

**SISTEMA DE CONTROL, Y MONITOREO DE TEMPERATURA POR
COMPUTADOR DE UN DESHIDRATADOR COMEK, PARA LA PLANTA
PILOTO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS DE LA
UNIVERSIDAD DEL CAUCA.**

LUBIER MOLANO SOTELO
FABIO HERNAN REALPE

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE FISICA
INGENIERIA FISICA
POPAYÁN
2006
0

**SISTEMA DE CONTROL, Y MONITOREO DE TEMPERATURA POR
COMPUTADOR DE UN DESHIDRATADOR COMEK, PARA LA PLANTA
PILOTO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS DE LA
UNIVERSIDAD DEL CAUCA.**

LUBIER MOLANO SOTELO
FABIO HERNAN REALPE

Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Físico

Director
MSc. JORGE W. CORONEL G.

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE FISICA
INGENIERIA FISICA
POPAYÁN
2006

NOTA DE ACEPTACIÓN

APROBADO

Director _____
M.Sc. Jorge W. Coronel Garcia

Jurado _____
Ing. Sandra Godoy

Jurado _____
Ing. Diego Bravo

Fecha de sustentación: Popayán, Julio 12 de 2006.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos

A Dios Padre por darme la vida.

A mi familia, en especial a la memoria de mi padre, a mi hermano Darío Realpe por su apoyo incondicional durante todo este tiempo y a la persona que hizo posible este sueño con su esfuerzo, lucha y dedicación a mí madre DOMICIANA MARTINEZ GARCES.

Fabio Hernán Realpe Martínez

A Dios Padre

Lubier Molano

TABLA DE CONTENIDO

Pág.

RESUMEN

DESHIDRATACION

INTRODUCCION	11
1 MECANISMOS DE DESHIDRATACION	12
1.1 Deshidratación.....	12
1.1.1 Deshidratación por aire caliente	12
1.2 Calor latente	13
1.3 Transferencia de calor en el secado	13
1.4 Formas de enlace de la humedad con el material	14
1.5 Movimiento de la humedad dentro del sólido	15
1.5.1 Difusión líquida.....	15
1.5.2 Movimiento capilar	16
1.5.3 Difusión de vapor	16
1.5.4 Presión	16
1.6 Curvas de régimen de secado	16
1.6.1 Etapa a-b	17
1.6.2 Etapa b-c	18
1.6.3 Etapa c-e	18
1.7 Mecanismos y cinética de secado. Transferencia de masa y calor	19
1.7.1 Condiciones externas	19
1.7.2 Condiciones internas	19
1.8 Clasificación de la operación de secado	20
1.9 Factores que afectan el tiempo de deshidratación.....	21
1.9.1 Velocidad del aire	21
1.9.2 Tipo de vegetal	21
1.9.3 Carga de bandejas.....	21
1.9.4 Espesor y forma	22
1.10 Efecto de la deshidratación	22
1.10.1 Textura	22
1.10.2 Aroma	23
1.10.4 Valor nutritivo	24
1.11 Tipos de secadores	25
1.11.1 Secador de bandeja.....	25
1.11.2 Secadores de túnel.....	26
1.11.3 Secadores de rodillo o de tambor.....	26
1.11.4 Secadores de tolva.....	26

1.11.5	Secadores de cinta.....	26
1.11.6	Secadores por vacío	26
1.11.7	Secadores liofilizadores.....	27
1.11.8	Secadores de lecho fluidizado	27
1.11.9	Secadores neumáticos	27
2	SENSORES PROCESADOR Y ACTUADOR	28
2.1	Termocuplas	28
2.2	Respuesta escalón.....	28
2.3	Modelo de la planta	32
2.4	Acondicionamiento de la señal para termocuplas	37
2.4.1	Ad594	38
2.5	Sensor de humedad	39
2.6	Sistema de control y adquisición de datos.....	40
2.6.1	Controladores automáticos	40
2.6.2	Adquisición de datos.....	41
2.6.3	Envío de información	42
2.6.4	Pic18f452	43
2.6.5	Temporizador del proceso	44
2.6.6	Otros dispositivos	45
2.7	Actuador.....	45
2.7.1	Motor paso a paso	46
2.7.2	Caja de reducción	48
2.7.3	Válvula globo	50
2.7.4	Descripción general del actuador y caracterización	50
3.	QUEMADORES ATMOSFERICOS	57
3.1	Llamas de premezcla	57
3.2	Forma de la llama	57
3.3	Propiedades.....	60
3.4	Componentes de un quemador.....	60
3.5	Características.....	61
3.5.1	Caudal calórico (qc).....	61
3.5.2	Caudal de aire arrastrado.....	62
3.6	Diagrama de funcionamiento de quemador atmosférico.....	64
4	ESTRATEGIA DE CONTROL UTILIZADA Y SOFTWARE UTILIZADO	67
4.1	Descripción del controlador	68
4.2	Software utilizado.....	69
4.2.1	Mplab v 6.6	69
4.2.2	Mcc-18	69
4.2.3	Labview™.....	70
4.2.4	Leica:	70
5	CALCULO DE VARIABLES PSICROMETRIA	71
5.1	Humedad relativa y temperatura del aire	71

5.1.2	Propiedades del aire húmedo.....	71
5.2	Punto de rocío	76
5.3	Temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo	77
5.3.1	Temperatura de bulbo seco	77
5.3.2	Temperatura de bulbo húmedo	77
5.4	Tiempo de deshidratación	78
5.4.1	Periodo de velocidad constante	78
6	ANÁLISIS Y RESULTADOS	80
6.1	Control manual	80
6.2	Control Automático	82
7.0	MANUAL DE USUARIO	84
7.1	Teclas de configuración	85
7.2	Características del estado manual	85
7.2.1	parametros a tener en cuenta	86
7.4	Estado automático	86
7.4.1	Características del estado automático	86
7.4.2	Parámetros a tener en cuenta.....	87
8	CONCLUSIONES	89
	BIBLIOGRAFIA	90
	ANEXO A	92

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Fracción de apertura de la válvula de acuerdo a la posición del vástago	54.
Tabla 2. Comportamiento del caudal frente a la variación del ángulo de apertura	55.
Tabla 3. Comportamiento de las presiones y velocidades de salida con tobera de gas	65.
Tabla 4. Humedades corregidas a diferentes temperaturas	74.

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Régimen de secado	17.
Figura 2. Comportamiento de humedad en proceso	20.
Figura 3. Secador de bandejas	25.
Figura 4. Respuesta escalón de termopar	29.
Figura 5. Respuesta escalón de termopar bajo diferentes condiciones de uso	30.
Figura 6. Caracterización de termopar tipo J compensada	35.
Figura 7. Caracterización de la planta	37.
Figura 8. Esquema interno de compensador termopar tipo J	38.
Figura 9. Sensor de humedad	39.
Figura 10. Curva de respuesta de sensor de humedad	39.
Figura 11. Conexión típica del sensor de humedad	40.
Figura 12. Diagrama de bloques de controlador automático	41.
Figura 13. Diagrama de pines max 232	42.
Figura 14. Diagrama de pines 18F452	44.
Figura 15. Diagrama de pines Ds1302	45.
Figura 16. Orden y conexión de entrada a bobinas del motor PAP	46.
Figura 17. Diagrama para medición de torque motor PAP	47.
Figura 18. Imagen a procesar válvula cerrada	51.
Figura 19. Imagen a procesar 35° de apertura	51.

Figura 20. Imagen procesada válvula solamente abierta	52.
Figura 21 Curva de respuesta de caudalimetro digital	53.
Figura 22 Comportamiento del caudal vs área	54.
Figura 23. Comportamiento del caudal vs variación del ángulo de apertura	56.
Figura 24. Llama de pre mezcla	58.
Figura 25. Diagrama de descomposición vectorial de la llama	59.
Figura 26. Diagrama de quemador de GLP	61.
Figura 27. Diagrama de zona de funcionamiento del quemador	64.
Figura 28. Comportamiento de la velocidad de gas en función de la variación del área con tobera	66.
Figura 29. Comportamiento de la presión vs variación del ángulo	66.
Figura 30. Panel frontal de MPLAB v 6.6	69.
Figura 31. Grafica de presión de saturación de vapor	71.
Figura 32. Curvas de humedad relativa vs temperatura	75.
Figura 33. Curvas de humedad vs temperatura a presión atmosférica local	75.
Figura 34. Temperatura vs presión de vapor	76.
Figura 35. Respuesta del sistema en estado manual	80.
Figura 36. Respuesta de la humedad en el sistema	81.
Figura 37. Respuesta del sistema en estado automático	82.
Figura 38. Humedad relativa calculada por carta psicrométrica digital	83.
Figura 39. Fuente de poder del controlador	91.
Figura 40. Tarjeta de potencia y comunicación del controlador	92.

RESUMEN

En las plantas piloto de alimentos de la **FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS DE LA UNIVERSIDAD DEL CAUCA** cuentan con un equipo de deshidratación marca **comek** que fue adquirido para procesamiento de frutas mediante un mecanismo que suministra aire caliente, el equipo no cuenta con un sistema de monitoreo de temperatura ni de humedad relativa que permita mantener control sobre el proceso de deshidratación al interior de la cámara de secado; ante esta situación se propone con el presente trabajo adecuar un sistema que permita controlar la temperatura de deshidratación mediante una acción del gas de combustión que alimenta el sistema calefactor y el monitoreo de temperatura y humedad relativa mediante una interfase a computador; con dichos elementos se construirá una carta psicrométrica digital facilite la realización de un análisis específico de cada producto sometido a deshidratación en el equipo.

Un correcto proceso de deshidratación en la mayor parte de alimentos requiere de temperaturas no superiores a 60 °C, con el propósito de evitar la pérdida total de nutrientes, aroma y flavor (aroma y sabor). En el equipo actual el sistema presenta una deficiencia en cuanto al tratamiento de esta variable; primero por que el valor máximo de temperatura de secado es superado en varios grados centígrados. Segundo por que existe una constante manipulación de la muestra durante todo el proceso de deshidratación para determinar el contenido de humedad presente en el alimento.

El trabajo desarrollado sobre el equipo consiste en el diseño y construcción de un sistema embebido de control, el algoritmo de control es capaz de general una acción sobre la variable física (temperatura) manteniéndola constante durante el proceso, al mismo tiempo permite el monitoreo de humedad relativa y temperatura.

El equipo adecuado consta de dos opciones de mando ejecutadas mediante un menú diseñado y desplegado mediante una pantalla el cual permite la selección de los estados de operación (manual o automático) cuyo accesos se realiza mediante un tablero colocado sobre el sistema, el control, la adquisición y el envío de la información proveniente de los sensores se realiza mediante un dispositivo electrónico digital denominado chip (PIC 18f452 Microchip), el cual es un pequeño procesador capaz de desarrollar múltiples tareas con la ayuda de sus periféricos.

INTRODUCCION

El hombre primitivo utilizó la energía solar que calentaba el medio ambiente, para secar sus alimentos al aire libre. Actualmente el secado de frutas y hortalizas es un proceso industrial muy importante en la preservación de la calidad de los productos agrícolas.

El secado o deshidratación consiste en la extracción del agua contenida en los alimentos por medios físicos hasta que el nivel de agua sea adecuada para su conservación por largos periodos.

El nivel de agua deseado lo determina el tipo de producto final, por ejemplo, el secado de granos y cereales se realiza hasta obtener alrededor de 12% de agua en el producto que es parecido a la humedad del aire normal, en el caso de las frutas secas, los niveles son más bajos (8-10%), en el caso de nueces y semillas los niveles son todavía más bajos (3-5%).

Cuando la humedad final que se desea está por debajo de la humedad del aire normal o del medio ambiente, es necesario realizar un proceso controlado de secado utilizando aire que debe ser calentado por cualquier fuente de energía: solar, eléctrica, por combustión de la madera u otros combustibles derivados del petróleo.

El secado por aire caliente orientado a túneles o cabinas en donde se coloca el producto, es el más eficiente y recomendado, ya que los equipos construidos pueden controlar el proceso de secado: temperatura y velocidad del aire, y la disposición del alimento a secar.

El objetivo de este trabajo es dar una solución a un problema que presenta el deshidratador ubicado en la planta piloto de procesos aplicados en vegetales de **FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS DE LA UNIVERSIDAD DEL CAUCA**, generando una herramienta para el control y monitoreo de Temperatura y Humedad importantes en el proceso de secado permitiendo un control óptimo de las variables durante el proceso de deshidratación logrando así un menor grado de manipulación de muestra y del equipo durante todo el proceso.

1 MECANISMOS DE DESHIDRATACION

1.1 Deshidratación

El secado o deshidratación de cualquier sólido consiste, generalmente, en separar un líquido de un sólido por evaporación y mediante métodos mecánicos. En alimentos se suele hablar de deshidratación. La deshidratación de alimentos es la eliminación casi completa del agua de los mismos en forma de vapor o al menos del 13% de su contenido de agua, bajo condiciones de temperatura controlada.

En el secado por convección el calor necesario para la evaporación del líquido se transmite por un agente gaseoso o un vapor que pasa por encima del sólido o lo atraviesa.

En el secado por conducción el producto que debe secarse se encuentra en recipientes calentado o se desplaza por encima de estos. El calor también se difunde en el sólido a través de la conductividad del propio sólido ^[1].

En el secado por radiación el calor se transmite por las superficies radiantes próximas.

En el secado dieléctrico la energía es generada en el interior del propio material mediante un campo electromagnético de alta frecuencia en la zona de microondas ^[2]

1.1.1 Deshidratación por aire caliente

La deshidratación o secado de los alimentos es un fenómeno complejo que implica procesos de transferencia de cantidad de movimiento, calor y masa. Todas las operaciones de secado dependen de la aplicación de calor para vaporizar el agua o los constituyentes volátiles. El mecanismo que regula el secado de un producto en forma de partículas depende de la estructura de este y de los parámetros de secado como contenido de humedad, dimensiones del producto, Temperatura del medio de calentamiento, velocidades de transferencia superficiales y contenido de humeado en equilibrio ^[1].

1.2 Calor latente

El calor latente o cambio de entalpía de un sistema, es la energía necesaria para lograr una transformación de fase de primer orden como por ejemplo el paso de líquido a vapor [17].

1.3 Transferencia de calor en el secado

La velocidad de secado está determinada por la tasa de transferencia de calor. El proceso de secado está acompañado por tres mecanismos de transferencia de calor es decir conducción convección y radiación. La importancia relativa de cada uno varía de un secador a otro predominando con frecuencia uno de ellos hasta el punto de gobernar el proceso en conjunto.

Por ejemplo en los secadores de aire forzado, la velocidad de transmisión de calor viene dada por:

$$q = h_s A(t_a - t_s) \quad (1.1)$$

En la que q es la velocidad de transmisión de calor en $\text{kJ kg}^{-1}\text{s}^{-1}$, h es el coeficiente de transmisión superficial en $\text{Jm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{C}^{-1}$, A es el área a través de la cual tiene lugar el flujo de calor en m^2 , t_a la temperatura del aire y t_s la temperatura de la superficie que se esta secando.

Otro tipo de secado en el cual la transmisión de calor se realiza por conducción hacia el producto alimenticio se encuentra descrito por la siguiente ecuación.

$$q = UA(t_i - t_s) \quad (1.2)$$

En la que U es el coeficiente global de transmisión de calor, t_i es la temperatura interior (usualmente muy próxima a la de la corriente), t_s es la temperatura de la superficie del alimento (la del punto de ebullición del agua o ligeramente superior) y A es el área de la superficie de contacto.

La transmisión de calor por radiación es la transferencia de energía por radiación electromagnética. La radiación es independiente del medio a través del cual opera y depende solo de las temperaturas relativas, de la distribución geométrica y de la estructura superficial de los materiales que emitan o absorban calor.

En los desecadores radiantes y hornos la velocidad de transmisión de calor radiante esta determinada por:

$$q = A\sigma T^4 \quad (1.3)$$

En la que T es la temperatura absoluta, σ es la constante de Stefan-Boltzmann = $5.73 \times 10^{-8} \text{ Jm}^{-2}\text{k}^{-4}$ [5].

El exceso de humedad contenida por los materiales puede eliminarse por métodos mecánicos (sedimentación, filtración, centrifugación). Sin embargo, la eliminación más completa de la humedad se obtiene por evaporación y eliminación de los vapores formados, es decir, mediante el secado térmico, ya sea empleando una corriente gaseosa o sin la ayuda del gas para extraer el vapor [5].

Esta operación se utiliza ampliamente en la tecnología química y es muy común que sea la última operación en la producción precedente a la salida del producto resultante [5]. Es evidente que la eliminación de agua o en general de líquidos existentes en sólidos es más económica por acción mecánica que por acción térmica. La dificultad de los medios mecánicos surge cuando los productos finales y gran número de productos intermedios deben cumplir especificaciones rigurosas en cuanto a la humedad final. Habitualmente una centrífuga trabajando con grandes cargas de sólido húmedo dejará humedades en torno al 10-20 %, aunque en casos excepcionales como la sal común o cloruro sódico se puede alcanzar el 1 %.

La operación de secado es una operación de transferencia de masa de contacto gas- sólido, donde la humedad contenida en el sólido se transfiere por evaporación hacia la fase gaseosa, en base a la diferencia entre la presión de vapor ejercida por el sólido húmedo y la presión parcial de vapor de la corriente gaseosa. Cuando estas dos presiones se igualan, se dice que el sólido y el gas están en equilibrio y el proceso de secado cesa [5].

1.4 Formas de enlace de la humedad con el material

El mecanismo del proceso de secado depende considerablemente de la forma de enlace de la humedad con el material: cuanto más sólido es dicho enlace, tanto más difícil transcurre el secado. Durante el secado el enlace de la humedad con el material se altera.

Las formas de enlace de la humedad con el material se clasifican en: químico, físico-químico y físico- mecánico [1].

La humedad ligada químicamente es la que se une con mayor solidez al material

en determinadas proporciones (estequiométricas) y puede eliminarse sólo calentando el material hasta altas temperaturas o como resultado de una reacción química. Esta humedad no puede ser eliminada del material por secado.

Durante el secado se elimina, como regla, sólo la humedad enlazada con el material en forma físico-química y mecánica. La más fácil de eliminar resulta la enlazada mecánicamente que a su vez se subdivide en: humedad de los macrocapilares y microcapilares (capilares con el radio medio mayor y menor de 10-5 cm). Los macrocapilares se llenan de humedad durante el contacto directo de ésta con el material, mientras que en los microcapilares la humedad penetra tanto por contacto directo, como mediante la adsorción de la misma en el medio ambiente. La humedad de los macrocapilares se elimina con facilidad no sólo por secado, sino que también empleando métodos mecánicos.

El enlace físico-químico une dos tipos de humedad que difieren por la solidez del enlace con el material: la humedad ligada osmóticamente y por adsorción. La primera llamada también humedad de hinchamiento, se encuentra dentro de las células del material y se retiene por las fuerzas osmóticas. La segunda se retiene sólidamente sobre la superficie y en los poros del material. La humedad de adsorción requiere para su eliminación un gas con una energía considerablemente mayor que la utilizada para eliminar la humedad de hinchamiento. La existencia de estos tipos de humedad especialmente se manifiesta en materiales coloidales y poliméricos ^[1].

1.5 Movimiento de la humedad dentro del sólido

Cuando se produce la evaporación superficial, debe haber un movimiento de humedad desde las profundidades del sólido hacia la superficie.

La naturaleza del movimiento influye en el secado en los períodos de caída del régimen ^[14].

A continuación se explicarán brevemente algunas de las teorías que se adelantaron para explicar el movimiento de la humedad y la relación de ésta con las curvas de régimen.

1.5.1 Difusión líquida

Se puede producir la difusión de la humedad líquida debido a los gradientes de concentración entre las profundidades del sólido, donde la concentración es alta y la superficie donde ésta es baja ^[14].

1.5.2 Movimiento capilar

La humedad no límite en sólidos granulares y porosos tales como arcillas, pigmentos de pinturas y otros semejantes, se traslada a través de capilares e intersticios de los sólidos mediante un mecanismo que implica tensión superficial. Los capilares se extienden desde pequeños receptáculos de humedad dentro del sólido hasta la superficie de secado. A medida que se lleva a cabo el secado, al principio la humedad se traslada por capilaridad hacia la superficie con suficiente rapidez, siendo constante el régimen de secado [7,14].

