

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería en Electrónica



Investigación sobre el efecto de la humedad, la temperatura y el caudal de aire en el tiempo de secado del café en guardiola

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura

Donald Siles Granados

Cartago, Marzo de 2007

INSTITUTO TECNOLOGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA

PROYECTO DE GRADUACIÓN

TRIBUNAL EVALUADOR

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

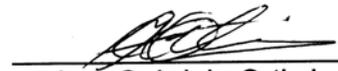
Miembros del Tribunal

Firma


Dr.-Ing. José Pablo Alvarado Moya

Profesor lector

Firma


Ing. Gabriela Ortiz León, M.Sc.

Profesor lector

Firma


Lic. Ing. Miguel Hernández Rivera

Profesor asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica.

Cartago, 19 de marzo de 2007

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Orosi, 22 de marzo de 2007



Donald Jesús Siles Granados

Céd: 1-1190-0216

RESUMEN

La empresa F.J.Orlich & Hnos. Ltda. se dedica al beneficiado de café, entre su maquinaria cuenta con 8 guardiolas para el secado del grano, etapa que constituye el “cuello de botella” del beneficio por requerir más tiempo que el resto del proceso. El tiempo de secado difiere, algunas veces, en más de un 50%, tanto para una misma guardiola como de una guardiola a otra.

En este documento se justifica porque las diferencias en la humedad de entrada y salida de la etapa de secado son las principales causantes de la discrepancia en el tiempo. Se explica la metodología de medición y características del hardware y software usado. Además se muestra el análisis de las mediciones realizadas y el procedimiento seguido para determinar un modelo matemático que explica el comportamiento de la humedad en función de las variables medidas a lo largo del tiempo.

Palabras claves: Guardiola, sensores, temperatura, velocidad de aire, humedad.

ABSTRACT

The company F.J Orlich & Hns. Ltda is dedicated to coffee mill, within it's equipment it has 8 machines, called "guardiolas", for the process of drying the coffee grain. This phase is the bottleneck of the production because it takes more time than the other tasks. Drying time is different between each "guardiola" and each lot of grains, sometimes it takes 50% more time.

This document justifies why the differences in humidity of the input and output of the drying stage are the main causes of the discrepancy in time. It explains measurements methodology and the characteristics of the used hardware and software. Also, it shows the analysis of the taken measurements and the procedure followed to determine a mathematical model that explains the behavior of the humidity versus the variables measure against time.

Keywords: Guardiola, sensors, temperature, air velocity, humidity.

DEDICATORIA

A mis padres, por su apoyo a lo largo de mi vida.

Donald

AGRADECIMIENTOS

Mencionar nombres sería muy injusto de mi parte, ya que han sido muchas las personas involucradas de una u otra manera en este proyecto y, sin quererlo, podría dejar alguna por fuera.

Para todos los que tuvieron parte en este proyecto, personal de la planta, oficinas, gerencia, amigos, familiares, profesores y demás personas involucradas, para todos, mi más sincero agradecimiento, su aporte fue importante.

Donald

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1: Introducción	12
1.1. Descripción del proceso de secado del café	12
1.2. Problema existente e importancia de su solución	14
1.2.1. Marco del problema	14
1.2.2. Descripción sintética del problema	14
1.2.3. Hipótesis planteadas	14
1.3. Solución seleccionada	15
Capítulo 2: Meta y Objetivos	17
2.1. Meta	17
2.2. Objetivo general	17
2.3. Objetivos específicos	17
Capítulo 3: Limitantes en el desarrollo del proyecto.....	18
Capítulo 4: Descripción detallada de la solución.....	19
4.1. Metodología de medición	19
4.1.1. Temperatura del aire que ingresa a la guardiola	19
4.1.2. Caudal del aire que ingresa a la guardiola	19
4.1.3. Temperatura del café	20
4.1.4. Humedad del café	21
4.2. Descripción del hardware diseñado	22
4.2.1. Medición de la temperatura del aire	22
4.2.2. Equipo de medición	23
4.3. Descripción del software	29
4.3.1. Programa del PIC	30
4.3.2. Programa de la PC	33
4.3.3. Programa de la neurona utilizada en la obtención del modelo	34
4.4. Frecuencia de muestreo	38
4.4.1. Considerando la teoría del procesamiento digital de señales	38
4.4.2. Considerando la teoría estadística	41
4.5. Obtención y validación del modelo matemático	43
Capítulo 5: Análisis de Resultados.....	46
5.1. Sobre las condiciones de trabajo de cada guardiola estudiada	46
5.2. Sobre la humedad del café al ingresar y salir de la guardiola	52
5.3. Sobre la temperatura del café al ingresar a la guardiola.....	58
5.4. Sobre el modelo matemático	60
Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones	75
6.1. Conclusiones	75
6.2. Recomendaciones	75
Bibliografía	76
Apéndices	78
A.1. Introducción a las redes neuronales	78
A.1.1 Redes neuronales biológicas y artificiales	78
A.2. Manual de usuario	80
A.3. Información sobre la empresa	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Fotografías del cilindro interno de una guardiola. A la izquierda la vista a través de una de las compuertas de carga y descarga y a la derecha el detalle del cilindro.	12
Figura 1.2 Dibujo de una guardiola	13
Figura 4.1 Sensor de velocidad de aire modelo 641-6 marca Dwyer	20
Figura 4.2 Analizador de humedad modelo Dole 400 marca Seedburo Equipment Company	21
Figura 4.3 Colocación de los sensores utilizados para medir la temperatura del aire.....	22
Figura 4.4 Circuito utilizado para la medición de temperatura y su conversión a corriente.....	23
Figura 4.5 Diagrama de bloques del circuito usado como solución.	24
Figura 4.6 Circuito utilizado para la primera etapa del multiplexado analógico.....	25
Figura 4.7 Circuito utilizado para la segunda etapa del multiplexado analógico.	27
Figura 4.8 Circuito utilizado en la etapa filtrado.	28
Figura 4.9 Circuito utilizado para la conexión del PIC y el MAX232.....	29
Figura 4.10 Diagrama de flujo del programa del PIC	30
Figura 4.11 Diagrama de flujo del método de leer datos desde los sensores.....	33
Figura 4.12 Diagrama de flujo del algoritmo de actualización de pesos de la neurona.....	37
Figura 4.13 Respuesta real, curva de mejor ajuste y curva	39
Figura 4.14 Gráfica de las armónicas del sistema	40
Figura 5.1 Vista lateral del horno que alimenta las guardiolas.....	49
Figura 5.2 Temperatura del aire en la entrada 1 de las guardiolas 2, 6 y 8 a lo largo del tiempo	50
Figura 5.3 Comportamiento del caudal de la guardiola 6 al apagar el abanico.....	51
Figura 5.4 Vista superior del horno y distribución de los ductos de las guardiolas	51
Figura 5.5 Histograma del lapso en que la humedad es mayor a 40% (con base en la Tabla 5.3).....	55
Figura 5.6 Histograma de la humedad de salida (con base en la Tabla 5.3)	56
Figura 5.7 Histograma del lapso en que la humedad es menor a 11% (con base en la Tabla 5.3).....	57
Figura 5.8 Comportamiento de la temperatura de la masa del café cuando no se detiene el horno	59
Figura 5.9 Comportamiento de la temperatura de la masa del café cuando.....	59
Figura 5.10 Gráfica del comportamiento de la humedad de la carga 1 a lo largo del tiempo	62
Figura 5.11 Gráfica del comportamiento de la humedad de la carga 2 a lo largo del tiempo	63
Figura 5.12 Gráfica del comportamiento de la humedad de la carga 3 a lo largo del tiempo	64

Figura 5.13 Gráfica del comportamiento de la humedad de la carga 4 a lo largo del tiempo	65
Figura 5.14 Gráfica del comportamiento de la humedad de la carga 1 a lo largo del tiempo	66
Figura 5.15 Gráfica del comportamiento de la humedad de la carga 2 a lo largo del tiempo	67
Figura 5.16 Gráfica del comportamiento de la humedad de la carga 3 a lo largo del tiempo	68
Figura 5.17 Gráfica del comportamiento de la humedad de la carga 1 a lo largo del tiempo	69
Figura 5.18 Gráfica del comportamiento de la humedad de la carga 2 a lo largo del tiempo	70
Figura 5.19 Gráfica del comportamiento de la humedad de la carga 3 a lo largo del tiempo	71
Figura 5.20 Gráfica del comportamiento de la humedad de la carga 4 a lo largo del tiempo	72
Figura A.1 Neuronas biológicas	78
Figura A.2 Comparación entre una neurona biológica y una artificial	79
Figura A.3 Interfaz gráfica al iniciar el programa.....	81
Figura A.4 Interfaz gráfica al visualizar las mediciones hechas desde el módulo 1	82
Figura A.5 Ventana de configuración de las entradas analógicas.....	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1	Códigos de operación utilizados y su función	31
Tabla 4.2	Estado lógico de las salidas A, B y C para cada iteración del método del "Leer Datos"	33
Tabla 4.3	Armónicas, su frecuencia y amplitud normalizada obtenidas por simulación	40
Tabla 5.1	Valores promedios y desviaciones estándar de las temperaturas y caudales medidos para cada carga	47
Tabla 5.2	Promedios y desviaciones estándar de las temperaturas y caudales para cada guardiola	48
Tabla 5.3	Resultados obtenidos con respecto a las duraciones de cada carga.....	53
Tabla 5.4	Valor promedio y desviación estándar por guardiola del tiempo de secado	55
Tabla 5.5	Características de los modelos propuestos y el error obtenido con cada uno de ellos.....	60
Tabla 5.6	Resultados obtenidos al validar los modelos determinados.....	61

Capítulo 1: Introducción

1.1. Descripción del proceso de secado del café

La empresa F.J. Orlich & Hnos. Ltda., Planta Santa María, utiliza 8 guardiolas para el secado del café. Estas son alimentadas con aire caliente que circula por una tubería de hierro cuyo diámetro es 16" (40.64cm) y que está recubierta en algunas partes del trayecto con fibra de vidrio. El horno se alimenta principalmente con leña seca. Sin embargo, cuando la temperatura del aire disminuye de 60°C, de forma automática, también se alimenta con cascarilla (cáscara que recubre al grano en oro y que es un "desecho" del proceso de beneficiado) para que la temperatura del aire no disminuya más.

Todas las guardiolas se alimentan por un mismo horno. Por medio de abanicos se lleva del aire del horno a la guardiola. Hay una tubería y un abanico por cada guardiola. Todas las tuberías del aire recorren diferentes trayectos y los abanicos que se utilizan también son diferentes. Una guardiola está constituida por dos cilindros concéntricos. El cilindro interno tiene ramificaciones perforadas que salen de él, como se muestra en la Figura 1.1. Sobre cada guardiola hay una tolva para almacenar el café antes de ser secado en caso de que la guardiola esté ocupada.



Figura 1.1 Fotografías del cilindro interno de una guardiola. A la izquierda la vista a través de una de las compuertas de carga y descarga y a la derecha el detalle del cilindro.

El aire caliente ingresa al cilindro interior, atraviesa las ramificaciones y sale por la superficie curva del cilindro exterior, circulando por el café y secándolo. En la Figura 1.2 se muestra un dibujo de una guardiola con cada una de sus partes.

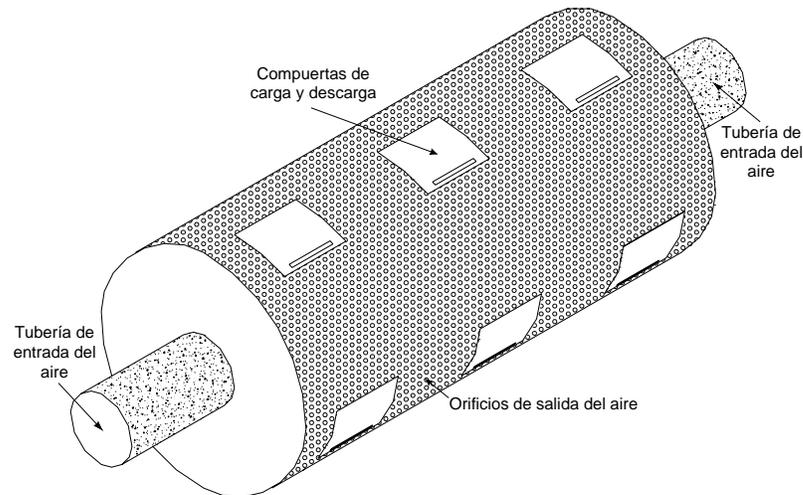


Figura 1.2 Dibujo de una guardiola

Previo a esta etapa se encuentra el presecado. En él se inicia el proceso de secado del grano. Para este fin se cuenta con dos máquinas llamadas “Presecadora Berico” y “Presecadora American”. Estas máquinas también se alimentan con aire caliente proveniente de un horno (diferente del que alimenta las guardiolas). En esta etapa el café permanece por 4 horas a menos que la máquina no pueda descargarse por saturación del proceso (guardiolas y tolvas llenas). En este caso el tiempo de presecado se extiende hasta que la máquina pueda ser descargada. Bajo estas condiciones el tiempo de presecado llega a ser, en algunos casos, de 14 ó 16 horas.

A la etapa de presecado, según literatura, el café ingresa con una humedad entre 50% y 55%^[1]. La humedad de salida de esta etapa, para las condiciones de trabajo actuales del beneficio, se desconoce puesto que no se cuenta con un registro de mediciones. En la empresa solamente se mide la humedad para determinar el instante de descarga de la guardiola, la cual debe estar entre 10% y 11% (medida para café “oro”) indistintamente de la calidad del mismo. Se considera una “carga” a la cantidad de café que ingresa a la guardiola para ser secada.

1.2. Problema existente e importancia de su solución

1.2.1. Marco del problema

El tiempo de secado en guardiola de cada carga varía hasta en un 50%. Esta variación se da tanto para cargas secadas en una misma guardiola como para cargas secadas en diferentes guardiolas. Las causas de esta variación no se conocen. Esto retrasa el proceso productivo, pues el tiempo extra que se utiliza para secar una carga no se está aprovechando para secar la carga siguiente, lo que implica ineficiencia en el proceso.

En una etapa de investigación previa se determinaron 13 variables que, con base en la experiencia del personal de planta, podrían afectar el tiempo de secado. A partir de ellas se hizo una selección, manteniendo aquellas variables que podrían afectar en mayor medida, por lo que se decidió analizar las siguientes 4 variables:

- a. Caudal de aire que ingresa a la guardiola.
- b. Temperatura del aire que ingresa a la guardiola.
- c. Humedad del café al ingresar a la guardiola.
- d. Temperatura del café al ingresar a la guardiola.

1.2.2. Descripción sintética del problema

Se desconocen las variables que afectan el tiempo de secado del café de calidad especial, primera y segunda, en guardiola.

1.2.3. Hipótesis planteadas

Las hipótesis de esta investigación son las siguientes:

- a. La diferencia en el tiempo de secado en guardiola se debe a la diferencias en el caudal y la temperatura del aire caliente introducido a cada guardiola.

- b. La diferencia en la humedad y la temperatura de las cargas introducidas a las guardiolas es la principal razón por la que los tiempos de secado difieren de una guardiola a otra.

1.3. Solución seleccionada

Puesto que el estudio se basa en mediciones del proceso y, al iniciar el proyecto, no se contaba en la planta con sensores ni equipo de medición alguno, en la primera etapa debió diseñarse el hardware necesario. Para éste había básicamente dos propuestas:

- a. Realizar módulos pequeños de adquisición de datos, constituidos básicamente por un ADC, una unidad de control (ambos en un PIC) y dos memorias EEPROM. Las mediciones se toman según un intervalo de tiempo predefinido (controlado con el PIC) y se almacenan en una de las dos memorias disponibles. Al llenar una memoria se enciende un LED indicando la situación y se continúa guardando la información en la otra memoria. Cada cierto tiempo, según la capacidad de la memoria y el intervalo de muestreo, las mediciones deben descargarse desde la memoria hasta una computadora, la EEPROM debe ser retornada al módulo para almacenar en ella las mediciones siguientes. Estos módulos son colocados en puntos estratégicos para disminuir el cableado.
- b. Las señales de los sensores son centralizadas en un solo punto, indistintamente de la distancia entre el sensor y este punto. Allí son convertidas a digital y enviadas directamente a una computadora donde son almacenadas en una base de datos. Los intervalos de muestreo son generados con la computadora.

Al analizar ambas propuestas de solución se puede notar que la primera necesita 180 metros menos de cable, lo que reduce los costos, pero presenta la desventaja de que requiere de una persona para descargar los datos a la computadora, lo que lo vuelve ineficiente pues si por alguna razón los datos no eran descargados a tiempo, al estar las dos memorias llenas, el muestreo se detendría y se perderían mediciones.

Por otra parte, la segunda propuesta de solución requiere 180 metros más de cable que la opción anterior, lo que implica aproximadamente \$200,000,00 más en materiales, así como una semana más de trabajo en la planta para la implementación. Sin embargo presenta la ventaja de no depender de una persona más que para el encendido del hardware y la configuración inicial del mismo, a partir de este punto el mismo funcionaría de forma independiente.

Considerando las ventajas y desventajas de cada propuesta se decidió implementar la segunda opción pues la independencia del factor humano es un aspecto deseable en el equipo.

Capítulo 2: Meta y Objetivos

2.1. Meta

Establecer las variables que afectan en más de 2 horas el tiempo de secado en guardiola, para reducir el retraso existente en esta etapa del proceso productivo, en la empresa F.J.Orlich & Hnos. Ltda., Planta Santa María.

2.2. Objetivo general

Determinar el efecto del caudal y temperatura del aire que ingresa a la guardiola y de la humedad y temperatura del grano, en el tiempo de secado del café de calidad especial, primera y segunda, en la empresa F.J.Orlich & Hnos. Ltda., Planta Santa María.

2.3. Objetivos específicos

- a. Determinar la metodología de medición que permita identificar el efecto del caudal y temperatura del aire que ingresa a la guardiola y la humedad y temperatura del café al entrar a la misma, en el tiempo de secado del café de calidad especial, primera y segunda en la empresa F.J.Orlich & Hnos. Ltda., Planta Santa María.
- b. Desarrollar el hardware y software necesario para medir el caudal, la temperatura y la humedad deseadas, en la etapa de secado de la empresa F.J.Orlich & Hnos. Ltda., Planta Santa María
- c. Determinar el modelo matemático del sistema en función del caudal y temperatura del aire que ingresa a la guardiola y la humedad y temperatura del café al entrar a la misma.

Capítulo 3: Limitantes en el desarrollo del proyecto

Una cosecha no uniforme provoca que las máquinas no trabajen a un 100% de su capacidad. De ahí que si no se mide la cantidad de café en la guardiola se limita el número de cargas para análisis pues las máquinas no siempre estarán llenas.

No colocar sensores de humedad y temperatura dentro de la guardiola para que la toma de mediciones sea independiente del factor humano limita la cantidad de mediciones a tomar y en consecuencia la información obtenida respecto al proceso.

Un equipo de medición con un rango que no abarque la totalidad de las magnitudes a medir (la magnitud se sale de la escala) no permite obtener información completa sobre las cargas para análisis.

No trabajar con la totalidad de la planta implica una disminución en la variedad de las condiciones de trabajo de las cargas para análisis. Los resultados están limitados a las máquinas estudiadas y no pueden generalizarse para las demás pues se desconocen las condiciones de trabajo de la maquinaria no medida.

Capítulo 4: Descripción detallada de la solución

En este capítulo se expondrá lo referente a la metodología de medición utilizada para comprobar las hipótesis planteadas así como lo referente al hardware y software implementado.

4.1. Metodología de medición

4.1.1. Temperatura del aire que ingresa a la guardiola

Para esta medición se colocó dentro del ducto el sensor de temperatura LM35DT^[2]. En el apartado 4.2.1 se presenta una explicación más detallada del circuito utilizado. La lectura se realizó por medio de hardware diseñado (que también se explicará en el apartado 4.2.1) y se almacenó en una base de datos cada 6 segundos. La justificación del tiempo de muestreo se encuentra en el apartado 4.4.

