costo de agua por día	m3/día	1.00	3.00	3.00	1.00	3.00	3.00	
B.3. Factor de costo por herramientas	w/día	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
B.4. Factor de costo por Alquiler dell local	día	1.00	5.75	5.75	1.00	5.75	5.75	
<b>C. ADQUISICIÓN DE MAQUINARIAS Y EQUIPOS</b>				<b>3.89</b>			<b>4.86</b>	
B.4. Factor de costo uso de equipos	depreciacion	1.00	1.46	1.46	1.00	1.46	1.46	
C.2. Uso y Depreciacion de la cabina deshidratadora	día	1.00	2.43	2.43	1.00	3.40	3.40	
<b>D. MATERIA PRIMA Y INSUMOS</b>				<b>27.29</b>			<b>27.90</b>	
D.1. Costo de Materia Prima	kilos	70.00	0.37	25.90	70.00	0.37	25.90	
D.2. Costo de Insumos y otros componentes del proceso	und	1.00	1.39	1.39	1.00	2.00	2.00	
<b>TOTAL COSTOS DIRECTOS (A+B+C+D)</b>				<b>142.14</b>			<b>115.19</b>	<b>18.96%</b>
<b>E. GASTOS ADMINISTRATIVOS</b>				<b>20.00</b>			<b>20.00</b>	
E.3 Administracion, y maneip del proceso	s/día	1.00	20.00	20.00	1.00	20.00	20.00	
<b>TOTAL COSTOS INDIRECTOS O</b>				<b>20.00</b>			<b>20.00</b>	
<b>F. IMPREVISTOS</b>	S/día	1	1	<b>1.00</b>	1	1	<b>1.00</b>	
<b>TOTAL GENERAL (A+B+C+D+E+F+G)</b>	Nuevos Soles			<b>163.14</b>			<b>136.19</b>	<b>16.52%</b>

**CUADRO N° 6.10  
COSTOS DE PRODUCCION**

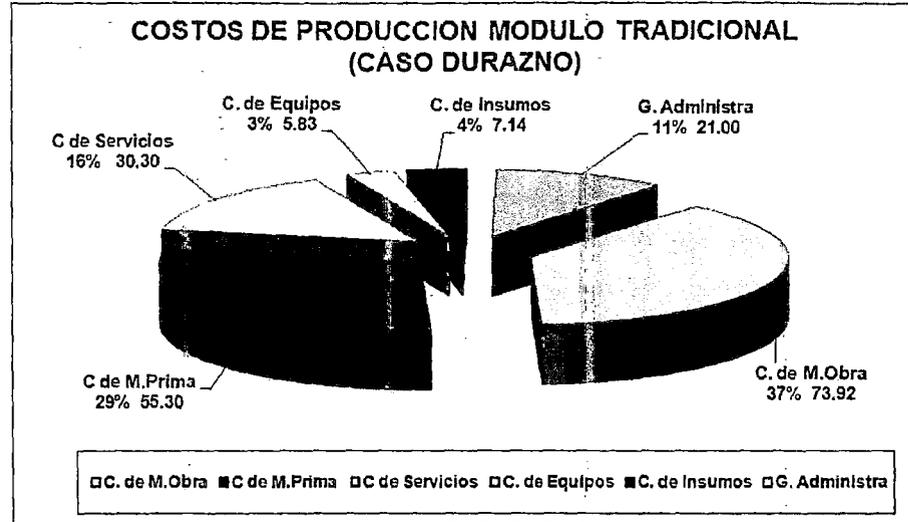
DESCRIPCIÓN DE LOS COSTOS	Modulo Tradicional				Modulo Automatizado			COMPARA
	UNIDAD DE MEDIDA	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL	
<b>A. PERSONAL</b> <b>MANZANA</b>				<b>SUBTOTALES</b>			<b>SUBTOTALES</b>	
A.1.2 SUELDOS	Nuevos Soles			<b>67.76</b>			<b>24.64</b>	<b>63.6%</b>
Personal Técnico	Horas	22.00	2.61	57.42	8.00	2.61	20.88	
A.1.3 LEYES SOCIALES	Nuevos Soles							
Personal Técnico	porcentaje	0.18	0.47	10.34	0.18	0.47	3.76	
<b>B. ALQUILER DE SERVICIOS</b>				<b>33.15</b>			<b>29.90</b>	<b>9.8%</b>
B.1. Factor de costo de luz por kw/hor	Kw/hora	36.00	0.65	23.40	31.00	0.65	20.15	
B.2. Factor de costo de agua por dia	m3/dia	1.00	3.00	3.00	1.00	3.00	3.00	
B.3. Factor de costo por herramientas	w/dia	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
B.4. Factor de costo por Alquiler dell local	dia	1.00	5.75	5.75	1.00	5.75	5.75	
<b>C. ADQUISICIÓN DE MAQUINARIAS Y EQUIPOS</b>				<b>3.89</b>			<b>4.86</b>	<b>124.9%</b>
B.4. Factor de costo uso de equipos	depreciacion	1.00	1.46	1.46	1.00	1.46	1.46	
C.2. Uso y Depreciacion de la cabina deshidratadora	dia	1.00	2.43	2.43	1.00	3.40	3.40	
<b>D. MATERIA PRIMA Y INSUMOS</b>				<b>22.89</b>			<b>23.50</b>	<b>102.7%</b>
D.1. Costo de Materia Prima	kilos	43.00	0.50	21.50	43.00	0.50	21.50	
D.2. Costo de Insumos y otros componentes del proceso	und	1.00	1.39	1.39	1.00	2.00	2.00	
<b>TOTAL COSTOS DIRECTOS (A+B+C+D)</b>				<b>127.69</b>			<b>82.90</b>	<b>35.1%</b>
<b>E. GASTOS ADMINISTRATIVOS</b>				<b>20.00</b>			<b>20.00</b>	
E.3 Administracion, y manejp del proceso	s/dia	1.00	20.00	20.00	1.00	20.00	20.00	
<b>TOTAL COSTOS INDIRECTOS O</b>				<b>20.00</b>			<b>20.00</b>	
<b>F. IMPREVISTOS</b>	S/dia	1	1	1.00	1	1	1.00	
<b>TOTAL GENERAL (A+B+C+D+E+F+G)</b>	Nuevos Soles			<b>148.69</b>			<b>103.90</b>	<b>30.1%</b>

FIGURA N° 6.4

COSTES COMPARATIVOS DE PRODUCCIÓN DE DURAZNO

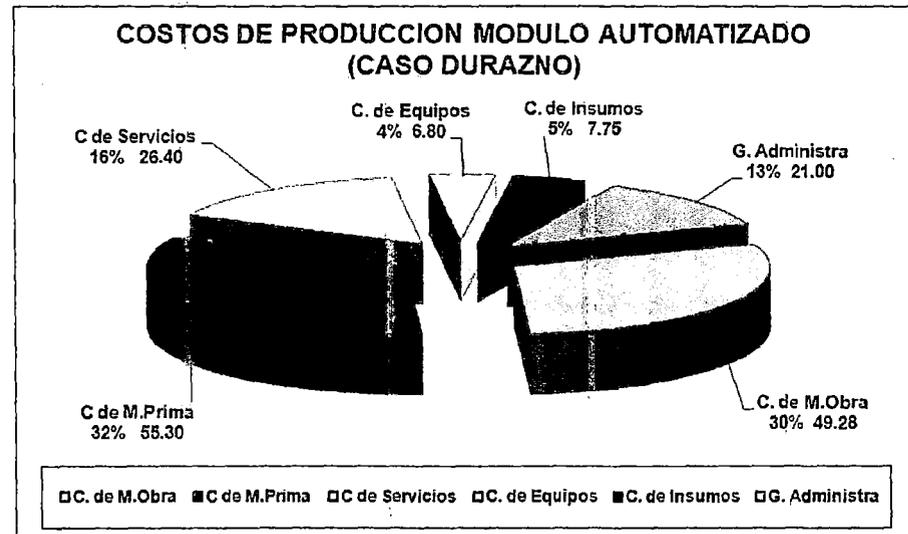
RESULTADOS DEL PROCESO	
INDICADORES	OPERADOR
Cantidad de Kilos Obtenidos	4.60
Cantidad de Operarios Necesarios	4
Cantidad de Kw/Hora Consumidos	42.00
Tiempo Total del Proceso	14.00
Costos de Produccion Total	193.48
Costo de Produccion Unitario	42.06
Relacion MP/PT	( 15 - 1 )

COSTOS DE PRODUCCION	
C. de M.Obra	73.92
C de M.Prima	55.30
C de Servicios	30.30
C. de Equipos	5.83
C. de Insumos	7.14
G. Administra	21.00
<b>Total de Costos Asignados</b>	<b>193.48</b>



RESULTADOS DEL PROCESO	
INDICADORES	OPERADOR
Cantidad de Kilos Obtenidos	5.00
Cantidad de Operarios Necesarios	4
Cantidad de Kw/Hora Consumidos	36.00
Tiempo Total del Proceso	16.00
Costos de Produccion Total	166.53
Costo de Produccion Unitario	33.31
Relacion MP/PT	( 15 - 1 )

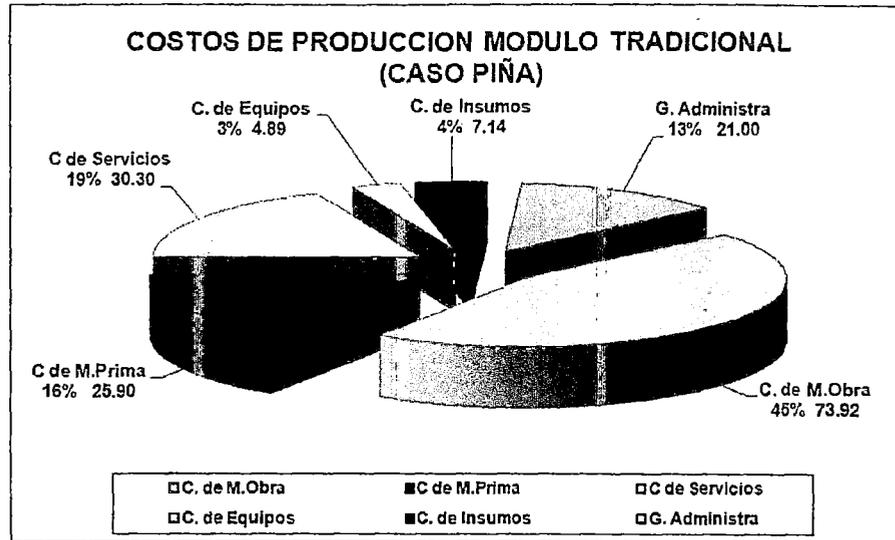
COSTOS DE PRODUCCION	
C. de M.Obra	49.28
C de M.Prima	55.30
C de Servicios	26.40
C. de Equipos	6.80
C. de Insumos	7.75
G. Administra	21.00
<b>Total Costos Asignados</b>	<b>166.53</b>