1.5.3 Difusión de vapor

Especialmente si se suministra calor a una superficie de un sólido mientras en otra el secado continúa, se puede evaporar la humedad debajo de la superficie, difundiéndola hacia afuera como vapor. También se puede evaporar debajo de la superficie, las partículas de humedad existentes en sólidos granulares en forma aislada de la porción mayor de humedad que fluye a través de los capilares [7,14].

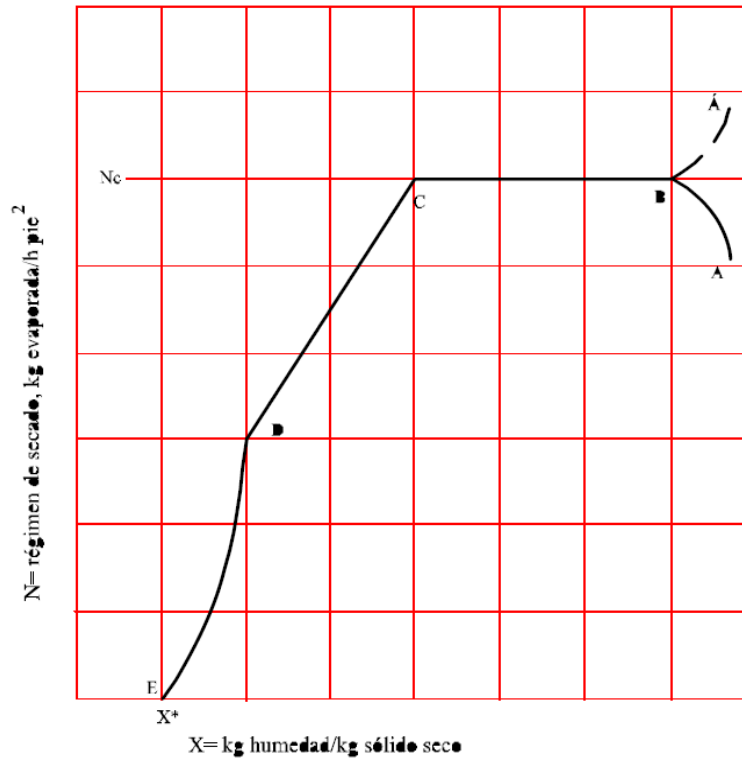
1.5.4 Presión

Durante el secado debido a la concentración de las capas externas de un sólido, se puede compeler la humedad hacia la superficie. Usualmente solo podemos conjeturar sobre cual de los mecanismos es el apropiado para cada sólido en particular, debiendo apoyarnos en el trabajo más o menos empírico de los regímenes experimentales de secado [7,14].

1.6 Curvas de régimen de secado

Se puede obtener abundante información si se convierten los datos a regímenes de secado, expresados como N (kg de humedad evaporada/ $h \cdot pie^2$), y se lleva a un gráfico en función del contenido de humedad. Se puede hacer esto midiendo las pendientes a las tangentes trazadas a la curva de humedad contra tiempo, o por medio de la determinación en base a la curva, de pequeños cambios Δx en el contenido de humedad para los correspondientes cambios en el tiempo Δt y calculando el régimen de secado como: $N = -(Ls \cdot \Delta x) / (A \cdot \Delta t)$. Donde Ls es el peso del sólido seco y A es la superficie húmeda sobre la que sopla el gas y a través de la cual se lleva a cabo la evaporación en el caso del secado con circulación cruzada de aire.

Figura 1. Régimen de secado



Generalmente se pueden apreciar dos partes notorias de la curva de régimen de secado: un período de régimen constante y uno de caída de régimen, aunque teóricamente existen o se pueden apreciar tres etapas del proceso o períodos de secado ^[16].

1.6.1 Etapa a-b

Es una etapa de calentamiento (o enfriamiento) inicial del sólido normalmente de poca duración en la cual la evaporación no es significativa por su intensidad ni por su cantidad. En esta etapa el sólido se calienta desde la temperatura ambiente hasta que se alcance el equilibrio entre el enfriamiento por evaporación y la absorción de calor de los gases. Este equilibrio se alcanza a la temperatura de bulbo húmedo del gas ^[16].

1.6.2 Etapa b-c

Es el llamado primer período de secado o período de velocidad de secado constante; donde se evapora la humedad libre o no ligada del material y predominan las condiciones externas. En este período el sólido tiene un comportamiento no higroscópico. La velocidad de secado se mantiene constante si el gas tiene un estado estacionario y en general depende solo de las propiedades y velocidad del mismo. Si durante el proceso, el gas se enfría, la velocidad de secado decrece pero sigue en esta zona dependiendo de factores externos al sólido. Durante este período la temperatura del sólido se mantiene igual a la de bulbo húmedo del gas, ya que se mantiene el equilibrio alcanzado al final de la etapa de calentamiento ^[16].

1.6.3 Etapa c-e

Es el segundo período de secado o período de velocidad de secado decreciente; donde se evapora la humedad semirrigida o seudoligada del material y predominan las condiciones internas o las características internas y externas simultáneamente. En estas condiciones el sólido tiene un comportamiento higroscópico. Durante el período, la temperatura del material sobrepasa la de bulbo húmedo debido a que el descenso de la velocidad de secado rompe el equilibrio térmico que mantiene estable la temperatura y una parte considerable del calor se emplea en un calentamiento del sólido. Ahora la humedad deberá ser extraída del interior del material con el consiguiente incremento de la resistencia a la evaporación.

Este período de velocidad decreciente puede dividirse en dos partes, con diferentes comportamientos de la velocidad de secado, la cual decrece cada vez más al disminuir la humedad del sólido. Esto implica dos modelos de secado diferente en dicha zona.

Un parámetro muy importante a determinar en los materiales a secar es la humedad a la cual se cambia del primero al segundo período, llamada humedad crítica. Esta depende del tipo del material y de la relación de secado en el primer período.

La forma de la curva de secado en el segundo período varía en dependencia de las características del material a secar. Existen curvas típicas de cuerpos capilarporosos con grandes superficies específicas y de pequeñas superficies específicas así como de cuerpos coloidales ^[16].

Una de las tareas primarias en el estudio del secado de un sólido, es la

identificación del modelo cinético que más adecuadamente se ajuste a los datos experimentales de secado. La adecuación de un modelo de secado consiste en la estimación de sus parámetros según algún criterio de comportamiento que tome en cuenta la magnitud de la humedad media del sólido y la magnitud de la humedad calculada por el modelo propuesto ^[16].

Novoa y Haber (1995) realizaron un estudio de la cinética de secado del cacao donde con el proceso de secado lograron una disminución de la humedad del grano hasta un nivel tal que garantiza la conservación en las debidas condiciones hasta su industrialización. El método utilizado para el procesamiento de los datos experimentales y ajustar los modelos matemáticos de las curvas de secado, se basó en una ecuación cinética que permite describir todo el proceso de secado incluyendo ambos períodos, donde todos los parámetros de la ecuación se pueden determinar fácilmente a partir de la curva de secado y las condiciones límites ^[16].

1.7 Mecanismos y cinética de secado. Transferencia de masa y calor

Un elemento fundamental en el proceso de secado es el estudio de la intensidad de la transferencia de masa en el mismo. Para esto es necesario conocer los elementos más útiles de la transferencia de calor y masa que funcionen en los secaderos de contacto directo. Según Madariaga (1995), esta depende de una serie de factores que van desde condiciones internas a externas ^[3,10].

1.7.1 Condiciones externas

Están definidas por la resistencia a la transferencia de calor y de masa de la capa límite del gas, y en el caso que predominen, el secado no dependerá de las características del sólido sino de las condiciones del gas, y estará controlado por la transferencia de masa y calor entre el gas y la superficie del sólido, empleándose en la evaporación todo el calor que se recibe del gas, la cual se comporta como una superficie libre de agua.

1.7.2 Condiciones internas

Están definidas, por la transferencia de calor y de masa a través del sólido. En el caso que predominen, es decir, que la resistencia a la transferencia de masa a través del material sea muy superior a la de la capa límite del gas, la difusión

interna controlará el proceso y lo más importante será las propiedades del sólido.

Cuando se seca un sólido se producen dos procesos fundamentales y simultáneos:

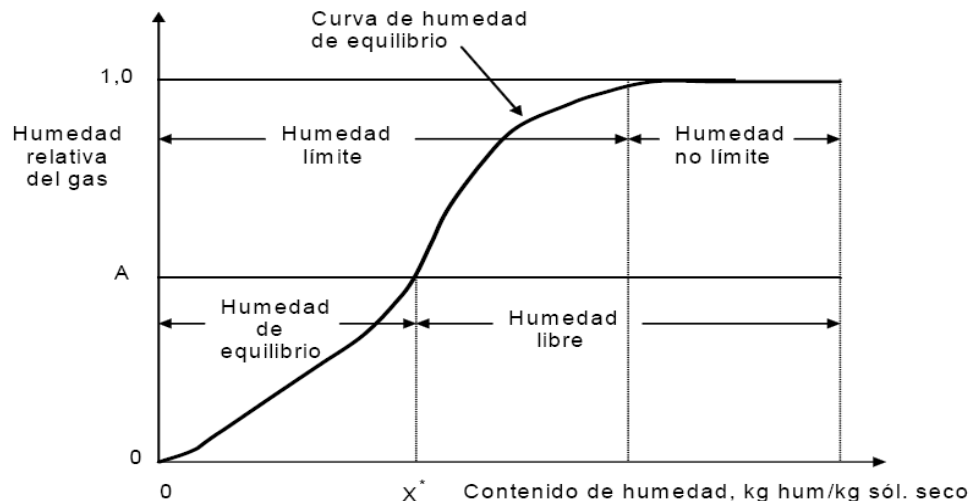
- Transmisión del calor para evaporar el líquido.
- Transferencia de masa en humedad interna y líquido evaporado.

Independientemente del mecanismo de transmisión de calor el cual puede ser por conducción, convección, radiación o una combinación de cualquiera de estos, el calor tiene que pasar primero a la superficie exterior y desde esta al interior del sólido. Excepto el secado por electricidad de alta frecuencia, que genera el calor intercambiante, esto conduce a la circulación de calor desde el interior hasta la superficie exterior ^[10]. También se ha reportado otro tipo de secado llamado secado por sublimación.

1.8 Clasificación de la operación de secado

De modo general se pueden clasificar las operaciones de secado en continuas y discontinuas. En las operaciones continuas pasan continuamente a través del equipo tanto la sustancia a secar como el gas. La operación discontinua en la práctica se refiere generalmente a un proceso semicontinuo, en el que se expone una cierta cantidad de sustancia a secar a una corriente de gas que fluye continuamente en la que se evapora la humedad ^[2,7].

Figura 2. Comportamiento de la Humedad en el proceso



1.9 Factores que afectan el tiempo de deshidratación

Existen varios parámetros los cuales afectan el procesos de deshidratación de un producto determinado, a continuación se mencionaran los de mas importancia. Los equipos utilizados para secar se pueden clasificar también de acuerdo a cualquiera de estas categorías ^[12]:

1. Métodos de operación: Continuos ó Discontinuos.
2. Métodos de propiciar el calor necesario para la evaporación de la humedad: En secaderos directos e indirectos.
3. Naturaleza de la sustancia a secar: Puede ser la sustancia un sólido rígido como la madera, un material flexible como el papel o la tela, un sólido granular tal como la masa de cristales, una pasta espesa o delgada o una solución. Es probable que la forma física de la sustancia y los distintos métodos de manipulación empleados, ejerzan la influencia más grande en el tipo de secadero a utilizar.

1.9.1 Velocidad del aire

Como ya se explicó anteriormente, la velocidad del aire influye en la resistencia que encuentra el vapor de agua del alimento para difundirse al medio ambiente, determinando el tiempo de secado. Ensayos realizados por Pistono (1955) demuestran que al aumentar la velocidad del aire desde 1,25 m/s a 5 m/s el tiempo de secado en zanahorias disminuye de 318 min a 192 min ^[14].

1.9.2 Tipo de vegetal

Los alimentos presentan diferentes texturas y constituciones por lo cual cada alimento debe presentar un diferente tipo de secado, especialmente en los vegetales y frutas ^[14].

1.9.3 Carga de bandejas

Cuanto mayor sea la carga de las bandejas, mayor sería la duración en el tiempo de secado. Ensayos realizados por Pistono (1955) muestran que al disminuir la carga de las bandejas con zanahorias, de 9 kg/m² a 3,5 kg/m² los tiempos de secado disminuyen de 660 min a 480 min ^[14].

En la industria nacional, dependiendo de las exigencias del mercado se usan cargas de bandeja, del orden de 5 a 8 kg /m², con velocidades de aire de 5 m/s, en rebanadas de 5 a 6 m.m, lo que resulta en un tiempo de secado del orden de 350 a 400 minutos ^[14].

1.9.4 Espesor y forma

En general, mientras mayor sea la superficie expuesta al aire caliente más rápida será la desecación del vegetal, por lo tanto mientras más pequeño, más rápido se desecará. De acuerdo a resultados experimentales hechos por Pistono (1955), los tiempos de secado disminuyeron de 570 min en rebanadas de zanahorias de 12 mm, a 195 min en rebanadas de 3 mm de espesor. Si la forma se cambiaba a cubos, el tiempo de secado disminuía de 300 min cuando éstos tenían 12 mm de espesor, a 210 min si el espesor del cubo era de 9 mm. Se ha hecho mención sólo de los factores más relevantes, dejando de lado factores como temperatura, humedad relativa, composición del alimento y madurez, entre otros ^[14].

La deshidratación del alimento se obtiene extrayendo gran parte de su agua de constitución bajo condiciones controladas de temperatura, humedad y velocidad del aire; por lo tanto, los equipos actualmente existentes buscan combinar estas variables en la forma más eficiente para lograr una rápida extracción del agua del alimento, existiendo una serie de sistemas que utilizan la exposición del producto a corrientes de aire forzado, lo cual implica largos tiempos de proceso, ya que es necesario primero establecer un gradiente de presiones y un cambio de fase del agua para ser retirada del producto.

El proceso, anteriormente explicado, significa costos y pérdida de calidad organoléptica del producto, en especial de color y sabor, debido a que se favorecen una serie de reacciones bioquímicas, especialmente reacciones de pardeamiento enzimático y no enzimático, dependiendo de la constitución del alimento. Por lo tanto, un proceso de deshidratación de alimentos requiere que la eliminación de agua sea lo más rápida y eficiente posible ^[6].

1.10 Efecto de la deshidratación

1.10.1 Textura

La textura de los alimentos es la característica de calidad que presenta mayor modificación con la desecación. Sus variaciones dependen mucho de el tipo de pre-tratamiento que se le da al alimento (adición de cloruro calcio, azúcares,

cloruro de sodio al agua de escaldado), el tamaño de partícula y la forma como se realiza la reducción de tamaño y el modo de pelado. En alimentos escaldados las pérdidas de textura están provocadas por la gelatinización del almidón, la cristalización de la celulosa y por tensiones internas provocadas por variaciones localizadas en el contenido en agua durante la deshidratación. Estas tensiones dan lugar a roturas y compresiones que provocan distorsiones permanentes en las células, relativamente rígidas, confiriendo al alimento un aspecto arrugado. Por ejemplo en la carne, durante el tratamiento se producirá agregación y desnaturalización de las proteínas, que pierden su capacidad de retención de agua, lo que provoca un endurecimiento del tejido muscular.

La variación en la textura depende también de las condiciones del desecador, por ejemplo, si se usan velocidades de deshidratación rápidas y temperaturas elevadas los cambios serán mas pronunciados que con flujos y temperaturas mas bajas. A medida que el agua va eliminándose, los solutos se desplazan hacia la superficie del alimento. Si las temperaturas son elevadas la evaporación del agua hace que la concentración de solutos en la superficie aumente lo que conduce a la formación de una capa superficial dura e impenetrable. Este fenómeno se llama acortezamiento y reduce la velocidad de deshidratación dando lugar a un alimento seco en su superficie pero húmedo en su interior ^[14].

1.10.2 Aroma

El calor no sólo provoca el paso del agua a vapor durante la deshidratación, sino también la pérdida de algunos componentes volátiles del alimento. Su mayor o menor pérdida dependerá de la temperatura, de la concentración de sólidos en el alimento y de la presión de vapor de las sustancias volátiles y su solubilidad en el vapor de agua. Por ello, alimentos especiales por sus características aromáticas (hierbas y especias) se deshidratan a temperaturas bajas ^[14].

La deshidratación produce también la oxidación de los pigmentos, vitaminas y lípidos durante el almacenamiento. Estas oxidaciones se producen por la presencia de oxígeno, como consecuencia de la estructura porosa que se desarrolla durante la deshidratación. La velocidad a la que estos componentes se deterioran depende de la actividad de agua en el alimento y de la temperatura de almacenamiento. Las reacciones oxidativas influyen en la producción o destrucción de compuestos aromáticos ^[14].

1.10.3 Color

La deshidratación afecta de igual modo al color, debido a los cambios químicos que se producen en las clorofilas, carotenoides y otros pigmentos como antocianinas, betalainas etc. Por lo general cuanto más largo es el proceso de deshidratación y mas elevada la temperatura, mayores son las pérdidas en estos pigmentos. La oxidación y la actividad enzimática residual favorecen el desarrollo del pardeamiento durante su almacenamiento. Ello puede evitarse usando el escaldado como tratamiento previo a la desecación o tratando la fruta con ácido ascórbico u otros compuestos con actividad antioxidante y fijadores de pigmentos [14].

1.10.4 Valor nutritivo

Las pérdidas de valor nutritivo que se producen durante la preparación previa de frutas y verduras son generalmente mayores que las que ocasiona el propio proceso de deshidratación. La pérdida de vitaminas viene en función de su solubilidad en agua. A medida que el proceso de deshidratación avanza algunas (por ejemplo: la riboflavina) alcanzan su sobresaturación y se precipitan. Las pérdidas, por tanto, son pequeñas. Otras, (por ejemplo: el ácido ascórbico) se mantienen disueltas hasta que el contenido en agua del alimento es muy bajo y reaccionan con los solutos a mayor velocidad a medida que el proceso progresa. La vitamina C es también sensible al calor y la oxidación. Por ello, los tiempos de deshidratación deben ser cortos. Otras vitaminas liposolubles son más estables (a la oxidación y al calor) por lo que sus pérdidas rara vez son superiores al 5 – 10%. Los nutrientes liposolubles se encuentran, en su mayor parte, en la materia seca del alimento, por lo que durante la deshidratación no experimentan concentración alguna.

Los metales pesados, sin embargo, actúan como catalizadores de reacciones de oxidación de nutrientes insaturados, están disueltos en la fase acuosa del alimento. A medida que el agua se elimina, su reactividad aumenta y las reacciones de oxidación (de lípidos esenciales también) se aceleran.

La deshidratación no cambia sustancialmente el valor biológico y la digestibilidad de las proteínas de la mayor parte de los alimentos [6].

1.11 Tipos de secadores

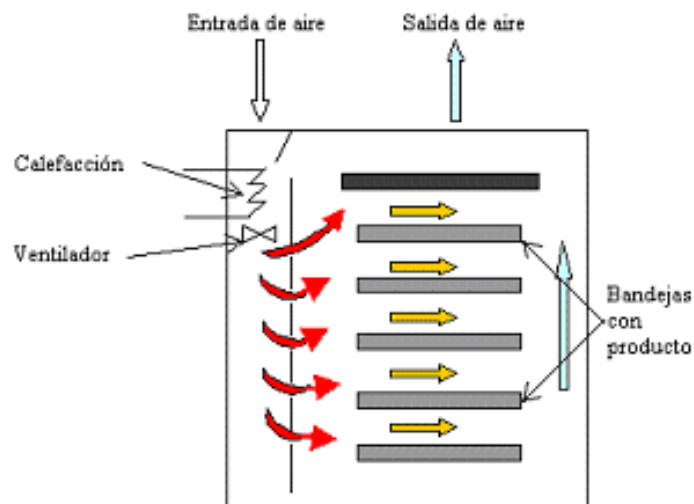
Algunos tipos de secadores:

- Secador de Bandeja.
- Secador de Túnel.
- Secador de Tambor o Rodillo.
- Secador de Tolva.
- Secador de Cinta.
- Secador de Vacío.
- Secador de Liofilizador.
- Secador de lecho Fluidizado.
- Secador Neumático.