4.1.2. Caudal del aire que ingresa a la guardiola

La medición del caudal de aire se realizó de forma indirecta, con base en la ecuación (4.1), puesto que el área transversal del ducto es constante (0.1184m^2) la variable a medir fue la velocidad del aire. Ésta medición se realizó con el transmisor de velocidad de aire modelo 641-6^[3] marca Dwyer, mostrado en la Figura 4.1, la ecuación (4.2) describe su señal de salida.

$$\text{Caudal} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] = \text{Velocidad} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] * \text{Área Transversal} \left[\text{m}^2 \right] \quad (4.1)$$

$$I_{out} \left[\text{mA} \right] = \text{Velocidad del aire} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] * \frac{16\text{mA}}{25\frac{\text{m}}{\text{s}}} + 4\text{mA} \quad (4.2)$$



Figura 4.1 Sensor de velocidad de aire modelo 641-6 marca Dwyer ^[4]

Al igual que para el caso de la temperatura del aire, la lectura se realizó por medio del hardware diseñado y se almacenó en una base de datos cada 6 segundos. Este tiempo de muestreo se justifica en el apartado 4.4.

4.1.3. Temperatura del café

Para realizar las mediciones de la temperatura del café al ingresar a la guardiola y durante el proceso de secado se tomó una muestra de café cada 2 horas. Se utilizó un termómetro de inmersión de mercurio marca AllFrance con un rango de medición de -20°C a 110°C y una precisión de 0.5°C , además de un termo para colocar la muestra en él y evitar que el intercambio de calor con el ambiente afecte considerablemente la medición. El procedimiento seguido para cada medición fue el siguiente:

- a. Tomar una muestra y colocarla en el termo. Esperar 5 minutos. El objetivo de esta muestra es simplemente calentar el termo previamente a la lectura para evitar que la temperatura del mismo afecte la medición.
- b. Retornar a la guardiola la primera muestra. Colocar en el termo una segunda muestra e introducir el termómetro en el termo hasta la profundidad indicada en el instrumento.
- c. Esperar 10 minutos.
- d. Realizar la lectura y apuntarla en la hoja correspondiente.
- e. Devolver el café a la guardiola.

4.1.4. Humedad del café

Las mediciones de la humedad del café al ingresar a la guardiola y durante el proceso de secado se tomaron con un analizador de humedad modelo Dole 400 marca Seedburo Equipment Company, como el mostrado en la Figura 4.2. La empresa contaba con este analizador desde antes del inicio del proyecto, por lo que no fue necesaria su compra. La humedad medida fue en café pergamino, esto con el objetivo de no pelar café cada vez que se sacaba una muestra. El procedimiento seguido para cada medición fue el siguiente:

- a. Tomar una muestra de la guardiola y colocarla en el enfriador. Previo a la medición la muestra debe enfriarse para que la temperatura de la muestra no afecte el valor indicado por el analizador de humedad.
- b. Esperar 5 minutos a que el café se enfríe.
- c. Pesar la muestra de café a medir con el analizador de humedad y colocarla dentro del instrumento de medición.
- d. Realizar la lectura y apuntarla en la hoja correspondiente.
- e. Devolver el café a la guardiola.



Figura 4.2 Analizador de humedad modelo Dole 400 marca Seedburo Equipment Company^[5]

4.2. Descripción del hardware diseñado

4.2.1. Medición de la temperatura del aire

Como se mencionó anteriormente, para realizar esta medición se colocó dentro del ducto, en los lugares mostrados en la Figura 4.3, un LM35DT. La tensión de salida de este circuito integrado en función de la temperatura se muestra en (4.3).

$$V_{out} [mV] = \frac{10mV}{^{\circ}C} * Temperatura [^{\circ}C] \quad (4.3)$$

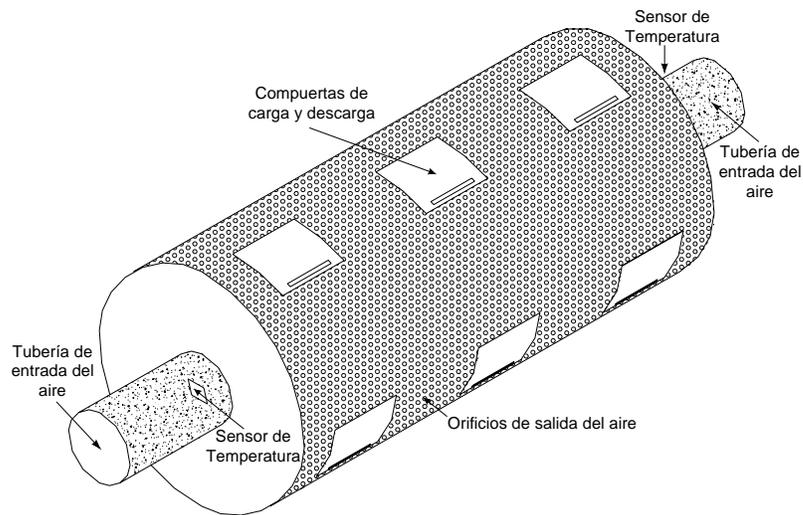


Figura 4.3 Colocación de los sensores utilizados para medir la temperatura del aire

Para un rango entre 0°C y 100°C la salida del sensor máxima es de 1V. Si esta tensión es enviada directamente al punto de recolección de datos la temperatura medida es errónea debido a la caída de tensión en el cable, este error aumenta con la distancia del cable. Por esta razón se decidió utilizar corriente para la transmisión de la medición de la temperatura puesto que su magnitud es la misma en cualquier parte de un circuito serie. El circuito utilizado es el que se muestra en la Figura 4.4. Está constituido por dos fuentes de corriente constante; la primera de ellas es implementada con el LM317^[6] y regulada a 4mA con el potenciómetro (R₆), mientras que la segunda, conectada en paralelo a la anterior, es regulada por la tensión de salida del LM35DT.

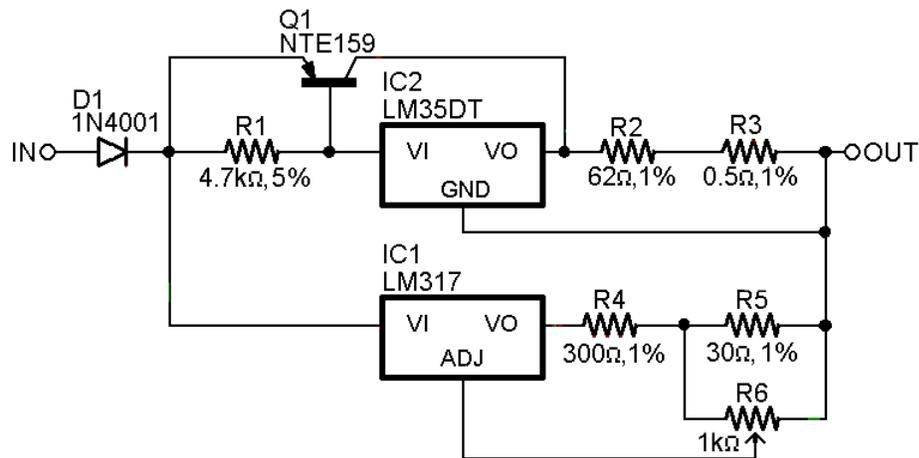


Figura 4.4 Circuito utilizado para la medición de temperatura y su conversión a corriente

Los componentes Q_1 y R_1 evitan que el exceso de corriente a través del pin de salida del sensor de temperatura lo dañe: al “encenderse” Q_1 , se limita la corriente por el sensor y la corriente demandada por la salida es proporcionada a través del transistor. El diodo D_1 protege en caso de que se inviertan los terminales IN y OUT. La ecuación que describe el comportamiento del circuito se muestra en (4.4). De esta forma se obtiene una corriente entre 4mA y 20mA para un rango entre 0°C y 100°C, la relación entre la temperatura y la corriente es lineal.

$$I_{out} [mA] = Temperatura [^{\circ}C] * \frac{0.16mA}{^{\circ}C} + 4mA \quad (4.4)$$

4.2.2. Equipo de medición

Antes de iniciar con la explicación del circuito diseñado se expondrán las características generales que cumple:

- Es capaz de muestrear 24 diferentes entradas analógicas para poder medir, en una posterior etapa, la totalidad de la planta.
- Todas las entradas analógicas son compatibles con sensores tanto de corriente en el rango de 4-20mA como de voltaje en el intervalo de 0-10V.

- c. Se comunica por puerto serie con una computadora para descarga de mediciones y configuración.

Marcadas estas pautas, en la Figura 4.5 se presenta el diagrama de bloques del circuito usado como solución.

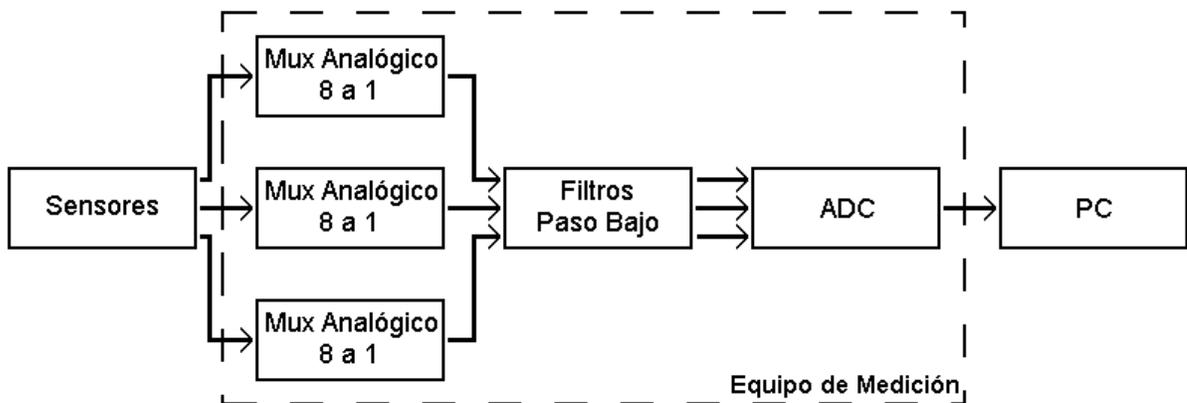


Figura 4.5 Diagrama de bloques del circuito usado como solución.

La etapa constituida por los multiplexores analógicos se encarga de generar 3 señales analógicas a partir de los 24 canales de entrada, para esto usa 3 bloques de multiplexores 8 a 1. Cada bloque cumple con las siguientes características:

- Permite el paso de sólo una de sus 8 diferentes entradas, la selección se hace por medio de 3 señales de control llamadas A , B y C (ver Figura 4.6)
- Es compatible con sensores tanto de corriente como de voltaje. Para indicar el tipo de sensor se utiliza una señal de control adicional llamada \bar{I}/V .
- La señal de salida de este bloque, que contiene la medición a observar en ese momento, es la misma independientemente del tipo de sensor y es de tensión.
- El rango a utilizar para la anterior salida es de 0V a 4V, representando una corriente de 0-20mA o bien una tensión de 0-10V según corresponda.

Bajo estos criterios, cada bloque multiplexor 8 a 1 se compone a su vez de dos etapas, en la primera de ellas se permite el paso de sólo uno de los ocho posibles canales de entrada y se generan dos señales analógicas (I_{Out} y V_{Out}) de acuerdo a la magnitud de salida y tipo del sensor (corriente o voltaje), el circuito se muestra en la Figura 4.6. Sus respectivas salidas (I_{Out} y V_{Out}) son las entradas de la siguiente etapa.

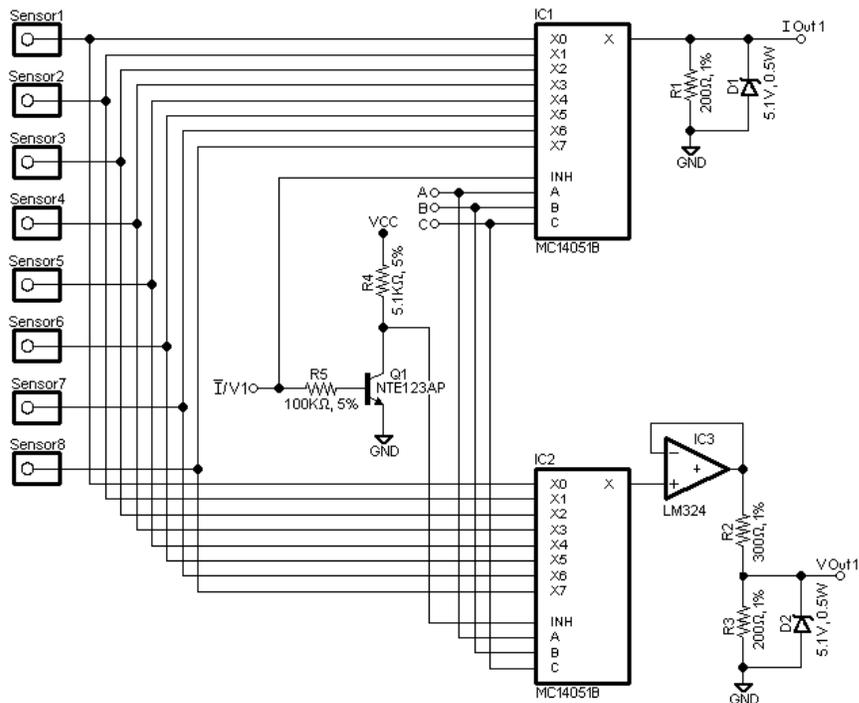


Figura 4.6 Circuito utilizado para la primera etapa del multiplexado analógico.

Cabe resaltar que las señales de control A , B y C son las mismas para los tres bloques de multiplexores mientras que las señales \bar{I}/V_1 , V_{Out1} , I_{Out1} son diferentes para cada uno, en los otros bloques son llamadas \bar{I}/V_2 , V_{Out2} , I_{Out2} , \bar{I}/V_3 , V_{Out3} e I_{Out3} (cuando se refiera a estas señales de forma general se llamarán \bar{I}/V , V_{Out} , I_{Out}). Además, cada vez que se realiza un cambio en A , B o C también se actualiza la señal \bar{I}/V de cada bloque, según el tipo de sensor, éste es indicado por el usuario a través de la PC. Las señales de control son generadas desde un PIC.

Si la señal \bar{I}/V se encuentra en bajo (sensor de corriente), el mux analógico 8 a 1 MC14051B^[7] (IC₂) se encuentra inhabilitado. Con las señales de selección A , B y C se indica el canal a observar y el integrado IC₁ permite el paso de la corriente a través de la entrada respectiva. En R₁ habrá una caída de tensión entre 0.8V y 4V dependiendo del valor de la corriente entregada por el sensor (4-20mA). El diodo zener D₁ de 5.1V es una protección para las etapas posteriores del circuito ya que algunas de ellas (por ejemplo el ADC) no pueden tener en su entrada una tensión mayor a 5V. En I_{Out} se encuentra el valor de la salida del respectivo sensor.

Si la señal \bar{I}/V se encuentra en alto (sensor de voltaje), el funcionamiento del circuito es similar al caso anterior, el circuito IC₁ se encuentra inhabilitado, mientras que IC₂ presenta a su salida la tensión de la entrada respectiva. El seguidor de tensión IC₃ se encarga de acoplar impedancias y evitar pérdidas de la señal del sensor en la resistencia interna (R_{ON}) de IC₂. R₂ y R₃ conforman un divisor de tensión para que la diferencia de potencial en R₃ se encuentre entre 0V y 4V dependiendo del valor de salida del sensor (0-10V). El diodo zener D₂ de 5.1V cumple la misma función que para el caso anterior. En V_{Out} se encuentra el valor de la salida del respectivo sensor.

La función de R₄, R₅ y Q₁ es invertir el valor lógico de la señal \bar{I}/V , de esta forma, y por la conexión utilizada, se garantiza que sólo uno de los integrados IC₁ e IC₂ se encuentra habilitado a la vez, lo que evita pérdidas en la señal de salida del sensor como consecuencia de un divisor de corriente con los integrados.

Puesto que las tensiones de alimentación utilizadas en los multiplexores analógicos fueron $V_{EE} = -5V$ y $V_{CC} = 12V$, para las señales de control de estos dispositivos el nivel de 0 lógico fue de 0V mientras que el 1 lógico fue 12V. Como estas señales provenían del PIC (tensiones entre 0V y 5V) fue necesaria una etapa en la que se ajustaran los niveles de tensión de cada dispositivo. Para esto se utilizaron inversores con transistores, uno por cada señal, la configuración usada es la misma que en R₄, R₅ y Q₁ (Figura 4.6).

En la segunda etapa del multiplexado analógico se permite el paso de una de las señales de salida de cada bloque anterior (I_{Out} o V_{Out}) en función del tipo de sensor conectado a la entrada. El circuito utilizado se muestra en la Figura 4.7.

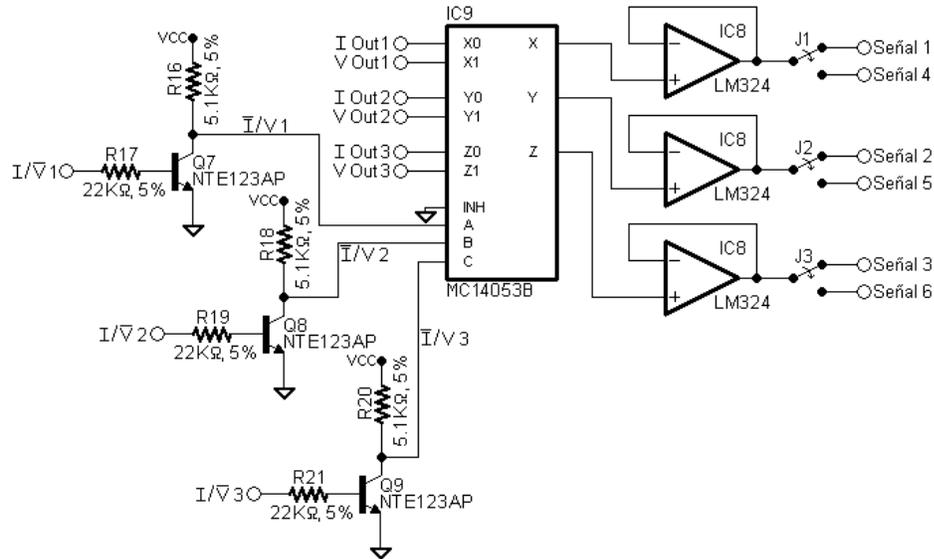


Figura 4.7 Circuito utilizado para la segunda etapa del multiplexado analógico.

Por medio del MC14053B^[8] (3 mux analógicos 2 a 1) se permite el paso de I_{Out} o de V_{Out} según sea el sensor de corriente o voltaje. Esta selección también está controlada por la señal \bar{I}/V del bloque respectivo. Los inversores con transistor formados por Q₇, Q₈ y Q₉ permiten ajustar los niveles de tensión entre los diferentes dispositivos. Los seguidores de tensión en las salidas de IC₉ evitan pérdidas de la señal en la resistencia interna del MC14053B (R_{ON}).

La etapa de multiplexado se implementó en una sola tarjeta impresa. Ésta se conectó al resto de los circuitos con una faja IDE de 40 cables. Puesto que el ADC utilizado tiene 8 entradas analógicas, como característica adicional, a la tarjeta con los multiplexores se le colocaron 3 jumpers (J₁, J₂ y J₃), de manera que, cambiando la posición de éstos se pueda cambiar el cable de la faja IDE conectado a la salida de los seguidores de tensión.

Los circuitos de aquí en adelante prevén la conexión de seis señales analógicas, por lo que, de hacerse otra tarjeta impresa con los multiplexores analógicos (módulo 2), si en ésta se colocan los “jumper” diferentes a la tarjeta conectada originalmente (módulo 1), puede conectarse al hardware ya existente y aumentar la cantidad entradas analógicas (sensores) a 48.

Posterior a la etapa de multiplexado está la de filtrado. En ella se elimina el ruido de las señales, principalmente el de 60Hz. El banco de filtros paso bajo está constituido por una red RC y un seguidor de tensión a su salida para no cargar al filtro. El circuito utilizado se muestra en la Figura 4.8. La frecuencia de corte de la red es 0.072Hz. Éste filtro se utilizó seis veces, una por cada señal proveniente de la etapa anterior.