**FIGURA N° 6.5**  
**COSTES COMPARATIVOS DE PRODUCCIÓN DE PIÑA**

RESULTADOS DEL PROCESO	
INDICADORES	OPERADOR
Cantidad de Kilos Obtenidos	2.87
Cantidad de Operarios Necesarios	4
Cantidad de Kw/Hora Consumidos	42.00
Tiempo Total del Proceso	16.00
Costos de Produccion Total	163.14
Costo de Produccion Unitario	56.84
Relacion MP/PT	( 24 - 1 )

COSTOS DE PRODUCCION	
C. de M.Obra	73.92
C de M.Prima	25.90
C de Servicios	30.30
C. de Equipos	4.89
C. de Insumos	7.14
G. Administra	21.00
<b>Total Costos Asignados</b>	<b>163.14</b>



RESULTADOS DEL PROCESO	
INDICADORES	OPERADOR
Cantidad de Kilos Obtenidos	2.87
Cantidad de Operarios Necesarios	4
Cantidad de Kw/Hora Consumidos	36.00
Tiempo Total del Proceso	14.00
Costos de Produccion Total	136.19
Costo de Produccion Unitario	47.45
Relacion MP/PT	( 24- 1)

COSTOS DE PRODUCCION	
C. de M.Obra	49.28
C de M.Prima	25.90
C de Servicios	26.40
C. de Equipos	5.86
C. de Insumos	7.75
G. Administra	21.00
<b>Total Costos Asignados</b>	<b>136.19</b>

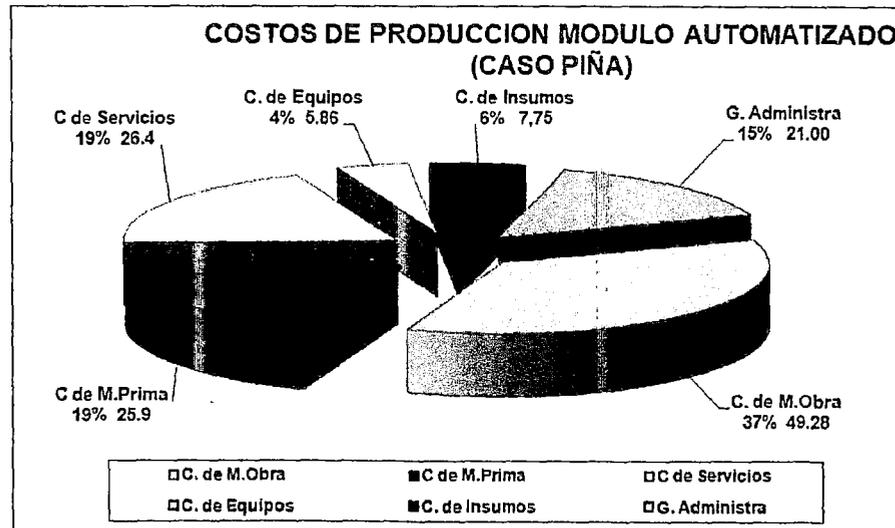
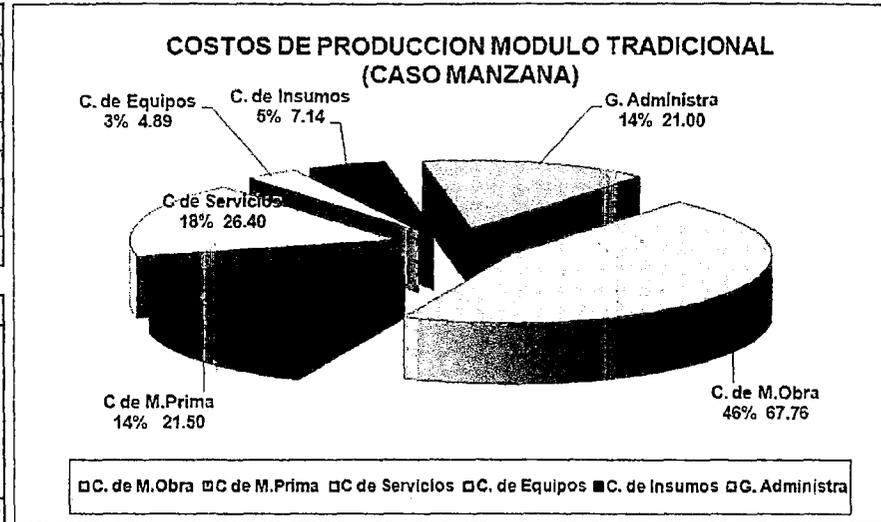


Fig. 6.6

**COSTO COMPARATIVO DE PRODUCCION DE MANZANA**

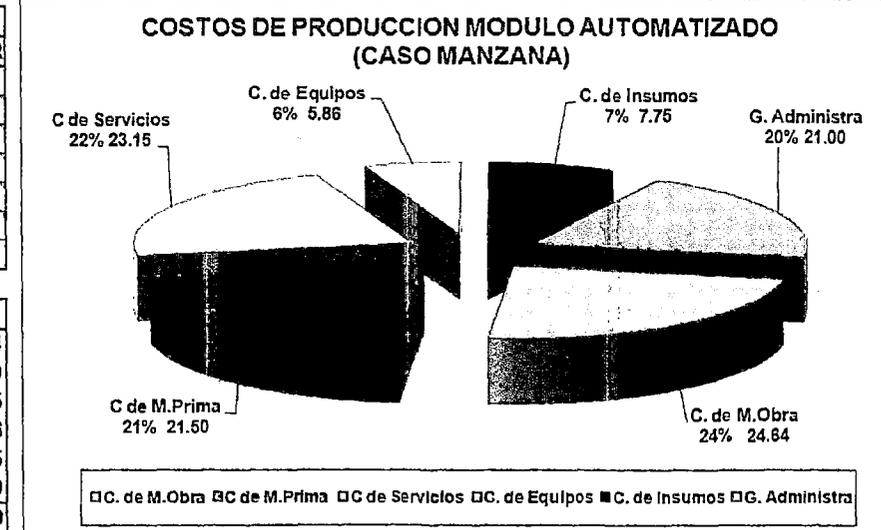
RESULTADOS DEL PROCESO	
INDICADORES	OPERADOR
Cantidad de Kilos Obtenidos	5.30
Cantidad de Operarios Necesarios	2
Cantidad de Kw/Hora Consumidos	36.00
Tiempo Total del Proceso	14.00
Costos de Produccion Total	148.69
Costo de Produccion Unitario	28.05
Relacion MP/PT	(8 - 1)

COSTOS DE PRODUCCION	
C. de M.Obra	67.76
C de M.Prima	21.50
C de Servicios	26.40
C. de Equipos	4.89
C. de Insumos	7.14
G. Administra	21.00
<b>Total Costos de Produccion</b>	<b>148.69</b>



RESULTADOS DEL PROCESO	
INDICADORES	OPERADOR
Cantidad de Kilos Obtenidos	4.89
Cantidad de Operarios Necesarios	2
Cantidad de Kw/Hora Consumidos	31.00
Tiempo Total del Proceso	16.00
Costos de Produccion Total	103.90
Costo de Produccion Unitario	21.25
Relacion MP/PT	(8 - 1)

COSTOS DE PRODUCCION	
C. de M.Obra	24.64
C de M.Prima	21.50
C de Servicios	23.15
C. de Equipos	5.86
C. de Insumos	7.75
G. Administra	21.00
<b>Total de Costos de Produccion</b>	<b>103.90</b>



## 6.6 COSTO DEL MODULO DE AUTOMATIZACION

El modulo de automatización del control de parámetros puede ser aplicable sobre cualquier equipo existente en las PYMES previa evaluación y adecuación de cada caso particular.

También se puede diseñar e implementar un deshidratador automatizado, dependiendo de los requerimientos de una PYME.

Los costos relacionados con el modulo de automatización se muestra en el siguiente cuadro y es considerado barato en comparación con los equipos importados. Por lo tanto la inclusión del modulo de automatización de control de parámetros propuesto en este trabajo no influye grandemente en el costo del equipo.

Con estas consideraciones se tendría un equipo deshidratador con automatización de control de parámetros a un costo razonable y al alcance de las PYMES de nuestro medio.