1.11.1 Secador de bandeja

El producto alimenticio se extiende sobre bandejas en las que tiene lugar la desecación. La calefacción se puede llevar a cabo mediante una corriente de aire que pasa sobre la bandeja, por conducción en bandejas calefactores, por soportes calentados o por radiación desde superficies calientes. La mayoría de los secadores de bandejas están calentados con aire que a la vez extrae el vapor, (véase figura N°3) [5].

Figura 3. Secador de bandejas



1.11.2 Secadores de túnel

Se puede considerar como una variación de los secadores de bandeja, en los que las bandejas pasan a través de un túnel donde se les aplica el calor y se les extrae el vapor. En la mayoría de los casos se utiliza aire en el túnel de secado y los productos se mueven bien de forma paralela o bien en contracorriente al flujo del aire ^[5].

1.11.3 Secadores de rodillo o de tambor

En estos secadores el producto alimenticio se esparce sobre una superficie o tambor calentado que gira, situando el producto sobre el tambor en el inicio de un ciclo de giro. El alimento permanece en la superficie del tambor durante la mayor parte de la rotación, durante el tiempo suficiente para que tenga lugar el secado y después se raspa. En este caso el secado puede considerarse como un secado por conducción ^[5].

1.11.4 Secadores de tolva

En estos secadores las sustancias se colocan en una tolva con el fondo perforado, a través del cual se hace pasar aire verticalmente hacia arriba, de forma que pase a través del producto y lo seque ^[5].

1.11.5 Secadores de cinta

El producto se extiende sobre una cinta con o sin perforaciones y se hace pasar aire sobre o a través del mismo. La mayoría de los casos la cinta es móvil, aunque en algunos diseños la cinta es fija y el producto se desplaza por medios de rastrillos ^[5].

1.11.6 Secadores por vacío

Son prácticamente iguales a los secadores de bandejas excepto que funcionan a vacío y el calor se transmite por conducción o radiación. En general el vapor de agua producido se condensa a la salida, ya que las bombas de vacío deben manejar solo gases no condensables ^[5].

1.11.7 Secadores liofilizadores

El producto está situado en soportes horizontales en un acámara que está en un vacío elevado. En la mayoría de los casos se congela el producto antes de introducirlo al secador. El calor se transmite por conducción o por radiación y el vapor se extrae por medio de una bomba de vacío y este se sublima ^[5].

1.11.8 Secadores de lecho fluidizado

En este secador el producto alimenticio se mantiene en suspensión contra la fuerza de la gravedad por medio de una corriente de aire que fluye verticalmente a la parte superior del secador. Puede haber una corriente de aire horizontal para mover el producto a través del secadero. El calor se transmite desde el aire al producto sobre todo por convección ^[5].

1.11.9 Secadores neumáticos

En este secador el producto alimenticio es transportado a gran velocidad por medio de una corriente de aire, cuya velocidad y turbulencia mantiene las partículas en suspensión. Este aire caliente produce la desecación frecuentemente el equipo influye un dispositivo de clasificación que separa los materiales secos, que se extraen como producto del material húmedo remanente el cual se recicla para ser sometido a un nuevo proceso de secado ^[5].

2 SENSORES PROCESADOR Y ACTUADOR

En este capítulo se hará referencia a los distintos sensores y actuadores utilizados para el desarrollo de este trabajo.

2.1 Termocuplas

Desde el punto de vista dinámico, un termopar se comporta como un instrumento de primer orden, cuyo modelo matemático está descrito por la ecuación diferencial

$$\tau \frac{de(t)}{dt} + e(t) = k_e T(t) \quad (2.1)$$

Donde:

$e(t)$: Voltaje, mV

$T(t)$: Temperatura a medir, °C

τ : Constante de tiempo, s

k_e : Sensibilidad estática, mV/°C

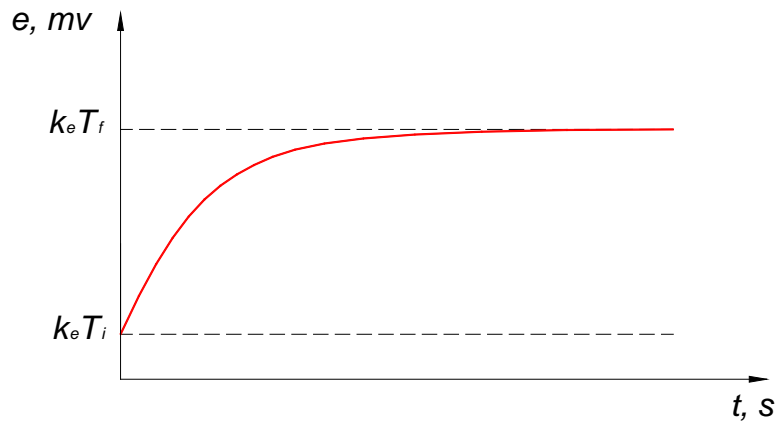
Una vez que se ha obtenido la ecuación diferencial que relaciona la entrada y la salida de un termopar, puede estudiarse su funcionamiento tomando la entrada (temperatura que se va a medir) como una función conocida del tiempo y luego resolviendo la ecuación diferencial para la salida (voltaje) como función del tiempo. Si la salida es aproximadamente proporcional a la entrada todo el tiempo, la exactitud dinámica es buena. La dificultad fundamental en este procedimiento radica en el hecho de que, en la práctica real, la temperatura que se va a medir no sigue comúnmente una función matemática sencilla, sino que es de naturaleza aleatoria. Sin embargo, por fortuna, puede aprenderse mucho respecto al comportamiento del termopar examinando la respuesta a ciertas funciones de entrada “estándar” relativamente sencillas. Es decir, no es posible analizar el sistema real, sino más bien un modelo idealizado del mismo, de manera que no se puede trabajar con la entrada de temperatura real, sino con una representación simplificada de la misma ^[13].

2.2 Respuesta escalón

La respuesta teórica de un termopar ante una entrada escalón que parte de una temperatura inicial T_i hasta una temperatura final T_f , está dada por la ecuación

$$e(t) = k_e T_f + k_e (T_i - T_f) e^{-\frac{t}{\tau}}, \text{ mV} \quad (2.2)$$

Figura 4. Respuesta escalón de un termopar



El valor medido de la temperatura entregado por un termopar es

$$T_{tc}(t) = \frac{e(t)}{k_e} = T_f + (T_i - T_f) e^{-\frac{t}{\tau}}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.3)$$

Examinando la ecuación (2.3) se ve que la velocidad de respuesta depende solamente del valor de τ y es más rápida si τ es más pequeña. Así, en esta clase de transductores se lucha por disminuir τ a fin de obtener lecturas más justas. Para un termopar, la constante de tiempo se puede expresar como

$$\tau = \frac{mC}{AU}, \text{ s} \quad (2.4)$$

Donde:

m: Masa de la unión medidora, kg

C: Calor específico del material de la unión medidora, J/kg·°C

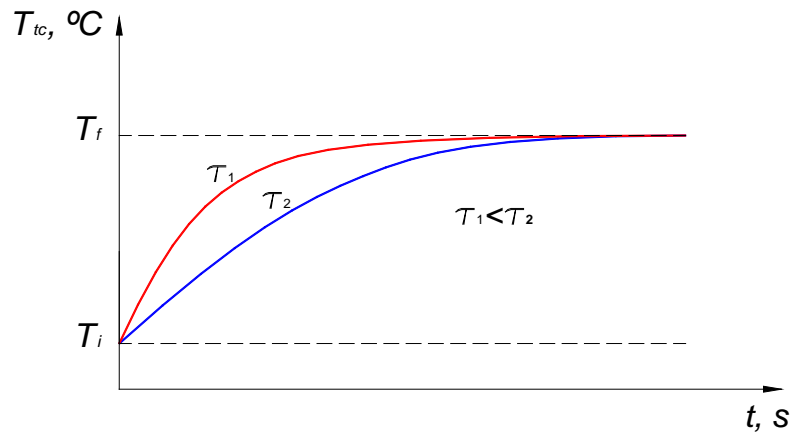
A: Superficie de la unión medidora, m²

U: Coeficiente global de transferencia de calor, W/m²·°C.

Como C es una propiedad del material, este no puede variarse independientemente, la masa depende del tamaño de la unión medidora, por tanto influye en la velocidad de respuesta del termopar ya que a pesar de que aumenta el área de transferencia de calor, la constante de tiempo aumenta.

El hecho de que τ dependa de U significa que un termopar no tiene una determinada constante de tiempo, sino que este empleado en un medio determinado bajo ciertas condiciones de transmisión de calor, tiene una cierta constante de tiempo [4,11,13,].

Figura 5. Respuesta escalón de un termopar bajo diferentes condiciones de uso.



Bajo condiciones estáticas, se puede establecer para un termopar

$$e = k_e T_{aire} + b, \text{ mV} \quad (2.5)$$

Solo entre el rango de (0 – 100 °C), rango efectivo para esta aplicación.

Donde:

e: Voltaje, mV

T_{aire} : Temperatura del aire.

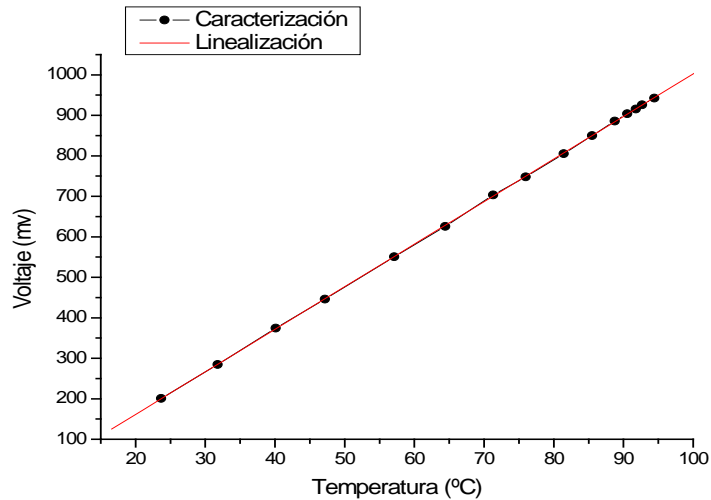
b: Deriva del cero, mV.

k_e : Calibración estática del Instrumento mV/°C.

Por tanto, el valor medido entregado por el termopar es

$$T_{tc} = T_{aire} = \frac{e - b}{k_e} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.6)$$

Figura 6. Caracterización termocupla tipo j compensada



Los valores encontrados fueron:

Ke: 10,313 mV/°C;

b: -29.250 mV.

Estos valores fueron obtenidos bajo la compensación hecha por el amplificador de instrumentación de Analog Device (AD594) para termocuplas tipo **J**.

La etapa de compensación genera una variación de 10 mV/°C, se hace necesario tratar la señal para convertirla de señal eléctrica a variable física real Dado que:

$$e_o = A_o e + A_o e_{off} \quad (2.7)$$

Donde:

e: Voltaje de salida del compensador, mV.

Ao: Factor de Ganancia vía software, 5000 mV/mV.

e_o: Voltaje manipulado, mV.

e_{off}: Voltaje de offset, mV.

Despejando **e** de la ecuación (2.7) y reemplazando en la ecuación (2.5) se puede deducir el valor medido entregado por el termopar, como.

$$T_{tc} = \frac{1}{k_e} \left(\frac{1000 * e_o}{A_o} - b \right) - \frac{e_{off}}{k_e} \quad (2.8)$$

Donde:

T_{tc} : Valor de Temperatura del sistema °C.

La ecuación (2.8) fue finalmente implementada por medio de un programa, desarrollado en LabVIEW™ de National Instruments™ y en un microcontrolador 18f452 de Microchip, para monitoreo (Temperatura y Humedad Relativa) y control de la variable Física (Temperatura).

2.3 Modelo de la planta

Teniendo en cuenta que el sistema se encuentra aislado térmicamente, es decir; no existe almacenamiento de calor en el aislamiento, y que además el aire está perfectamente mezclado (agitado) de modo que la temperatura sea uniforme, se define un solo medidor de temperatura.

θ_i = Temperatura en estado estacionario del fluido que entra en °C.

θ_o = Temperatura en estado estacionario del fluido que sale en °C.

G = Gasto de fluido en estado estacionario en Kg/s.

M = Masa de fluido en el tanque en Kg.

C = Calor específico del fluido en Kca/Kg°C.

R = Resistencia térmica en °Cs/Kca.

C = Capacitancia térmica Kcal/°C.

H = Flujo de calor de entrada en estado estacionario en Kca/s.

h = Cambio en el flujo de calor Kca/s.

Sí se supone que el fluido que entra mantiene una temperatura constante e instantáneamente cambia de temperatura desde H a H + h_i, en donde h_i = pequeña variación en el flujo de calor de entrada, el flujo de calor saliente varía entonces gradualmente de H a H + h_o y la temperatura del fluido que sale también

habrá cambiado de θ a $\theta_o + \theta$, se obtiene que:

$$h_o = GC\theta \quad (2.9)$$

$$C = Mc \quad (2.10)$$

Además **R** la resistencia térmica para la transferencia de calor entre sustancias se define como:

R = cambio en la diferencia de temperatura °C/ cambio en el flujo de calor en Kca/s.

$$R = \frac{\theta}{h_o} = \frac{1}{GC} \quad (2.11)$$

Si el coeficiente de convección térmica se mantiene constante la resistencia térmica para la convección es constante entonces la capacitancia térmica se define **C** se define mediante la siguiente expresión.

C = Cambio en el Calor almacenado Kcal / Cambio en la Temperatura °C.

La ecuación de balance de calor en el sistema térmico será:

$$Cd\theta = qdt \quad (2.12)$$

Si se define Δh como la variación total de pequeñas variaciones entre el flujo de entrada y el flujo de salida, la ecuación se reescribe de la siguiente forma:

$$Cd\theta = (\Delta h)dt \quad (2.13)$$

Donde:

$$\Delta h = (h_i - h_o)$$

Si $h_i = Gc\theta_i$, reemplazando estas expresiones en la ecuación de balance de calor del sistema (ecuación 2.11) la ecuación obtenida será:

$$Cd\theta = (Gc\theta_i - h_o)dt \quad (2.14)$$

Experimentalmente la temperatura del fluido que ingresa varía bruscamente de θ_i a $\theta_i + \theta_i^l$; θ_i^l = variación en la temperatura con respecto a la entrada, mientras que el flujo de calor de entrada (**H**) y el gasto o el consumo de fluido (**G**) se mantienen constantes, entonces el flujo de calor de salida se modifica desde **H** a

$H + h_o$ y la temperatura del gasto de salida cambiara de θ_o a $\theta_o + \theta_o'$.

La ecuación diferencial para este caso queda:

$$C \frac{d\theta}{dt} = Gc\theta_i - h_o \quad (2.15)$$

Si $Rh_o = \theta_o$ y $RGc = 1$; $R = \frac{1}{Gc}$ y multiplicando por R la ecuación diferencial queda.

$$RC \frac{d\theta_o}{dt} + \theta_o = \theta_i \quad (2.16)$$

Aplicando transformada de la place a la ecuación 2.15 la función de transferencia que relaciona θ_o con θ_i esta dada por:

$$RCs\theta_o(s) + \theta_o(s) = \theta_i(s) \quad (2.17)$$

$$\theta_o(s)[RCs + 1] = \theta_i(s) \quad (2.18)$$

Operando algebraicamente

$$\frac{\theta_o(s)}{\theta_i(s)} = \frac{1}{RCs + 1} \quad (2.19)$$

Donde

$$RC = \tau$$

Por tanto

$$\frac{\theta_0(s)}{\theta_i(s)} = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (2.20)$$

Denominada la ecuación de transferencia del sistema

Si resolvemos la ecuación para una entrada escalón donde θ_i es constante

entonces $\theta_i(s) = \frac{\theta_i}{s}$ tenemos:

$$\theta_0(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \theta_i(s) \quad (2.21)$$

$$\theta_0(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \frac{\theta_i}{s} \quad (2.22)$$

$$\theta_0(s) = \frac{1}{s(\tau s + 1)} \theta_i \quad (2.23)$$

Resolviendo en fracciones simples

$$\frac{1}{s(\tau s + 1)} = \frac{A}{s} + \frac{B}{\tau s + 1} \quad (2.24)$$

$$A = \left[s \frac{1}{s(\tau s + 1)} \right]_{s=0} = A = 1 \quad (2.25)$$

$$B = \left[(\tau s + 1) \frac{1}{s(\tau s + 1)} \right]_{s = -\frac{1}{\tau}} = B = -\tau \quad (2.26)$$

Reemplazando en la ecuación 2.23

$$\theta_0(s) = \left[\frac{1}{s} + \left(\frac{-\tau}{\tau s + 1} \right) \right] \theta_i(s) \quad (2.27)$$

$$\theta_0(s) = \left[\frac{1}{s} - \left(\frac{\tau}{s + \left(\frac{1}{\tau} \right)} \right) \right] \theta_i(s) \quad (2.28)$$

Aplicando transformada inversa de laplace a la última ecuación (ecuación 2.28) se obtiene.

$$\theta_0(t) = \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \theta_i(t) \quad (2.29)$$

Respuesta escalón a un sistema de primer orden

$$1 - \frac{\theta_0(t)}{\theta_i(t)} = e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2.30)$$

Aplicando logaritmo natural a la ecuación 2.30

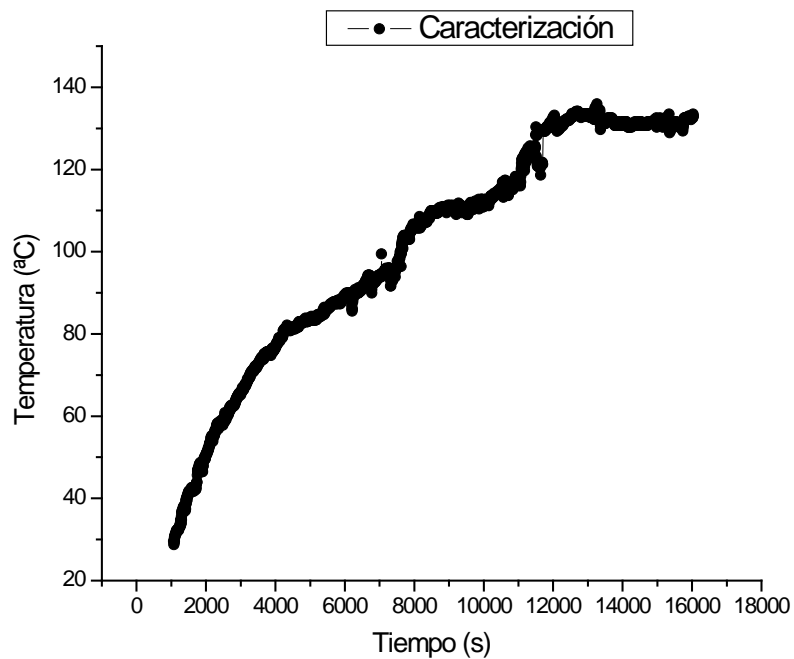
$$\text{Ln} \left[1 - \frac{\theta_0(t)}{\theta_i(t)} \right] = -\frac{t}{\tau} \quad (2.31)$$

Despejando tau de la ecuación 2.31

$$\tau = -\frac{t}{\text{Ln} \left[1 - \frac{\theta_0(t)}{\theta_i(t)} \right]} \quad (2.32)$$

Equivalente al 63% de estabilización de la planta ^[13].

Figura 7. Caracterización de la Planta



2.4 Acondicionamiento de la señal para termocuplas

Generalmente para el acondicionamiento de señal (amplificación, ajuste de offset y calibración) se realiza mediante electrónica análoga (amplificadores operacionales), lo que implica un gran montaje hardware con alto grado de complejidad, susceptible al ruido y con un bajo porcentaje de confiabilidad, por

esta razón se utilizó el AD594 de ANALOG DEVICE el cual realiza la etapa de acondicionamiento de señal eliminando los inconvenientes que presenta el diseño hardware anteriormente descrito.