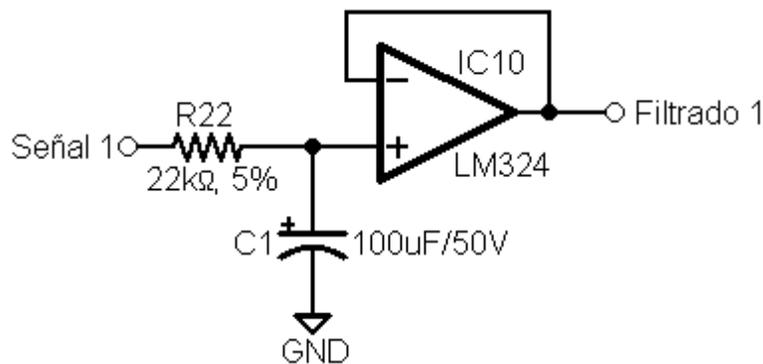


Figura 4.8 Circuito utilizado en la etapa filtrado.

Luego de la etapa de filtrado sigue la conversión de los datos analógicos a digitales y la transmisión a la computadora para su almacenamiento en una base de datos, para esto se utilizó un PIC16F877A y un MAX232N. El circuito se muestra en la Figura 4.9.

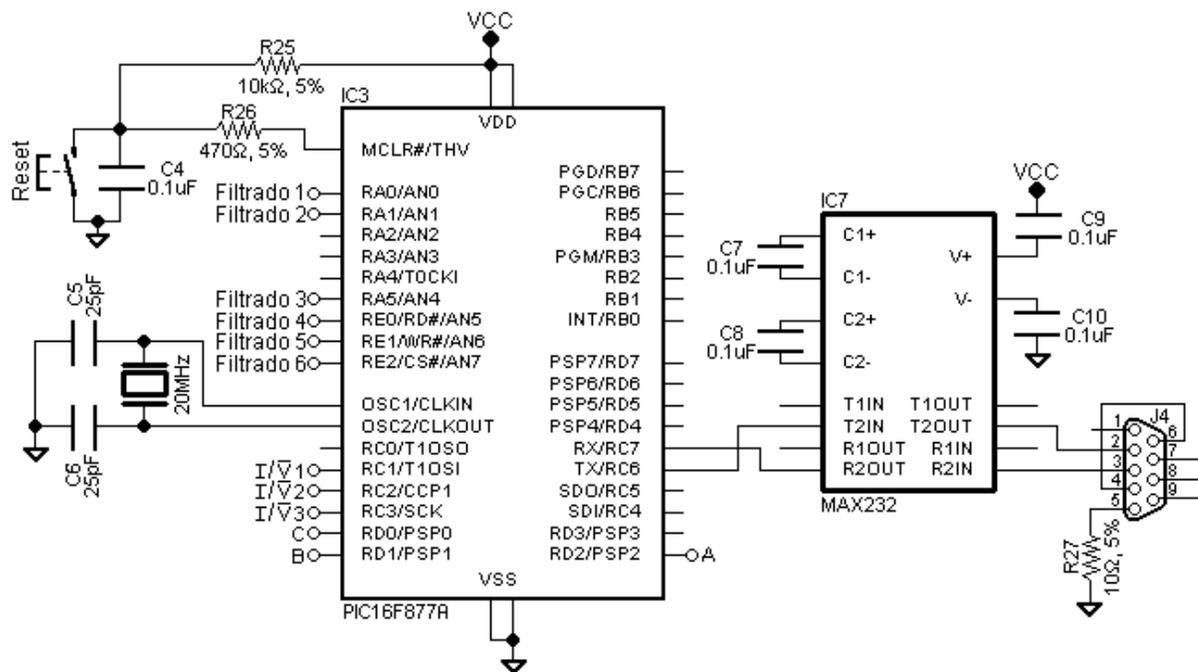


Figura 4.9 Circuito utilizado para la conexión del PIC y el MAX232

Además, el PIC también se encarga de generar las señales A , B , C y \bar{I}/V de los bloques de multiplexores analógicos.

4.3. Descripción del software

A nivel de software se realizaron dos programas: uno para el PIC hecho en C para PIC y otro para la PC realizado, a petición de la empresa, en Visual Studio.Net. También se programó en MatLab el algoritmo de la red neuronal para la obtención del modelo matemático.

4.3.1. Programa del PIC

El PIC se encargó de generar las señales de control requeridas, convertir los datos de analógicos a digitales y comunicarse con la PC para la configuración de las entradas analógicas y descarga de mediciones. La configuración de las entradas analógicas es descargada desde la PC hasta el PIC, se almacena en la memoria RAM para ser accesada cuando se necesite y además es guardada en la EEPROM interna para, posterior al encendido del sistema o bien después de un “Reset”, actualizar la RAM con la última configuración descargada. El diagrama de flujo del programa se muestra en la Figura 4.10.

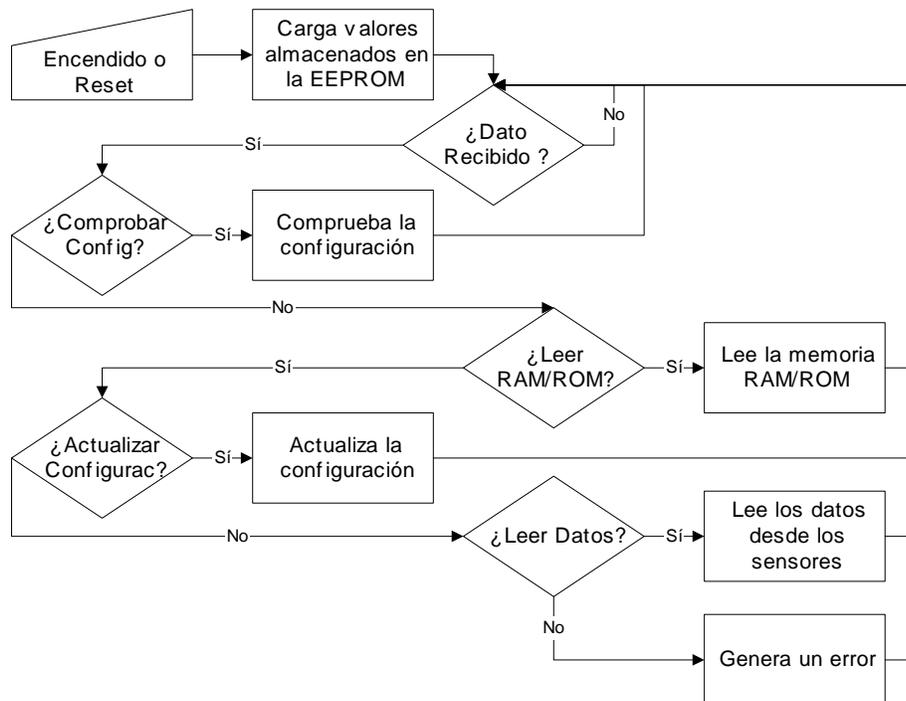


Figura 4.10 Diagrama de flujo del programa del PIC

Posterior a la actualización de la memoria RAM desde la EEPROM el sistema queda a la espera de datos en el “buffer” de entrada del puerto serie. Cuando un byte es recibido se considera un código de operación, por lo que la PC está indicando al PIC salir de su estado de reposo.

El PIC compara el dato recibido con los predefinidos. En caso de coincidir con alguno de ellos se ejecuta el método correspondiente. Si el byte recibido es diferente de todos los códigos de operación posibles envía el código de error a la PC. En la Tabla 4.1 se muestra un listado completo de los códigos de operación y constantes de configuración usados.

Tabla 4.1 Códigos de operación utilizados y su función

Código de Operación (Hexad.)	Función
23	Revisar la comunicación entre el PIC y la PC
67	Leer la información almacenada en la EEPROM
DF	Leer la información almacenada en la memoria RAM
18	Actualiza la configuración del hardware (RAM y EEPROM)
AE	Código para tomar las mediciones desde los sensores
55	Código usado para confirmaciones entre el PIC y la PC
AA	Código usado para indicar que hubo un error
33	Indica que sólo está conectado el módulo 1 de entradas analógicas
CC	Indica que sólo está conectado el módulo 2 de entradas analógicas
F0	Indica que están conectados los 2 módulos de entradas analógicas
0F	Indica que no hay conectados módulos de entradas analógicas
88	El sensor conectado en esa entrada tiene una salida de corriente
81	El sensor conectado en esa entrada tiene una salida de tensión

A continuación se dará una breve explicación de los métodos programados en el PIC:

- a. “Revisar Comunicación” (23H): Una vez reconocido el código de operación envía una confirmación hacia la PC y espera por un nuevo byte. Cuando la PC recibe la confirmación desde el PIC genera un byte de forma aleatoria, lo envía al PIC y espera por un byte entrante. El PIC recibe este byte, lo reenvía a la PC y entra en reposo. La PC compara el último byte recibido con el generado aleatoriamente, si son iguales se genera un mensaje que indica que la comunicación es satisfactoria, de ser diferentes o no recibir respuesta en 2 segundos indica al usuario que la comunicación no pudo establecerse.

- b. “Leer RAM/EEPROM” (DFH y 67H): Estos dos métodos, a pesar de enviar datos desde diferentes memorias funcionan de la misma manera. Cuando el código de operación es reconocido envía un byte de confirmación hacia la PC. Ésta lo recibe y se prepara para la recepción de los datos, cuando finaliza envía un código de confirmación al PIC. Al recibir éste el byte envía hacia la PC el contenido de todas las posiciones desde la 0H hasta la 30H, de la respectiva memoria, ya que éstas son las que contienen la información de la configuración, posteriormente entra en reposo.
- c. “Actualizar configuración” (18H): Posterior al reconocimiento del código de operación el PIC se prepara para la recepción de datos, al finalizar envía el código de confirmación hacia la PC. Cuando ésta lo recibe inicia el envío de la configuración hacia el PIC, cada vez que envía un byte espera por una confirmación de recibido desde el mismo, de esta forma se evitan problemas de sincronización. Cada vez que el PIC recibe un byte lo guarda en la respectiva dirección de la EEPROM, actualiza esa misma dirección en la RAM, envía a la PC el código de confirmación y queda a la espera de un nuevo byte. Al completar 48 bytes se detiene la ejecución del método y se pasa al estado de reposo.
- d. “Leer Datos” (AEH): Éste método es el encargado de tomar las mediciones desde los sensores y enviarlas a la PC. En la Figura 4.11 se muestra el diagrama de flujo de este método. Con entrada analógica se refiere a los canales de entrada del PIC. Al indicar “Canal” se hace referencia a los canales analógicos del MC14051B. Muestreando 8 canales por 3 entradas diferentes se abarcan las 24 entradas analógicas del circuito completo. Los estados lógicos de las señales A, B y C para cada iteración se muestran en la Tabla 4.2. Las señales $\bar{I}/V 1$, $\bar{I}/V 2$ y $\bar{I}/V 3$ se colocan en alto o bajo según la configuración de los sensores enviada desde la PC.

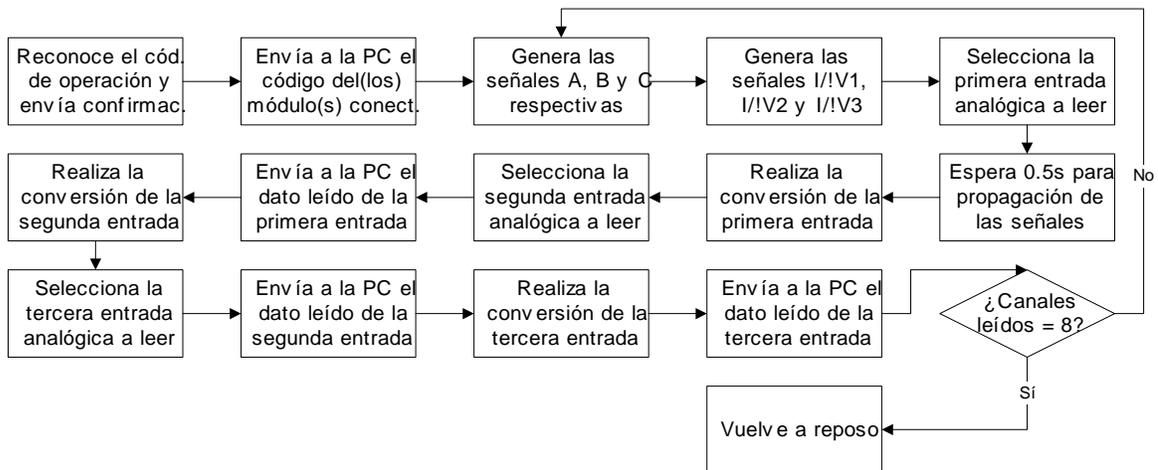


Figura 4.11 Diagrama de flujo del método de leer datos desde los sensores

Tabla 4.2 Estado lógico de las salidas A, B y C para cada iteración del método del “Leer Datos”

Iteración	A	B	C	Canal seleccionado (MC14051B)
1	0	1	1	4
2	0	0	1	6
3	1	0	1	2
4	1	1	0	1
5	0	0	0	7
6	0	1	0	5
7	1	1	1	0
8	1	0	0	3

4.3.2. Programa de la PC

El programa para la PC fue realizado en la versión 2005 de Visual Studio.Net, puesto que ésta tiene implementados los algoritmos para manejo de puerto serie. Dentro de las funciones permitidas por el programa se encuentran las siguientes:

- Permite seleccionar el puerto serie a utilizar y revisar si la PC se comunica con el hardware de forma satisfactoria.
- Se puede indicar el estado de todas las 24 entradas analógicas (en uso o desconectada) así como el tipo de sensor conectado (corriente o voltaje).
- Permite configurar el hardware y comprobar si la configuración almacenada en el mismo coincide con la de la PC.

- d. El lapso entre dos muestras consecutivas es indicado por el usuario.
- e. Permite realizar la lectura de los datos, mostrarlos en pantalla y, por selección del usuario, almacenarlos o no en una base de datos hecha en MySQL.
- f. El usuario puede definir la curva de cada sensor, siempre que ésta sea lineal, además del nombre de la señal y su unidad. Esta información puede ser almacenada en archivos físicos (extensión cfg) para mantener diversas configuraciones y ser accesadas fácilmente.
- g. Permite la opción de realizar gráficos con la información contenida en la base de datos. Para esto el usuario debe definir la señal a graficar y el intervalo de graficación.

En el Apéndice A.2 se muestran imágenes de la interfaz gráfica del programa y algunas de las ventanas de configuración.

4.3.3. Programa de la neurona utilizada en la obtención del modelo

Antes de iniciar con la explicación del algoritmo utilizado para la actualización de los pesos, se justificará la utilización del algoritmo de la neurona para la obtención del modelo (en el Apéndice A.1 hay una breve introducción a las redes neuronales).

Considerando como función de transferencia de la neurona la ecuación (4.6), y la entrada neta a la misma mostrada en (4.5), la relación entre las entradas y la salida (J) de la neurona a utilizar es la mostrada en (4.7). Ahora bien, comparando esta última con la forma general de una ecuación de diferencias (ecuación (4.8)), puede hacerse una analogía entre los términos w_i y las constantes a_k y b_k , mientras que las entradas x_i son análogas a los términos $x(n-k)$ y $y(n-k)$, de ahí la justificación de la utilización de una neurona para aproximar las constantes de la ecuación de diferencias buscada.

$$\text{Entrada Neta}_i = \sum_{i=0}^n x_i w_i \quad (4.5)$$

$$f_i = \text{Entrada Neta}_i \quad (4.6)$$

$$J_i = \sum_{i=0}^n x_i w_i \quad (4.7)$$

$$y(n) = -\sum_{k=0}^N a_k y(n-k) + \sum_{k=1}^M b_k x(n-k), \text{ con } a_0 = 1 \quad (4.8)$$

La red neuronal del tipo “backpropagation” o de retropropagación^[9], es un tipo de red de aprendizaje supervisado (se le indica explícitamente la salida deseada para un conjunto determinado de entradas), el algoritmo para la actualización de los pesos es el siguiente:

- a. El patrón utilizado para entrenar a la red (o neurona) es presentado a las entradas y propagado hasta la(s) salida(s).
- b. La salida generada por la red es comparada con la salida deseada, esto genera una señal de error.
- c. La señal de error es propagada “hacia atrás” dependiendo del aporte de cada peso (w_i) al error total.
- d. Con base en el error propagado, cada peso es actualizado de acuerdo a su aporte al error total.

Para entrenar la neurona se parte de un patrón de entrenamiento que tiene q componentes, como se muestra en (4.9), donde k representa el número de patrón utilizado para entrenar la red, ya que por lo general se cuenta con más de un patrón. Los q pesos w_i de la red, mostrados en (4.10), se inicializan de forma aleatoria. La salida de la neurona para el patrón usado, considerando la función de transferencia mostrada en (4.6), se define por medio de la ecuación (4.11).

El error generado en cada neurona de la capa de salida se define como en (4.12), esto da lugar al error total de la red, que es el error medio cuadrático (4.13), en donde m representa la cantidad de neuronas en la capa de salida, para este caso en particular $m = 1$.

$$X_k = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad \dots \quad x_q] \quad (4.9)$$

$$W = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ \dots \\ w_q \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$J_k = X_k W_k = \sum_{i=1}^q x_i w_i \quad (4.11)$$

$$\delta_k = t_k - J_k \quad (4.12)$$

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m (\delta_{ki})^2 = \frac{1}{2} (t_k - J_k)^2 \quad (4.13)$$

Para determinar el valor con el que debe actualizarse los pesos se utiliza el gradiente negativo del error (∇E), ya que el error está definido en un espacio de q dimensiones. Se toma la dirección negativa puesto que al evaluar el gradiente en un punto sobre la superficie del error se obtiene la dirección en que la función de error presenta mayor crecimiento. Con base en esto, cada peso w_i se actualiza según la ecuación mostrada en (4.14). El parámetro α es conocido como tasa de aprendizaje y varía entre 0 y 1 según las características del problema a resolver, para este caso se consideró $\alpha = 0.1$.

$$W_{k+1} = W_k - \alpha \nabla E \quad (4.14)$$

El gradiente del error se calcula como la derivada del error con respecto a los pesos de la red, esto se muestra en la ecuación (4.15).

$$\nabla E = \frac{\partial}{\partial W} E = \frac{\partial}{\partial W} \left[\frac{1}{2} (t_k - J_k)^2 \right] = -(t_k - J_k) \frac{\partial}{\partial W} (J_k) = (J_k - t_k) X_k \quad (4.15)$$

Puesto que el proceso de entrenamiento es iterativo, los patrones son presentados a la neurona una y otra vez hasta que el error generado por la red es menor al error deseado, momento en el cual se detiene la etapa de entrenamiento. En este caso en particular, a la neurona se le presentaban todos los patrones de entrenamiento, actualizando los pesos tras mostrar cada uno de ellos, al finalizar se evaluaban todos los patrones con los últimos pesos actualizados y se encontraba, con base en la ecuación (4.12), la media de todos los errores, si ésta era menor que el error propuesto como consigna, el proceso de entrenamiento era detenido.

En la Figura 4.12 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo descrito anteriormente.