ITEM	COSTO
Tarjetas de control y accesorios	\$150.00
03 Contactores trifasicos	\$51.00
01 llave termomagnetica trifasica	\$60.00
01 llave termica monofasica	\$10.00
LM35 Acondicionado industrial	\$30.00
Sensor de Humedad relativa	\$500.00
Sensor magnetico final de carrera	\$10.00
Cables	\$70.00
Accesorios de instalacion	\$99.00
Armario	\$60.00
Panel HMI	\$50.00
SUBTOTAL	\$1,090.00
IGV	\$196.20
<b>TOTAL</b>	<b>\$1,286.20</b>

Tabla 6.3 Costo del módulo de automatización

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES:

1. El desarrollo de la actividad de deshidratación de frutas en el Perú es incipiente, a pesar de existir demanda interna satisfecha con importación de fruta deshidratada de Chile y Argentina, siendo posible la generación de oferta organizada a cargo de las PYMES.
2. La industria metal-mecánica fabricante de deshidratadores de productos hortofrutícolas no ha mejorado su paquete tecnológico, presentando los equipos construidos por estas empresas deficiencias en su funcionamiento lo que viene afectando el desarrollo de dicha actividad.
3. La automatización basada en conceptos de cibernética y robótica han permitido realizar algoritmos de control para la optimización del proceso de deshidratado.
4. El enfoque sistémico ha permitido realizar un análisis global del proceso de deshidratado, mostrando las relaciones con otros sistemas.
5. Las redes de Petri ha permitido el modelamiento del sistema de deshidratación mostrando etapas que ese ejecutan en forma concurrente.
6. La evaluación de los métodos de control moderno ha sido posible mediante la utilización del MATLAB que ha permitido realizar simulaciones y obtener tendencias y comportamientos para poder elegir el mejor método y realizar el algoritmo de control correspondiente.
7. El aporte importante de esta tesis ha sido la realización de un software de control desarrollado de acuerdo a las exigencias del proyecto usando el lenguaje ensamblador de los microcontroladores PIC.
8. Se ha desarrollado el paquete tecnológico de automatización de un prototipo de deshidratador de cabina con capacidad de 30 kilos de carga

(Tomando como referencia manzana, durazno y piña), que permite el control de los parámetros de proceso: temperatura gradual al interior de la cámara, nivel de humedad relativa, humedad final del producto así como el control de funcionamiento del equipo.

9. Respecto a la evaluación sensorial de las frutas deshidratadas, en el caso de la manzana existen diferencias significativas entre el proceso realizado con deshidratador automatizado y sin automatizar. La fruta obtenida con el deshidratador automatizado está mejor calificada que el obtenido con el equipo sin automatizar, gusto extremadamente 17% y 7%; gusta mucho 30% y 10% respectivamente.
10. En el caso del durazno no existe diferencia significativa entre el proceso que usó deshidratador automatizado y sin automatizar, o sea que son similares con respecto a su aceptabilidad (han sido calificadas en forma similar por los consumidores).
11. Para el caso de la piña deshidratada, se concluye que hay diferencias significativas entre los procesos evaluados. Se observa que el proceso con deshidratador automatizado está mejor calificada, gusto extremadamente 16% y 1% gusto mucho 28% y 12%, gusto moderadamente 30% y 20% respectivamente.

#### **RECOMENDACIONES:**

1. Validar el desarrollo del diseño de la automatización en la producción de frutas deshidratadas.
2. Mejorar las condiciones y prácticas de trabajo en la línea de producción de frutas deshidratadas a fin de evitar posibles focos de contaminación microbiana.
3. Hacer extensivo los resultados encontrados en el diseño de otras líneas de deshidratados de productos hortofrutícolas y complementarlos con los estudios de mercado necesarios, ya que la capacidad del prototipo se puede extrapolar a una mayor capacidad de producción.

## **GLOSARIO DE TERMINOS:**

### **-Actuadores:**

Dispositivos capaces de generar fuerza a partir de líquidos, energía eléctrica y gases, recibe una orden de un regulador o controlador y da una salida necesaria para activar un elemento final.

### **-Análisis microbiológico:**

Es una inspección que permite valorar la carga microbiana, se basa habitualmente en el cultivo y recuento de los microorganismos.

### **-Análisis organoléptico:**

Es la valoración cualitativa que se realiza a una muestra en el campo basada exclusivamente en la percepción de los sentidos.

### **-Análisis proximal:**

Consiste en determinar el contenido de humedad, grasa, Proteínas y cenizas que contiene un alimento.

### **-Diodo zener:**

Es un diodo de Silicio construido para funcionar en la zona de ruptura, funciona como un limitador o regulador de tensión.

### **-Flanco:**

Es la transición de un nivel de una señal digital ya sea de alto a bajo o viceversa.

### **-Humedad Relativa:**

Porcentaje de saturación del aire con vapor de agua.

### **-JIRA:**

Asociación Japonesa de Robótica Industrial.

### **-Microcontrolador:**

Dispositivo electrónico que contiene los elementos de un computador básico.

**-Memoria de programa:**

Es la memoria donde se almacena las instrucciones correspondientes a un Programa.

**-MICROCHIP:**

Empresa fabricante de microcontroladores PIC.

**-MATLAB:**

Software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) Con un lenguaje de programación propio.

**-MPLAB:**

Software para trabajar con microcontroladores PIC.

**-MBPC:**

Control predictivo basado en modelos.

**-M0:**

Marcado inicial de la red de Petri.

**-Opto acoplador:**

Es un aislador acoplado ópticamente, es un dispositivo de emisión y recepción que funciona como un interruptor excitado mediante luz.

**-PN:**

Red de Petri

**-Proceso concurrente:**

Procesos que se ejecutan al mismo tiempo.

**-PWM:**

Modulación por ancho de pulsos, es una técnica en que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica.

**-PIC Star Plus:**

Programador de microcontroladores PIC que permite grabar en la memoria de programa.

**-PID:**

Mecanismo de control por realimentación, donde el algoritmo de calculo se da en 3 parámetros: el proporcional, el integral y el derivativo.

**-ROBOT:**

Manipulador automático, reprogramable y multifuncional.

**-RIA:**

Instituto de robótica de América.

**-RISC:**

Computador de conjunto reducido de instrucciones.

**-RLS:**

Estimación de parámetros por el método de los mínimos cuadrados recursivo mejorado.

**-Robot SCARA:**

Es una maquina de ensamblado que instala partes o lleva elementos, esta diseñado para imitar la acción de un brazo humano.

**-Sensor:**

Dispositivo diseñado para convertir una señal no eléctrica en señal eléctrica.

**-Tokens:**

Son puntos que se encuentran dentro de un lugar en la red de Petri y representa que la condición es verdadera, se utilizan para definir la ejecución de una red de Petri.

**-Tiempo real:**

Cuando se tienen respuestas en tiempos muy cortos o en el momento que ocurre un evento.

**-TRIAC:**

Dispositivo semiconductor de tres terminales usado para controlar el flujo de corriente en una carga, es bidireccional y puede ser disparado independiente de la polarización de la compuerta.

**-Tensión de ruptura:**

Máxima tensión en sentido inverso que puede soportar un diodo sin entrar en conducción.

**-Transistor:**

Dispositivo electrónico semiconductor, que cumple las funciones de: amplificador, conmutador o rectificador.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Campos D. "Conservación de Alimentos por Deshidratación", Tercer Seminario de Secado Solar, Proyecto de Secado Solar. Lima 1988.
2. Costel E, Durán L. "El Análisis Sensorial en el Control de Calidad de los Alimentos IV, Realización y Análisis de los datos", Revista Agroquímica y Tecnología de Alimentos.
3. De Carlo Raymond A. "Linear Systems", Editorial Prentice Hall 2001.
4. Delores M. Etter. " Solución de Problemas de Ingeniería con MATLAB", Editorial Prentice Hall 1997.
5. Domínguez, J. "Dirección De Operaciones: Aspectos Estratégicos en la Producción y Servicios", Editorial McGraw Hill 1999.
6. Frohr Friedrich y Orttenburgen Fritz. "Introducción al Control Electrónico", Editorial Marcombo 2000.
7. Khalil Hassan. "Nonlinear Systems", Editorial Prentice Hall 2002
8. Krajewski Lee J. " Administración de Operaciones: Estrategia y Análisis" Editorial Pearson 2000.
9. Mandado Pérez Enrique. "Autómatas Programables Entorno y Aplicaciones" , Editorial Prentice Hall 2003.
10. Montes A. " Estudio de Parámetros de Secado de Maíz", Tesis Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima 1968.
11. Ogata Katsuhico. "Sistemas de Control en Tiempo Discreto", Editorial Prentice Hall 2002.

12. Ogata Katsuhico. "Ingeniería de Control Moderna"  
Editorial Prentice Hall 1993.
13. Oppenheim Alan V. "Tratamiento de Señales en Tiempo Discreto",  
Editorial Prentice Hall 2000.
14. Piedrahita Moreno Ramón. "Ingeniería de la Automatización Industrial",  
Editorial Alfa omega. 2000.
15. Rojas Moreno Arturo. "Control Avanzado, Diseño y Aplicaciones en  
Tiempo Real", Universidad Nacional de Ingeniería, Lima 2001.
16. Sánchez, M. "Conceptos Teóricos y Evaluación Experimental del  
Secado", Tercer Seminario de Secado Solar. Proyecto de Secado Solar,  
Lima 1988.
17. Ureña Milber. "Análisis Sensorial de Alimentos", Lima 2000
18. Valera A. "Principales Parámetros Inherentes al Secado", Tercer  
Seminario de Secado Solar", Proyecto de Secado Solar. Lima 1998.
19. VIANI, B. "Difusión de la Tecnología de Secado de Bandejas en el Perú" ,  
ITDG-PERU Lima 1997.
20. Velezmoro Carmen. "Curso de Automatización de Procesos  
Agroindustriales", U.N.A. Lima 2001.
21. Yourdon Edward. "Análisis Estructurado Moderno",  
Editorial Prentice Hall 2000.

## ANEXO 01

### PROGRAMACIÓN Y SIMULACIÓN DE LOS MODELOS

Usando MATLAB se realizó la programación y simulación de los modelos de control moderno para el control del parámetro temperatura.