2.4.1 Ad594

El AD594 es completamente un amplificador de instrumentación y un compensador de junta dentro de un chip. Este combina un punto de referencia frío con un amplificación precalibrado que produce un nivel alto de $(10 \text{ mV}/^\circ\text{C})$ siendo esta la señal de salida de la Termocupla.

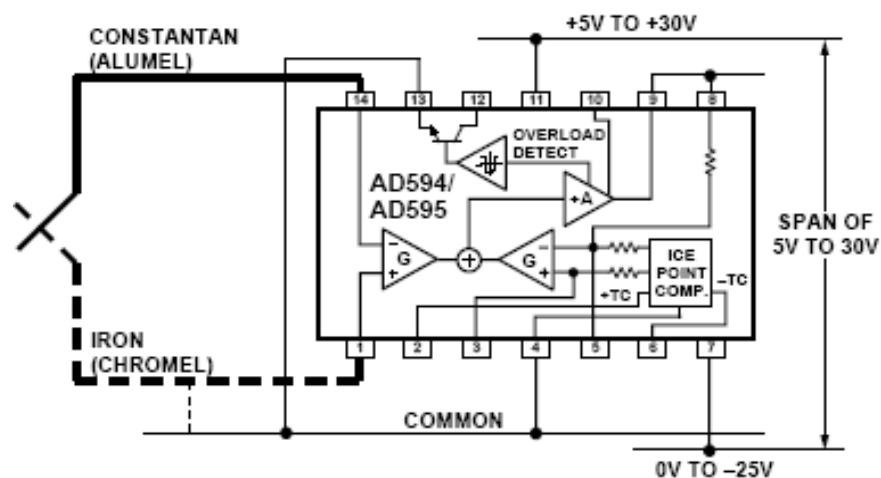
La salida normal de este tipo de Termocuplas (J) en 25°C (Condiciones de laboratorio) es $\text{TC} = 51.70 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Por tanto el valor de la ganancia para el AD594 es de 193.4 ($10 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ dividido por $51.70 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$), por otra parte existe un voltaje de inducción (offset) por el amplificador ($16 \mu\text{V}$), teniendo en cuenta estos parámetros es posible determinar una función de transferencia la cual permita determinar el voltaje de salida en cualquier instante.

$$\text{AD594 salida} = (\text{Tipo J Voltaje} + 16 \mu\text{V}) \times 193.4 \quad (2.33)$$

Tipo J Voltaje: Voltaje de Termocupla sin compensación.

Diagrama de conexión.

Figura 8. Esquema interno del acondicionador de Termocuplas tipo J



2.5 Sensor de humedad

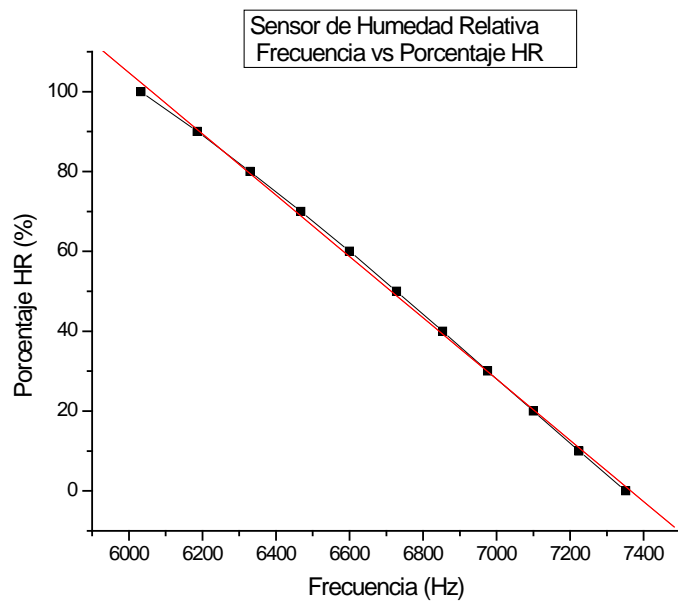
Es una célula de tipo capacitiva, estos sensores de humedad relativa están diseñados para grandes volúmenes y aplicaciones donde sea necesario la compensación de humedad, en la siguiente figura se muestra la forma del sensor (véase figura 9).

Figura 9. Sensor de Humedad Relativa



Gracias a su comportamiento y a las características dadas por el manual del fabricante es posible observar su comportamiento frente a la entrada de humedad relativa (ver figura 10).

Figura 10. Curva de respuesta del sensor de humedad relativa



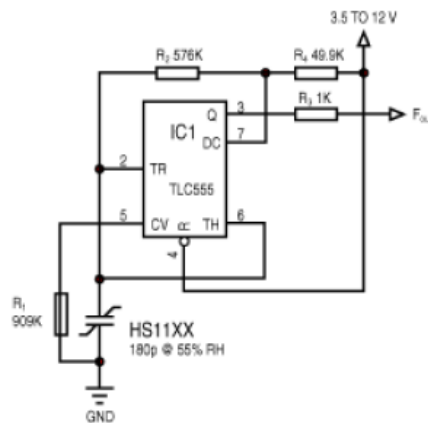
Donde:

$m =$ Pendiente (-0.07672).

$b =$ Punto de Corte (565.09667).

El circuito utilizado más común es un multivibrador astable diseñado por un LM 555 donde este sensor se utiliza como condensador variable proporcionado a la salida del circuito una variación de frecuencia (véase figura 11).

Figura 11. Conexión Típica, Modo astable



2.6 Sistema de control y adquisición de datos

2.6.1 Controladores automáticos

Un controlador automático compara el valor real de la salida de una planta con la entrada de referencia (valor deseado), determina la desviación y produce una señal de control que reduce la desviación a cero o a un valor pequeño. La manera en la cual el controlador automático produce la señal de control se denomina acción de control. La figura 12 es un diagrama de bloques de un sistema de control industrial que consiste en un controlador automático, con un actuador, una planta y un sensor (elemento de medición). El controlador detecta la señal de error, que por lo general, está en un nivel de potencia muy bajo, y la amplifica a un nivel lo suficientemente alto. La salida de un controlador automático se alimenta a un actuador, como un motor o una válvula neumática o hidráulica etc. (El actuador es un dispositivo de potencia que produce la entrada para la planta de acuerdo con la señal de control, a fin de que la señal se aproxime a la señal de entrada de referencia).

El sensor, o elemento de medición, es un dispositivo que convierte la variable de salida en otra variable manejable, como un desplazamiento, una presión o un voltaje, que pueda ser usado para comparar la salida con la señal de entrada de referencia. Este elemento esta en la trayectoria de la realimentación del sistema de lazo cerrado. El punto de ajuste del controlador debe convertirse en una entrada de referencia con las mismas unidades que la señal de realimentación del sensor o del elemento de medición [16].

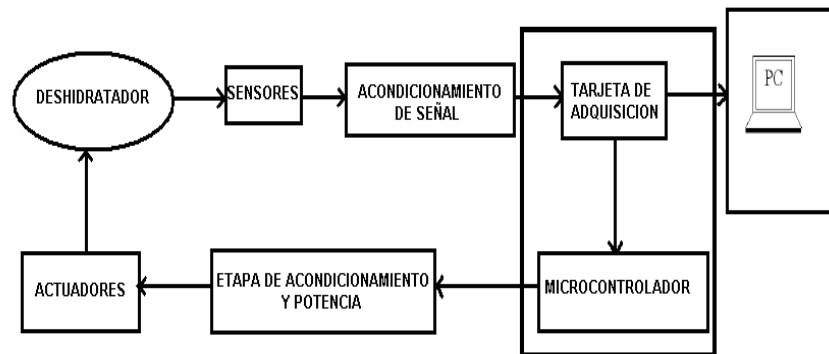
2.6.2 Adquisición de datos

Son múltiples las ventajas que conllevan el conocimiento preciso e inmediato acerca de las tareas involucradas en el desarrollo de un proceso industrial en donde el sistema debe operar dentro de ciertos límites preestablecidos de tal forma que las variables puedan ser monitoreadas y controladas cumpliendo con los requisitos impuestos de diseño y ajustados a parámetros propios de operación según normas estipuladas de producción.

Por esta razón estas interfaces ofrecen un manejo adecuado y seguro del flujo de información tanto como para la lectura de datos como también para el control de los actuadores dispuestos en el diseño, a parte de poseer la compatibilidad con sistemas eléctricos y la capacidad de conexión entre sistemas computacionales.

La figura 12, indica el desarrollo completo de un sistema automático para el control y lectura de las variables físicas del deshidratador en cuestión.

Figura 12. Diagrama de Bloques de controlador Automático.



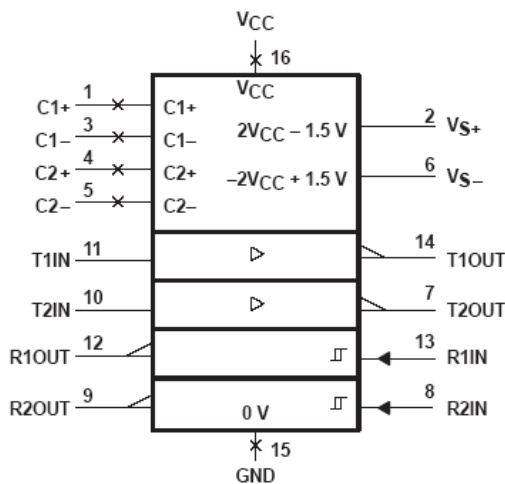
2.6.3 Envío de información

El envío de niveles lógicos (bits) a través de cables o líneas de transmisión necesitan la conversión a voltajes apropiados. En un circuito lógico o en un microprocesador se trabaja con niveles de voltaje inferiores a 0.8 para representar el valor lógico 0 y voltajes mayores a 2 para representar un 1 lógico. Por lo general cuando se trabaja con familias TTL y CMOS se asume que un "0" es igual a cero voltios y un "1" a +5 voltios.

Cuando la comunicación que se pretende hacer es muy corta, se puede conectar directamente el transmisor y el receptor para hacer la transmisión de datos a los mismos niveles lógicos, pero cuando existe una distancia mayor de dos metros se hace necesario utilizar dispositivos que permitan la no atenuación de la señal debido al ancho de banda de la misma y la velocidad de transmisión, básicamente consiste en cambiar los niveles lógicos de envío (0 y 5V) a dos niveles de voltaje magnitud mayor, uno positivo (+V) para representar el cero lógico y uno negativo (-V) para representar el uno. En el equipo receptor de la información se hace lo contrario, los niveles positivos y negativos que lleguen se convierten a los niveles lógicos tradicionales de 0 a 5V. Los de voltaje son simétricos con respecto a la tierra y son al menos +3V para el "0" binario y -3V para el 1.

Como la mayoría de las aplicaciones del RS 232 necesita de un receptor y un emisor, el MAX 232 incluye en un solo empaque dos parejas completas de driver y receiver, como lo indica la estructura interna del integrado que se muestra en la figura 13.

Figura 13. Diagrama de Pines del Max 232.



El diagrama esquemático correspondiente a esta etapa se encuentra en el anexo A.

2.6.4 Pic18f452

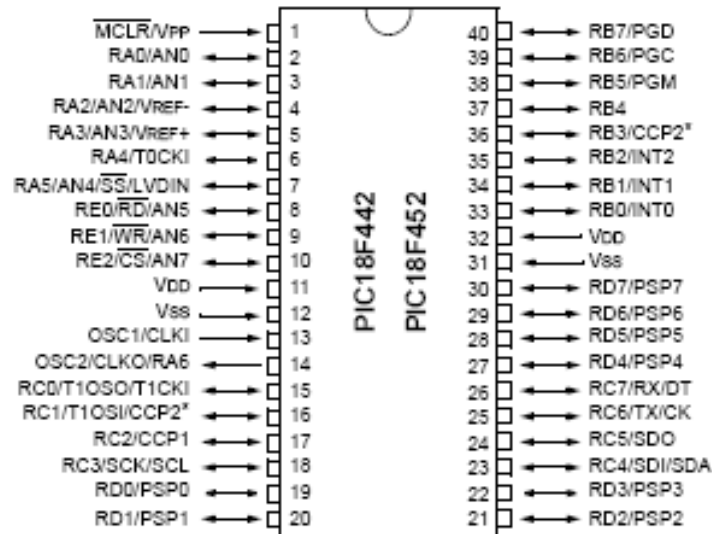
Este dispositivo fue utilizado para el desarrollo de esta aplicación debido al fácil manejo y a los componentes que este posee, dos módulos importantes de este dispositivo son los 8 canales de conversión A/D (10 bits de resolución) y el protocolo de comunicación RS 232 que permite el envío de datos hacia un PC para el debido monitoreo de las dos variables físicas (Humedad y Temperatura). Por otra parte permite la utilización de sus periféricos para las tareas de control visualización y entrada de set-point. Las principales características de este microcontrolador de la familia de Microchip son.

- Arquitectura RISC (Reduced Instruction Set Computer).
- Juego de instrucciones reducido para ejecución rápida.
- Oscilador hasta 40 MHz – 10 MIPs (Million Instructions Per second).
- Optimizado para compilación desde lenguaje C.
- Micro de 8 bits.
- Arquitectura de memoria Harvard:
- Memoria interna de programa FLASH de 32 Kb
- Memoria interna RAM de 1536 bytes
- Memoria interna EEPROM de 256 bytes
- Contador de programa de 21 bits – hasta 2 Mb de memoria de programa
- Direccionamiento de 12 bits en memoria de datos – 4Kb

Periféricos integrados:

- Temporizadores, contadores, comparadores, unidades de captura.
- Modulación en ancho de pulso PWM (Pulse Width Modulation).
- Interrupciones internas y externas.
- Canal serie USART
- Canal serie SPI (Serial Peripheral Interface)
- Canal serie I2C (Inter-Integrated Circuit)
- Puerto paralelo esclavo PSP (Parallel Slave Port)
- Conversión A/D de 10 bits
- Perro guardián WDT (Watchdog Timer).

Figura 14. Diagrama de pines del pic 18f 452



El diagrama esquemático de conexión se encuentra en el anexo A

2.6.5 Temporizador del proceso

Es el encargado de regular las operaciones sobre una base de tiempo, interrumpiendo el proceso al cumplirse el tiempo estipulado por el usuario.

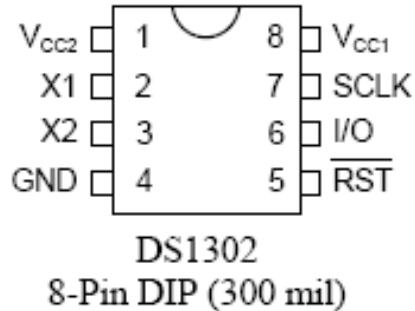
- **DS1302**

Es un circuito integrado de Dallas Semiconductor el cual posee un contador en tiempo real utilizado como modulo de temporización en el sistema de control.

El cual fue configurado mediante software para el conteo de horas, minutos y segundos.

El DS1302 es conectado a unos pines descritos al microcontrolador designados el programa configura a este dispositivo generando una secuencia lógica para la lectura y escritura en el dispositivo, con el objetivo de generar un tiempo de control mediante el ingreso de un intervalo de operación en un proceso determinado. El diagrama de conexión es expuesto en el anexo A.

Figura 15. Diagrama de pines del ds 1302



2.6.6 Otros dispositivos

El sistema acoplado cuenta con un tablero matricial permitiendo ingresar el valor de temperatura requerido por el usuario a demás del tiempo de operación por el cual el sistema estará en funcionamiento, por otra parte también posee una pantalla de cristal liquido la cual permite visualizar el valor de temperatura y el porcentaje de humedad que se encuentra en el sistema, las conexiones de estos dispositivos se encuentran descritos en el anexo A.

2.7 Actuador

El actuador como etapa importante en la tarea de control, es capaz de transformar una señal eléctrica de entrada en una acción efectiva permitiendo el manejo de la variable a controlar, para ello se dispuso fundamentalmente de tres elementos tales como: válvula globo, caja de reducción, motor paso a paso así como una correcta disposición de estos para lograr su mejor desempeño. Que en su conjunto representaría para nosotros una electroválvula, para su adecuación se dispusieron elementos con características específicas que se describen a continuación.

Uno de los componentes es un motor paso a paso (PAP) bipolar con – de torque máximo, con alimentación de 5 V (DC), con un tiempo de respuesta mínimo entre señales de secuencia de 10 ms.

Otro de los componentes consiste en una caja de reducción cuya finalidad es la obtener ganancia mecánica. Esta relación de engranajes incluye un sin fin y corona de ejes perpendiculares que la hacen irreversible, hecho este que proporciona un efecto de protección hacia el motor PAP, cuando se presenten

fuerzas de fricción en la válvula globo por efectos de corrosión.

La válvula globo es el elemento en contacto con el fluido a controlar (gas propano) y cuya apertura o cierre es en si la acción final de control. Este elemento posee para su adaptación dos terminales roscados a tres octavos NPT.

2.7.1 Motor paso a paso

Es un dispositivo que convierte pulsos eléctricos (señales secuenciales de unos y ceros), en movimientos discretos en cuanto a rotación mecánica de su eje inducido.

Básicamente estos motores están constituidos normalmente por un rotor sobre el que van aplicados distintos imanes permanentes y por un cierto número de bobinas excitadoras bobinadas en su estator.

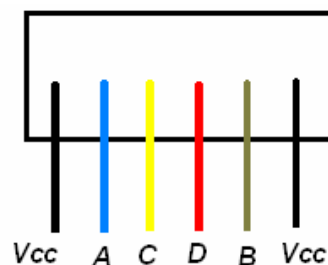
Las bobinas son parte del estator y el rotor es un imán permanente. Toda la conmutación (o excitación de las bobinas) deber ser externamente manejada por un controlador.

Específicamente el motor paso a paso utilizado consta de dos fases con cincuenta parejas de polos por cada sección del estator lo cual le da un desempeño de doscientos pasos por revolución a uno punto ocho grados por paso. Este motor es unipolar es decir posee dos bobinas en cada uno de los estatores y el modo de operación utilizado es a doble paso con el objetivo de obtener un mayor torque capas de vencer fácilmente la carga aplicada a su eje.

A continuación se presenta la configuración unipolar y la secuencia de conmutación de las bobinas (colocar graficas y secuencia de motor)

Las bobinas se encuentran ordenadas de acuerdo a su disposición física de entrada así (véase figura 16).

Figura 16. Orden y conexión de entrada de Bobinas



Teniendo en cuenta que: A,B,C,D corresponde al orden de la secuencia de conmutación que se presenta en la tabla anteriormente descrita.

Un aspecto importante es la determinación del torque máximo de desempeño, al aplicar una carga sobre su eje, en este caso se ha utilizado un método sencillo, cuyo montaje se presenta en la grafica siguiente (figura 17).

Figura 17. Diagrama para la medición del torque

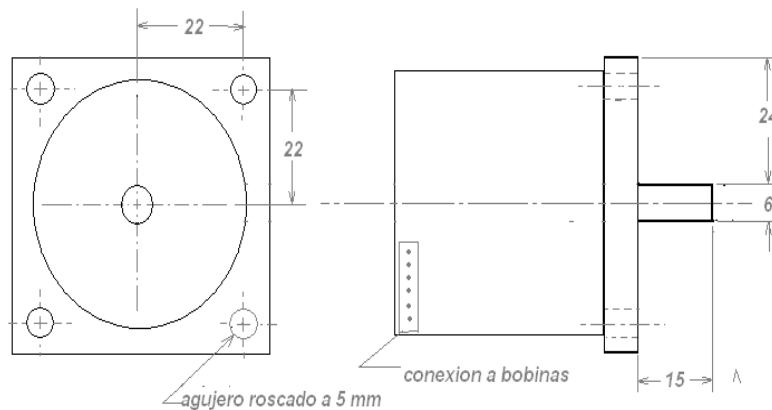
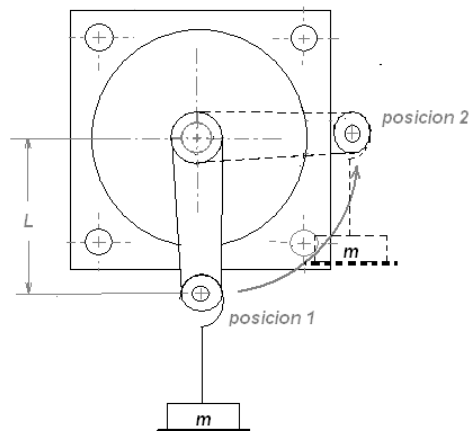


Figura 17. Diagrama para la medición del torque



Físicamente el torque (τ) o momento de una fuerza esta definido como la fuerza por el brazo de palanca, en forma escalar se tiene la siguiente expresión.

$$\tau = F * L * \text{sen}\theta \tag{2.34}$$

Esta es la magnitud del producto vectorial entre el vector desplazamiento y el vector de fuerza ^[13].