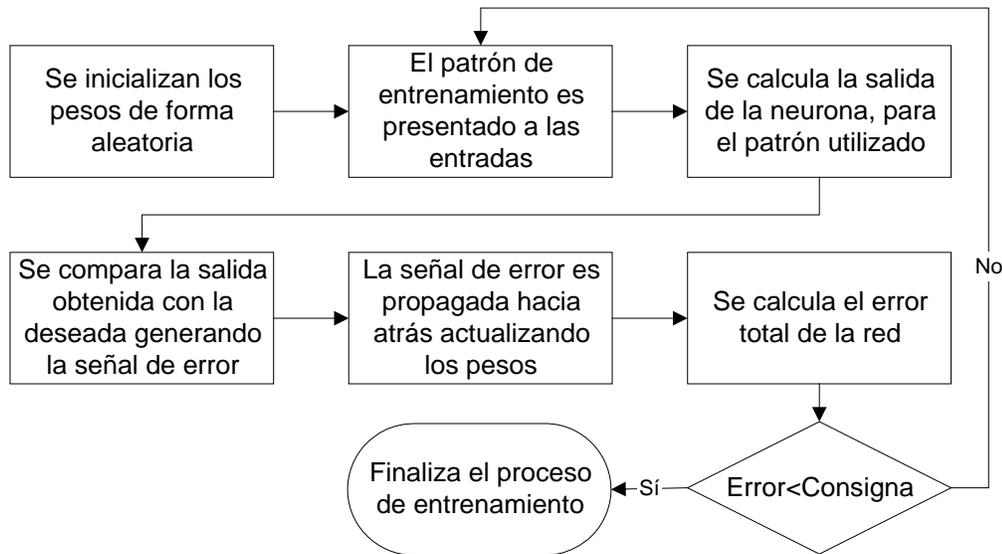


Figura 4.12 Diagrama de flujo del algoritmo de actualización de pesos de la neurona

4.4. Frecuencia de muestreo

Puesto que no se poseía información confiable sobre el comportamiento de alguna de las variables a medir, para la determinación de la frecuencia de muestreo se contemplaron los dos análisis a realizar, el primero de ellos con base en la teoría del procesamiento digital de señales y el otro desde el punto de vista estadístico.

4.4.1. Considerando la teoría del procesamiento digital de señales

Para la determinación de la frecuencia de muestreo se realizaron las siguientes consideraciones:

- a. Tanto la humedad como la temperatura del grano de café varían más lento que la velocidad y la temperatura del aire, por lo que sus componentes frecuenciales son de una frecuencia menor.
- b. Las mayores variaciones de la velocidad y temperatura del aire tienen lugar cuando se enciende o apaga algún abanico o bien el horno, por lo que estos lapsos son los que contienen un mayor rango de componentes frecuenciales.

El procedimiento seguido para determinar la frecuencia de muestreo fue el siguiente:

- a. Se muestrearon, al encender y apagar el abanico respectivo, tanto la velocidad como la temperatura del aire, con el menor periodo entre muestras permitido por el equipo de medición (4 segundos).
- b. Puesto que a partir de estas muestras no es posible determinar con certeza las armónicas presentes en el sistema, con base en ellas se obtuvo una ecuación en tiempo continuo que modelara de forma aproximada el comportamiento de la velocidad y la temperatura respectiva en función del tiempo.

- c. Por medios computacionales se muestreó la curva obtenida en el punto anterior, con una frecuencia de 10Hz (considerando que la mayor frecuencia del sistema sería de 5Hz), a partir de estas muestras y con la transformada discreta de Fourier se obtuvo la magnitud de las diferentes armónicas del sistema.
- d. Con base en el teorema de muestreo^[10] y el resultado del punto anterior se definió la frecuencia de muestreo.

En la Figura 4.13 se muestra la gráfica seleccionada para la determinación de la frecuencia de muestreo así como la curva utilizada para aproximar el comportamiento obtenido. Ésta fue escogida de entre todas las obtenidas a lo largo de una semana por ser la que generó la mayor amplitud en las armónicas.

Velocidad del aire en función del tiempo

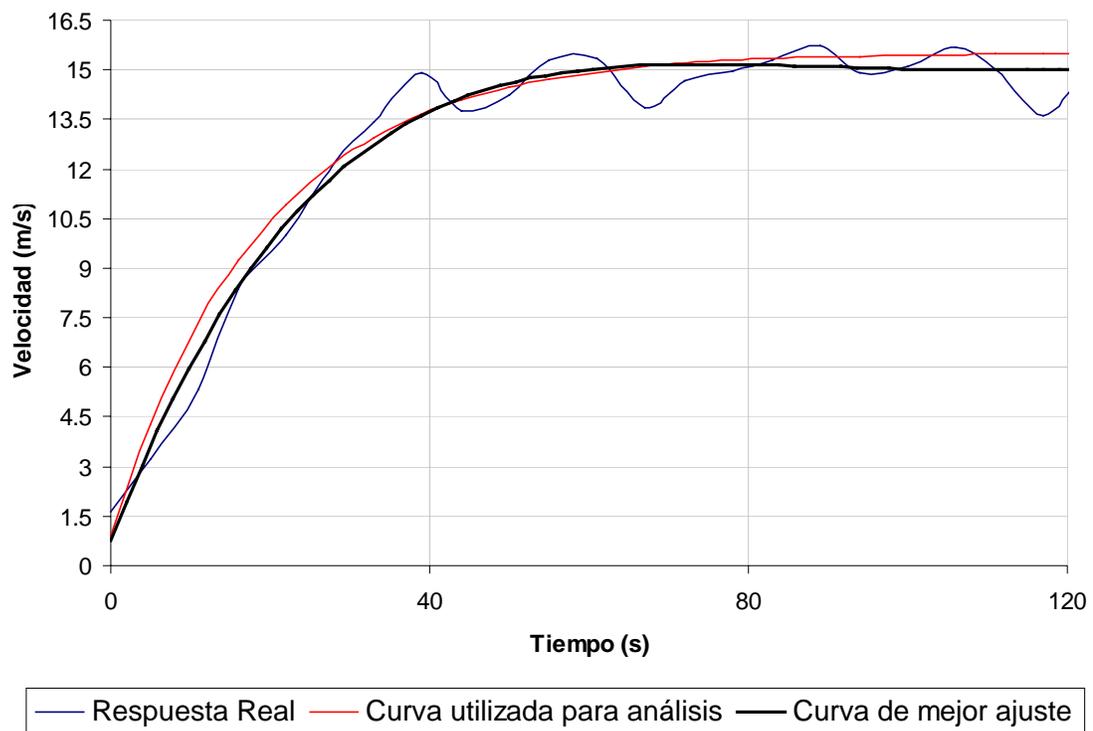


Figura 4.13 Respuesta real, curva de mejor ajuste y curva utilizada para calcular la frecuencia de muestreo.

Con base en la ecuación mostrada en (4.16) y por simulación se obtuvieron las armónicas del sistema así como sus respectivas frecuencias, esto se muestra en la Tabla 4.3, el gráfico respectivo se presenta en la Figura 4.14.

$$y(t) = 14.6 * (1 - \exp(-t/19)) + 0.92 \quad (4.16)$$

Tabla 4.3 Armónicas, su frecuencia y amplitud normalizada obtenidas por simulación

Orden de la Armónica	Frecuencia (Hz)	Amplitud Normalizada
0	0.0000	1.0000
1	0.0105	0.1435
2	0.0210	0.0852
3	0.0315	0.0591
4	0.0420	0.0450
5	0.0525	0.0362
6	0.0630	0.0303
7	0.0735	0.0260
8	0.0840	0.0228
9	0.0945	0.0203
10	0.1050	0.0183

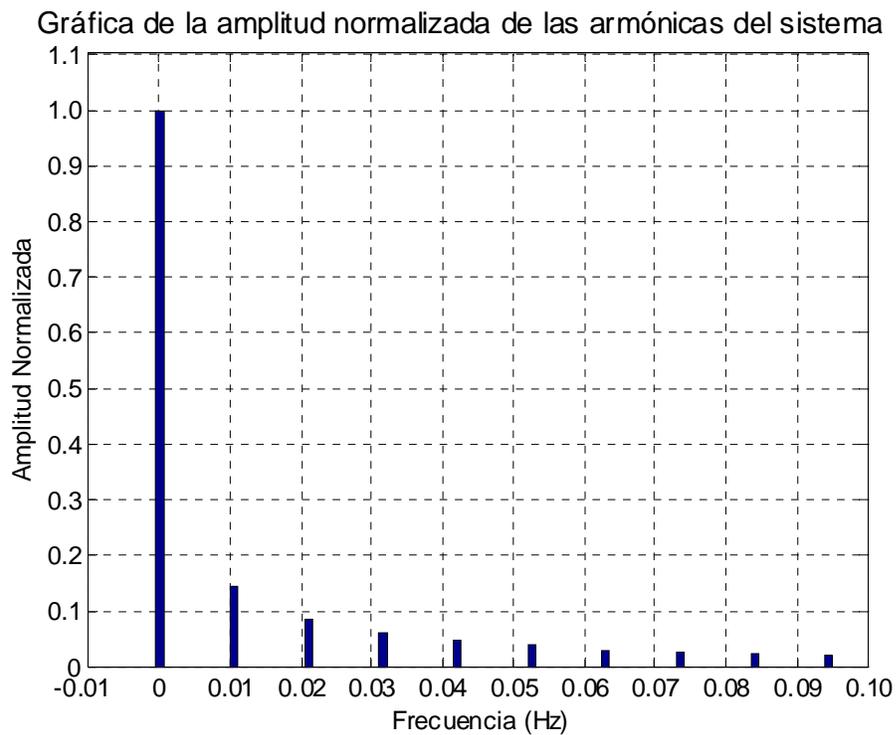


Figura 4.14 Gráfica de las armónicas del sistema

Como era de esperar, la componente CD presenta la mayor amplitud, al observar las restantes armónicas se decidió conservar para el análisis hasta la sexta armónica (cuya frecuencia es 0.063Hz), puesto que el aporte en amplitud de las restantes es menor al 3%. De ahí que, con base en el teorema del muestreo, se determinó que la frecuencia mínima de muestreo debe ser 0.126Hz, por lo que el periodo máximo entre muestras es 7.937s, de donde se decidió que el lapso entre muestras será de 6s o bien una frecuencia de 0.167Hz.

4.4.2. Considerando la teoría estadística

Desde el punto de vista estadístico, se desea analizar la temperatura y el caudal promedio del aire que entra a la guardiola, para determinar la cantidad de muestras a tomar se utilizó la ecuación mostrada en (4.17)^[11].

$$n = \frac{Z_A^2 * S^2}{d^2} \quad (4.17)$$

Donde:

Z_A : Nivel de seguridad o confianza. Considerando un nivel de confianza del 95% entonces $Z_A = 1.96$.

S^2 : Varianza.

d : Precisión con que se desean estimar los promedios.

Para determinar sus parámetros se realizó un preestudio con el objetivo de encontrar de forma aproximada las características del sistema, pues no se contaba con información del proceso. Con base en este preestudio, realizado de la misma manera que para el caso anterior, se determinó que, dependiendo de la guardiola, la temperatura y el caudal promedio varían. Los rangos de oscilación, en términos generales, se muestran a continuación:

- a. El promedio aproximado de la temperatura del aire oscila entre 61°C y 72°C.

- b. La varianza aproximada de la temperatura del aire presenta un comportamiento similar a la temperatura promedio, se encuentra entre 18.76°C^2 y 70.73°C^2 .
- c. El promedio aproximado del caudal del aire oscila entre $6300\text{m}^3/\text{h}$ y $7900\text{m}^3/\text{h}$.
- d. La varianza aproximada del caudal del aire oscila entre $135\text{m}^6/\text{h}^2$ y $1367\text{m}^6/\text{h}^2$.

Con base en estos datos y considerando una confiabilidad de un 95% ($Z_A = 1.96$) y una precisión de un 1% del promedio aproximado (0.61°C y $63\text{m}^3/\text{h}$) se encontró la cantidad de muestras requeridas, como se muestra en (4.18) y (4.19).

$$n_{\text{Temperatura}} = \frac{Z_A^2 * S^2}{d^2} = \frac{(1.96)^2 * (70.73)}{(0.61)^2} = 730.22 \rightarrow 731 \text{ muestras} \quad (4.18)$$

$$n_{\text{Caudal}} = \frac{Z_A^2 * S^2}{d^2} = \frac{(1.96)^2 * (1367)}{(6.3)^2} = 132.31 \rightarrow 133 \text{ muestras} \quad (4.19)$$

Puesto que las mediciones de temperatura y caudal se realizarán con la misma frecuencia, para los cálculos restantes se considerará el valor de 731 muestras ya que éste es el peor de los casos. Partiendo de un tiempo mínimo de secado de 3 horas (según datos brindados por la empresa el mínimo tiempo de secado reportado en las anteriores tres cosechas es 5.5 horas), el periodo con que deben tomarse las muestras se calcula como en (4.20).

$$\text{periodo} = \frac{3 \text{ horas}}{731 \text{ muestras}} = \frac{10800 \text{ s}}{731 \text{ muestras}} = \frac{14.77 \text{ s}}{\text{muestra}} \quad (4.20)$$

Esto implica que las muestras deben tomarse, como mínimo, cada 14.77s. Ahora bien, puesto que las mediciones realizadas se utilizarán por igual para la obtención del modelo y el análisis estadístico, el periodo de muestreo será, finalmente, de 6 segundos.

4.5. Obtención y validación del modelo matemático

Por las características del sistema y la obtención de los datos en tiempo discreto, el modelo matemático es una ecuación de diferencias cuya única salida es la humedad del grano de café, las entradas son:

- a. Temperatura del aire que ingresa a la guardiola, puesto que esta tiene dos entradas de aire se consideraron como dos entradas independientes (T_1 y T_2).
- b. Velocidad del aire que ingresa a la guardiola, medida en un solo punto, se consideró como una sola entrada (V).
- c. Temperatura del grano de café (T_M).
- d. Tipo de café (k), es una constante a lo largo del proceso dependiendo del tipo de café, tiene los siguientes valores:
 - a. Premio: 0.2
 - b. Especial: 0.4
 - c. Primera Corriente: 0.8
 - d. Tres Ríos: 0.5
 - e. Cartago: 0.125
 - f. Segunda: 0.25
- e. Humedad del grano de café (salida realimentada y condiciones iniciales).

Puesto que no se tenía información alguna sobre el modelo a determinar se propusieron varios modelos en los que se variaba la cantidad de entradas y salidas pasadas a considerar así como el grado global de las entradas (lineales o cuadráticas). Para todos ellos se obtuvo el error con respecto a los patrones usados para entrenar la neurona y finalmente se escogió el modelo que presentaba la menor media de los errores.

Para la obtención del modelo se contaba con lo siguiente:

- a. Mediciones cada 6 segundos de la velocidad y temperatura del aire que ingresa a la guardiola. En el caso de la temperatura, las mediciones se hicieron en ambas entradas de la guardiola.

- b. Mediciones de la temperatura y la humedad del grano de café al ingresar a la guardiola y cada 2 horas a partir de este instante.

Debido a la diferencia en los intervalos de medición (y por tanto en la cantidad de mediciones) se decidió, con base en las mediciones de temperatura y humedad del grano de café, obtener una ecuación en tiempo continuo y a partir de ella interpolar y obtener los restantes datos.

Con este procedimiento, la ecuación de diferencias a encontrar tendría un periodo de muestreo de 6 segundos, sin embargo, tratar de validar el modelo encontrado con los datos generados a partir de la interpolación los resultados obtenidos no fueron satisfactorios, pues la ecuación encontrada no lograba validarse.

En vista de esto se decidió, con base en las mismas mediciones, cambiar el procedimiento a seguir, esta vez la ecuación a obtener presentaría un periodo de 2 horas, que es el intervalo entre 2 muestras consecutivas de humedad y temperatura del grano. Esto generó un problema con las mediciones tomadas a mayor frecuencia, ya que no podían tomarse sólo unas pocas de ellas e ignorar el resto pues se estaría perdiendo gran parte del comportamiento de la entrada correspondiente. Por esta razón, las mediciones tomadas cada 6 segundos fueron aplicadas como entrada a un filtro de media móvil causal de orden 1200 (ecuación (4.21)), de esta forma una sola muestra de la salida del filtro reuniría el comportamiento de la entrada en ese instante así como de las 1199 entradas anteriores. El orden del filtro se escogió en función del mayor periodo de muestreo (2 horas), un filtro de orden 1200 reuniría a su salida la información de las últimas 2 horas de trabajo.

$$y(n) = \frac{x(n) + x(n-1) + x(n-2) + \dots + x(n-1199)}{1200} \quad (4.21)$$

Con base en esto se propusieron diversos modelos, variando la cantidad de entradas y salidas pasadas así como el grado global de las entradas (lineales o cuadráticas). El modelo seleccionado fue el que presentó la menor media del error. Se obtuvo un modelo por cada guardiola.

Para las guardiolas 2 y 8 se dispuso de 4 cargas de secado para la obtención y validación del modelo, puesto que sólo estas reúnen las mismas condiciones de trabajo. Para la guardiola 6 se dispuso de 3 cargas. Ante la interrogante de cual carga usar para la validación y cuales para la obtención del modelo, se decidió validar con una de las cargas y utilizar las restantes para obtener el modelo, repitiendo el proceso para todas las combinaciones posibles. Los resultados de la obtención y validación del modelo se muestran en el capítulo de los resultados experimentales.

Capítulo 5: Análisis de Resultados

5.1. Sobre las condiciones de trabajo de cada guardiola estudiada

En este apartado se expondrá un resumen de los datos más relevantes (promedios, desviaciones estándar, entre otros) así como algunas gráficas que presenten importancia particular en el análisis.

Con respecto a los valores promedios para cada carga analizada, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.1. La explicación del contenido de cada una de las columnas de la tabla se muestra a continuación:

- a. #: Es el número de referencia de la carga secada.
- b. Guardiola: Es el número de la guardiola en que fue secada la carga.
- c. Cantidad: Contenido de café en la guardiola. “Completa” indica que la guardiola se encontraba llena (60qq), “Incompleta” que no estaba llena.
- d. Calidad: Es la calidad del café secado.
- e. T1_Prom: Temperatura promedio (en °C) del aire que ingresa por la entrada 1 de la guardiola. La entrada 1 es la más cercana al horno (la de “arriba”).
- f. T1_DE: Desviación estándar de la temperatura 1 (°C).
- g. T2_Prom: Temperatura promedio (en °C) del aire que ingresa por la entrada 2 de la guardiola. La entrada 2 es la más cercana a las bodegas (la de “abajo”).
- h. T2_DE: Desviación estándar de la temperatura 2 (°C).
- i. Cau._Pro.: Caudal Promedio (m^3/h).
- j. Cau._DE: Desviación estándar del caudal (m^3/h).

Tabla 5.1 Valores promedios y desviaciones estándar de las temperaturas y caudales medidos para cada carga

#	Guardiola	Cantidad	Calidad	T1_Prom (°C)	T1_DE (°C)	T2_Prom (°C)	T2_DE (°C)	Cau. Pro. (m ³ /h)	Cau_DE (m ³ /h)
1	2	Completa	Premio	69.93	7.64	68.61	7.39	6469.44	202.70
2	2	Completa	3 Ríos	71.18	8.56	69.87	8.31	6502.97	205.48
3	2	Completa	Premio	69.44	5.10	68.30	4.90	6379.19	191.03
4	2	Completa	Corriente	67.24	7.65	66.33	7.37	6394.61	188.45
5	2	Incompl. (*)	Premio	69.17	7.24	67.97	6.95	6534.33	183.60
6	2	Incompl. (*)	Cartago	71.68	4.90	70.59	4.66	6377.37	217.01
7	2	Incompl. (**)	Corriente	68.48	6.40	67.45	6.21	6394.63	207.01
8	2	Completa	Premio	70.43	8.59	69.13	8.24	6389.39	537.15
9	2	Completa	Premio	69.97	5.82	69.04	5.65	6388.55	180.60
10	6	Completa	Especial	66.70	7.11	67.53	6.87	7463.45	392.07
11	6	Completa	3 Ríos	68.02	6.77	68.79	6.51	6307.06	1366.25
12	6	Incompl. (**)	Corriente	69.05	7.44	70.04	7.23	7568.92	379.11
13	6	Incompl. (***)	Especial	67.03	5.94	68.05	5.74	7639.59	282.62
14	6	Incompl. (***)	3 Ríos	70.04	5.43	71.03	5.20	7489.37	382.29
15	6	Incompl. (*)	Premio	65.65	8.66	66.56	8.41	7862.15	473.14
16	6	Incompl. (*)	3 Ríos	66.59	7.01	67.59	6.81	7502.20	334.78
17	6	Completa	Premio	67.30	6.24	68.02	6.06	7305.84	272.90
18	8	Completa	Corriente	63.22	6.40	66.51	6.72	7508.64	249.44
19	8	Incompl. (*)	Segunda	61.64	5.41	64.79	5.63	7683.72	187.56
20	8	Incompl. (***)	Especial	65.81	6.57	68.91	6.85	7686.20	142.69
21	8	Incompl. (***)	Corriente	64.00	4.65	67.17	4.86	7658.57	163.66
22	8	Completa	Premio	64.85	5.48	67.93	5.77	7572.94	135.28
23	8	Completa	Premio	63.31	8.95	66.25	9.43	7523.34	317.27

* Aproximadamente un 90% de la capacidad de la guardiola.