### PROGRAMACIÓN DEL MODELO DEL PROCESO A SER CONTROLADO

```
1modelado_proceso.m
% Programa para modelado del proceso a ser controlado
clear all
% Ingreso de parámetros del proceso
K=input('ingresa la ganancia del proceso : ')
T1=input('ingresa constante de tiempo de la cabina : ')
T2=input('ingresa constante de tiempo del producto : ')
% Ingreso del modelo del proceso en variable de estado
disp('pulse cualquier tecla para ver el modelo del proceso')
pause
A=[0 1;-1/(T1*T2) -(T1+T2)/(T1*T2)]
B=[0; K/(T1*T2)]
Cc=[1 0]
Dc=[0]
proceso=ss(A,B,Cc,Dc);
% Análisis de controlabilidad y observabilidad
rangocon=rank(ctrb(A,B));
if rangocon==2;
```

```

disp('el proceso es controlable')
else
    disp('el proceso no es controlable')
end
rangoobs=rank(observ(A,Cc));
if rangoobs==2;
    disp('el proceso es observable')
else
    disp('el proceso no es observable')
end
% Modelo en tiempo discreto
T=0.1; % periodo de muestreo igual a 0.1 min (la variación de temperatura
es de ese orden)
[G,H,Cd,Dd]=c2dm(A,B,Cc,Dc,T,'zoh');
disp('pulse cualquier tecla para ver el modelo en tiempo discreto del
proceso')
pause
G,H,Cd,Dd
Resultados:
Se muestra el resultado con los parámetros K=1; T1=10 min; T2=1min;
>> modelado_proceso
ingresa la ganancia del proceso : 1
K = 1
ingresa constante de tiempo de la cabina : 10
T1 = 10
ingresa constante de tiempo del producto : 1
T2 = 1
pulse cualquier tecla para ver el modelo del proceso
A =
    0  1.0000
 -0.1000 -1.1000
B =

```

0  
0.1000

Cc = 1 0

Dc = 0

**el proceso es controlable**

**el proceso es observable**

pulse cualquier tecla para ver el modelo en tiempo discreto del proceso

G =

0.9995 0.0947

-0.0095 0.8954

H =

0.0005

0.0095

Cd = 1 0

Dd = 0

## **SIMULACIÓN DEL MODELO DEL PROCESO A SER CONTROLADO**

simulacion\_modelo.m

% Programa para simulación del modelo del proceso a ser controlado

clear all

% Ingreso de parámetros del proceso

K=input('ingresa la ganancia del proceso : ')

T1=input('ingresa constante de tiempo de la cabina : ')

T2=input('ingresa constante de tiempo del producto : ')

% Ingreso del modelo del proceso en variable de estado

disp('pulse cualquier tecla para ver el modelo del proceso')

pause

A=[0 1;-1/(T1\*T2) -(T1+T2)/(T1\*T2)]

B=[0; K/(T1\*T2)]

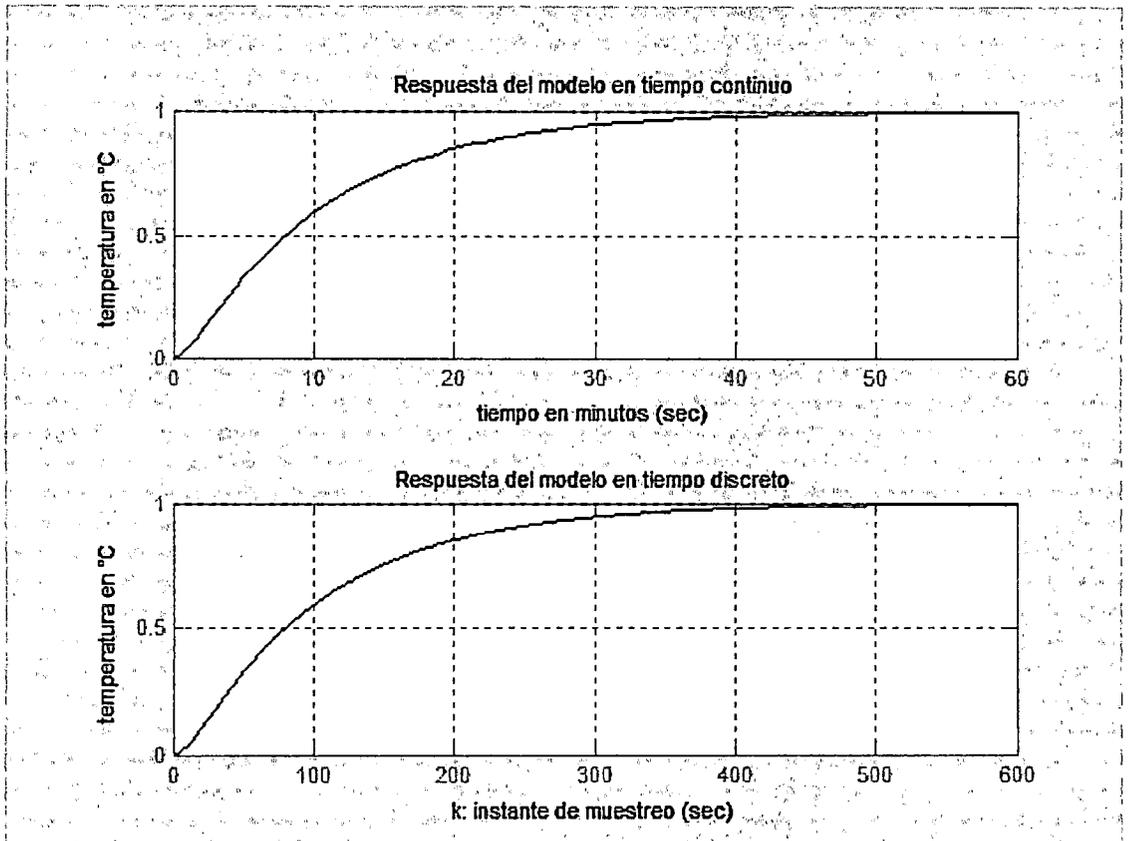
Cc=[1 0]

Dc=[0]

```

proceso=ss(A,B,Cc,Dc);
% Modelo en tiempo discreto
T=0.1; % periodo de muestreo igual a 0.1 min (la variación de temperatura
es de ese orden)
[G,H,Cd,Dd]=c2dm(A,B,Cc,Dc,T,'zoh');
disp('pulse cualquier tecla para ver el modelo en tiempo discreto del
proceso')
pause
G,H,Cd,Dd
% Respuesta del proceso en tiempo continuo a un cambio escalón unitario
en la entrada
disp('pulse cualquier tecla para ver el cambio en la temperatura cuando la
corriente sufre un aumento de 1 amp')
pause
[y,t,x]=step(proceso);
subplot(2,1,1)
step(proceso);grid
xlabel('tiempo en minutos')
ylabel('temperatura en °C')
title('Respuesta del modelo en tiempo continuo')
% Respuesta del proceso en tiempo discreto a un cambio escalon unitario en
la entrada
disp('pulse cualquier tecla para ver el cambio en la temperatura cuando la
corriente sufre un aumento de 1 amp')
pause
[y,x]=dstep(G,H,Cd,Dd);
subplot(2,1,2)
dstep(G,H,Cd,Dd);grid
xlabel('k: instante de muestreo')
ylabel('temperatura en °C')
title('Respuesta del modelo en tiempo discreto')
Resultados:

```



## METODO DE CONTROL ÓPTIMO

El control óptimo trata de determinar el mejor sistema de control empleando una técnica óptima de diseño.

Como se ha encontrado que la fase 1 resulta la más crítica, a continuación se muestra las simulaciones realizadas para esta fase:

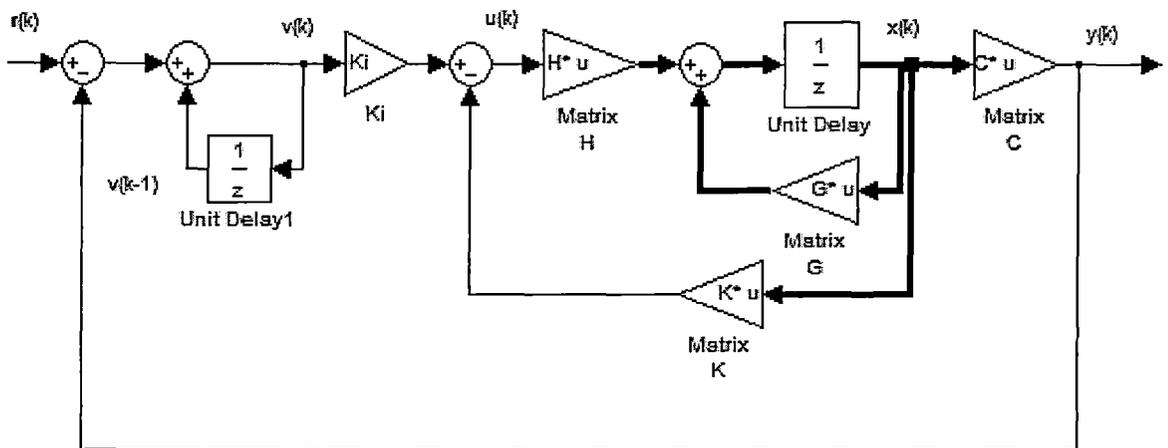
### CONTROL ÓPTIMO DISCRETO

A continuación se presenta la programación y simulación del método.

copi.m

```
% Programa para cálculo de un controlador optimo proporcional integral
```

```
clear all
```



% Ingreso de parámetros del proceso

K=input('ingresa la ganancia del proceso : ')

T1=input('ingresa constante de tiempo de la cabina : ')

T2=input('ingresa constante de tiempo del producto : ')

% Ingreso del modelo del proceso en variable de estado

disp('pulse cualquier tecla para ver el modelo del proceso')

pause

A=[0 1;-1/(T1\*T2) -(T1+T2)/(T1\*T2)]

B=[0; K/(T1\*T2)]

Cc=[1 0]

Dc=[0]

proceso=ss(A,B,Cc,Dc);

% Modelo en tiempo discreto

T=0.1; % periodo de muestreo igual a 0.1 min (la variación de temperatura es de ese orden)

[G,H,Cd,Dd]=c2dm(A,B,Cc,Dc,T,'zoh');

% Composición de matrices Gtilde y Htilde

Gtilde=[G zeros(2,1); -Cd\*G eye(1,1)];

Htilde=[H; -Cd\*H];

disp('pulse cualquier tecla para ver el modelo en tiempo discreto del proceso')

```

pause
G,H,Cd,Dd
Gtilde,Htilde
% Matrices de ponderacion
Q=[10 0 0;0 1 0;0 0 1]; R=[0.1];
disp('pulse cualquier tecla para ver las matrices de ponderación asumidas')
pause
Q,R
% Ganancia del controlador optimo
[Ktil,Ptil,E]=dlqr(Gtilde,Htilde,Q,R);
K=[Ktil(1) Ktil(2)]; KI=-Ktil(3);
disp('pulse cualquier tecla para ver la ganancia del controlador optimo')
pause
K,KI
% Respuesta al escalon r=1
x=[0;0];yi=0;v=0;
NN=100;r=1;
for k=1:NN
    v=v+r-yi;
    Ia(k)=-K*x+KI*v;
    x=G*x+H*Ia(k);
    y(k)=x(1);yi=y(k);
end
% Graficos
disp('pulse cualquier tecla para ver resultados graficos')
pause
t=linspace(0,T*NN,NN);
subplot(2,1,1)
plot(t,y);ylabel('Temp (°C)');grid;
subplot(2,1,2)
plot(t,Ia);ylabel('Ia (Amp)');grid;
xlabel('Tiempo (min)');