La teoría anterior es aplicable para determinar el torque máximo que puede vencer el motor. En la posición 1 el torque será el mínimo (véase figura 17), e ira creciendo hasta un máximo localizado en la posición 2, debido al incremento de el brazo y la palanca, es decir la distancia desde el centro de rotación hasta la línea de acción de la fuerza.

Experimentalmente esto se logra mediante el montaje de una etapa de potencia implementada con transistores TIP 110 con los cuales se puede manejar corrientes mayores que el motor requiere (ver descripción de hardware), eliminando las limitaciones que en este sentido tienen los controladores.

Generada la secuencia de conmutación, que para este caso se realizo bajo plataforma **labview** y enviada a través del puerto paralelo, e interfazada a la etapa de potencia la cual proporciona tanto la polarización necesaria como la secuencia de conmutación ya potenciada para el manejo del motor PAP.

El software utilizado permite una variación en temporización que existe entre el envío de datos en la secuencia, tal temporización es la mínima a la cual las bobinas del motor pueden responder a los pulsos generados, específicamente para el motor utilizado este tiempo es de 10 ms.

Seguidamente se requiere el montaje que se presenta en la figura 16, aquí al motor se ha adaptado un brazo de longitud L y un porta masas (soporte) al eje del motor, ahora colocando una masa sobre el soporte y enviando la secuencia de conmutación necesaria para que se mueva desde posición 1 hasta posición 2 es decir 90 grados o 50 pasos para este caso, el montaje permite ir agregando masas en el soporte por cada repetición del proceso, hasta que el eje del motor no sea capaz de levantar la masa dispuesta en el soporte, entonces la masa que el motor es capaz de levantar sin demasiado esfuerzo será el valor registrado un instante anterior al ultimo suceso. El torque máximo será determinado con la relación 2.34. Este valor fue de 0.01985 o aproximadamente 0.02Nm.

2.7.2 Caja de reducción

Se hizo necesaria la adaptación de una caja de reducción debido a que el torque máximo del motor es inferior al necesario para operar la válvula globo, a través de su vástago.

La primera parte consiste en dos engranajes de dientes rectos cuya relación entre radios es de 2 : 1 , considerando el engranaje 1 como impulsor (engranaje sobre el eje del motor)y el engranaje 2 el impulsado.
La relación entre velocidades es la siguiente:

$$n_2 = \frac{N_1}{N_2} n_1 \quad (2.35)$$

Donde:

n= numero de vueltas o rpm

N = numero de dientes.

D= diámetro de paso.

Si la fuerza de contacto entre los engranajes esta dada por

$$F_1 = \frac{\tau_1}{d_1/2} = \frac{\text{torque maximomotor}}{\text{radiosobrelacircunferenciapasoengrane1}}$$

El torque sobre el eje del engranaje 2 será:

$$\tau_2 = F_1 * \frac{d_2}{2} \quad (2.36)$$

$\frac{d_2}{2}$ = Radio sobre circunferencia de paso engranaje 2

τ_2 es el mismo en el tornillo sin fin, pues esta localizado sobre el mismo eje.

Donde:

d_w = es el diámetro circunferencia de paso de tornillo sin fin.

D_g = es el diámetro circunferencia de paso de la rueda.

P_x = es el paso axial de tornillo sin fin.

λ = avance de un punto sobre el tornillo por cada revolución. Completa de este.

Para el caso el tornillo es de una sola entrada, es decir hay una sola hélice envuelta sobre el cilindro de revolución, entonces P_x es igual λ .

Analíticamente se tiene una relación matemática que determina la fuerza máxima (Q), que tangencialmente el sinfín puede imprimir a su rueda relacionada

$$Q = \frac{2\pi}{6} * \frac{\frac{d_2}{2} - \frac{d_w}{2}}{P_x} * F_1 \quad (2.37)$$

$\frac{d_2}{2}$ = radio de engranaje 2 colocado en el extremo del tornillo sinfín

$\frac{d_w}{2}$ = radio sobre la circunferencia de paso de tornillo sinfín

F_1 es la fuerza de contacto entre los engranajes 1 y 2, o fuerza máxima de motor a través de engranaje 1.

Ahora la fuerza Q aplicada tangencialmente sobre la rueda relacionada genera el torque de salida de la caja de reducción. Se tiene finalmente que:

$$\tau_g = \frac{d_g}{2} * Q \quad (2.38)$$

τ_g torque máximo de salida de la caja.

2.7.3 Válvula globo

Este elemento esta constituido principal por una esfera horadada cuyo eje de giro (vástago) es perpendicular al orificio inscrito en dicha esfera. El diámetro de flujo es de 7mm, además esta provista de roscas 3/8 NPT en la via de conducción para instalación en la red a controlar.

2.7.4 Descripción general del actuador y caracterización

Dadas las características de la válvula, cierre no lineal, es necesario determinar la fracción de cierre o apertura de la válvula, de acuerdo a la posición del vástago. La fracción de cierre o apertura de la válvula se define como el área de la válvula parcialmente abierta (**A_p**), dividida por el área de la válvula completamente abierta (**A_t**). El procedimiento usado fue el siguiente.

Inicialmente se comienza por abrir la válvula cada 5° desde el punto 25° (sin flujo) hasta la apertura total equivalente a 90°, para cada variación se tomaron

fotografías que luego fueron procesadas mediante el software Leica determinando el valor de área de apertura, a continuación se presentan algunas de las imágenes que fueron procesadas.

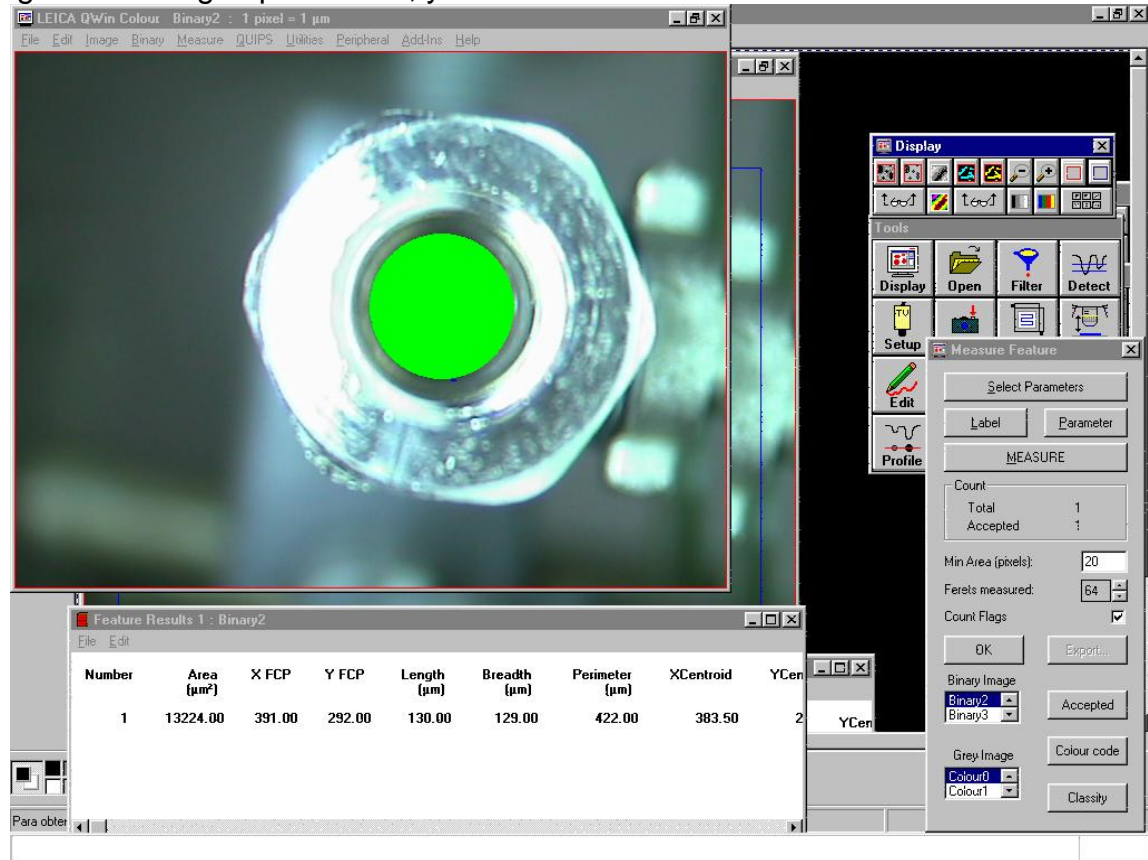
Figura 18. Imagen a procesar, válvula totalmente cerrada



Figura 19. Imagen a procesar, 35° grados de apertura



Figura 20. Imagen procesada, y determinación de área 90° abierta



Teniendo en cuenta el valor de áreas proporcionado por las graficas se procede a medir el caudal que pasa a través de cada variación angular del vástago, para eso se hizo necesario realizar un montaje en el cual se haría necesario utilizar dos instrumentos importantes los cuales son:

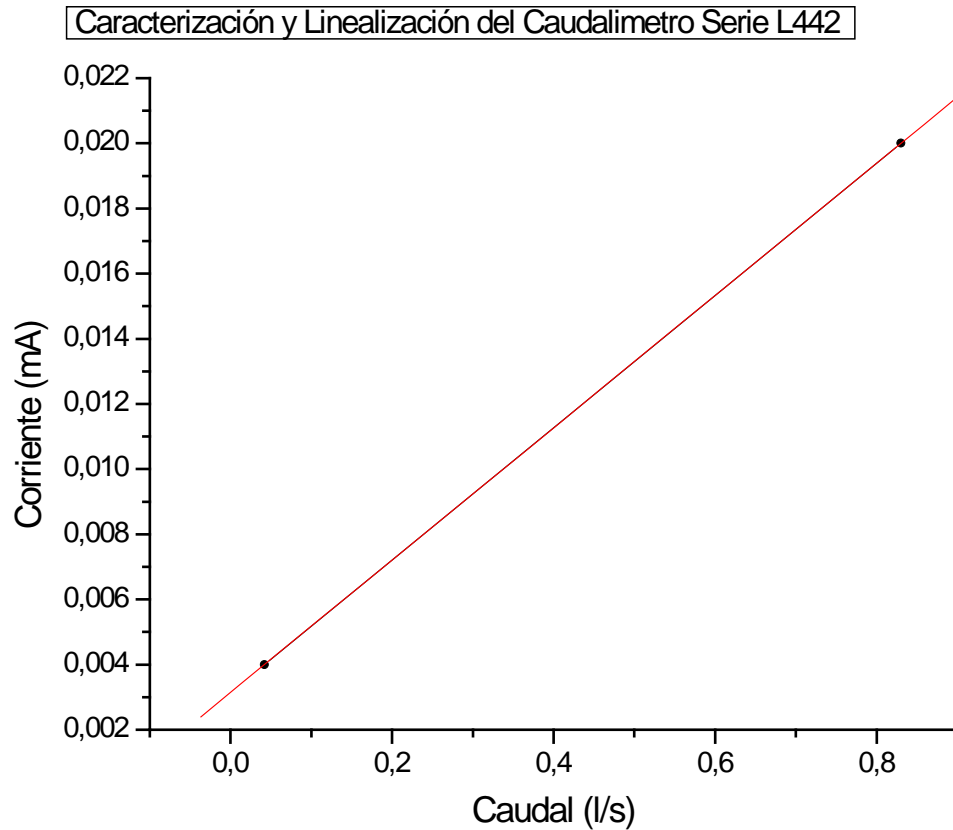
Caudalímetro: Instrumento el cual mide caudal en l/s.

Manómetro: Instrumento el cual mide la presión en Kps.

El caudalímetro pertenece a la empresa kobol y es de la serie L442, este transductor es de tipo industrial. Teniendo en cuenta el manual del fabricante este tiene una salida de 4mA para caudal cero hasta un máximo de 20 mA para un caudal correspondiente a 0.8333 l/s teniendo en cuenta estos parámetros se realiza una regresión lineal para encontrar la relación entrada salida, de esta manera es posible saber el caudal correspondiente al valor de corriente

desplegada por el instrumento, la siguiente grafica muestra el comportamiento teórico del instrumento.

Figura 21. Curva de respuesta del caudalímetro serie I442.



$m =$ Pendiente (0.0203 ma/(l/s)).

$b =$ Punto de Corte (0.004 m.a).

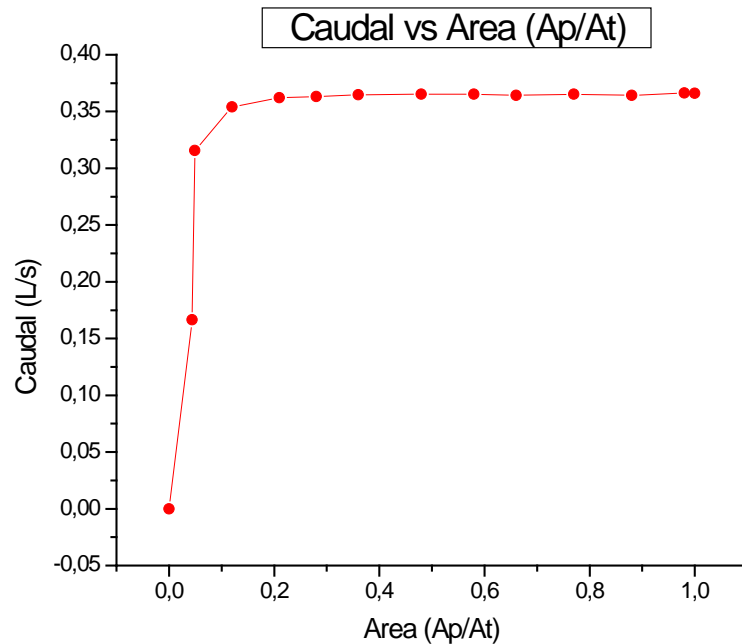
Los datos anteriormente determinados son los correspondientes al valor de la pendiente y el punto de corte del caudalímetro.

Teniendo en cuenta esto los valores de caudal y fracción de apertura de la válvula fueron:

Tabla 1 Fracción de apertura de la válvula de acuerdo a la posición del vástago

Posición del Vástago en grados (°)	Área (μm^2)	Fracción de Apertura (A_p/A_t)	Flujo Volumétrico (l/s)	% de Flujo
30	591	0.044	0,1665	45.48
35	660	0.049	0,3157	86.245
40	1693	0.12	0,35401	96.71
45	2879	0.21	0,36225	98.96
50	3816	0.28	0,36325	99.23
55	4837	0.36	0,36476	99.64
60	6404	0.48	0,36525	99.78
65	7800	0.58	0,36526	99.784
70	8772	0.66	0,36423	99.5
75	10208	0.77	0,36525	99.78
80	11681	0.88	0,36423	99.5
85	12973	0.98	0,36604	99.99
90	13224	1	0,36625	100

Figura 22. Comportamiento del caudal frente a la variación del área



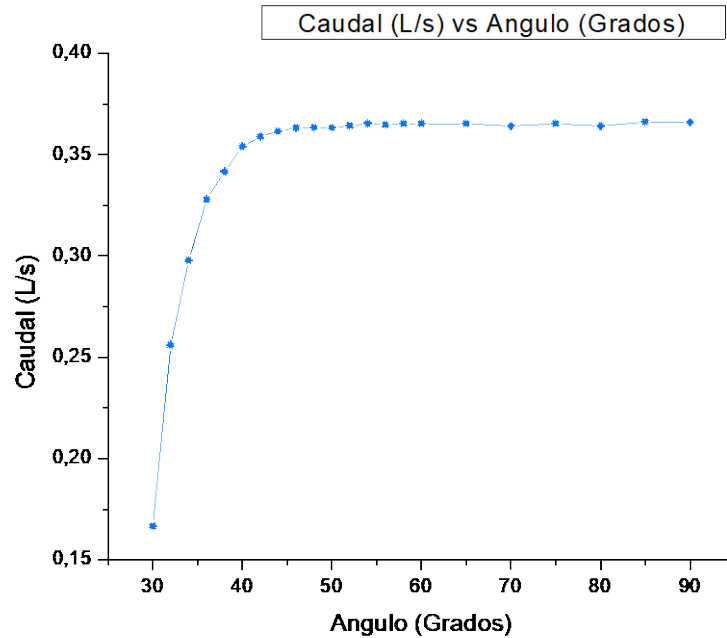
En esta gráfica es posible observar la no linealidad del actuador frente a la entrada. Esto da una idea del tipo de control a utilizar, es posible también observar

el mismo comportamiento relacionando ángulo vs caudal. En la siguiente tabla se muestra los datos obtenidos.

Tabla 2. Comportamiento del caudal frente a la variación del ángulo de apertura

Angulo (grados)	Caudal (l/s)
30	0,1665
32	0,2561
34	0,29778
36	0,32782
38	0,3416
40	0,35401
42	0,3589
44	0,36159
46	0,36325
48	0,36325
50	0,36325
52	0,36425
54	0,36532
56	0,36476
58	0,36525
60	0,36525
65	0,36526
70	0,36423
75	0,36525
80	0,36423
85	0,36624
90	0,36605

Figura 23. Comportamiento del caudal frente a la variación del ángulo de apertura



Se observa claramente que el caudal tiene una variación abrupta entre 30° y 38° grados lo cual no permite un amplio rango de operación, debido a que el caudal es máximo a partir de 38 grados, esto implica que a pesar del incremento en el ángulo de apertura existirá el mismo caudal de salida, significando un rango de operación muerto (sin variación de caudal), entre ese valor y el ángulo de apertura máxima.

La complejidad del modelo matemático teórico, condujo a una aproximación de este partiendo de lo experimenta para llegar a lo teórico para ello se hizo necesario relacionar gráficamente el caudal vs fracción de apertura, teniendo el comportamiento de la válvula respecto al ángulo de apertura por efecto del movimiento del vástago acoplado al motor PAP.

3. QUEMADORES ATMOSFERICOS

3.1 Llamas de premezcla

Las llamas utilizadas en procesos industriales o artefactos domésticos pueden clasificarse, de acuerdo a la forma en que el combustible y el comburente toman contacto, en llamas de premezcla y llamas de difusión. Tanto las llamas de premezcla como las de difusión pueden clasificarse asimismo, según sea el régimen de escurrimiento del combustible, en llamas de régimen laminar o de régimen turbulento.

Por último, de acuerdo con la naturaleza de la radiación que emiten, las llamas pueden clasificarse en llamas claras o llamas luminosas. Cuando el combustible se mezcla con el aire (comburente) en una instancia previa al ingreso al espacio previsto para que se desarrolle la combustión, la llama obtenida se denomina llama de premezcla.

Son los utilizados en artefactos domésticos en lo que el gas combustible actúa como inductor, arrastrando parte del aire necesario para la combustión (aire primario) de la atmósfera ^[8].

3.2 Forma de la llama

La llama es el lugar donde se desarrolla la reacción de combustión entre el gas combustible y el gas comburente.

Como la reacción es exotérmica (libera calor), los gases producidos adquieren temperaturas elevadas, con lo que emiten radiación, en parte luminosa, de la masa de gases incandescentes producidos por el proceso de combustión.