** Aproximadamente un 85% de la capacidad de la guardiola.

*** Aproximadamente un 75% de la capacidad de la guardiola.

Con base en los datos de la Tabla 5.1 se pueden obtener, por guardiola, y para diversas cargas, los promedios y desviaciones estándar de la temperatura y caudal del aire, estos resultados se muestran en la Tabla 5.2. A continuación se da una explicación del contenido de cada una de las columnas de la tabla:

- a. Guardiola: Indica el número de la guardiola medida.
- b. T1_Prom: Temperatura promedio (en °C) del aire que ingresa por la entrada 1.
- c. Desv. Est. T1: Desviación estándar de la temperatura 1 en °C y porcentaje con respecto al promedio.
- k. T2_Prom: Temperatura promedio (en °C) del aire que ingresa por la entrada 2.
- d. Desv. Est. T2: Desviación estándar de la temperatura 2 en °C y porcentaje con respecto al promedio.
- e. Cau._Prom: Caudal Promedio (m³/h).
- f. Desv. Est. Cau.: Desviación estándar del caudal en m³/h y porcentaje con respecto al promedio.

Tabla 5.2 Promedios y desviaciones estándar de las temperaturas y caudales para cada guardiola

Guardiola	T1_Prom (°C)	Desv. Est. T1		T2_Prom (°C)	Desv. Est. T2		Cau_Prom (m ³ /h)	Desv. Est. Cau.	
		(°C)	%		(°C)	%		(m ³ /h)	%
2	69.73	1.35	1.94	68.59	1.28	1.85	6425.61	60.01	0.93
6	67.55	1.43	2.11	68.45	1.45	2.12	7547.36	172.64	2.29
8	63.81	1.44	2.26	66.93	1.43	2.14	7605.57	80.80	1.06

Como puede notarse en la Tabla 5.2 la variación a lo largo de diversas cargas, tanto de la temperatura como del caudal promedio es, como máximo, 2.29%. De ahí que para fines prácticos las condiciones de trabajo de las guardiolas 2, 6 y 8 se pueden considerar constantes de una carga a otra.

Al comparar entre sí las condiciones de trabajo de las tres guardiolas analizadas puede observarse que a pesar de que las temperaturas y caudales se mantienen para una misma guardiola difieren de una guardiola a otra.

La guardiola 2 tiene las mayores temperaturas promedio del aire mientras que la 8 presenta las de menor magnitud. Este comportamiento se justifica en función del lugar desde el cual toma cada guardiola el aire caliente. En la Figura 5.1 puede observarse que las guardiolas 1 y 2 toman el aire de la parte superior del horno mientras que las restantes 6 guardiolas lo hacen de la parte inferior. Al aumentar la temperatura del aire disminuye su densidad, por lo que el aire más caliente (por tanto más liviano) se ubicará en la parte superior del horno, precisamente donde extrae el aire la guardiola 2.

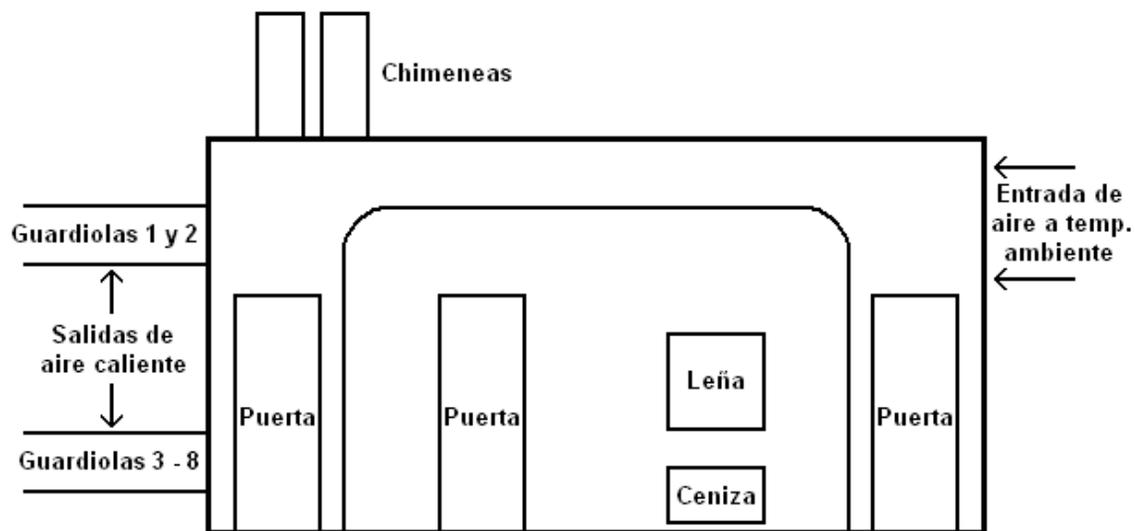


Figura 5.1 Vista lateral del horno que alimenta las guardiolas

Con respecto a las temperaturas se notó que cuando el abanico de la guardiola 1 ó el de la 2 se encuentra apagado la temperatura del aire que ingresa al resto de guardiolas disminuye, como se muestra en la Figura 5.2 después de las 6:00 p.m. Esto se debe a que cuando estos abanicos (1 y 2) están encendidos, atraen el aire caliente, ubicado en la parte superior del horno, hacia la salida del mismo (parte más a la izquierda en la Figura 5.1), por lo que las restantes guardiolas se ven beneficiadas al tomar parte de este aire caliente. Cuando los abanicos 1 y 2 están apagados, los restantes abanicos no toman con tanta facilidad el aire caliente que está en la parte superior, sino que sacan el aire que se encuentra en la parte inferior, que es el más frío.

Temperatura del aire de la entrada 1 de las guardiolas 2, 6 y 8 a lo largo del tiempo

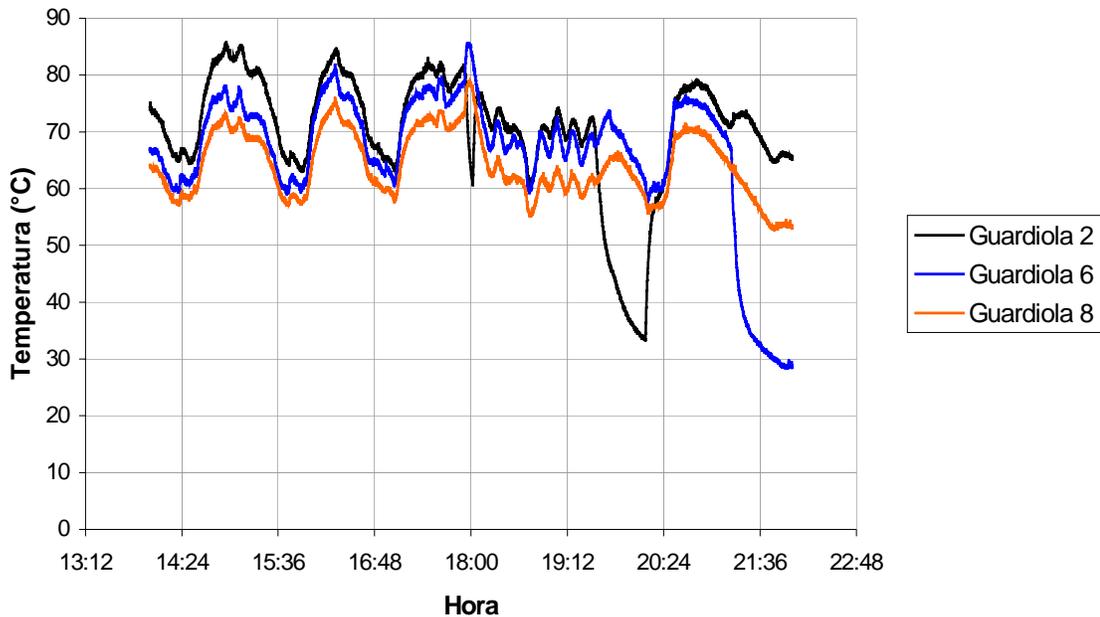


Figura 5.2 Temperatura del aire en la entrada 1 de las guardiolas 2, 6 y 8 a lo largo del tiempo

Como se muestra en la Figura 5.3 al apagar el abanico de la guardiola 6 el flujo de aire no llega a $0\text{m}^3/\text{h}$ a pesar de que el abanico se encuentre apagado. Esto se debe a que al apagar el abanico y no interrumpir el flujo de aire por el ducto respectivo, a través de él ingresa aire a temperatura ambiente que enfría el aire proveniente del horno.

Nótese, con base en la Figura 5.4, que para la guardiola 8 es fácil tomar el aire a través del ducto de la guardiola 6 si éste no está interrumpido y el abanico está apagado. Esto también puede notarse en la Figura 5.3 al observar que el caudal disminuye hasta menos de $1000\text{m}^3/\text{h}$ para posteriormente subir (al entrar aire por el ducto) cerca de los $2250\text{m}^3/\text{h}$. Esta misma situación fue encontrada para las guardiolas 2 y 8, aunque en menor medida para la primera de ellas pues ésta toma el aire de la parte superior del horno (Figura 5.1).

Comportamiento del caudal de la guardiola 6 al apagar el abanico a las 21:14 y encenderlo a las 22:14

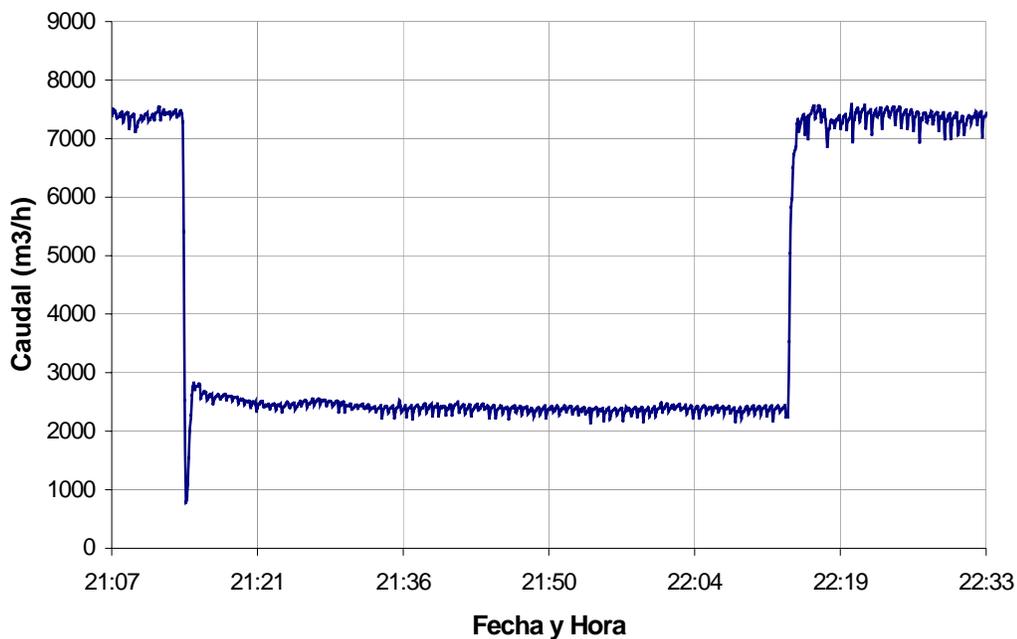


Figura 5.3 Comportamiento del caudal de la guardiola 6 al apagar el abanico a las 21:14 y encenderlo a las 22:14

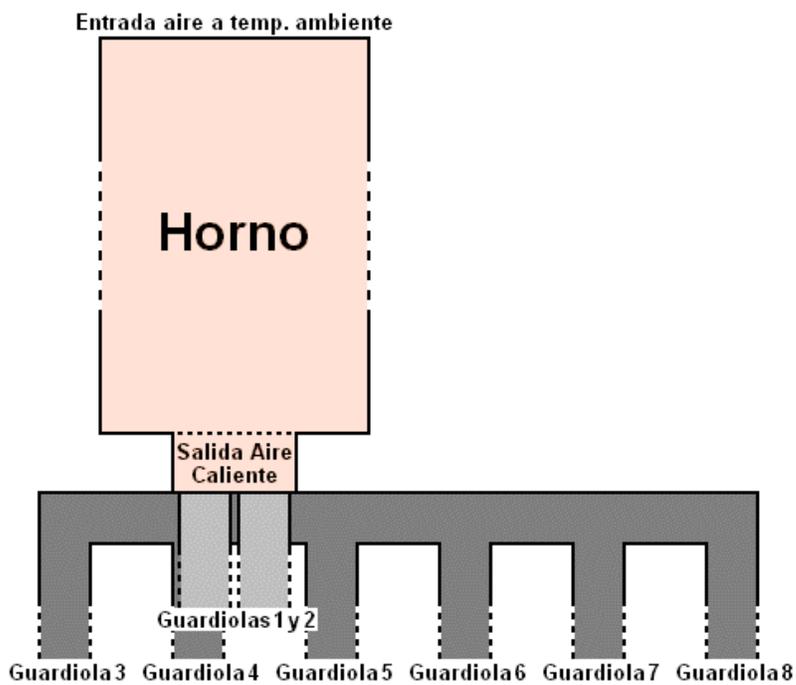


Figura 5.4 Vista superior del horno y distribución de los ductos de las guardiolas

5.2. Sobre la humedad del café al ingresar y salir de la guardiola

En la Tabla 5.3 se muestran los tiempos de diversos intervalos del proceso de secado de cada carga analizada. El contenido de cada una columna es:

- a. Máq. Pr.: Indica la máquina en que fue presecado el café.
- b. D. Pr.: Indica la duración en horas del presecado.
- c. H. In: Humedad del café al entrar a la guardiola.
- d. T.M. In: Temperatura del café al ingresar a la guardiola.
- e. H. Out: Humedad del café al salir de la guardiola.
- f. T.M. Out: Temperatura del café al descargar la guardiola.
- g. D.HCS: Duración de la carga reportada en las hojas de “Control de Secado” usadas por la empresa, éstas son llenadas por los empleados de planta.
- h. D.HCS E: Como en algunas ocasiones se apaga el horno (por reparaciones o limpieza), en esta columna se muestra el tiempo efectivo de secado. Obtenido al restar a la columna anterior el tiempo de la interrupción (tiempo muerto).
- i. D.Ab E: Duración efectiva de la carga calculada con base en el tiempo durante el cual el abanico estuvo encendido.
- j. D.Tot. E: Duración total efectiva de secado de la carga. Se obtiene al sumar el tiempo efectivo de secado y el de presecado, éste último se obtiene de las hojas de “Control de Secado”.
- k. D.In-40 E: Tiempo que le tomó a la carga disminuir su humedad desde un valor inicial hasta un 40%. Valor calculado desde el momento en que el abanico es encendido. Se ajusta por tiempo muerto.
- l. D.40-11 E: Tiempo que le tomó a la carga disminuir su humedad desde 40% hasta 11%. Se ajusta por tiempo muerto.
- m. D.11-Fin E: Tiempo transcurrido desde que la carga tenía una humedad de un 11% hasta que se apagó el abanico. Se ajusta por tiempo muerto.

Tabla 5.3 Resultados obtenidos con respecto a las duraciones de cada carga

#	Máq. Pr.	D. Pr. (h:m)	H. In (%)	T.M. In (°C)	H. Out (%)	T.M. Out (°C)	D.HCS (h:m)	D.HCS E (h:m:s)	D.Ab. E (h:m:s)	D.Tot. E (h:m:s)	D.In-40 E (h:m:s)	D.40-11 E (h:m:s)	D.11-Fin E (h:m:s)
1	Beric	4:00	F. R.	32.0	9.9	48.0	27:00	27:00	27:05:12	31:05:12	7:21:42	19:10:30	0:33:00
2	Beric	4:00	F. R.	33.5	8.7	43.0	27:00	25:00	24:44:42	28:44:42	5:59:50	16:55:10	1:49:42
3	Beric	4:00	F. R.	28.0	7.6	53.0	37:30	28:30	28:23:48	32:23:48	6:22:42	18:41:24	3:19:42
4	Ame	4:00	F. R.	27.0	11.0	42.0	31:00	31:00	31:05:36	35:05:36	8:37:12	22:20:24	0:08:03
5	Beric	4:00	F. R.	30.0	10.0	46.0	29:30	29:30	28:30:54	32:30:54	8:40:48	18:57:36	0:52:30
6	Beric	4:00	44.0	38.0	6.2	62.0	24:00	23:30	23:28:22	27:28:22	2:31:30	18:41:10	2:15:42
7	Ame	4:00	F. R.	26.5	10.0	49.0	32:30	30:30	30:44:22	34:44:22	11:36:40	17:56:24	1:41:18
8	Beric	6:00	41.4	31.0	10.0	48.0	26:00	24:00	24:05:24	30:05:24	2:31:18	20:27:00	1:07:06
9	Beric	14:00	30.0	38.0	9.6	48.0	15:00	15:00	11:29:59	25:29:59	No Aplic	No Aplic	0:35:23
10	Beric	4:00	F. R.	30.0	9.4	44.0	34:00	34:00	34:23:18	38:23:18	10:03:36	22:35:30	1:44:12
11	Beric	4:00	F. R.	34.5	9.5	44.5	29:00	29:00	29:16:18	33:16:18	5:03:00	22:41:18	1:32:00
12	Beric	4:00	F. R.	32.5	9.0	54.5	31:30	29:30	29:33:33	33:33:33	7:31:33	20:24:19	1:37:41
13	Ame	4:00	F. R.	32.0	7.0	47.0	33:00	31:00	31:02:30	35:02:30	7:49:24	20:40:54	2:32:12
14	Beric	4:00	F. R.	33.5	8.5	56.5	26:00	26:00	Equ. Ap.	Equ. Ap.	Equ. Ap.	19:02:00	1:48:27
15	Beric	6:00	42.8	31.0	10.2	48.0	26:30	24:30	24:34:00	30:34:00	3:28:36	20:15:06	0:50:18
16	Beric	11:00	N. R.	N. R.	10.3	43.5	22:30	22:30	22:31:30	33:31:30	1:11:30	20:59:18	0:20:42
17	Beric	16:00	25.0	34.5	7.0	40.5	8:30	8:30	9:08:30	25:08:30	No Aplic	No Aplic	1:08:36
18	Ame	4:00	F. R.	32.0	9.0	55.0	38:30	36:30	35:17:06	39:17:06	10:59:12	21:49:42	2:28:12
19	Ame	4:00	F. R.	35.0	10.6	52.0	32:00	32:00	31:44:37	35:44:37	9:02:36	22:16:09	0:25:52
20	Ame	4:00	F. R.	30.0	9.8	50.0	30:00	28:00	28:12:07	32:12:07	9:49:13	17:33:30	0:49:24
21	Beric	4:00	F. R.	18.3	7.3	58.5	45:00	36:00	28:18:00	32:18:00	5:19:06	18:22:14	4:36:40
22	Beric	14:00	30.8	34.5	9.2	50.0	13:30	13:30	13:15:49	27:15:49	No Aplic	No Aplic	1:21:05
23	Beric	16:00	N. R.	N. R.	9.2	49.0	9:00	9:00	9:08:24	25:08:24	No Aplic	No Aplic	0:56:24

F.R.: La humedad es mayor a 45.2% y por tanto está fuera del rango de medición del analizador de humedad.

Equ. Ap.: El equipo de medición se encontrada apagado y por tanto la medición no fue tomada.

No Aplic.: El valor indicado en esa columna no aplica a la carga de café.

Ame: Presecadora American.

Beric: Presecadora Berico.