```

Resultados:

>> copi

ingresa la ganancia del proceso : 1

K = 1

ingresa constante de tiempo de la cabina : 10

T1 = 10

ingresa constante de tiempo del producto : 1

T2 = 1

pulse cualquier tecla para ver el modelo del proceso

A =

$$\begin{bmatrix} 0 & 1.0000 \\ -0.1000 & -1.1000 \end{bmatrix}$$

B =

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0.1000 \end{bmatrix}$$

Cc = 1 0

Dc = 0

pulse cualquier tecla para ver el modelo en tiempo discreto del proceso

G =

$$\begin{bmatrix} 0.9995 & 0.0947 \\ -0.0095 & 0.8954 \end{bmatrix}$$

H =

$$\begin{bmatrix} 0.0005 \\ 0.0095 \end{bmatrix}$$

Cd = 1 0

Dd = 0

Gtilde =

$$\begin{bmatrix} 0.9995 & 0.0947 & 0 \\ -0.0095 & 0.8954 & 0 \\ -0.9995 & -0.0947 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

Htilde =

0.0005

0.0095

-0.0005

pulse cualquier tecla para ver las matrices de ponderación asumidas

Q =

10 0 0

0 1 0

0 0 1

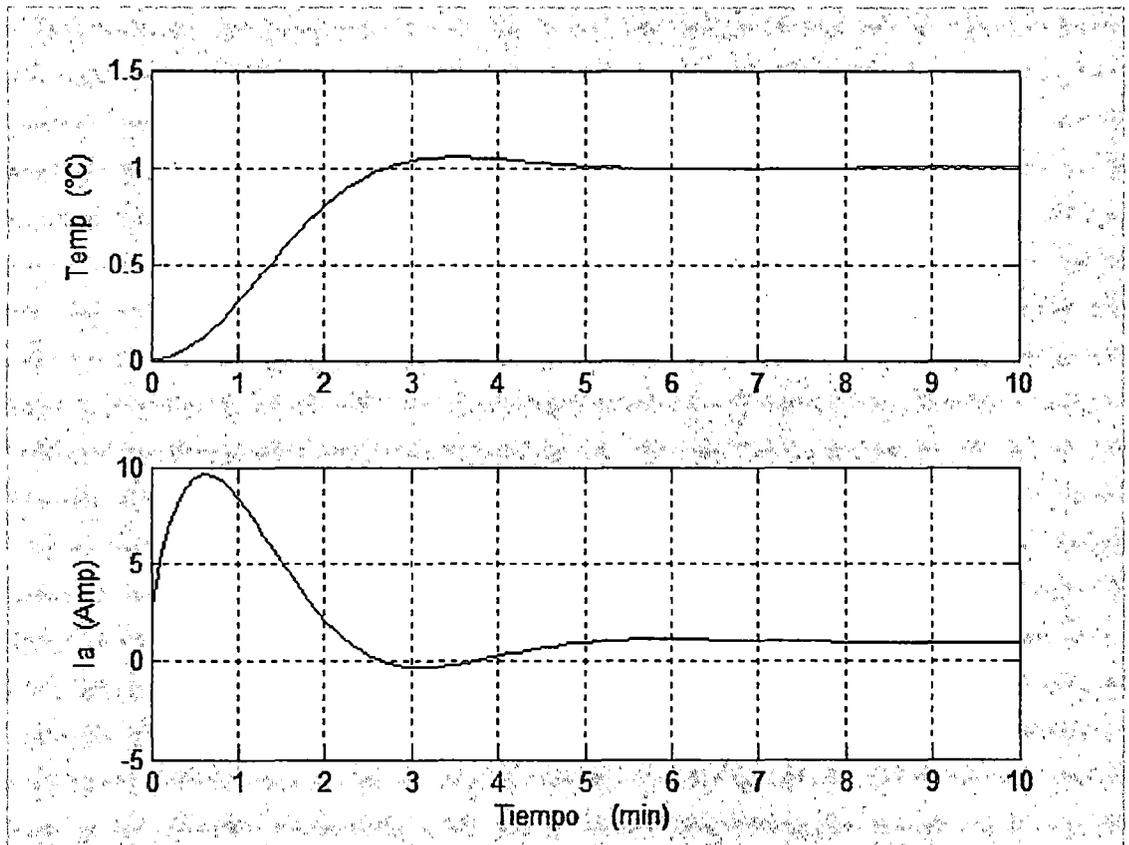
R = 0.1000

pulse cualquier tecla para ver la ganancia del controlador optimo

K = 40.6239 20.0497

KI = 2.8446

Pulse cualquier tecla para ver resultados gráficos



Observamos que la respuesta se estabiliza alrededor de 5 min al valor de referencia  $r = 1$ , es decir no hay error estacionario. Esto se debe al control proporcional integral.

### **Método de control adaptivo autosintonizado**

A continuación se presenta la programación y simulación del método.

#### **adaptivo.m**

```
% Calculo de un controlador adaptivo con auto sintonización
```

```
clear all
```

```
% Parametros
```

```
nn=2;r=1; % nn:orden del proceso (numero de variables de estado; r:  
número de salidas
```

```
NN=5; % orden del vector estimado de parámetros
```

```
cmax=100;cmin=15; % para el estimador de parámetros
```

```
Sigma=10; Xi=1; % parámetros para optimizar el filtro de Kalman
```

```
R=100; Qa=[0.1 0 0;0 0 0;0 0 0.1]; % parámetros de optimizacion del  
controlador Ka
```

```
% Modelo del proceso en tiempo continuo
```

```
Ac=[0 1; -0.1 -1.1]; Bc=[0;0.1];Cc=[1 0];Dc=[0];
```

```
T=0.1; % periodo de muestreo
```

```
% Modelo discreto
```

```
[G,H,C,D]=c2dm(Ac,Bc,Cc,Dc,T,'zoh');
```

```
[num,den]=ss2tf(G,H,C,D);
```

```
a1=den(2);a2=den(3);
```

```
b1=num(2);b2=num(3);
```

```
% Condiciones iniciales
```

```
Ref=1; % magnitud de la señal de referencia
```

```
Ce=(1+a1+a2)*Ref; Uo=0;
```

```
thi=[-a1 -a2 b1 b2 Ce]';
```

```
alfa=1000; Pi=alfa*eye(NN);
```

```
lamb=0.98;lamb0=0.99;
```

```
Y(1)=0;Y(2)=0;y(1)=0;y(2)=0; % salida
```

```
U(1)=0;U(2)=0;u(1)=0;u(2)=0; % control
```

```

xmenos=zeros(nn,1); % vector de observacion inicial
z=0; % accion integral inicial
% Lazo del sistema de control
MM=2000;
for t=1:MM
v1(t+2)=1;
Y(t+2)=[Y(t+1) Y(t) U(t+1) U(t)]*[-a1 -a2 b1 b2]';
y(t+2)=Y(t+2)-v1(t+2); % desviacion
% Estimacion de parametros (metodo MCMR)
psi=[Y(t+1) Y(t) U(t+1) U(t) 1]';
rho=max(1,norm(psi));
psin=psi/rho;
Nn=chol(Pi');
S=inv(diag(Nn*ones(NN,1),0));
Ps=S*Pi*S;
psins=inv(S)*psin;
rt=1+psins'*Ps*psins;
lamb=1-(rt-sqrt(rt^2-4*norm(Ps*psins)^2/trace(Ps)))/2;
e=Y(t+2)/rho-psin'*thi;
j=psins'*Ps*psins+lamb;
th=thi+e*inv(S)*Ps*psins/j;
Hns=Ps*psins/j;
Ps=(Ps-Hns*psins'*Ps)/lamb;
tt=abs(max(eig(Ps))/min(eig(Ps)));
cmax=100;cmin=15;
if tt <= cmin,
    Pi=Ps;thi=th;
elseif tt >= cmax,
    Nnew=chol(Ps');
    Snew=inv(diag(Nnew*ones(NN,1),0));
    Psnew=Snew*Ps*Snew;
    Pi=Psnew;thi=th;