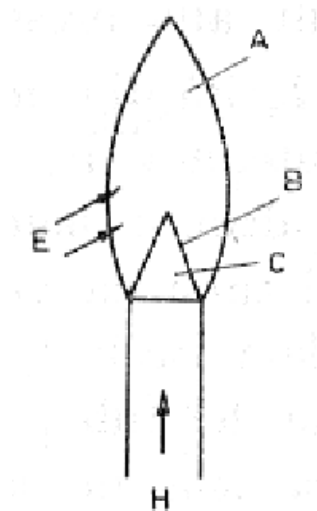
Para obtener un frente de llama estable, es suficiente que en un punto de ese frente de llama se produzca la igualdad entre la velocidad de la mezcla aire-combustible y la velocidad de propagación de la llama. En estas condiciones, la componente normal de la velocidad de la mezcla aire-combustible es igual a la velocidad de deflagración del gas combustible.

El frente de llama que se propaga a través de una mezcla gaseosa combustible-comburente, lo hace con una velocidad que depende de la composición de la mezcla, de su temperatura, presión, homogeneidad y de las formas y dimensiones del recinto donde se desarrolla la combustión. La propagación del frente de llama

puede efectuarse a través de dos procesos de características diferentes: deflagración y detonación [8].

1. Prevé el pasaje de una mezcla combustible-comburente a través de un tubo en cuyo extremo se forma una llama estacionaria, denominada llama de premezcla (figura 24). En este tipo de llama puede identificarse un cono interno donde se desarrolla la combustión del gas combustible con el aire de la premezcla (aire primario), denominado cono azul por la tonalidad que adopta. El aire que rodea la llama (aire secundario) contribuye a completar la combustión [8].

Figura 24. Llama de premezcla



Donde:

H: Flujo de mezcla de gas con aire primario.

C: Cono de combustión con aire primario.

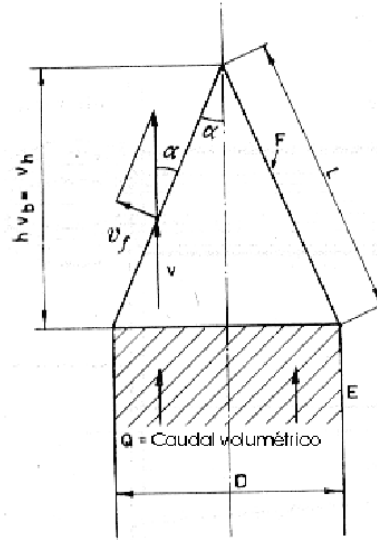
A: Combustión por aire secundario.

B: Frente de llama.

E: Contorno de llama.

El cálculo de la velocidad de llama se basa en la medida de la componente ortogonal al frente de llama, de la velocidad de la mezcla gaseosa, de acuerdo con la figura 25.

Figura 25. Descomposición vectorial de la llama



La velocidad de combustión se puede obtener de la siguiente relación:

$$V_f = V \operatorname{sen} \alpha \quad (2.40)$$

Donde alfa es el ángulo del cono en un punto que dista $0,707 r$ del centro del mechero (r es el radio del agujero de combustión). En este punto, la velocidad del flujo gaseoso (V) iguala la velocidad media a través de la sección interna del tubo.

La reacción de combustión no se termina en la región del cono. Existe un manto luminoso, externo al cono azul, en el cual, por medio del aire secundario que difunde dentro del manto, se completa la combustión del gas que no reaccionó con el aire primario.

El largo de llama puede determinarse a través del siguiente análisis: supongamos que una mezcla aire combustible circula a través de un tubo cuyo radio es R ($d/2$) a una velocidad U , y que la llama se estabiliza en su extremo formando un cono azul de altura H .

El caudal a través del tubo se expresa como el producto entre la velocidad U y la sección del tubo S .

Si el frente de llama se estabiliza en la superficie del cono, entonces el caudal que

atraviesa la superficie del cono vendrá dado por el producto entre la velocidad del frente de llama (V_f) y la superficie del cono, de donde se desprende que:

$$H = R \sqrt{\left(\frac{U}{V_f}\right)^2 - 1} \quad (2.41)$$

De la relación matemática anterior que determina el largo de llama, se deduce que éste crece con el radio del tubo.

En el caso hipotético que la velocidad U coincidiera con V_f la llama sería plana y se estabilizaría en la sección de salida del tubo ($H=0$) [8].

3.3 Propiedades

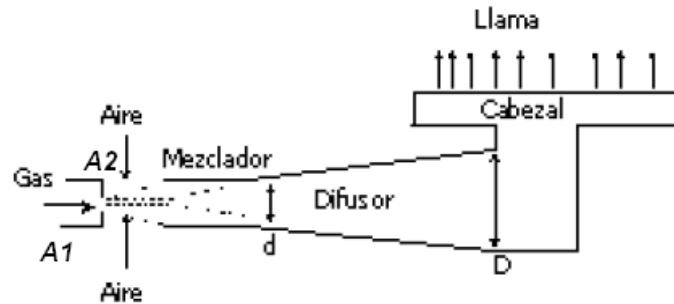
Las llamas de premezcla permiten:

- Lograra temperaturas más elevadas que las conseguidas a través de las llamas de difusión.
- Alta relación entre el calor liberado y el volumen que ocupa la llama.
- Reducir el espacio destinado al desarrollo del proceso de combustión, y llamas transparentes. En general la radiación emitida se limita al espectro de bandas de los productos de la combustión completa (CO_2 y H_2O).

3.4 Componentes de un quemador

El quemador utilizado en el sistema de calefacción de la planta es el que se presenta en la figura 26, se encuentra constituido principalmente en su conjunto por un mezclador (sitio de mezcla aire-combustible), un difusor, y un cabezal (sitio de desarrollo de combustión), la grafica muestra además el acople de el inyector (micro tobera) de salida de el gas combustible GLP [8].

Figura 26. Diagrama de un quemador de glp



3.5 Características

Las características propias del quemador antes de la combustión son el caudal calórico y el caudal de aire primario arrastrado de la atmósfera.

3.5.1 Caudal calórico (qc)

Se define como el caudal volumétrico del gas combustible expresado en m³/h (Q_{gas}) y poder calorífico superior (PCS) expresado en J/m³.

Aproximadamente se tiene que el caudal volumétrico del gas es

$$Q_{gas} = \frac{CA\sqrt{P}}{\delta} \quad (2.42)$$

Donde:

δ : Densidad del gas combustible relativa al aire.

P: Presión del gas combustible antes del inyector.

A: Área del orificio del inyector.

C: Coeficiente que depende de las unidades utilizadas de la forma del orificio del inyector y de la temperatura.

El caudal calórico puede expresarse.

$$Q_c = Q_{gas} * PCS \quad (2.43)$$

De donde se deduce que dentro de ciertos límites, el caudal calorífico es proporcional a la presión de alimentación del gas combustible. La relación anterior es válida siempre que se desprece la compresibilidad del gas, como es el caso del gas combustible utilizado ($C_3 H_8$) en el sistema calefactor de la planta [8].

3.5.2 Caudal de aire arrastrado

El aire arrastrado por el chorro de gas sigue la teoría del chorro confinado. Suponiendo que la cantidad de movimiento se conserva dentro del quemador y despreciando la influencia de las presiones y rozamiento contra las paredes se puede expresar en términos del momento así:

$$P_{gas} = P_{aire} \quad (2.44)$$

$$M_{gas} * V_{gas} = M_{aire} * V_{aire} \quad (2.45)$$

Donde:

M_{gas} = Caudal masico del gas.

V_{gas} = Velocidad del gas en el inyector, caudal volumétrico del gas sobre la sección de Área del orificio del Inyector.

M_{aire} = Caudal masico del aire.

V_{aire} = Velocidad del aire, caudal volumétrico del aire sobre la sección de área de mezcla.

$$V_{gas} = \frac{Q_{gas}}{S_i} \quad (2.46)$$

$$V_{gas} = \frac{Q_{aire}}{S_m} \quad (2.47)$$

$$M_{gas} = Q_{gas} * \delta_{gas} \quad (2.48)$$

$$M_{aire} = Q_{aire} * \delta_{aire}$$

Reemplazando esta dos ultimas relaciones en (1), se tiene

$$(Q_{gas} * \delta_{gas}) \left(\frac{Q_{gas}}{S_i} \right) = (Q_{aire} * \delta_{aire}) \left(\frac{Q_{aire}}{S_m} \right) \quad (2.49)$$

Desarrollando algebraicamente se obtiene

$$\frac{Q_{aire}}{Q_{gas}} = \sqrt{\frac{\delta_{gas}}{\delta_{aire}}} \sqrt{\frac{S_m}{S_i}} \quad (2.50)$$

$$\frac{Q_{aire}}{Q_{gas}} = R = \sqrt{\delta_{rel}} \sqrt{\frac{S_m}{S_i}} \quad (2.51)$$

Si la relación de la cantidad de aire primario y la cantidad de gas inyectado definido como R se refiere a su vez a la cantidad de aire teórico o estequiometrico (A) se tiene:

$$N = \frac{R}{A} = \frac{\sqrt{\delta_{rel}}}{A} \sqrt{\frac{S_m}{S_i}} \quad (2.52)$$

Esta última relación indica que dentro de ciertos límites operativos la proporción de aire primario arrastrado con respecto a la estequiometria, por unidad de volumen del gas combustible inyectado, es independiente de la presión de alimentación en ese gas combustible que alimenta el quemador.

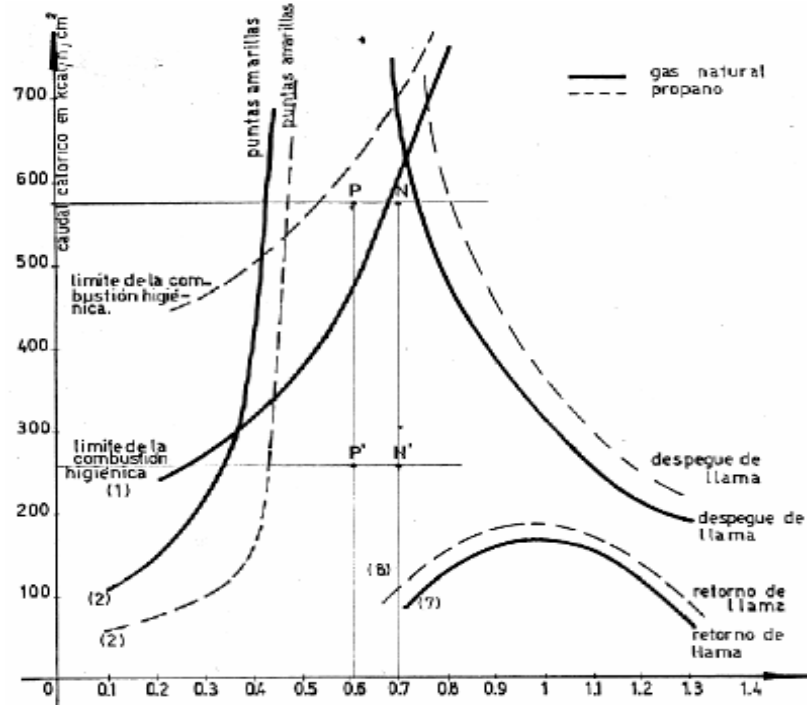
Para cada quemador en particular puede ser trazado un diagrama similar al representado en la figura 27.

Las abscisas corresponden a la proporción de aire primario referido a la cantidad de aire estequiométrica (N) y las ordenadas al caudal calórico por unidad de área de los orificios de salida del quemador.

La zona de funcionamiento satisfactorio del quemador está limitada por curvas límites que, si se sobrepasan, dan lugar a la aparición de alguno de los siguientes fenómenos indeseables:

- Desprendimiento de llama, como consecuencia de sobrepasar la velocidad crítica correspondiente.
- Retorno de llama, al reducirse el caudal calórico hasta valores inferiores al mínimo.
- Combustión incompleta, con la presencia de CO en los gases de la combustión, en proporciones superiores a las admisibles.
- Aparición de puntas amarillas que originan el fenómeno ya descrito [8].

Figura 27. Zona de funcionamiento de los quemadores



Donde:

N = aire primario sobre aire estequiométrico.

3.6 Diagrama de funcionamiento de quemador atmosférico

La figura muestra el diagrama de funcionamiento de un quemador para gas natural (suponiéndolo compuesto por metano puro) y para propano (suponiéndolo compuesto por propano puro) [8].

El punto N corresponde al funcionamiento del quemador cuando se lo utiliza con gas natural, y el P se corresponde con el funcionamiento con propano. Las presiones a las que se inyecta el gas combustible son de 180 mm de columna de agua (1.77KPa) para el gas natural, y 280 mm de columna de agua (2.8KPa) para el propano.

Si se utiliza el mismo quemador, no es posible que pueda funcionar indistintamente con cualquiera de los dos gases antes mencionado. Es decir, no son gases intercambiables. Para que pueda funcionar con propano resultaría necesario modificar el diseño del quemador, cambiando el inyector.

Ahora se hacia necesario observar el comportamiento del actuador acoplado a la tobera de alimentación del gas, este es un orificio de un diámetro muy pequeño del orden de unas décimas de milímetro.

Se lo hizo con la finalidad de observar el aporte de gas sobre el mezclador y determinar por completo una estrategia de control, los datos obtenidos fueron velocidad de gas y de presión de salida, las cuales son las variables que influyen directamente en el proceso físico de combustión [8].

Datos con tobera de gas

Tabla N°3 .Comportamiento de las presiones y velocidades de salida con tobera de gas

Angulo (Grados)	Velocidad (m/s)	Presión (Kps)
25	0	0,002
28	0,2	0,06981
32	0,4	0,13928
34	0,5	0,1425
36	0,6	0,14572
38	0,60447	0,14763
40	0,60447	0,143
42	0,60447	0,144
44	0,60447	0,14824
46	0,60447	0,14624
48	0,59541	0,151
50	0,60447	0,152
55	0,59541	0,151
60	0,60447	0,153
65	0,60447	0,15
70	0,609	0,149

75	0,61352	0,151
80	1	0,243
85	1	0,243
90	1	0,245

Figura 28. Comportamiento de la velocidad de gas GLP en función de la variación del área de la válvula con tobera

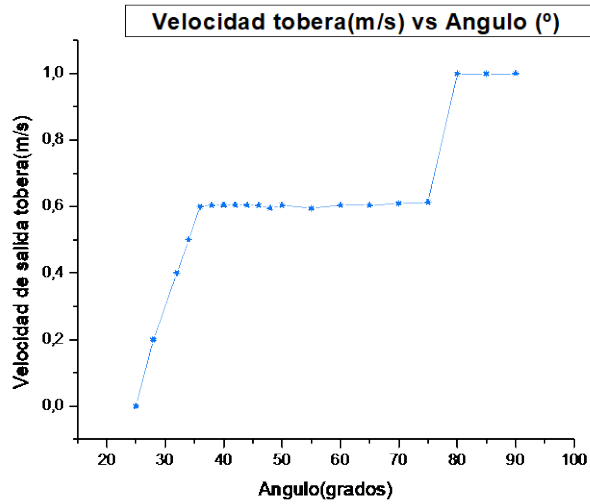
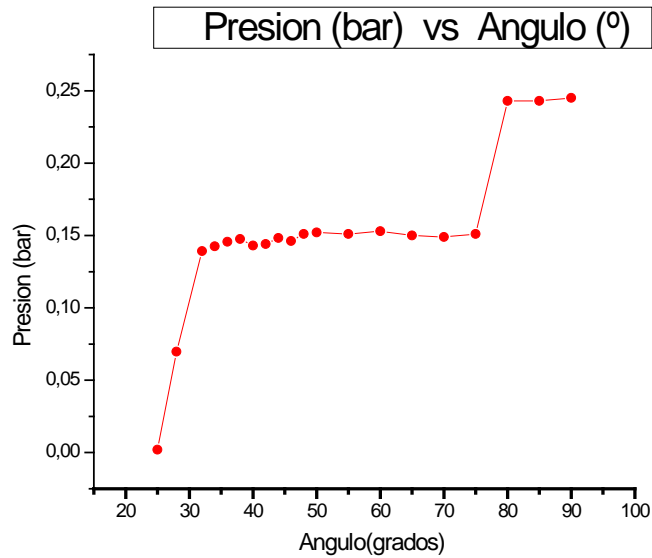


Figura 29. Comportamiento de la presión de salida de gas GLP en función de la variación del área de la válvula con la tobera



Es posible observar dos estados de variación de llama en el quemador los puntos de variación son en 30 y 80 grados de apertura aproximadamente estos comportamientos son importantes en el momento de escoger una técnica de control.

4 ESTRATEGIA DE CONTROL UTILIZADA Y SOFTWARE UTILIZADO

En este caso el sistema de control más eficiente correspondió a un controlador ON OFF debido a la no linealidad de nuestro actuador como también del quemador, puesto que para desarrollar un tipo de controlador más avanzado se hace necesario que la respuesta de los elementos de control sean proporcionales y no contengan intervalos de operación muertos como lo describe la figura 28, que corresponden entre 30 y 75 grados en los cuales no se observa variación alguna de velocidad y presión del fluido, como también a partir del segundo cambio abrupto existente en 80° de apertura. Lo anterior conlleva a descartar los siguientes tipos de control.

El controlador PID no es aplicable al sistema debido principalmente a la no linealidad de la respuesta característica del inyector (alimentador de gas del quemador) y de nuestro actuador (electroválvula), a pesar del cambio de esta por una válvula proporcional reguladora de caudal, igualmente el sistema sería incapaz de ejecutar una acción de control satisfactoria debido a los estados presentes en el inyector, la aplicación de un actuador proporcional hubiera sido además una sub utilización de este en relación con sus características de desempeño, obteniendo exactamente la misma respuesta

Un controlador de tipo inteligente (PD FUZZY) es un tipo de control para sistemas no lineales y posee una respuesta de estabilidad en la planta muy buena, la razón por la cual no fue posible utilizarlo es sencilla, al observar la respuesta del quemador frente a la variación de apertura se obtuvo solamente los estados de operación antes mencionados, las figuras 28, 29 muestran que el cambio en la velocidad de inyección de gas en el quemador ocurre en los extremos de apertura (variación angular de vástago), con lo cual la velocidad de salida del GLP después del inyector y la cantidad de aire primario arrastrado permanecen constantes durante intervalos de operación dando como resultado una inestabilidad en la respuesta del controlador. Este tipo de estrategia sería aplicable en los siguientes casos:

1. Variación de la sección transversal del mezclador.
2. Instalación de múltiples actuadores con sus respectivos quemadores.
3. Apertura o cierre de escotillas para la circulación de aire a temperatura

ambiente.

4. Cambio en el sistema de calefacción a través de la adecuación de resistencias eléctricas.
5. Variación del flujo de aire con temperatura mayor a la ambiente por medio de una válvula.

4.1 Descripción del controlador

El controlador es de dos estados significa que solo funcionará como abierto o cerrado, este controlador tendrá un rango de operación de mas o menos 5°C con le fin de no sobrepasar la temperatura descrita por el usuario, esta estimación se la hace debido a que dentro de la planta existe una inercia térmica la cual conlleva a sobrepasar el punto en el cual se necesita que la planta se estabilice, aunque este tipo de controlador no es muy estable se intenta reducir este rango de operación, es decir, si el usuario coloca una temperatura de operación de 80°C el sistema se debe apagar en 75°C debido a que la inercia térmica lleve a la planta a una temperatura de 80°C y no superior a la establecida si la temperatura se encuentra por debajo de 70°C el sistema automáticamente enviara una secuencia de apertura de la válvula además del encendido automático de la misma para garantizar que el piloto se encuentre siempre encendido y así evitar la fuga de gas por el recinto, esto se hace con el fin de que exista una combustión permanente dentro del sistema.

Al colocar el sistema en estado automático, el controlador busca que la válvula siempre se encuentre en estado inicial en nuestro caso será completamente cerrada de esta forma el sistema se cerciora la no existencia de fugas de gas por parte del actuador, esta información es proporcionada por una llave óptica, inmediatamente se encuentra cerrada el sistema pide al usuario el valor de temperatura requerido y el tiempo de duración del proceso para de esta forma una vez terminado el tiempo de deshidratado la válvula sea cerrada y el proceso sea terminado, finalmente se pide al usuario cerrar la llave de abastecimiento para evitar el paso de gas a todos los sistemas alimentados por GLP.