N.R.: Dato no reportado.

Antes de iniciar el análisis debe aclararse que éste se dividió en tres intervalos de acuerdo a la humedad del grano, estos son:

- a. Cuando la humedad del grano es mayor a 40%: Se decidió este valor ya que algunas de las cargas analizadas presentan, al ingresar en la etapa de secado, una humedad cercana a 41% mientras que para otras es mayor. Tomando como referencia 40% se evitan diferencias en las condiciones “iniciales” del siguiente intervalo de análisis y permite saber si el bajar la humedad del café hasta este punto presenta variaciones considerables en el tiempo de secado.
- b. Aquel en que la humedad del grano está entre 40% y 11%. La justificación del 11% se encuentra en el siguiente apartado. Este intervalo es el que presenta el mayor cambio de humedad, un 29%, y también el mayor aporte al tiempo total de secado.
- c. Cuando la humedad del grano es menor a 11%. Este punto se decidió considerando que, llegados a este punto, la decisión de finalizar el secado y descargar la guardiola queda a criterio del operario encargado en ese momento. De esta forma se analizará si las variaciones en el tiempo producidas en este intervalo son debidas a causas subjetivas.

Para el intervalo de análisis que abarca desde el inicio del secado hasta que la humedad alcanza un 40%, con base en la Figura 5.5, puede notarse que la distribución de los tiempos de las cargas analizadas varía considerablemente, que el intervalo en el que se concentran mayoritariamente los datos es de 6 horas y la distribución es relativamente constante en él. Lo anterior implica que las variaciones en el tiempo de secado debidas a este primer intervalo del proceso abarcan hasta 6 horas, lo que refleja, considerando que la carga ya está presecada y lo expuesto anteriormente sobre las condiciones de trabajo de las máquinas, que la humedad con que ingresa a la etapa de secado es la causante de estas variaciones.

Histograma del tiempo de secado cuando la humedad es mayor a 40%

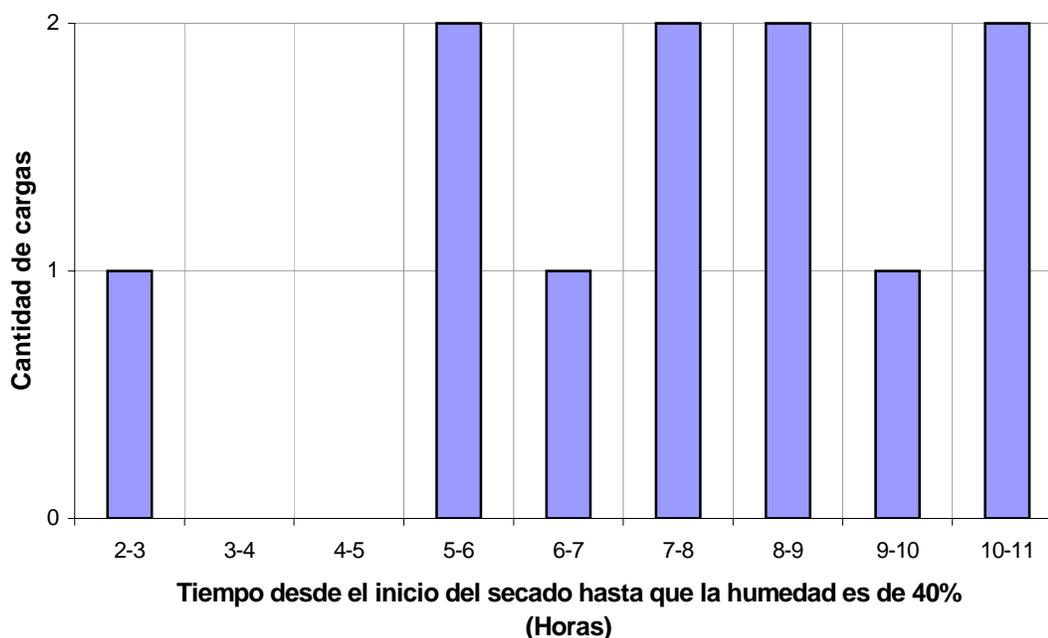


Figura 5.5 Histograma del lapso en que la humedad es mayor a 40% (con base en la Tabla 5.3)

Pare el intervalo en que la humedad del grano se encuentra entre 40% y 11%, se hará un análisis por máquina, ya que, como se expuso anteriormente, las condiciones de trabajo de cada una son diferentes. Debido a la limitante en la cosecha el número de cargas que reunieran las mismas condiciones de trabajo para el análisis fue, en algunos casos sólo 2 ó 3, por lo que para el análisis se tomarán cargas con condiciones similares, mas no iguales. En la Tabla 5.4 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 5.4 Valor promedio y desviación estándar por guardiola del tiempo de secado cuando la humedad está entre 40% y 11%

Guardiola	Condiciones del análisis	Tiempo Promedio	Desv. Estánd.	
			Horas	%
2	Tiempo de presecado: 4 horas. Capacidad mayor a 90%	18:29:10	0:53:58	4.86
6	Humedad de entrada a secado mayor a 40%. Capacidad mayor a 90%	21:37:48	1:12:18	5.57
8	Tiempo de presecado: 4 horas. Capacidad mayor a 90%	22:02:55	0:18:42	1.41
	Tiempo de presecado: 4 horas. Capacidad al 75%	17:57:52	0:34:28	3.20

Con base en los resultados de la Tabla 5.4 se puede notar que la mayor variación en el tiempo de secado para el intervalo en que la humedad está entre 40% y 11% fue de 5.57%. Considerando el poco control que existe sobre las temperaturas y caudales esta diferencia es aceptable y no influye considerablemente sobre la variación total del tiempo.

Con respecto al último intervalo de análisis (humedad de 11% o menos) se encontró que la humedad de salida de las cargas analizadas varía sustancialmente de una a otra, abarcando un intervalo desde 6.2% hasta 11%, en café pergamino. En la Figura 5.6 se muestra el histograma de la humedad de salida.

Histograma de la humedad de salida

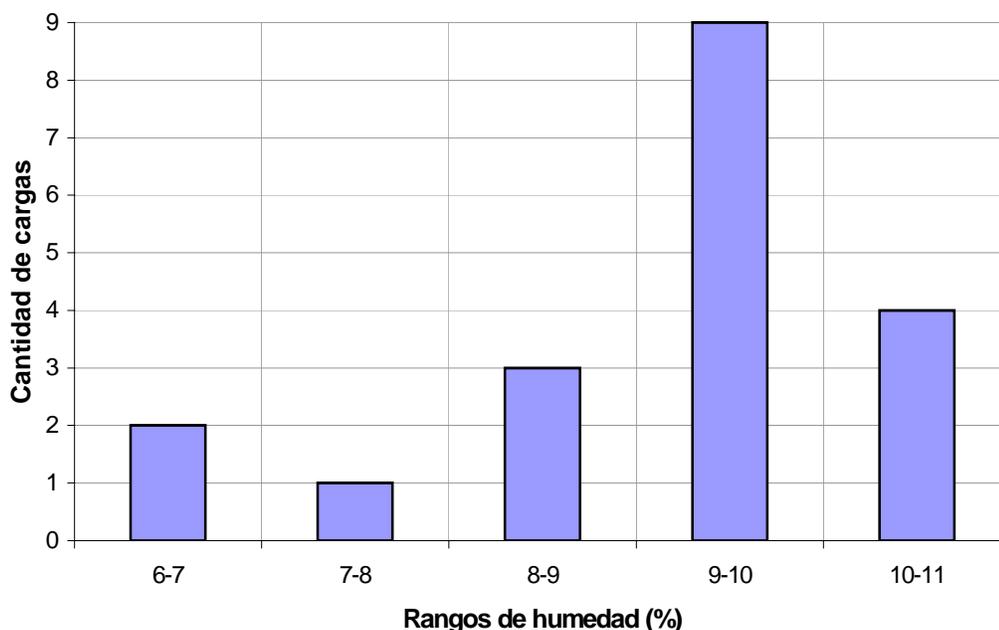


Figura 5.6 Histograma de la humedad de salida (con base en la Tabla 5.3)

En la Figura 5.7 se muestra el histograma del tiempo de secado para el intervalo en análisis.

Histograma del tiempo de secado cuando la humedad es menor a 11%

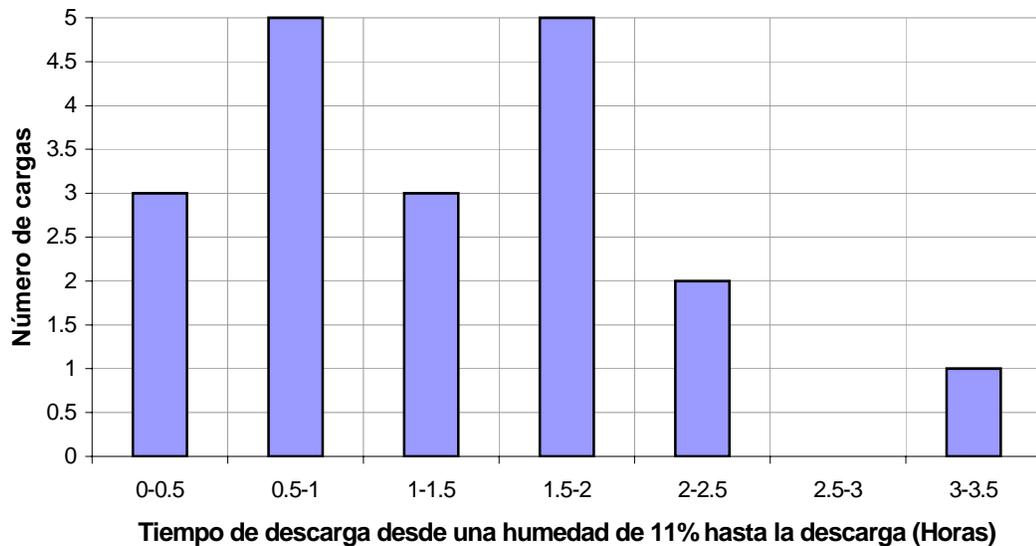


Figura 5.7 Histograma del lapso en que la humedad es menor a 11% (con base en la Tabla 5.3)

El tiempo de secado en el intervalo en que la humedad es menor a 11% varía desde 8 minutos hasta 3:19:42 horas. Como se observa en la Figura 5.7, de las 19 cargas consideradas en el análisis, 16 fueron descargadas en 2 horas o menos, la humedad para estas cargas se encontraba entre 11% y 8.7% (cabe resaltar que a pesar de que una carga fue descargada con 7% de humedad no fue incluida, pues constituye una prueba, por lo que sus condiciones de trabajo son diferentes; ésta será analizada posteriormente). Las restantes 3 cargas comprenden aquellas que, por criterio del operario, necesitaban ser secadas por más tiempo, a pesar de que otras cargas que tenían la misma humedad e inclusive mayor ya habían sido descargadas.

Con base en lo anterior puede notarse que la etapa final del proceso (el “punteo”) introduce variaciones de tipo subjetivo de peso en el tiempo de secado, pues queda completamente a criterio del operario la decisión de descargar la guardiola. A pesar de que éste cuenta con el analizador de humedad (Dole 400) para determinar el instante de descarga, el rango de variación de la misma es 4.8%.

En términos generales, con base en los datos expuestos en los párrafos anteriores, puede afirmarse que las diferencias en el tiempo de secado presentadas en el intervalo en que la humedad está entre 40% y 11% aportan poco a la diferencia total, pues aunque este lapso es el de mayor amplitud (en tiempo y humedad), las diferencias introducidas son menores a las de los otros dos intervalos de análisis (humedad mayor a 40% y humedad menor a 11%). Esto refuerza el hecho de que la diferencia temporal es debida a causas subjetivas y de diferencia en condiciones iniciales y confirma que las condiciones de trabajo de una misma máquina son constantes, pues el mayor intervalo de análisis introdujo las menores diferencias.

5.3. Sobre la temperatura del café al ingresar a la guardiola

En términos generales, la temperatura aumentó con una razón que variaba entre -2°C y 3.5°C por hora de trabajo a lo largo del proceso de secado, finalizando entre 45°C y 50°C según la humedad con que se haya descargado el café, esto se observa en la Figura 5.8. Para aquellos intervalos en que la temperatura del aire se encontraba entre 50°C y 60°C , el aumento en la temperatura del grano de café se dio con una razón entre 0°C y 1°C por hora y para aquellos intervalos en que la temperatura del aire superaba los 60°C el cambio en la temperatura de la masa de café oscilaba entre 1°C y 2°C por hora. Cuando la humedad de la carga era menor del 13% la razón de cambio aumentaba de 2°C por hora.

Por otra parte, para aquellas cargas en que el proceso de secado debió interrumpirse, por ejemplo por limpieza del horno, la temperatura, durante el tiempo de interrupción, experimentó una disminución como consecuencia del decremento en la temperatura del aire, como se puede notar en la Figura 5.9 para el intervalo entre las 13 y las 18 horas. Al encender nuevamente el horno, la temperatura del grano aumentó (en este caso en particular a razón de 6°C por hora) hasta alcanzar la temperatura que tenía antes de apagar el horno, en términos generales esta razón variaba entre 5.5°C y 6.5°C por hora. A partir de este punto continua con el comportamiento normal de la temperatura, descrito en el anterior párrafo.

Temperatura de la masa del café en función del tiempo

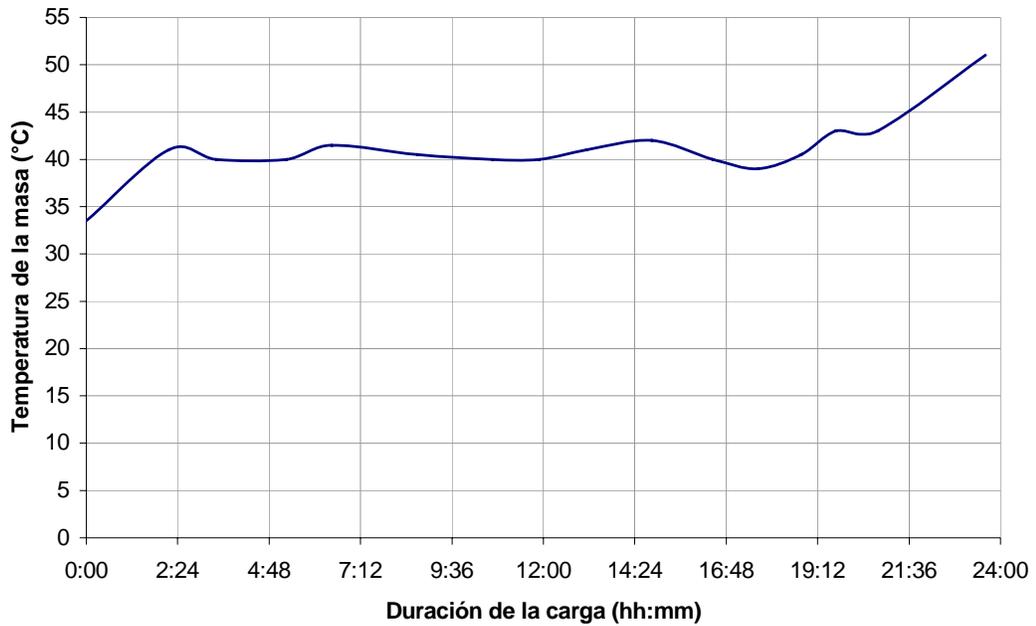


Figura 5.8 Comportamiento de la temperatura de la masa del café cuando no se detiene el horno

Temperatura de la masa del café en función del tiempo

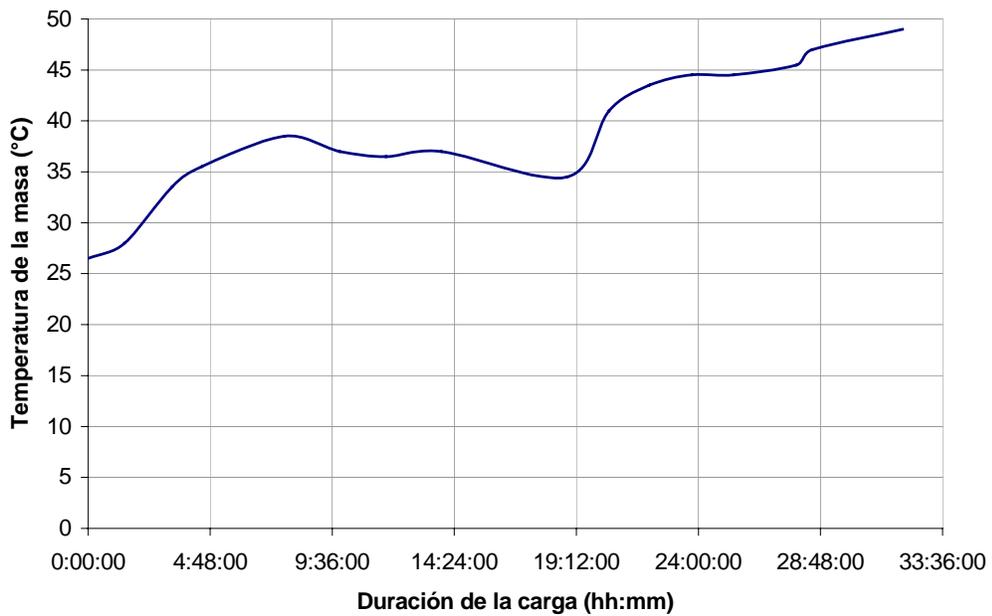


Figura 5.9 Comportamiento de la temperatura de la masa del café cuando se detiene el horno a las 17:00 horas de proceso

Con base en lo anterior puede afirmarse que la variación en el tiempo de secado introducida por la temperatura del café no supera una hora de trabajo pues, a pesar de que las cargas no ingresan con la misma temperatura, rápidamente alcanzan un punto de equilibrio de acuerdo a su humedad y a partir de este instante la temperatura aumenta de la manera descrita anteriormente a medida que su humedad disminuye.

5.4. Sobre el modelo matemático

Con base en el procedimiento explicado en el apartado 4.5, se obtuvo un modelo para cada una de las guardiolas estudiadas. Los resultados obtenidos para los diversos modelos propuestos, respecto a la media del error, se muestran en la Tabla 5.5. Con base en ellos se decidió que el modelo a validar es aquel en que las entradas son de grado global dos (cuadráticas) y requiere dos entradas pasadas y dos salidas pasadas pues este es el que presenta el menor error.

Tabla 5.5 Características de los modelos propuestos y el error obtenido con cada uno de ellos

Grado global de las entradas	Entradas pasadas consideradas en el modelo	Salidas pasadas consideradas en el modelo	Total de constantes determinadas	Error
Lineales	0	1	6	0.2788
Lineales	1	1	10	1.1618
Lineales	2	1	14	0.8718
Cuadráticas	0	1	16	0.4962
Cuadráticas	1	1	30	0.0550
Cuadráticas	2	1	44	0.0296
Lineales	0	2	7	1.6709
Lineales	1	2	11	1.6137
Lineales	2	2	15	1.2671
Cuadráticas	0	2	17	0.9380
Cuadráticas	1	2	31	0.0684
Cuadráticas	2	2	45	0.0282

Los resultados obtenidos al validar el modelo se muestran en la Tabla 5.6. Los valores de la carga validada (A, B, C y D) son genéricos y no representan a alguna carga en particular de las mostradas en la Tabla 5.1. Las gráficas comprendidas entre la Figura 5.10 y la Figura 5.20 muestran de forma gráfica el comportamiento de la salida teórica (medida) y la experimental (salida del modelo) para cada una de las ecuaciones entre (5.1) y (5.11).