```

```

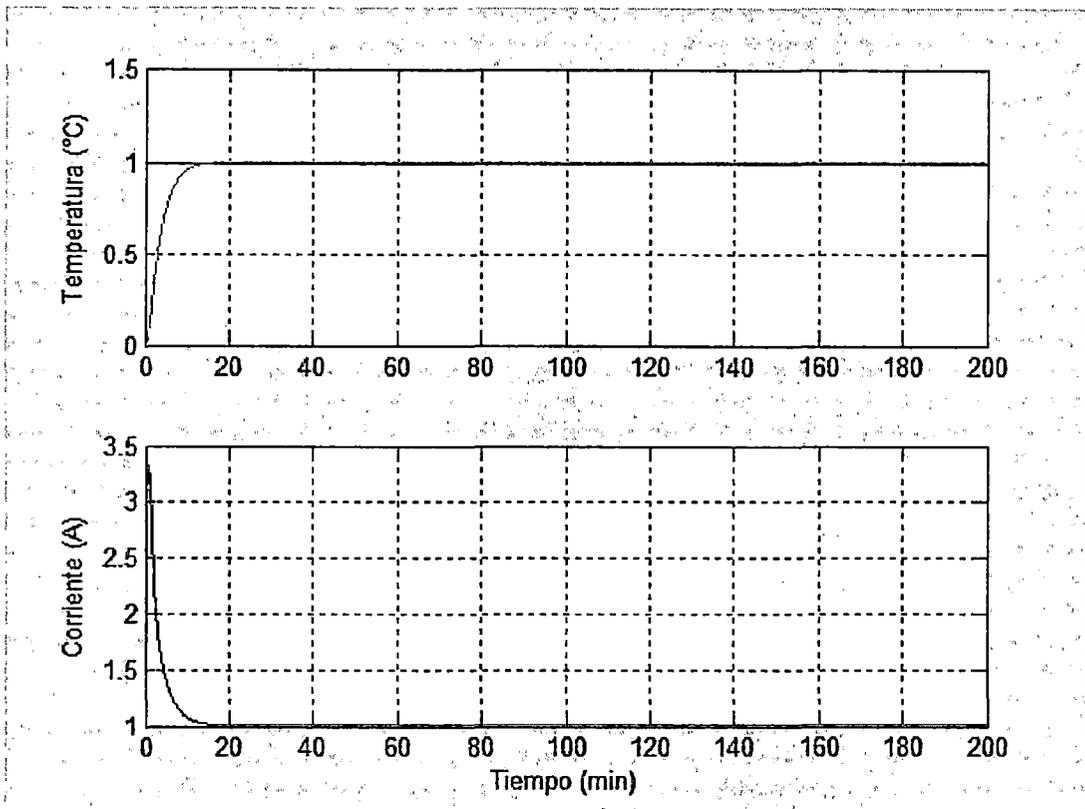
end
% Recuperacion de ecuacion estimada
ae1=-th(1);ae2=-th(2);
be1=th(3);be2=th(4);Ce=th(5);
nume=[0 be1 be2];
dene=[1 ae1 ae2];
[GE,HE,CE,DE]=tf2ss(nume,dene);
% Calculo de la ganancia F del estimador de Kalman
F=dlqe(GE,HE,CE,Sigma,Xi);
xmas=xmenos+F*(y(t+2)-CE*xmenos);
z=z -CE*xmas;
% Calculo de la ganancia del controlador
Ga=[GE zeros(nn,r);-CE eye(r,r)];
Ha=[HE;zeros(r,r)];
Ca=[CE zeros(r,r)];
Ka=dlqr(Ga,Ha,Qa,R);
% Calculo de la ley de control
u(t+2)=-Ka*[xmas;z];
xmenos=GE*xmas+HE*u(t+2);
AE=1+ae1+ae2; BE=be1+be2;
Uin=inv(BE)*(AE*v1(t+2)-Ce);
U(t+2)=u(t+2)+Uin;
end
% Graficos
ejex=linspace(0,MM*T,MM);
subplot(2,1,1)
plot(ejex,v1(3:MM+2),ejex,Y(3:MM+2));grid
ylabel('Temperatura (°C)')
subplot(2,1,2)
plot(ejex,U(3:MM+2)),grid
ylabel('Corriente (A)')
xlabel('Tiempo (min)')

```

```

% Resultados
disp('pulse cualquier tecla para ver los parámetros del modelo discreto')
pause
a1,a2,b1,b2
disp('pulse cualquier tecla para ver los parámetros estimados del modelo
discreto')
pause
ae1,ae2,be1,be2
disp('pulse cualquier tecla para ver la ganancia F del estimador de Kalman')
pause
F
disp('pulse cualquier tecla para ver la ganancia Ka del controlador')
pause
Ka
Resultados:
>> adaptivo
pulse cualquier tecla para ver los parámetros del modelo discreto
a1 = -1.8949
a2 = 0.8958
b1 = 4.8212e-004
b2 = 4.6476e-004
pulse cualquier tecla para ver los parámetros estimados del modelo discreto
ae1 = -1.8949
ae2 = 0.8958
be1 = 4.8189e-004
be2 = 4.6469e-004
pulse cualquier tecla para ver la ganancia F del estimador de Kalman
F =
    20.3375
    20.1413
pulse cualquier tecla para ver la ganancia Ka del controlador
Ka = 0.1674 -0.1390 -0.0291

```



Observamos que la respuesta se estabiliza alrededor de 10 min al valor de referencia  $r = 1$ , es decir no hay error estacionario, sin oscilaciones.

### Control predictivo basado en modelos

A continuación se presenta la programación y simulación del método.

predictivo.m

```
% Calculo de un controlador predictivo empleando ley de control escalar
```

```
% dinamica
```

```
clear all
```

```
% Modelo del proceso en tiempo continuo
```

```
Ac=[0 1; -0.1 -1.1]; Bc=[0;0.1]; Cc=[1 0]; Dc=[0];
```

```
T=0.1; % periodo de muestreo
```

```
% Modelo discreto
```

```
[G,H,C,D]=c2dm(Ac,Bc,Cc,Dc,T,'zoh');
```

```

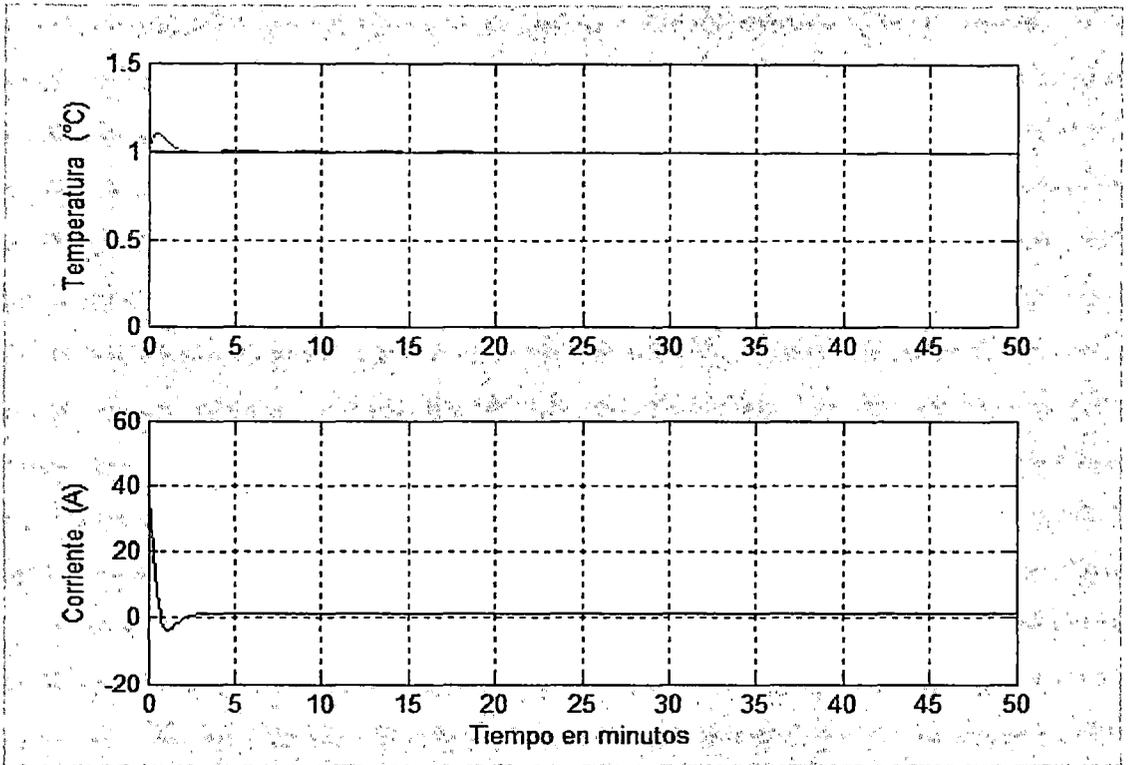
[numd,dend]=ss2tf(G,H,C,D);
a1=dend(2);a2=dend(3);
b1=numd(2);b2=numd(3);
% Respuesta al escalon
g1=b1;
g2=-a1*b1+b1+b2;
g3=-a1*g2-a2*g1+b1+b2; g4=-a1*g3-a2*g2+b1+b2;
g5=-a1*g4-a2*g3+b1+b2; g6=-a1*g5-a2*g4+b1+b2;
g7=-a1*g6-a2*g5+b1+b2; g8=-a1*g7-a2*g6+b1+b2;
g9=-a1*g8-a2*g7+b1+b2; g10=-a1*g9-a2*g8+b1+b2;
% Horizontes de control
N1=1;N2=10;Nu=1;
% Condiciones iniciales
for k=1:3
    yf(k)=0;y(k)=0;r(k)=0;u(k)=0;
end
alf=0.1;lambda=0;MM=500;
% Lazo de control
for t=3:MM+2
% Trayectoria deseada, referencia y respuesta libre
    for k=1:N2
        W(t+k)=1;
        r(t+k)=alf*r(t+k-1)+(1-alf)*W(t+k);
        yf(t+k)=-a1*yf(t+k-1)-a2*yf(t+k-2)+(b1+b2)*u(t-1);
    end
% Ley de control
du(t)=(g1*(r(t+1)-yf(t+1))+g6*(r(t+6)-yf(t+6))+...
    g2*(r(t+2)-yf(t+2))+g7*(r(t+7)-yf(t+7))+...
    g3*(r(t+3)-yf(t+3))+g8*(r(t+8)-yf(t+8))+...
    g4*(r(t+4)-yf(t+4))+g9*(r(t+9)-yf(t+9))+...
    g5*(r(t+5)-yf(t+5))+g10*(r(t+10)-yf(t+10)))/...
    (g1^2+g2^2+g3^2+g4^2+g5^2+g6^2+g7^2+g8^2+g9^2+g10^2+lambda);