El sistema esta compuesto por un estado manual el cual permite la supervisión de las variables físicas anteriormente descritas del sistema, cuenta con el envío de datos al computador para su debido monitoreo con el software desarrollado en la plataforma de **Labview™** además posee la capacidad de salir del estado manual y cambiarse a al estado automático con la digitación de la tecla B del tableo matricial véase manual de usuario.

4.2 Software utilizado.

Es indispensable la utilización de herramientas computacionales para el desarrollo de sistemas de control, para esto se hizo necesario acudir a software que sean capaces de proporcionar un desempeño óptimo y de fácil manejo para el usuario.

El software utilizado es:

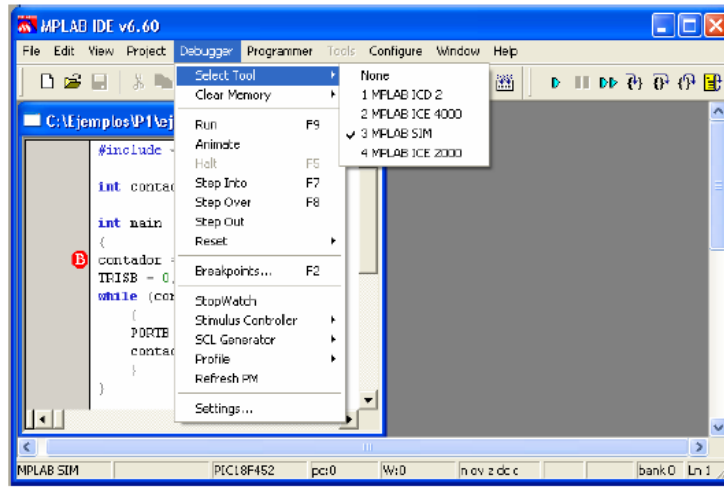
4.2.1 Mplab v 6.6

Es una plataforma utilizada para el manejo de lenguajes de programación de dispositivos embebidos como son los microcontroladores de la familia de **Microchip** en nuestro caso el 18f452 que es el microcontrolador dispuesto para esta aplicación, sobre esta plataforma se desarrollo el software que realizara el control y envíos de datos al computador.

4.2.2 Mcc-18

Esta herramienta perteneciente a la empresa de **Microchip** funciona como un compilador el cual permite la programación del dispositivo 18f452 en lenguaje ANSI C, facilitando el entorno de desarrollo y de programación del dispositivo, ver figura 30.

Figura 30. Panel frontal de mplab v6.6



4.2.3 Labview™:

Esta plataforma de programación pertenece a **National Instruments™**, una de las grandes ventajas es que permite desarrollar un programación grafica dentro de un entorno de desarrollo sencillo, sobre esta plataforma se desarrollo la adquisición y toma de datos ya que es posible ver sobre ventanas graficas el avance de las variables físicas con respecto a la evolución del tiempo en nuestro caso el valor de temperatura y humedad relativa [9].

4.2.4 Leica:

Software utilizado para el procesamiento de imágenes, sobre esta plataforma se realizó la medida del área de las fotografías de la válvula para determinar el comportamiento dinámico de la válvula, este software cuenta con múltiples herramientas de procesamiento entre estas tenemos filtros, humbralización, extracción de planos, histogramas y medias de áreas la cual fue utilizado para nuestro propósito, véase figura 19.

5 CALCULO DE VARIABLES PSICROMETRIA

5.1 Humedad relativa y temperatura del aire

5.1.2 Propiedades del aire húmedo

Cuando la presión parcial del vapor de agua es menor a la presión de saturación a la temperatura del aire T , $p_v < p_g$, se dice que el aire húmedo no está saturado. Si la presión parcial del vapor de agua coincide con la de saturación, $p_v = p_g$ se dice que el aire está saturado de humedad. Para mensurar esta propiedad del aire se introduce el concepto de **Humedad Relativa** ϕ [17,18]:

$$\phi = \frac{p_v}{p_g} \quad (4.1)$$

Donde:

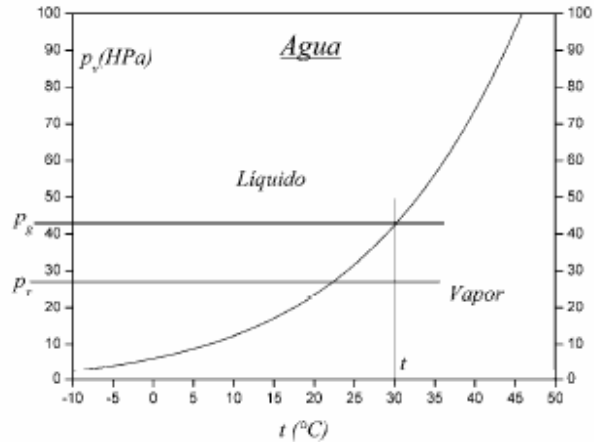
p_v = Presión parcial de vapor de agua en el sistema.

p_g = Presión parcial del vapor de agua en saturación a la misma Temperatura del sistema.

Y es el cociente entre la presión parcial de vapor y la de saturación a la temperatura del aire. Esto puede verse en la figura 30. Los valores que puede

adoptar esta variable son iguales o menores al 100%. Cuando el aire húmedo está saturado, tiene un 100% de humedad relativa [18].

Figura 31. Presión de Saturación del Agua 1 atm



Para conocer la composición del aire húmedo, sería suficiente con esta variable ya que conocida la temperatura, la humedad relativa y la presión, se puede obtener la presión parcial del vapor y con esta la fracción molar [17,18].

Despejando p_v de la ecuación anterior se obtiene:

$$p_v = \phi p_g \quad (4.2)$$

Las fracciones molares de la mezcla de aire seco y vapor de agua se definen de la siguiente manera:

$$y_{agua} = \frac{p_v}{p} \quad (4.3)$$

$$y_{aire\ seco} = 1 - y_{agua} \quad (4.4)$$

Donde:

P = Presión atmosférica local.

Como la composición del aire seco no cambia, el uso de las fracciones molares no resulta práctico y se recurre a otra propiedad del aire húmedo conocida como **Relación de Humedad ω** , (o humedad específica) ^[17,18]:

$$\omega = \frac{m_{agua}}{m_{aire}} \quad (4.5)$$

Y es el cociente entre la masa de agua y la de aire seco. Para el aire húmedo no saturado ($\phi < 100\%$) la masa de agua esta en la fase vapor, luego se cumple:

$$m_{agua} = m_v = \frac{M_{agua} p_v V}{R_o T} \quad (4.6)$$

$$m_{aire} = m_a = \frac{M_{aire} p_a V}{R_o T} \quad (4.7)$$

Donde:

M_{agua} , M_{aire} : son las masas molares de agua y aire respectivamente.
Reemplazando estas ecuaciones en la expresión para ω se obtiene:

$$\omega = \frac{M_{agua} p_v}{M_{aire} p_a} \quad (4.8)$$

El cociente entre masas molares es posible representarlo por un valor constante igual a 0.622 (adimensional), ahora teniendo en cuenta la ley de Dalton para presiones cuya definición es ^[17]:

$$p = p_{aire} + p_{agua} \quad (4.9)$$

Reemplazando esta expresión y la definición de Humedad relativa en la ecuación 4.8 se obtiene finalmente la expresión para la Humedad absoluta.

$$\omega = 0.622 \frac{p_g}{\frac{p}{\phi} - p_g} \quad (4.10)$$

Es posible observar que la humedad absoluta depende de la presión atmosférica local (p), La humedad relativa (ϕ) y la presión de vapor de saturación (p_g). Los valores mostrados en las cartas psicrométricas de la literatura están realizados para una presión atmosférica a nivel del mar (101.325 kpa) y a una temperatura de laboratorio de (25°C), como se pretende realizar el cálculo de algunas variables psicrométricas se hace necesario realizar un ajuste a la presión atmosférica local de Popayán.

Calculo de la Presión atmosférica

La ecuación para el cálculo de esta variable se muestra a continuación:

$$P_{Local} = P_o e^{\frac{uq}{R_o T}} \quad (4.11)$$

Donde:

P_o = Presión atmosférica a nivel del mar.

u = Masa molar del aire.

q = Coeficiente de proporcionalidad.

R_o = Constante Universal de gas Ideal 8.314 KJ/Kmol °K.

T = Temperatura de laboratorio.

P_{Local} = 82542 Pas en promedio a una altura de 1700 mts.

Teniendo en cuenta estos parámetros y utilizando la ecuación 4.10 los datos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4. Humedades corregidas a diferentes temperaturas

Tem °C	w(g/kg) Al 10%	w(g/kg) Al 20%	w(g/kg) Al 30%	w(g/kg) Al 40%	w(g/kg) Al 50%	w(g/kg) Al 60%	w(g/kg) Al 70%	w(g/kg) Al 80%	w(g/kg) Al 90%	w(g/kg) Al 100%
20	1,767	3,54	5,33	7,15	8,93	10,75	12,58	14,42	16,27	18,13
25	2,397	4,81	7,247	9,736	12,17	14,66	17,17	19,7	22,25	24,83
30	3,21	6,4	9,74	13,11	16,41	19,8	23,23	26,69	30,19	33,72

35	4,27	5,628	12,98	17,5	21,95	26,52	31,17	35,88	40,66	45,51
40	5,61	8,9	17,15	23,16	29,12	35,27	41,54	47,94	54,45	61,1
45	7,31	14,8	22,46	30,43	38,37	46,62	55,07	63,75	72,65	81,78
50	9,44	19,18	29,22	39,74	50,28	61,33	72,75	84,56	96,77	109,42
55	12,1	24,69	37,78	51,62	65,63	80,45	95,93	112,11	129,03	146,75
60	15,39	31,54	48,59	66,79	85,44	105,43	126,57	148,99	172,79	198,1
65	19,45	40,15	62,24	86,21	111,15	138,32	167,59	199,2	233,45	270,67
70	24,43	50,84	79,51	111,22	144,88	182,35	223,67	269,47	320,51	377,75
75	28,12	64,14	101,43	143,66	189,67	242,39	302,42	371,44	451,58	545,79
80	37,88	80,68	129,41	186,29	250,42	326,83	417,9	528,31	664,95	839,32

A continuación se presenta las gráficas de humedad absoluta con respecto a temperatura, a una presión de 101325 pa (véase figura 32) y a la presión atmosférica local 82542 pa (véase figura 33) (Popayán) respectivamente.

Figura 32. Curvas de Humedad vs Temperatura a 1atms

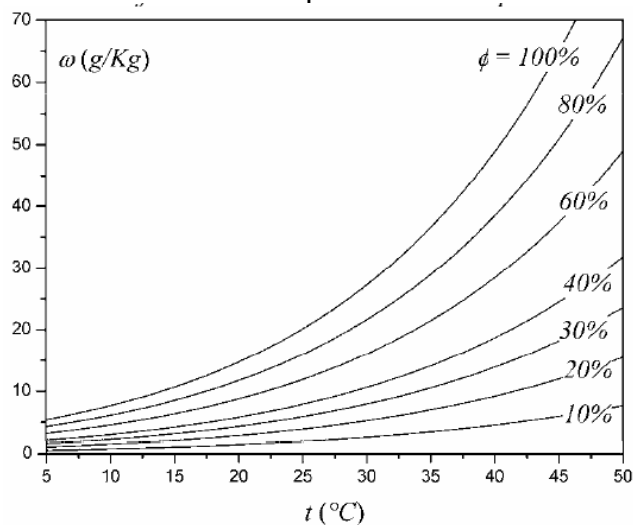
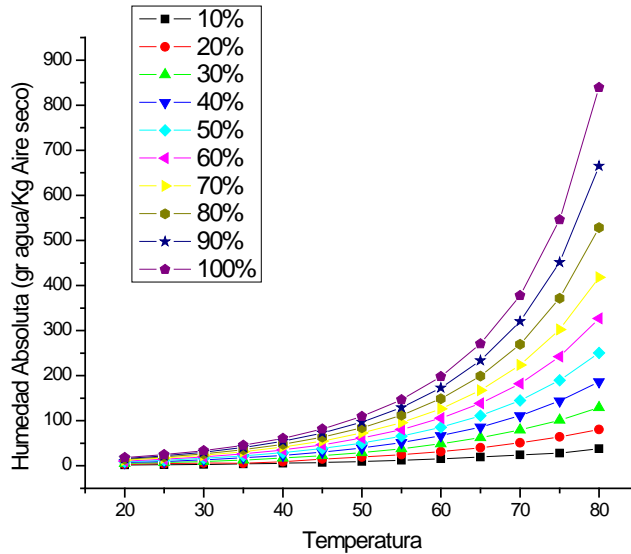


Figura 33. Curvas de humedad vs temperatura a presión atmosférica local

Curvas de Humedad vs Temperatura



Es posible observar la variación de Humedad Absoluta a diferentes presiones para una misma temperatura de bulbo seco (Temperatura del Aire dentro del sistema).

5.2 Punto de rocío

Es la temperatura a la que es preciso enfriar una mezcla de gas y vapor para que se alcance el punto de saturación. Si se sigue enfriando al vapor condensa, manteniéndose siempre la humedad de saturación.

Si el aire se encuentra a la temperatura T , humedad relativa ϕ y presión p , la presión de vapor se calcula: como anteriormente se definió $p_v = \phi p_g$, y para el punto de rocío $p_g(T_r) = p_v$, luego de ambas ecuaciones ^[18]:

$$p_g(T_r) = \phi p_g(T) \tag{4.12}$$

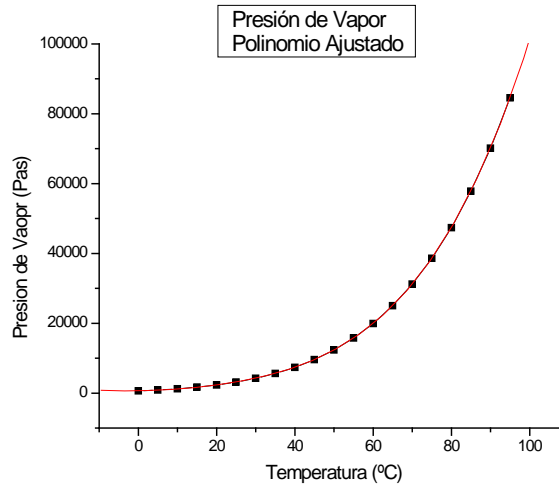
Donde:

- T_r = Temperatura de Rocío.
- T = Temperatura del Sistema.

Debido a que en todos los cálculos se necesita el valor de la presión de vapor de saturación se hace necesario hacer la regresión polinomial de la grafica Temperatura vs Presión de Saturación proporcionadas por las tablas propiedades

del vapor saturado (véase figura 34) [2].

Figura 34. Temperatura vs presión de vapor



Ecuación de regresión, polinomio de 4 orden.

$$P = 658.90 + 21.02 * T + 3.32 * T^2 - 0.028 * T^3 + 9.32 \times 10^{-4} * T^4 \quad (4.13)$$

5.3 Temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo

5.3.1 Temperatura de bulbo seco

La temperatura de mezcla aire vapor de agua que se lee en un termómetro o un termopar se denomina de bulbo seco. Mientras no se diga otra cosa, cuando se habla de temperatura del aire se hace referencia a la temperatura de bulbo seco [17].

5.3.2 Temperatura de bulbo húmedo

La temperatura de bulbo húmedo, desde el punto de vista termodinámico, puede definirse como la temperatura T_s a la cual el agua, por evaporación en el aire húmedo a una temperatura de bulbo seco T y contenido de humedad ω , puede llevar adiabáticamente el aire hasta saturación mientras se mantiene una presión constante [1].

Desde el punto de vista práctico es posible determinar aproximadamente la temperatura de bulbo húmedo como:

$$T_s = \frac{T + T_r}{2} \quad (4.14)$$

Donde:

T_s = Temperatura de Bulbo Húmedo.

T_r = Temperatura de Rocío.

T = Temperatura del Sistema.

5.4 Tiempo de deshidratación

5.4.1 Periodo de velocidad constante

Durante el periodo de secado de velocidad constante, los fenómenos de transporte que tiene lugar son la transferencia de materia de vapor de agua hacia el medio ambiente desde la superficie del producto a través de una película de aire que rodea el material y la transferencia de calor a través del sólido. Mientras dura el proceso de secado, la superficie del material permanece saturada de agua, ya que la velocidad de movimiento del agua desde el interior del sólido es suficiente para compensar el agua evaporada en la superficie. Si se supone que solo existe transferencia de calor hacia la superficie del sólido es suficiente por convección desde el aire caliente y transferencia de materia desde la superficie hacia el aire caliente los balances de materia y calor se podrá expresar como ^[1].

$$q = hA(T - T_w) \quad (4.15)$$

$$N_a = K_y(Y_w - Y) \quad (4.16)$$

En las que h es el coeficiente de transmisión de calor, A es el área que se esta secando, T_w es la temperatura de bulbo húmedo, T es la temperatura de secado, N_a es la densidad de flujo de vapor de agua, Y_w el contenido de humedad del aire en la superficie del sólido, Y el contenido de humedad del aire en el seno de la corriente de secado, y K_y el coeficiente de transferencia de materia ^[1].

El calor necesario para vaporizar el agua en la superficie del producto se puede expresar como:

$$q = N_a M_a \lambda_w A \quad (4.17)$$

En la que M_a es la masa molecular del agua, λ_w el calor latente de vaporización a la temperatura T_w , y la velocidad de secado en el periodo de velocidad constante se expresa como :

$$R_c = k_y M_b (H_w - H) \quad (4.18)$$

o

$$R_c = \frac{h(T - T_w)}{\lambda_w} = \frac{q}{\lambda_w A} \quad (4.19)$$

En la que M_a es la masa molecular del aire, H_w la humedad correspondiente a la temperatura de bulbo húmedo, y H es la humedad del aire en el seno de la corriente gaseosa. Si no existe transferencia de calor por conducción y radiación, la temperatura del sólido a la temperatura de bulbo húmedo es la del aire durante el periodo de velocidad constante de secado [1].

En los cálculos de secado es imprescindible conocer el coeficiente de transferencia de materia (K_y) [1].

$$\frac{K_y l}{D_{AB}} = 0.664 Re^{1/2} Sc^{1/3} \quad (4.20)$$

La ecuación válida para el flujo laminar paralelo a un plato plano siendo l la longitud del plato en la dirección del flujo, y en la que los módulos de Reynolds y Schmidt están definidos por las expresiones:

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D_{AB}} \quad Re = \frac{d v \rho}{\mu} \quad (4.21)$$

Siendo D_{AB} la difusividad molecular de la mezcla aire agua, d es la longitud

característica o el diámetro, v la velocidad del fluido, ρ la densidad, y μ la viscosidad.

El coeficiente de transmisión de calor puede tenerse mediante la ecuación [25]:

$$h = 0.0204G^{0.8} \quad (4.22)$$

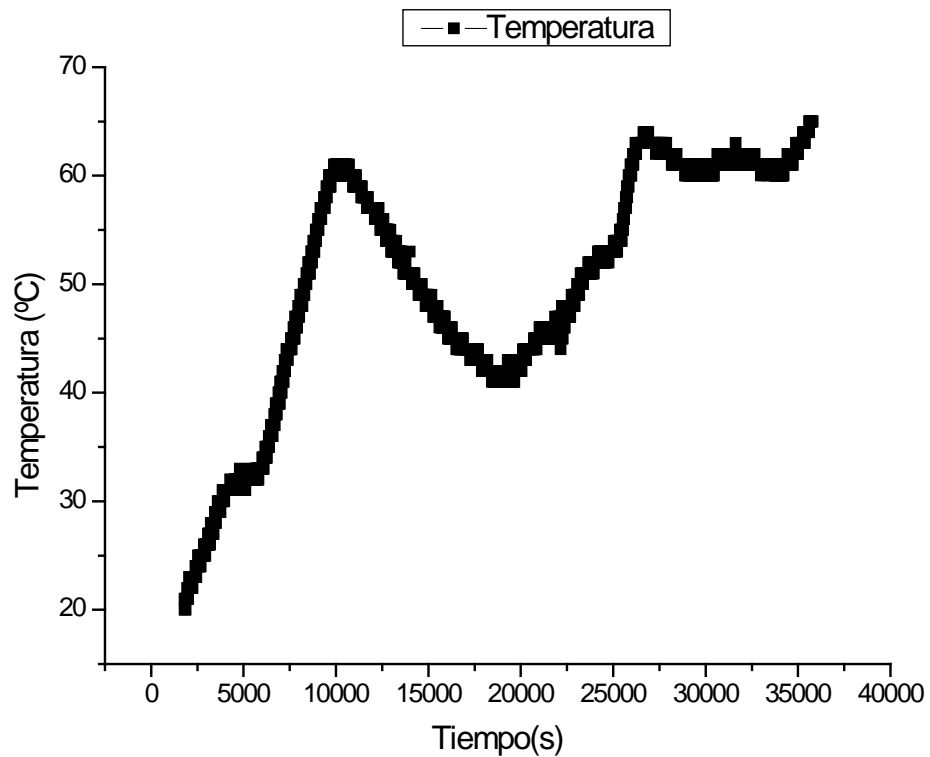
En la que G es la densidad del flujo masica del aire expresada en $\text{kg/m}^2\text{h}$ teniéndose el coeficiente de transmisión de calor en $\text{W/m}^2\text{C}$.