Tabla 5.6 Resultados obtenidos al validar los modelos determinados

Carga Validada	Guardiola 2			Guardiola 6			Guardiola 8		
	Error	Figura	Ecuación	Error	Figura	Ecuación	Error	Figura	Ecuación
A	0.0013	Figura 5.10	(5.1)	0.0070	Figura 5.14	(5.5)	0.0049	Figura 5.17	(5.8)
B	0.0054	Figura 5.11	(5.2)	0.0119	Figura 5.15	(5.6)	0.0035	Figura 5.18	(5.9)
C	0.0239	Figura 5.12	(5.3)	0.0092	Figura 5.16	(5.7)	0.0524	Figura 5.19	(5.10)
D	0.0033	Figura 5.13	(5.4)	No Aplica	No Aplica	No Aplica	0.0008	Figura 5.20	(5.11)

Así por ejemplo, la ecuación (5.1) fue obtenida con las cargas B, C y D de la guardiola 2 y el error fue calculado al validar con la carga A. La ecuación (5.2) se obtuvo con las cargas A, C y D de la guardiola 2 y mientras que el error se determinó al validar con la carga B. De igual forma se procedió con el resto de cargas a validar.

Con base en las ecuaciones mostradas en la Tabla 5.6 se tomó como modelo final aquella ecuación en que el error es menor.

a. Validando la carga 1 de la guardiola 2

Comportamiento de la humedad de la carga 1 a lo largo del tiempo

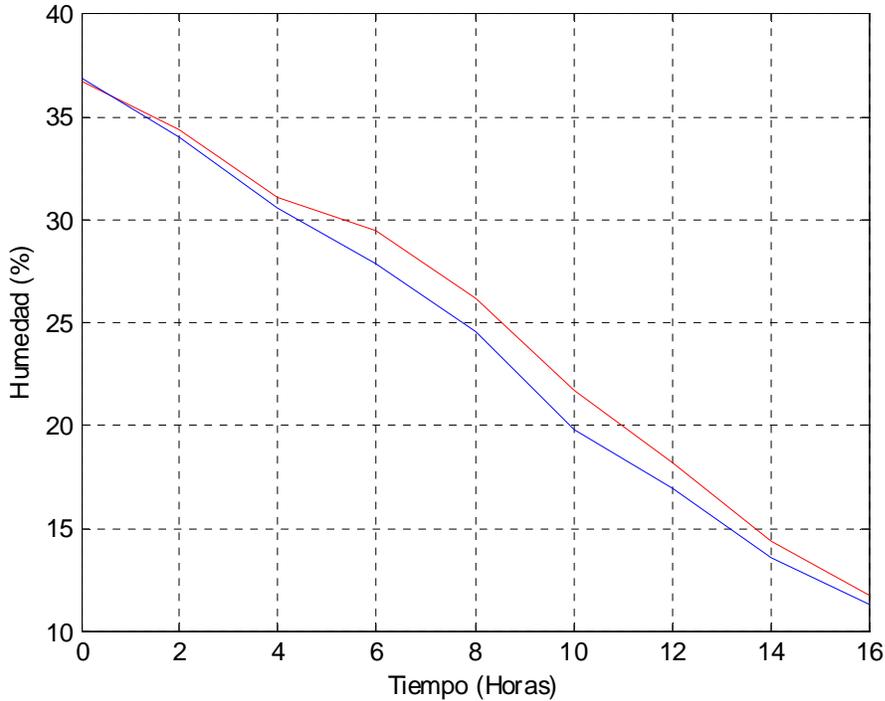


Figura 5.10 Gráfica del comportamiento de la humedad de la carga 1 a lo largo del tiempo
Roja: Respuesta Real; Azul: Respuesta Estimada

El modelo obtenido es:

$$\begin{aligned}
 y(n) = & 0.5877 \cdot y(n-2) + 0.2384 \cdot y(n-1) - 1.3958 \cdot T_1(n) + 0.0496 \cdot T_2(n) + 1.6386 \cdot T_M(n) \\
 & - 1.9427 \cdot V(n) - 0.9762 \cdot T_1^2(n) + 0.3161 \cdot T_1(n)T_2(n) + 1.4121 \cdot T_1(n)T_M(n) \\
 & + 0.3291 \cdot T_1(n)V(n) + 1.0811 \cdot T_2^2(n) + 2.0355 \cdot T_2(n)T_M(n) + 0.2300 \cdot T_2(n)V(n) \\
 & + 1.1754 \cdot T_M^2(n) + 1.1623 \cdot T_M(n) \cdot V(n) + 0.9832 \cdot V^2(n) - 0.4445 \cdot T_1(n-1) \\
 & + 0.4011 \cdot T_2(n-1) + 1.0151 \cdot T_M(n-1) + 0.6054 \cdot V(n-1) + 0.2343 \cdot T_1^2(n-1) \\
 & + 0.4296 \cdot T_1(n-1)T_2(n-1) + 1.3447 \cdot T_1(n-1)T_M(n-1) - 2.4594 \cdot T_1(n-1)V(n-1) \\
 & + 0.4735 \cdot T_2^2(n-1) + 0.6954 \cdot T_2(n-1)T_M(n-1) - 2.3754 \cdot T_2(n-1)V(n-1) \\
 & + 0.2713 \cdot T_M^2(n-1) + 1.2854 \cdot T_M(n-1) \cdot V(n-1) + 3.3211 \cdot V^2(n-1) + 1.1791 \cdot T_1(n-2) \\
 & + 0.2409 \cdot T_2(n-2) - 0.6285 \cdot T_M(n-2) - 0.9882 \cdot V(n-2) + 0.6677 \cdot T_1^2(n-2) \\
 & + 0.0076 \cdot T_1(n-2)T_2(n-2) + 0.4286 \cdot T_1(n-2)T_M(n-2) - 0.2985 \cdot T_1(n-2)V(n-2) \\
 & - 1.3663 \cdot T_2^2(n-2) + 0.2618 \cdot T_2(n-2)T_M(n-2) - 1.4766 \cdot T_2(n-2)V(n-2) \\
 & + 0.3503 \cdot T_M^2(n-2) + 0.1298 \cdot T_M(n-2) \cdot V(n-2) + 2.2997 \cdot V^2(n-2) - 0.0614 * k
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

b. Validando la carga 2 de la guardiola 2

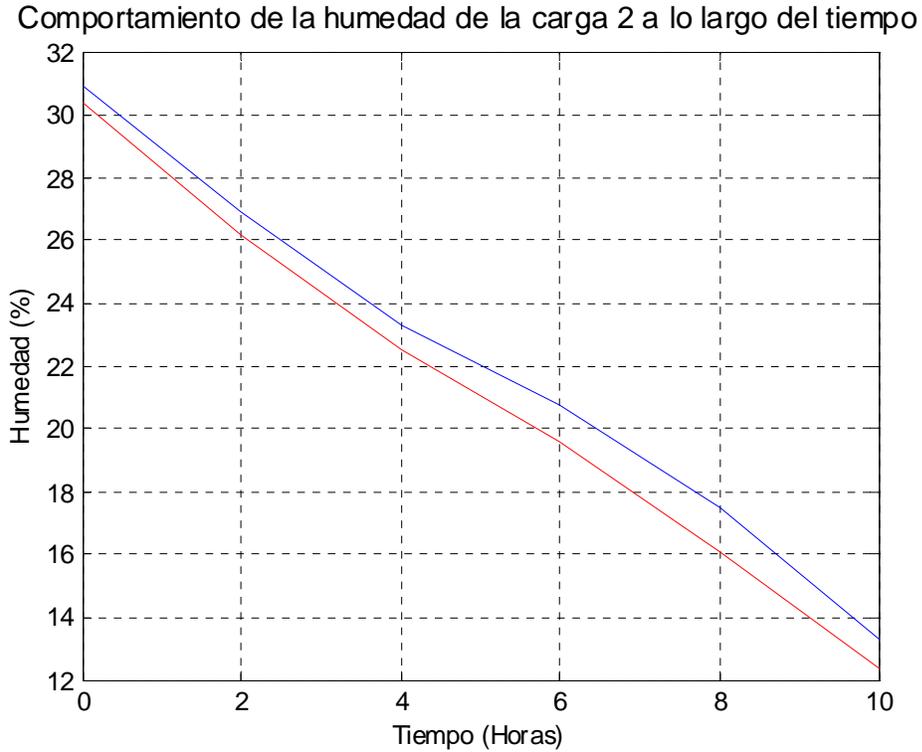


Figura 5.11 Gráfica del comportamiento de la humedad de la carga 2 a lo largo del tiempo
 Roja: Respuesta Real; Azul: Respuesta Estimada

El modelo obtenido es:

$$\begin{aligned}
 y(n) = & 0.3743 \cdot y(n-2) + 0.5147 \cdot y(n-1) + 0.2148 \cdot T_1(n) - 0.3628 \cdot T_2(n) + 0.1028 \cdot T_M(n) \\
 & - 0.4394 \cdot V(n) - 0.3046 \cdot T_1^2(n) + 0.2005 \cdot T_1(n)T_2(n) + 0.9339 \cdot T_1(n)T_M(n) \\
 & - 0.4552 \cdot T_1(n)V(n) + 0.1807 \cdot T_2^2(n) + 0.5630 \cdot T_2(n)T_M(n) + 0.0777 \cdot T_2(n)V(n) \\
 & + 0.2489 \cdot T_M^2(n) + 0.7663 \cdot T_M(n) \cdot V(n) + 0.1174 \cdot V^2(n) + 0.3774 \cdot T_1(n-1) \\
 & + 0.1698 \cdot T_2(n-1) + 0.1904 \cdot T_M(n-1) - 0.1567 \cdot V(n-1) + 0.0328 \cdot T_1^2(n-1) \\
 & + 0.0173 \cdot T_1(n-1)T_2(n-1) + 0.1171 \cdot T_1(n-1)T_M(n-1) - 0.0637 \cdot T_1(n-1)V(n-1) \\
 & - 0.5393 \cdot T_2^2(n-1) + 0.4565 \cdot T_2(n-1)T_M(n-1) - 0.1076 \cdot T_2(n-1)V(n-1) \\
 & + 0.6813 \cdot T_M^2(n-1) + 0.5601 \cdot T_M(n-1) \cdot V(n-1) + 0.3690 \cdot V^2(n-1) - 0.2766 \cdot T_1(n-2) \\
 & - 0.1287 \cdot T_2(n-2) + 0.6649 \cdot T_M(n-2) - 0.1811 \cdot V(n-2) + 0.5747 \cdot T_1^2(n-2) \\
 & + 0.2183 \cdot T_1(n-2)T_2(n-2) - 0.0345 \cdot T_1(n-2)T_M(n-2) - 0.3569 \cdot T_1(n-2)V(n-2) \\
 & - 0.5532 \cdot T_2^2(n-2) + 0.0967 \cdot T_2(n-2)T_M(n-2) + 0.0384 \cdot T_2(n-2)V(n-2) \\
 & + 0.4265 \cdot T_M^2(n-2) + 0.5912 \cdot T_M(n-2) \cdot V(n-2) + 0.2248 \cdot V^2(n-2) - 0.0590 \cdot k
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

c. Validando la carga 3 de la guardiola 2

Comportamiento de la humedad de la carga 3 a lo largo del tiempo

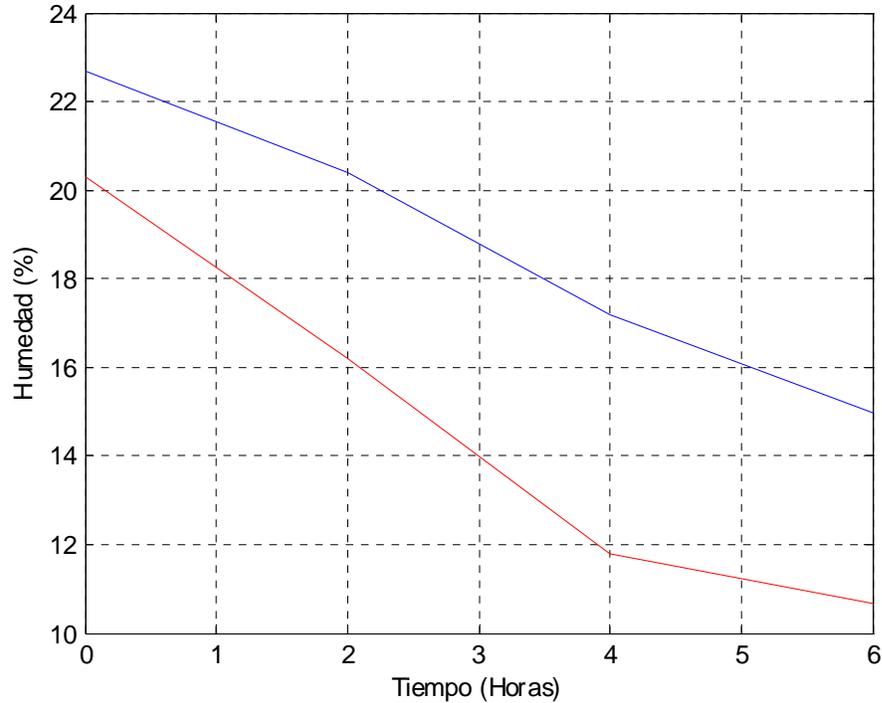


Figura 5.12 Gráfica del comportamiento de la humedad de la carga 3 a lo largo del tiempo

Roja: Respuesta Real; Azul: Respuesta Estimada

El modelo obtenido es:

$$\begin{aligned}
 y(n) = & 0.3394 \cdot y(n-2) + 0.6072 \cdot y(n-1) + 0.2224 \cdot T_1(n) - 0.1934 \cdot T_2(n) + 1.0840 \cdot T_M(n) \\
 & - 0.5417 \cdot V(n) - 0.1367 \cdot T_1^2(n) - 0.4295 \cdot T_1(n)T_2(n) + 0.6003 \cdot T_1(n)T_M(n) \\
 & - 0.1576 \cdot T_1(n)V(n) + 0.3230 \cdot T_2^2(n) + 1.0199 \cdot T_2(n)T_M(n) + 0.0051 \cdot T_2(n)V(n) \\
 & + 0.1234 \cdot T_M^2(n) + 0.0254 \cdot T_M(n) \cdot V(n) + 0.0838 \cdot V^2(n) + 0.2282 \cdot T_1(n-1) \\
 & - 0.7406 \cdot T_2(n-1) + 0.0331 \cdot T_M(n-1) - 0.4509 \cdot V(n-1) + 0.5398 \cdot T_1^2(n-1) \\
 & + 0.3285 \cdot T_1(n-1)T_2(n-1) + 0.5195 \cdot T_1(n-1)T_M(n-1) - 0.4206 \cdot T_1(n-1)V(n-1) \\
 & - 0.0849 \cdot T_2^2(n-1) - 0.2682 \cdot T_2(n-1)T_M(n-1) - 1.3559 \cdot T_2(n-1)V(n-1) \\
 & + 0.3660 \cdot T_M^2(n-1) - 0.0196 \cdot T_M(n-1) \cdot V(n-1) + 0.6893 \cdot V^2(n-1) + 1.0533 \cdot T_1(n-2) \\
 & - 0.5965 \cdot T_2(n-2) - 0.8356 \cdot T_M(n-2) - 0.0710 \cdot V(n-2) + 1.4599 \cdot T_1^2(n-2) \\
 & - 0.3181 \cdot T_1(n-2)T_2(n-2) - 0.1682 \cdot T_1(n-2)T_M(n-2) + 0.1515 \cdot T_1(n-2)V(n-2) \\
 & - 1.0439 \cdot T_2^2(n-2) - 0.6484 \cdot T_2(n-2)T_M(n-2) - 1.2891 \cdot T_2(n-2)V(n-2) \\
 & - 0.1358 \cdot T_M^2(n-2) - 0.1991 \cdot T_M(n-2) \cdot V(n-2) + 1.1096 \cdot V^2(n-2) + 0.0662 * k
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

d. Validando la carga 4 de la guardiola 2

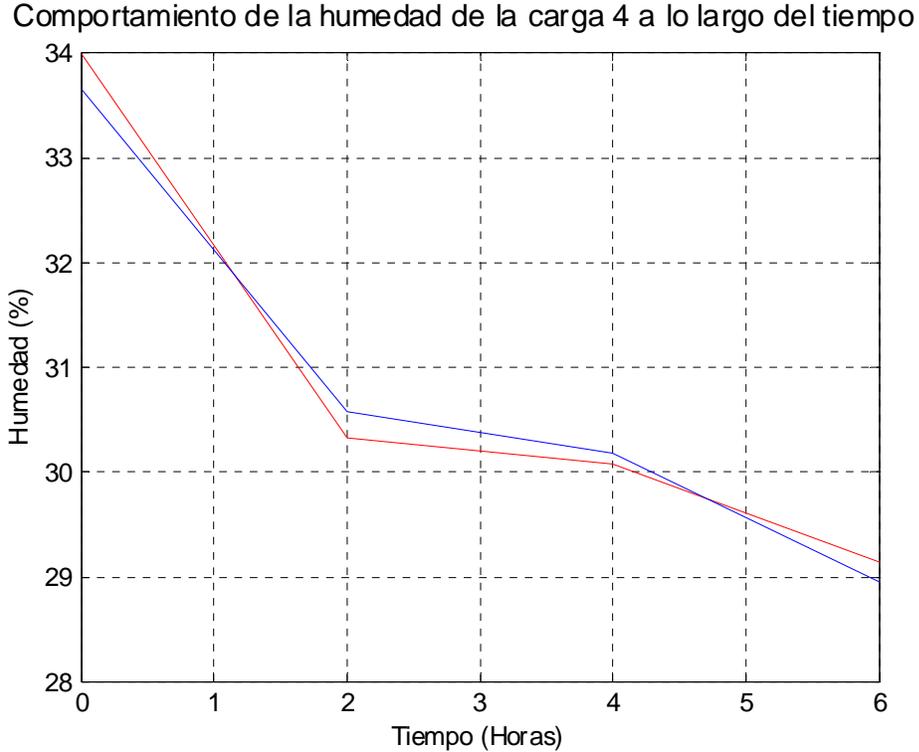


Figura 5.13 Gráfica del comportamiento de la humedad de la carga 4 a lo largo del tiempo
Roja: Respuesta Real; Azul: Respuesta Estimada