```

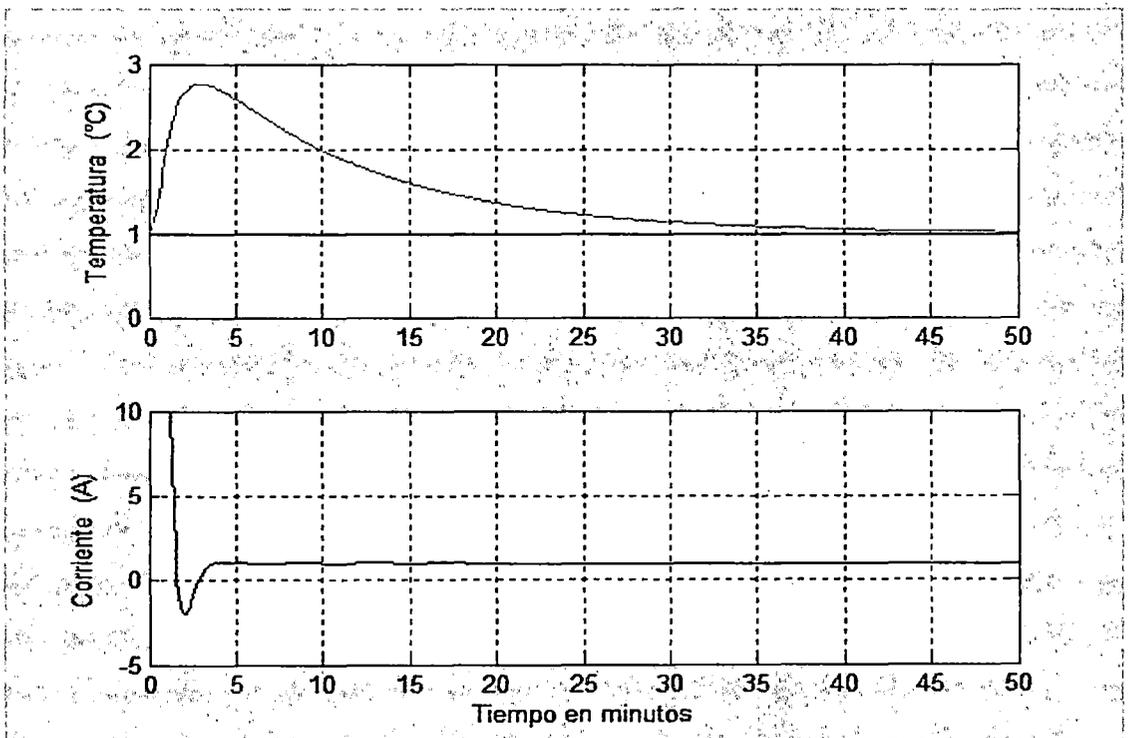
```

u(t)=u(t-1)+du(t);
% Proceso linealizadoy(t+1)=-a1*y(t)-a2*y(t-1)+b1*du(t)+b2*du(t-1);
% Salida actual
Y(t+1)=y(t+1)+W(t+1);
% Limitando la señal de control
fu=50;
if(u(t)>0 & u(t) > fu)
    u(t)=fu;
elseif(u(t)<0 & u(t) < -fu)
    u(t)=-fu;
end
end
% Graficos
ejex=linspace(0,MM*T,MM-2);
subplot(2,1,1)
plot(ejex,W(3:MM),ejex,Y(3:MM));grid
ylabel('Temperatura (°C)')
subplot(2,1,2)
plot(ejex,u(3:MM));grid
ylabel('Corriente (A)')
xlabel('Tiempo en minutos')

```



Se note que la respuesta es rápida, se estabiliza aproximadamente en 3 min. con error estacionario cero, pero la corriente inicial es de 30 A, ( muy alto ). Si limitamos la señal de control a máximo 10 A. (cambiamos  $f_u = 10$  ), el resultado es:



Se observa que es más lenta y con mayor sobreimpulso, pero la corriente máxima no supera a 10 A.

## SIMULACIÓN DEL DISEÑO PARA TODAS LAS FASES DE DESHIDRATADO

### Simulación del proceso completo

El proceso completo consta de 4 fases, a continuación se mostrará las simulaciones para todas las fases de proceso de deshidratado:

Fase	Temp. ( °C )	Tiempo (horas)
F1	30	2 ( 120 min )
F2	35	3 ( 180 min )
F3	40	2.5 ( 150 min )
F4	45	3 ( 180 min )

### Control óptimo discreto

copi1.m

% Programa para cálculo de un controlador optimo proporcional integral

clear all

% Ingreso de parámetros del proceso

K=input('ingresa la ganancia del proceso : ')

T1=input('ingresa constante de tiempo de la cabina : ')

T2=input('ingresa constante de tiempo del producto : ')

% Ingreso del modelo del proceso en variable de estado

disp('pulse cualquier tecla para ver el modelo del proceso')

pause

A=[0 1;-1/(T1\*T2) -(T1+T2)/(T1\*T2)]

B=[0; K/(T1\*T2)]

Cc=[1 0]

Dc=[0]

```

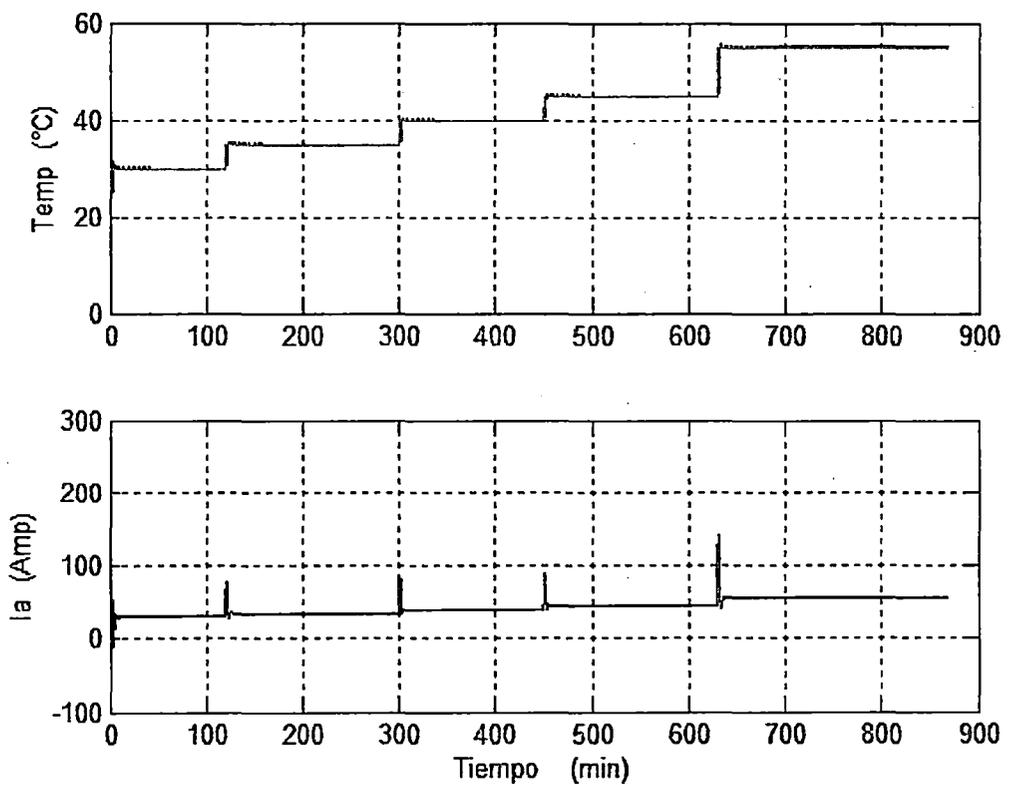
proceso=ss(A,B,Cc,Dc);
% Modelo en tiempo discreto
T=0.1; % periodo de muestreo igual a 0.1 min (la variacion de temperatura
es de ese orden)
[G,H,Cd,Dd]=c2dm(A,B,Cc,Dc,T,'zoh');
% Composicion de matrices Gtilde y Htilde
Gtilde=[G zeros(2,1); -Cd*G eye(1,1)];
Htilde=[H; -Cd*H];
disp('pulse cualquier tecla para ver el modelo en tiempo discreto del
proceso')
pause
G,H,Cd,Dd
Gtilde,Htilde
% Matrices de ponderacion
Q=[10 0 0;0 1 0;0 0 1]; R=[0.1];
disp('pulse cualquier tecla para ver las matrices de ponderacion asumidas')
pause
Q,R
% Ganancia del controlador optimo
[Ktil,Ptil,E]=dlqr(Gtilde,Htilde,Q,R);
K=[Ktil(1) Ktil(2)]; KI=-Ktil(3);
disp('pulse cualquier tecla para ver la ganancia del controlador optimo')
pause
K,KI
% Respuesta del proceso en todas sus fases
x=[0;0];yi=0;v=0;
NN=8700;r=[30*ones(1,1200),35*ones(1,1800),40*ones(1,1500),45*ones(1,1
800),55*ones(1,2400)];
for k=1:NN
    v=v+r(k)-yi;
    la(k)=-K*x+KI*v;
    x=G*x+H*la(k);

```

```

y(k)=x(1);yi=y(k);
end
% Graficos
disp('pulse cualquier tecla para ver resultados graficos')
pause
t=linspace(0,T*NN,NN);
subplot(2,1,1)
plot(t,y,t,r);ylabel('Temp (°C)');grid;
subplot(2,1,2)
plot(t,ia);ylabel('Ia (Amp)');grid;
xlabel('Tiempo (min)');

```



### Control adaptivo autosintonizado

```

adaptivo1.m

```

```

% Cálculo de un controlador adaptivo con auto sintonización

```

```

clear all

```

```

% Parámetros
nn=2;r=1; % nn:orden del proceso (numero de variables de estado; r:
número de salidas
NN=5; % orden del vector estimado de parámetros
cmax=100;cmin=15; % para el estimador de parámetros
Sigma=10; Xi=1; % parámetros para optimizar el filtro de Kalman
R=100; Qa=[0.1 0 0;0 0 0;0 0 0.1]; % parámetros de optimización del
controlador Ka
% Modelo del proceso en tiempo continuo
Ac=[0 1; -0.1 -1.1]; Bc=[0;0.1];Cc=[1 0];Dc=[0];
T=0.1; % periodo de muestreo
% Modelo discreto
[G,H,C,D]=c2dm(Ac,Bc,Cc,Dc,T,'zoh');
[num,den]=ss2tf(G,H,C,D);
a1=den(2);a2=den(3);
b1=num(2);b2=num(3);
% Condiciones iniciales
Ref=1; % magnitud de la señal de referencia
Ce=(1+a1+a2)*Ref; Uo=0;
thi=[-a1 -a2 b1 b2 Ce]';
alfa=1000; Pi=alfa*eye(NN);
lamb=0.98;lamb0=0.99;
Y(1)=0;Y(2)=0;y(1)=0;y(2)=0; % salida
U(1)=0;U(2)=0;u(1)=0;u(2)=0; % control
xmenos=zeros(nn,1); % vector de observación inicial
z=0; % accion integral inicial
% Lazo del sistema de control
MM=8700;
for t=1:MM
v1=[30*ones(1,1200),35*ones(1,1800),40*ones(1,1500),45*ones(1,1800),55*
ones(1,2400)];
v1(t+2)=v1(t);