6 ANALISIS Y RESULTADOS

A continuación se observan las diferencias establecidas por los dos tipos de control definidos sobre planta (manual y automático).

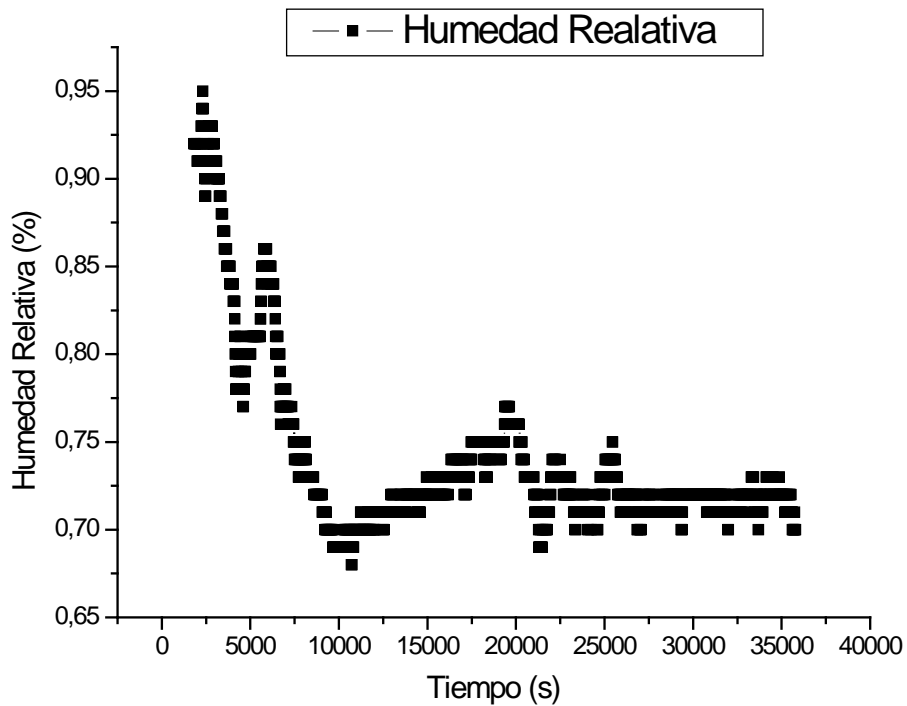
6.1 Control manual

Figura 35. Respuesta del sistema en estado manual



La figura 35 muestra el comportamiento de la temperatura dentro del sistema (deshidratador), en esta se puede observar los cambios bruscos antes de alcanzar el estado de estable, superando ampliamente el límite máximo de temperatura de deshidratación predeterminados para una gran cantidad de alimentos. De igual modo el tiempo de estabilización del sistema se alcanza en un tiempo aproximado de 5 horas.

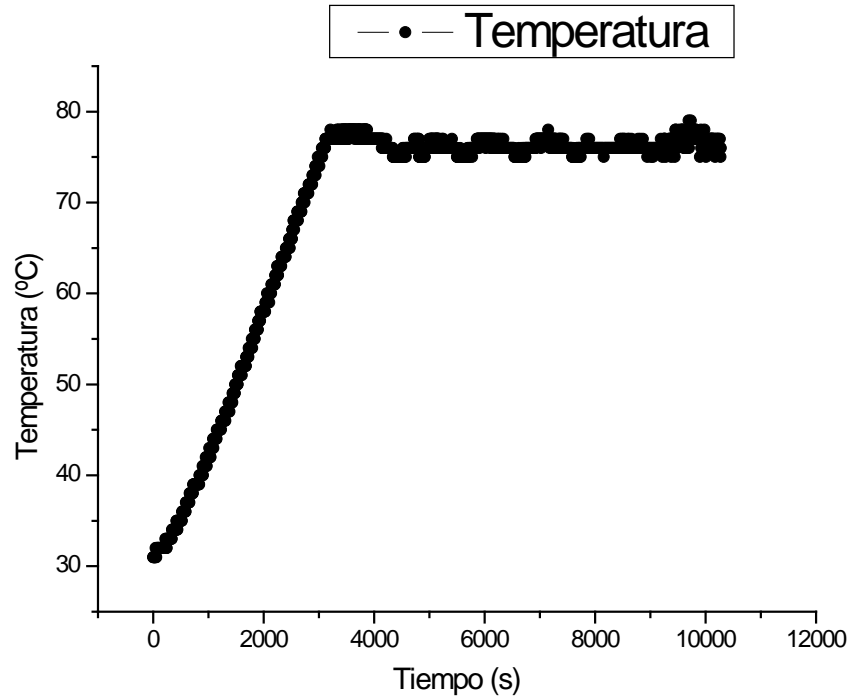
Figura 36. Respuesta de humedad relativa en el sistema.



La figura 36 muestra el comportamiento de humedad relativa en función del tiempo en el interior del sistema, es posible observar que inicialmente registra la humedad relativa del medio, incrementándose hasta alcanzar un máximo debido al aporte de vapor de agua que pierde el alimento (uchuva), luego de este estado, el sistema por acción del incremento de la temperatura y evacuación del aire forzado por efecto del extractor, presenta un decremento de la humedad relativa en el interior de la cámara de deshidratación, tal decremento es llevado hasta cierto punto sin alcanzar el valor determinado para la humedad crítica establecida teóricamente, dada por las condiciones de diseño del equipo.

6.2 Control Automático

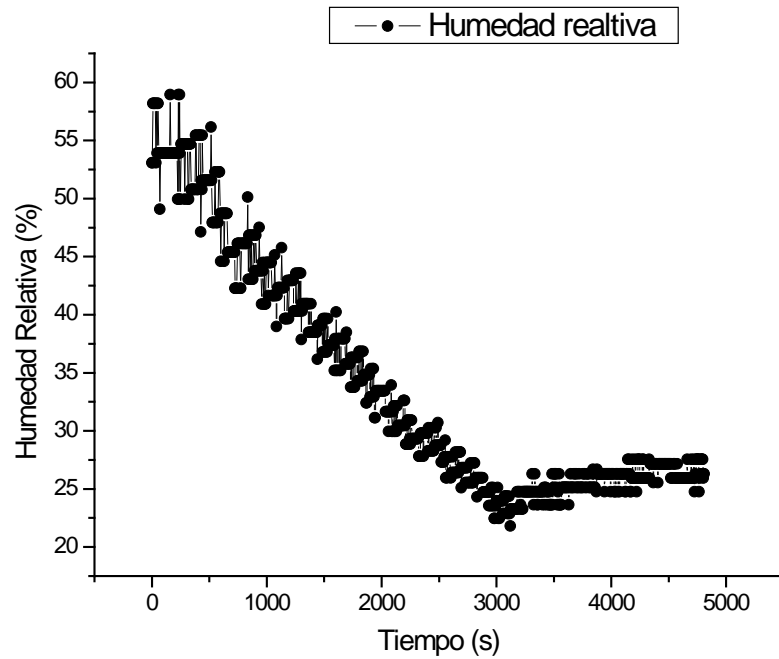
Figura 37. Respuesta del sistema en estado automático



La acción de control ejercida sobre el sistema permite obtener un tiempo de estabilización mucho menor (41 minutos), la figura 37 muestra un pequeño salto diferencial alrededor del punto de operación establecido por el usuario (set – point 80°C), permitiendo de esta manera un mejor proceso de deshidratación de alimentos.

Debido al problema presentado en la medida de la humedad relativa por el sensor debido a las condiciones ya establecidas, se hizo necesario buscar un método alternativo en la búsqueda de esta variable, para ello se utilizó la ecuación 4.2, obteniendo valores aproximados descritos por la teoría, los cuales se presentan en la figura 38, esta indica el decremento real de la humedad relativa del alimento con respecto al tiempo, indicando que está por finalizar la primera etapa de secado (etapa de velocidad constante).

Figura 38. Humedad relativa calculada por la carta psicrométrica digital



El equipo con las nuevas adaptaciones se presenta en la siguiente figura



7 MANUAL DE USUARIO

El software proporciona la posibilidad de colocar el sistema en dos estados los cuales son: automático o manual, a continuación se describirá el funcionamiento de cada uno de estos, y las funciones asignadas a cada tecla.

7.1 Teclas de configuración

A: Tecla definida para ingresar a cualquier opción que aparezca en el menú (Enter).

B: Tecla definida para corregir el valor de un numero mal ingresado (Borrado).

C: Tecla definida para cancelar cualquiera de los dos estados ya se automático o manual (Cancel).

D: Tecla definida para el ingreso de tiempo en minutos (12:58).

#,*: No definidos.

Pasos a seguir

- Revisar que el sistema electrónico se encuentre alimentado a la red eléctrica.
- Abrir la llave de gas principal para dar paso al GLP (gas propano).
- Encender el sistema presionando el botón blanco el cual se encuentra en el frente del panel de control, el led en la parte frontal debe estar encendido.
- Aparecerá un letrero en la pantalla de cristal liquido informando el estado de la válvula, el sistema no continuará con el proceso hasta que ésta sea cerrada automáticamente por el controlador, esto tardara unos cuantos minutos en caso que la válvula halla sido manipulada por alguna persona, de lo contrario el sistema debe enviar un mensaje indicando que la válvula se encuentra cerrada.
- Seguidamente aparecerán letreros visibles en la pantalla de cristal líquido indicando los números y las letras que deben ser presionadas para acceder a una de las dos opciones con que cuenta el sistema.
- Después de leer las indicaciones el usuario deberá presionar los números establecidos por el controlador y la letra de acceso a los mismos.

7.2 Características del estado manual

En este estado el sistema cuenta con la supervisión de las variables física en la pantalla de cristal líquido (panel frontal).

El sistema enviara datos cada tres segundos dando información de la evolución de estas variables en ventanas graficas, además cuenta con el almacenamiento de los valores de temperatura y humedad.

En caso de terminar el proceso manual el sistema puede ser apagado oprimiendo el botón de encendido.

7.2.1 parámetros a tener en cuenta

- La válvula de control debe estar permanentemente cerrada, pues en el encendido del sistema este tuvo que ser previamente cerrado.
- Conexión del cable de comunicación ajustado al chasis del sistema.
- Retirara el sensor de humedad relativa debido a que en este estado el sistema no se hace cargo del control de temperatura, siendo propenso a daños por el exceso de temperatura en el sistema manual (Temperatura limite 80° de soporte para el sensor de Humedad).

Al presiona la tecla **C** el usuario tiene la posibilidad de regresar a la elección de los dos estados de control

7.4 Estado automático

El controlador tiene la capacidad de mantener la temperatura establecida por el usuario y posee también las características del estado manual en cuanto al envío de datos.

7.4.1 Características del estado automático

Al ingresar a esta parte del menú el usuario será instruido por el controlador para el ingreso del valor tanto de temperatura como de tiempo de duración del proceso, éste cuenta con ciertos parámetros de operación.

7.4.2 Parámetros a tener en cuenta

- El rango de operación esta entre 30 y 80 grados centigrados, para temperaturas mayores o menores el sistema no responderá.
- Si el usuario presiona una tecla diferente a la establecida aparecerá en la pantalla los pasos a seguir para establecer una temperatura deseada en el deshidratador.
- Seguidamente el usuario deberá incluir el tiempo de deshidratación conveniente para cada alimento donde el rango va hasta 12 horas 59 minutos.

Ejemplo para el ingreso de tiempo

Si se desea colocar 3 horas y 25 minutos las teclas a presionar son:

03 seguidamente oprimir la tecla D: y luego 25 (: indica el tiempo en minutos) y luego oprimir la tecla **A**, en caso de equivocación, el usuario podrá borrar el tiempo con la tecla **B** y volver a digitar.

Si se desea colocar solamente tiempo exacto como 10 horas las teclas a presionar son:

10 seguidamente oprimir la tecla D: y luego 00 e igual que en el anterior caso.

Si se desea colocar un tiempo de deshidratación de unos cuantos minutos como 56 las teclas a presionar son:

00 seguidamente oprimir la tecla D: y luego 56 e igual en los casos anteriores.

Al introducir estos parámetros el sistema se encargara del control de temperatura hasta que el tiempo termine o el sensor de humedad relativa marque el 17% de la humedad en el recinto.

Al finalizar aparecerá un letrero correspondiente a la finalización del proceso junto

con un informe del estado de la válvula que automáticamente será cerrada, luego la pantalla de la LCD se encontrara en color azul lo cual significa que se hace necesario cerrar la válvula principal.

8 CONCLUSIONES

1. La adaptación del sistema permite dar una mayor confiabilidad al proceso de secado de alimentos del deshidratador Comek de la planta piloto en la FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS debido a la adecuada aplicación de la tecnología a los procesos de conservación.
2. La aplicación de algunos conocimientos físicos como la termodinámica nos lleva al entendimiento del proceso de deshidratación, para abordar el problema de múltiples maneras, y dar una solución efectiva sin recurrir de manera extrema a la medición de algunas variables como energías internas, entalpías entre otras.
3. Este estudio y su aplicación permitirá al usuario la facilidad de obtener una base de datos de la mayor parte de variables físicas y parámetros propios de este proceso de conservación de alimentos, además de un entorno agradable el cual permita registrar en cualquier instante una de las variables o parámetros que se maneja.
4. El control efectivo de las variables física (temperatura y humedad), permite la optimización del proceso permitiendo el fácil desempeño del usuario dentro de la planta. Con los resultados obtenidos se genera un lazo de cercanía entre los programas de Ing. Física e Ing. Agroindustrial de la Universidad del Cauca.

BIBLIOGRAFIA

1. BARBOSA C, Gustavo V. Deshidratación de alimentos. Zaragoza. Acribia 2000.
2. BRENNAN, Gustavo. Las operaciones de la ingeniería de los alimentos. Zaragoza. Acribia. 1980.
3. CABRERA, Leila y CARDOSO, Ana. Influencia de los parámetros de secado sobre la calidad de dos variedades de cebolla deshidratada, 1985.
4. DOEBELIN, E. Diseño y Aplicación de Sistemas de Medición. México 1980.
5. EARLE, R. Ingeniería de Alimentos. Zaragoza, Acribia, 1987.
6. FELLOWS P. Tecnología del procesado de los alimentos: Principios y prácticas. Zaragoza, Acribia ,1994.
7. GEANKOPLIS, C.J. Drying of process materials. En Transport Process and Unit Operations, Boston, Allyn and Bacon, 1983.
8. Industrial combustion and Directives of the European Community, Barcelona, Organiza Ins. Petroquímica aplicada UPC y In. Français Pétrole. 19-21 Junio.1990.
9. LAZARO, Antonio. LabVIEW 6i, Programación Gráfica para el Control de Instrumentación. Madrid, Paraninfo, 2001.
10. MADARIAGA A, J. F. El secado de biomasa residual de la caña de azúcar. Ciudad de la Habana. Tesis para C. Dr. C. T. ISJAE. Fac. de Ing. Mecánica, 1995.
11. MORRIS, Alan S. Principios de mediciones e instrumentacion. Mexico Pearson Educación, 2002.
12. NOVOA R. y HABER V. "Estudio de la cinética de fermentación y secado

del cacao". Rev. Tecnología Química. I.S.P. Madrid. 1995.

13. OGATA, Katsuhiko. Dinámica de Sistemas. México, Prentice-Hall hispanoamericana, S.A, 2003.
14. PISTONO, J. Deseccación de los productos vegetales. Barcelona, Reverté, 1955.
15. RANZNEVIC, K. "Handbook of Thermodynamics Tables and Chartes". Hemisphere Publ. Corp., Whasignton, D.C, 1987.
16. SHARMA Shrik. Operaciones unitarias y prácticas de laboratorio. Mexico, Limusa 2003.
17. SING R, Paul. Introducción a la ingeniería de alimentos. Zaragoza, Acribia, 1997.
18. VALIENTE. Operaciones aire – agua, Métodos de Producción de Frío, Programa Universitario de Alimentos, UNAM, México, 1993.

ANEXO A

Esquemático

Figura 39. Fuente de poder del controlador

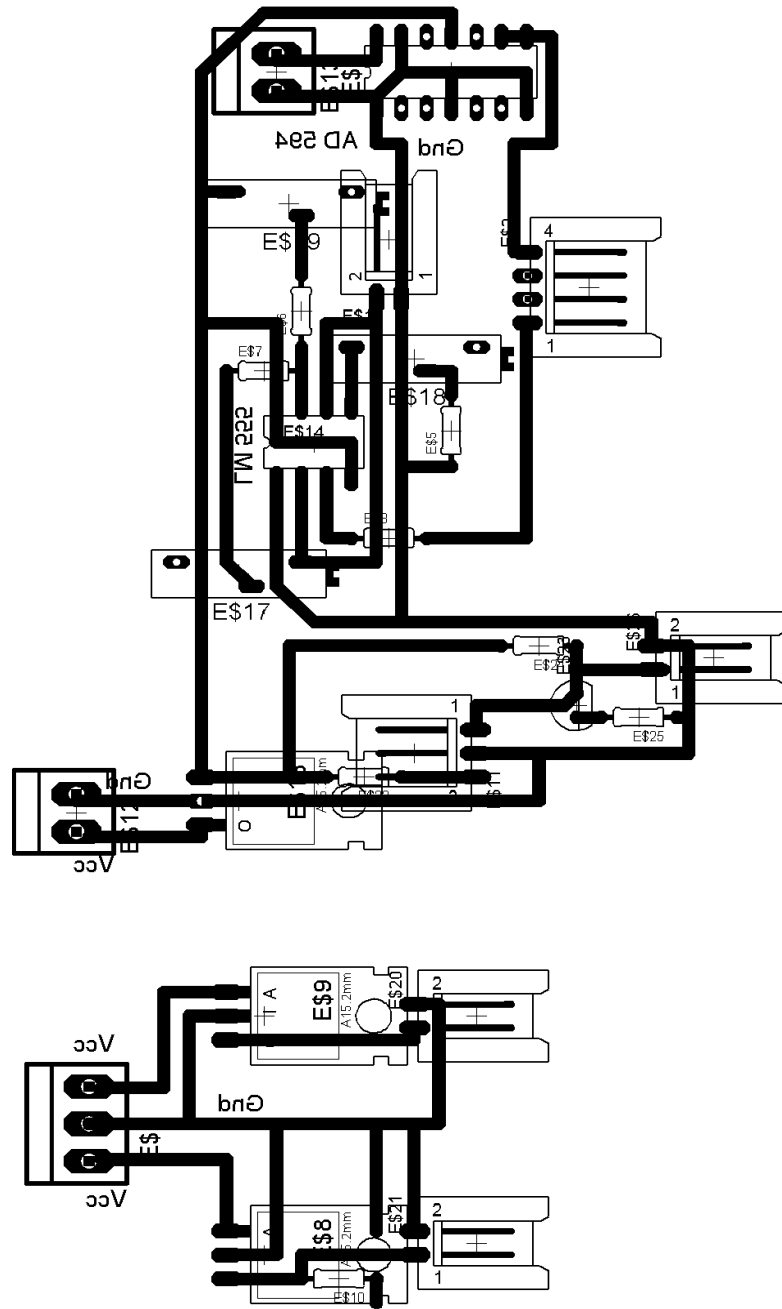


Figura 40. Tarjeta de control de potencia y comunicación del controlador