```

```

Y(t+2)=[Y(t+1) Y(t) U(t+1) U(t)]*[-a1 -a2 b1 b2]';
y(t+2)=Y(t+2)-v1(t+2); % desviación
% Estimación de parámetros (método MCMR)
psi=[Y(t+1) Y(t) U(t+1) U(t) 1]';
rho=max(1,norm(psi));
psin=psi/rho;
Nn=chol(Pi');
S=inv(diag(Nn*ones(NN,1),0));
Ps=S*Pi*S;
psins=inv(S)*psin;
rt=1+psins'*Ps*psins;
lamb=1-(rt-sqrt(rt^2-4*norm(Ps*psins)^2/trace(Ps)))/2;
e=Y(t+2)/rho-psin'*thi;
j=psins'*Ps*psins+lamb;
th=thi+e*inv(S)*Ps*psins/j;
Hns=Ps*psins/j;
Ps=(Ps-Hns*psins'*Ps)/lamb;
tt=abs(max(eig(Ps))/min(eig(Ps)));
cmax=100;cmin=15;
if tt <= cmin,
    Pi=Ps;thi=th;
elseif tt >= cmax,
    Nnew=chol(Ps');
    Snew=inv(diag(Nnew*ones(NN,1),0));
    Psnew=Snew*Ps*Snew;
    Pi=Psnew;thi=th;
end
% Recuperación de ecuación estimada
ae1=-th(1);ae2=-th(2);
be1=th(3);be2=th(4);Ce=th(5);
nume=[0 be1 be2];
dene=[1 ae1 ae2];

```

```

[GE,HE,CE,DE]=tf2ss(ume,dene);
% Calculo de la ganancia F del estimador de Kalman
F=dlqe(GE,HE,CE,Sigma,Xi);
xmas=xmenos+F*(y(t+2)-CE*xmenos);
z=z -CE*xmas;
% Cálculo de la ganancia del controlador
Ga=[GE zeros(nn,r);-CE eye(r,r)];
Ha=[HE;zeros(r,r)];
Ca=[CE zeros(r,r)];
Ka=dlqr(Ga,Ha,Qa,R);
% Calculo de la ley de control
u(t+2)=-Ka*[xmas;z];
xmenos=GE*xmas+HE*u(t+2);
AE=1+ae1+ae2; BE=be1+be2;
Uin=inv(BE)*(AE*v1(t+2)-Ce);
U(t+2)=u(t+2)+Uin;
end
% Graficos
ejex=linspace(0,MM*T,MM);
subplot(2,1,1)
plot(ejex,v1(3:MM+2),ejex,Y(3:MM+2));grid
ylabel('Temperatura (°C)')
subplot(2,1,2)
plot(ejex,U(3:MM+2)),grid
ylabel('Corriente (A)')
xlabel('Tiempo (min)')
% Resultados
disp('pulse cualquier tecla para ver los parámetros del modelo discreto')
pause
a1,a2,b1,b2
disp('pulse cualquier tecla para ver los parámetros estimados del modelo
discreto')

```

pause

ae1,ae2,be1,be2

disp('pulse cualquier tecla para ver la ganancia F del estimador de Kalman')

pause

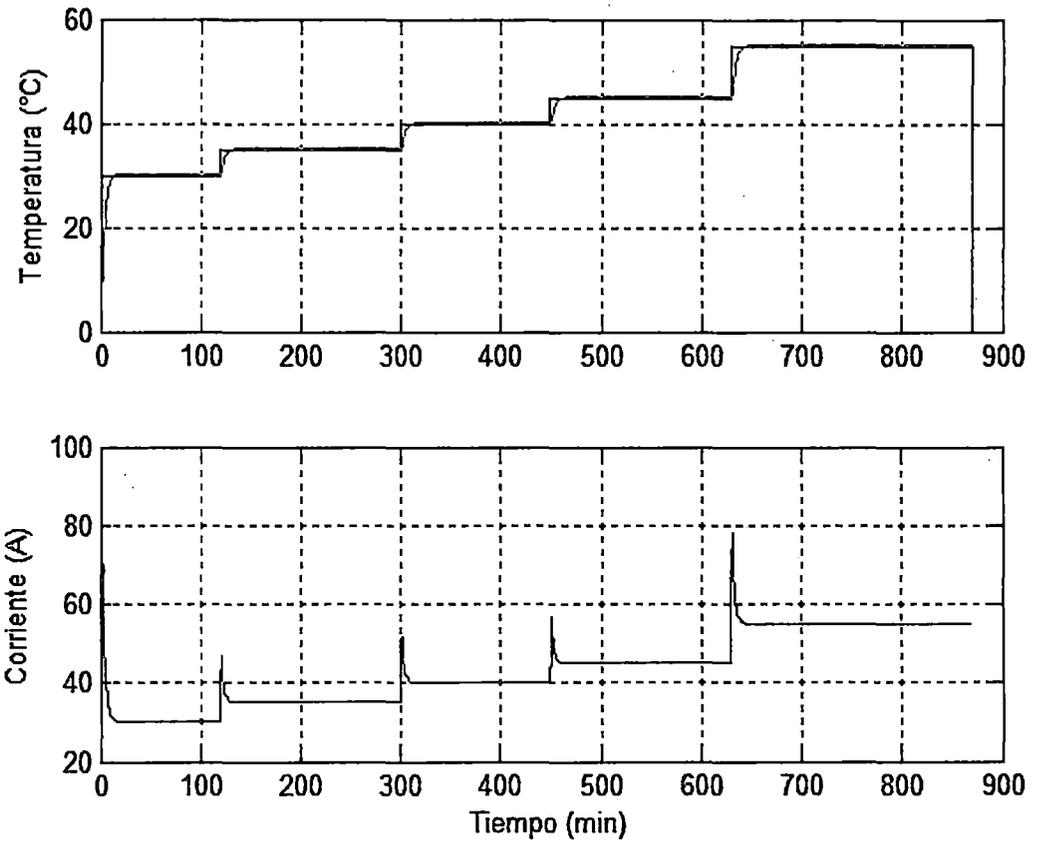
F

disp('pulse cualquier tecla para ver la ganancia Ka del controlador')

pause

Ka

Resultado:



## CONTROL PREDICTIVO BASADO EN MODELOS

predictivo1.m

```
% Calculo de un controlador predictivo empleando ley de control escalar  
% dinámica
```

```
clear all
```

```
% Modelo del proceso en tiempo continuo
```

```
Ac=[0 1; -0.1 -1.1]; Bc=[0;0.1];Cc=[1 0];Dc=[0];
```

```
T=0.1; % periodo de muestreo
```

```
% Modelo discreto
```

```
[G,H,C,D]=c2dm(Ac,Bc,Cc,Dc,T,'zoh');
```

```
[numd,dend]=ss2tf(G,H,C,D);
```

### Control predictivo basado en modelos

```
a1=dend(2);a2=dend(3);
```

```
b1=numd(2);b2=numd(3);
```

```
% Respuesta al escalon
```

```
g1=b1;
```

```
g2=-a1*b1+b1+b2;
```

```
g3=-a1*g2-a2*g1+b1+b2; g4=-a1*g3-a2*g2+b1+b2;
```

```
g5=-a1*g4-a2*g3+b1+b2; g6=-a1*g5-a2*g4+b1+b2;
```

```
g7=-a1*g6-a2*g5+b1+b2; g8=-a1*g7-a2*g6+b1+b2;
```

```
g9=-a1*g8-a2*g7+b1+b2; g10=-a1*g9-a2*g8+b1+b2;
```

```
% Horizontes de control
```

```
N1=1;N2=10;Nu=1;
```

```
% Condiciones iniciales
```

```
for k=1:3
```

```
    yf(k)=0;y(k)=0;r(k)=0;u(k)=0;
```

```
end
```

```
alf=0.1;lambda=0;MM=8700;
```

```

% Lazo de control
for t=3:MM+2
    % Trayectoria deseada, referencia y respuesta libre
    for k=1:N2

v1=[30*ones(1,1200),35*ones(1,1800),40*ones(1,1500),45*ones(1,1800),55*
ones(1,2412)];
        W(t+k)=v1(t);
        r(t+k)=alf*r(t+k-1)+(1-alf)*W(t+k);
        yf(t+k)=-a1*yf(t+k-1)-a2*yf(t+k-2)+(b1+b2)*u(t-1);
    end
    % Ley de control
du(t)=(g1*(r(t+1)-yf(t+1))+g6*(r(t+6)-yf(t+6))+...
g2*(r(t+2)-yf(t+2))+g7*(r(t+7)-yf(t+7))+...
g3*(r(t+3)-yf(t+3))+g8*(r(t+8)-yf(t+8))+...
g4*(r(t+4)-yf(t+4))+g9*(r(t+9)-yf(t+9))+...
g5*(r(t+5)-yf(t+5))+g10*(r(t+10)-yf(t+10)))/...
(g1^2+g2^2+g3^2+g4^2+g5^2+g6^2+g7^2+g8^2+g9^2+g10^2+lambd);
u(t)=u(t-1)+du(t);
    % Proceso linealizado
y(t+1)=-a1*y(t)-a2*y(t-1)+b1*du(t)+b2*du(t-1);
    % Salida actual
Y(t+1)=y(t+1)+W(t+1);
    % Limitando la señal de control
fu=50;
if(u(t)>0 & u(t) > fu)
    u(t)=fu;
elseif(u(t)<0 & u(t) < -fu)
    u(t)=-fu;
end
end
end
% Graficos

```

```

ejex=linspace(0,MM*T,MM-2);
subplot(2,1,1)
plot(ejex,W(3:MM),ejex,Y(3:MM));grid
ylabel('Temperatura (°C)')
subplot(2,1,2)
plot(ejex,u(3:MM));grid
ylabel('Corriente (A)')
xlabel('Tiempo en minutos')

```