El modelo obtenido es:

$$\begin{aligned}
 y(n) = & 0.4479 \cdot y(n-2) + 0.4050 \cdot y(n-1) - 0.1457 \cdot T_1(n) + 0.1080 \cdot T_2(n) + 1.1347 \cdot T_M(n) \\
 & - 3.4580 \cdot V(n) - 0.0581 \cdot T_1^2(n) - 0.2466 \cdot T_1(n)T_2(n) + 1.2064 \cdot T_1(n)T_M(n) \\
 & - 0.6280 \cdot T_1(n)V(n) + 0.5820 \cdot T_2^2(n) + 1.2339 \cdot T_2(n)T_M(n) - 0.7627 \cdot T_2(n)V(n) \\
 & + 0.8824 \cdot T_M^2(n) - 0.0948 \cdot T_M(n) \cdot V(n) + 5.1524 \cdot V^2(n) + 1.1787 \cdot T_1(n-1) \\
 & + 0.5450 \cdot T_2(n-1) + 1.1933 \cdot T_M(n-1) - 1.2240 \cdot V(n-1) - 0.0560 \cdot T_1^2(n-1) \\
 & - 0.1981 \cdot T_1(n-1)T_2(n-1) + 1.6125 \cdot T_1(n-1)T_M(n-1) - 0.8318 \cdot T_1(n-1)V(n-1) \\
 & - 0.8438 \cdot T_2^2(n-1) + 0.9066 \cdot T_2(n-1)T_M(n-1) - 0.6433 \cdot T_2(n-1)V(n-1) \\
 & + 0.9200 \cdot T_M^2(n-1) + 0.4961 \cdot T_M(n-1) \cdot V(n-1) + 3.5349 \cdot V^2(n-1) + 1.4041 \cdot T_1(n-2) \\
 & + 1.0178 \cdot T_2(n-2) - 3.0454 \cdot T_M(n-2) - 0.6514 \cdot V(n-2) + 0.5563 \cdot T_1^2(n-2) \\
 & - 0.2912 \cdot T_1(n-2)T_2(n-2) - 1.0598 \cdot T_1(n-2)T_M(n-2) - 1.0524 \cdot T_1(n-2)V(n-2) \\
 & - 1.2909 \cdot T_2^2(n-2) - 0.3662 \cdot T_2(n-2)T_M(n-2) - 1.0267 \cdot T_2(n-2)V(n-2) \\
 & - 0.9516 \cdot T_M^2(n-2) - 0.6850 \cdot T_M(n-2) \cdot V(n-2) + 1.2543 \cdot V^2(n-2) + 0.0922 \cdot k
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

e. Validando la carga 1 de la guardiola 6

Comportamiento de la humedad de la carga 1 a lo largo del tiempo

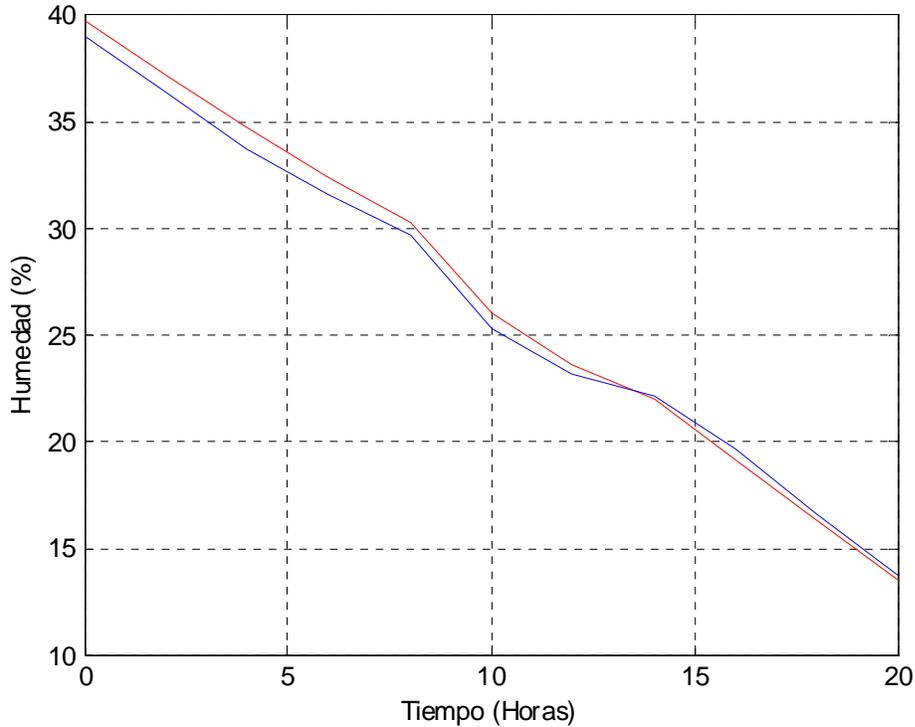


Figura 5.14 Gráfica del comportamiento de la humedad de la carga 1 a lo largo del tiempo

Roja: Respuesta Real; Azul: Respuesta Estimada

El modelo obtenido es:

$$\begin{aligned}
 y(n) = & 0.6521 \cdot y(n-2) + 0.2972 \cdot y(n-1) - 0.3424 \cdot T_1(n) + 0.2540 \cdot T_2(n) + 0.3542 \cdot T_M(n) \\
 & + 0.3504 \cdot V(n) - 0.0956 \cdot T_1^2(n) + 0.4245 \cdot T_1(n)T_2(n) - 0.0689 \cdot T_1(n)T_M(n) \\
 & + 0.2085 \cdot T_1(n)V(n) - 0.2642 \cdot T_2^2(n) + 0.7124 \cdot T_2(n)T_M(n) - 0.0194 \cdot T_2(n)V(n) \\
 & + 0.6416 \cdot T_M^2(n) - 0.0359 \cdot T_M(n) \cdot V(n) + 0.1466 \cdot V^2(n) - 0.0915 \cdot T_1(n-1) \\
 & - 0.1950 \cdot T_2(n-1) + 0.2556 \cdot T_M(n-1) - 0.0445 \cdot V(n-1) - 0.4449 \cdot T_1^2(n-1) \\
 & + 0.3139 \cdot T_1(n-1)T_2(n-1) + 0.5195 \cdot T_1(n-1)T_M(n-1) + 0.2730 \cdot T_1(n-1)V(n-1) \\
 & + 0.2039 \cdot T_2^2(n-1) + 0.4260 \cdot T_2(n-1)T_M(n-1) - 0.3358 \cdot T_2(n-1)V(n-1) \\
 & + 0.1826 \cdot T_M^2(n-1) + 0.4327 \cdot T_M(n-1) \cdot V(n-1) + 0.1161 \cdot V^2(n-1) - 0.4003 \cdot T_1(n-2) \\
 & - 0.3983 \cdot T_2(n-2) + 0.1016 \cdot T_M(n-2) - 0.3300 \cdot V(n-2) + 0.0918 \cdot T_1^2(n-2) \\
 & + 0.5091 \cdot T_1(n-2)T_2(n-2) + 0.4708 \cdot T_1(n-2)T_M(n-2) - 0.2075 \cdot T_1(n-2)V(n-2) \\
 & + 0.0602 \cdot T_2^2(n-2) + 0.4663 \cdot T_2(n-2)T_M(n-2) - 0.3886 \cdot T_2(n-2)V(n-2) \\
 & + 0.7879 \cdot T_M^2(n-2) + 0.8032 \cdot T_M(n-2) \cdot V(n-2) + 0.1263 \cdot V^2(n-2) - 0.2040 \cdot k
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

f. Validando la carga 2 de la guardiola 6

Comportamiento de la humedad de la carga 2 a lo largo del tiempo

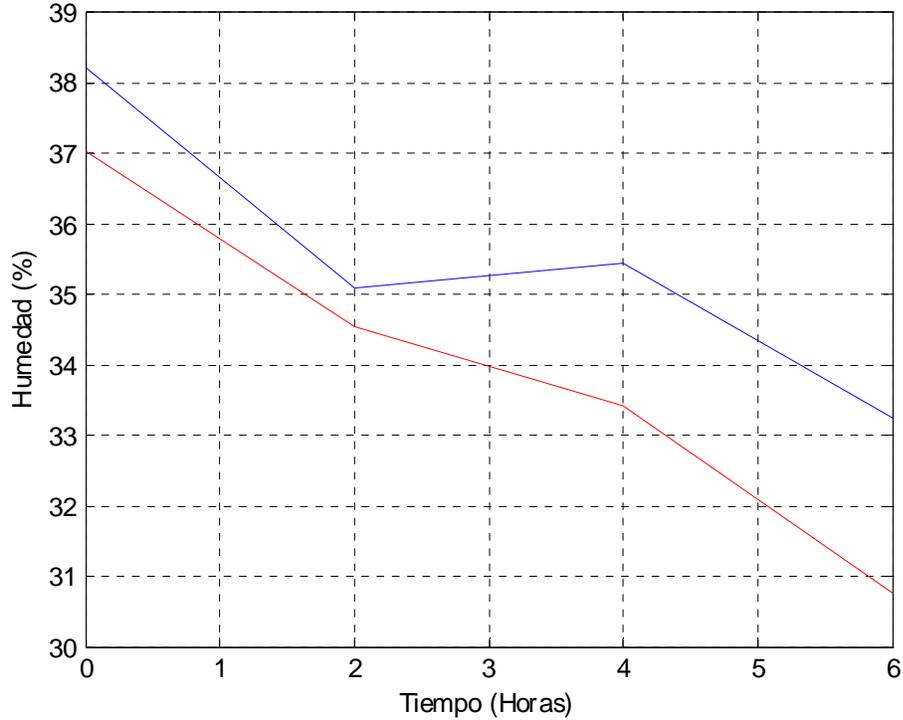


Figura 5.15 Gráfica del comportamiento de la humedad de la carga 2 a lo largo del tiempo

Roja: Respuesta Real; Azul: Respuesta Estimada

El modelo obtenido es:

$$\begin{aligned}
 y(n) = & 0.4260 \cdot y(n-2) + 0.6344 \cdot y(n-1) + 0.0940 \cdot T_1(n) + 0.2210 \cdot T_2(n) - 0.0826 \cdot T_M(n) \\
 & - 0.2144 \cdot V(n) + 0.3347 \cdot T_1^2(n) - 0.3326 \cdot T_1(n)T_2(n) + 0.5186 \cdot T_1(n)T_M(n) \\
 & + 0.5939 \cdot T_1(n)V(n) - 0.3679 \cdot T_2^2(n) - 0.0563 \cdot T_2(n)T_M(n) - 0.2894 \cdot T_2(n)V(n) \\
 & + 0.0038 \cdot T_M^2(n) + 0.4171 \cdot T_M(n) \cdot V(n) + 0.0134 \cdot V^2(n) + 0.3461 \cdot T_1(n-1) \\
 & - 0.3945 \cdot T_2(n-1) - 0.4302 \cdot T_M(n-1) + 0.1006 \cdot V(n-1) + 0.1420 \cdot T_1^2(n-1) \\
 & - 0.0084 \cdot T_1(n-1)T_2(n-1) - 0.1046 \cdot T_1(n-1)T_M(n-1) - 0.2532 \cdot T_1(n-1)V(n-1) \\
 & - 0.0070 \cdot T_2^2(n-1) + 0.1581 \cdot T_2(n-1)T_M(n-1) - 0.5323 \cdot T_2(n-1)V(n-1) \\
 & - 0.1054 \cdot T_M^2(n-1) + 0.0790 \cdot T_M(n-1) \cdot V(n-1) + 0.3451 \cdot V^2(n-1) + 0.3073 \cdot T_1(n-2) \\
 & - 0.3787 \cdot T_2(n-2) - 0.3166 \cdot T_M(n-2) + 0.1036 \cdot V(n-2) - 0.3169 \cdot T_1^2(n-2) \\
 & + 0.0796 \cdot T_1(n-2)T_2(n-2) + 0.6199 \cdot T_1(n-2)T_M(n-2) + 0.0703 \cdot T_1(n-2)V(n-2) \\
 & + 0.2924 \cdot T_2^2(n-2) - 0.3433 \cdot T_2(n-2)T_M(n-2) - 0.4672 \cdot T_2(n-2)V(n-2) \\
 & + 0.6777 \cdot T_M^2(n-2) + 0.1540 \cdot T_M(n-2) \cdot V(n-2) + 0.4172 \cdot V^2(n-2) + 0.0387 * k
 \end{aligned} \tag{5.6}$$

g. Validando la carga 3 de la guardiola 6

Comportamiento de la humedad de la carga 3 a lo largo del tiempo

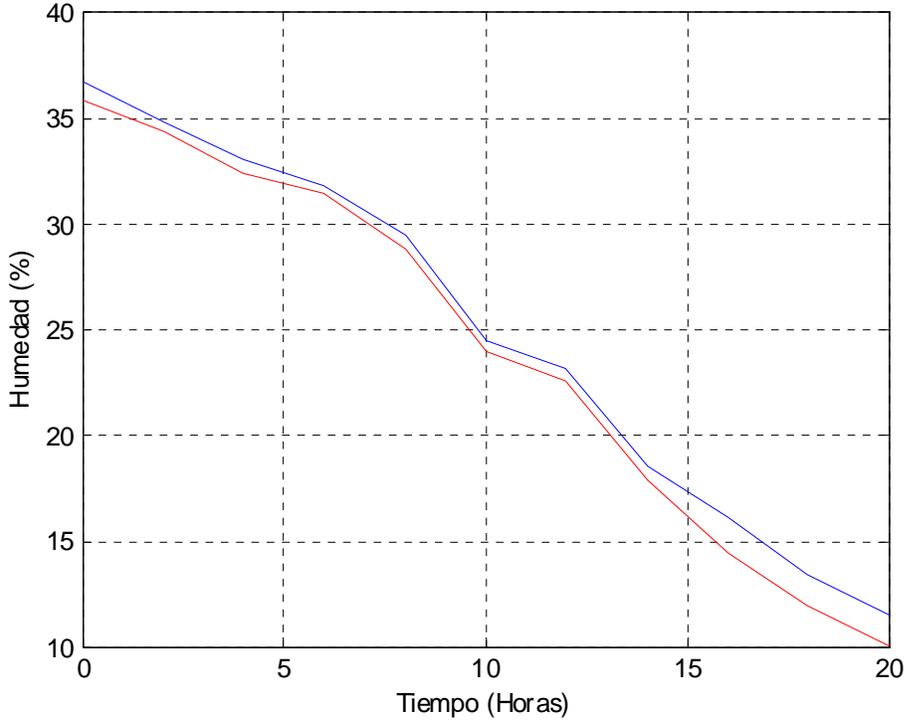


Figura 5.16 Gráfica del comportamiento de la humedad de la carga 3 a lo largo del tiempo

Roja: Respuesta Real; Azul: Respuesta Estimada

El modelo obtenido es:

$$\begin{aligned}
 y(n) = & 0.6061 \cdot y(n-2) + 0.4495 \cdot y(n-1) + 0.0940 \cdot T_1(n) - 0.2809 \cdot T_2(n) - 0.3569 \cdot T_M(n) \\
 & - 0.0800 \cdot V(n) + 0.0405 \cdot T_1^2(n) + 0.4184 \cdot T_1(n)T_2(n) + 0.0070 \cdot T_1(n)T_M(n) \\
 & + 0.5945 \cdot T_1(n)V(n) + 0.1810 \cdot T_2^2(n) - 0.0726 \cdot T_2(n)T_M(n) + 0.2165 \cdot T_2(n)V(n) \\
 & + 0.1023 \cdot T_M^2(n) + 0.8377 \cdot T_M(n) \cdot V(n) - 0.1748 \cdot V^2(n) + 0.1133 \cdot T_1(n-1) \\
 & - 0.4005 \cdot T_2(n-1) + 0.1553 \cdot T_M(n-1) - 0.2126 \cdot V(n-1) + 0.0353 \cdot T_1^2(n-1) \\
 & + 0.1841 \cdot T_1(n-1)T_2(n-1) - 0.0322 \cdot T_1(n-1)T_M(n-1) - 0.4311 \cdot T_1(n-1)V(n-1) \\
 & - 0.0928 \cdot T_2^2(n-1) + 0.2362 \cdot T_2(n-1)T_M(n-1) - 0.2744 \cdot T_2(n-1)V(n-1) \\
 & - 0.7493 \cdot T_M^2(n-1) + 0.1712 \cdot T_M(n-1) \cdot V(n-1) + 0.2512 \cdot V^2(n-1) + 0.1602 \cdot T_1(n-2) \\
 & + 0.3148T_2(n-2) + 0.2206 \cdot T_M(n-2) + 0.0843 \cdot V(n-2) - 0.0501 \cdot T_1^2(n-2) \\
 & - 0.5017 \cdot T_1(n-2)T_2(n-2) + 0.4659 \cdot T_1(n-2)T_M(n-2) + 0.0514 \cdot T_1(n-2)V(n-2) \\
 & - 0.0784 \cdot T_2^2(n-2) - 0.2116 \cdot T_2(n-2)T_M(n-2) - 0.0227 \cdot T_2(n-2)V(n-2) \\
 & + 0.7574 \cdot T_M^2(n-2) + 0.0481 \cdot T_M(n-2) \cdot V(n-2) + 0.3208 \cdot V^2(n-2) + 0.1074 * k
 \end{aligned} \tag{5.7}$$

h. Validando la carga 1 de la guardiola 8

Comportamiento de la humedad de la carga 1 a lo largo del tiempo

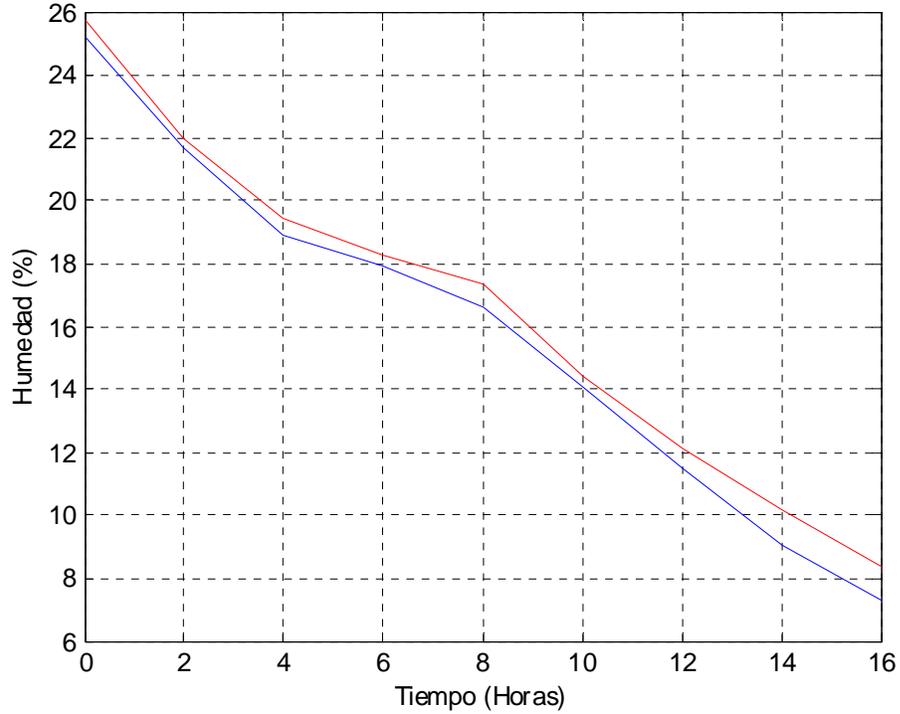


Figura 5.17 Gráfica del comportamiento de la humedad de la carga 1 a lo largo del tiempo

Roja: Respuesta Real; Azul: Respuesta Estimada

El modelo obtenido es:

$$\begin{aligned}
 y(n) = & 0.3544 \cdot y(n-2) + 0.8299 \cdot y(n-1) - 0.3385 \cdot T_1(n) + 0.5038 \cdot T_2(n) + 0.0173 \cdot T_M(n) \\
 & - 0.1481 \cdot V(n) - 0.8153 \cdot T_1^2(n) + 0.2487 \cdot T_1(n)T_2(n) - 0.1651 \cdot T_1(n)T_M(n) \\
 & - 0.1301 \cdot T_1(n)V(n) + 0.1011 \cdot T_2^2(n) - 0.0975 \cdot T_2(n)T_M(n) + 0.6944 \cdot T_2(n)V(n) \\
 & - 0.0126 \cdot T_M^2(n) - 0.1074 \cdot T_M(n) \cdot V(n) - 0.1143 \cdot V^2(n) - 0.7320 \cdot T_1(n-1) \\
 & + 0.1956 \cdot T_2(n-1) + 0.5025 \cdot T_M(n-1) + 0.2152 \cdot V(n-1) - 0.6465 \cdot T_1^2(n-1) \\
 & + 0.2352 \cdot T_1(n-1)T_2(n-1) - 0.1730 \cdot T_1(n-1)T_M(n-1) - 0.5457 \cdot T_1(n-1)V(n-1) \\
 & + 0.8077 \cdot T_2^2(n-1) + 0.5113 \cdot T_2(n-1)T_M(n-1) - 0.1889 \cdot T_2(n-1)V(n-1) \\
 & + 0.0190 \cdot T_M^2(n-1) + 0.1247 \cdot T_M(n-1) \cdot V(n-1) + 0.8724 \cdot V^2(n-1) - 0.6775 \cdot T_1(n-2) \\
 & - 0.2178T_2(n-2) - 0.2041 \cdot T_M(n-2) + 0.6267 \cdot V(n-2) + 0.5214 \cdot T_1^2(n-2) \\
 & + 0.0338 \cdot T_1(n-2)T_2(n-2) + 0.0217 \cdot T_1(n-2)T_M(n-2) - 0.6899 \cdot T_1(n-2)V(n-2) \\
 & + 0.4376 \cdot T_2^2(n-2) - 0.2705 \cdot T_2(n-2)T_M(n-2) - 0.4198 \cdot T_2(n-2)V(n-2) \\
 & + 0.6108 \cdot T_M^2(n-2) + 0.5093 \cdot T_M(n-2) \cdot V(n-2) - 0.0686 \cdot V^2(n-2) + 0.0180 * k
 \end{aligned} \tag{5.8}$$

i. Validando la carga 2 de la guardiola 8

Comportamiento de la humedad de la carga 2 a lo largo del tiempo

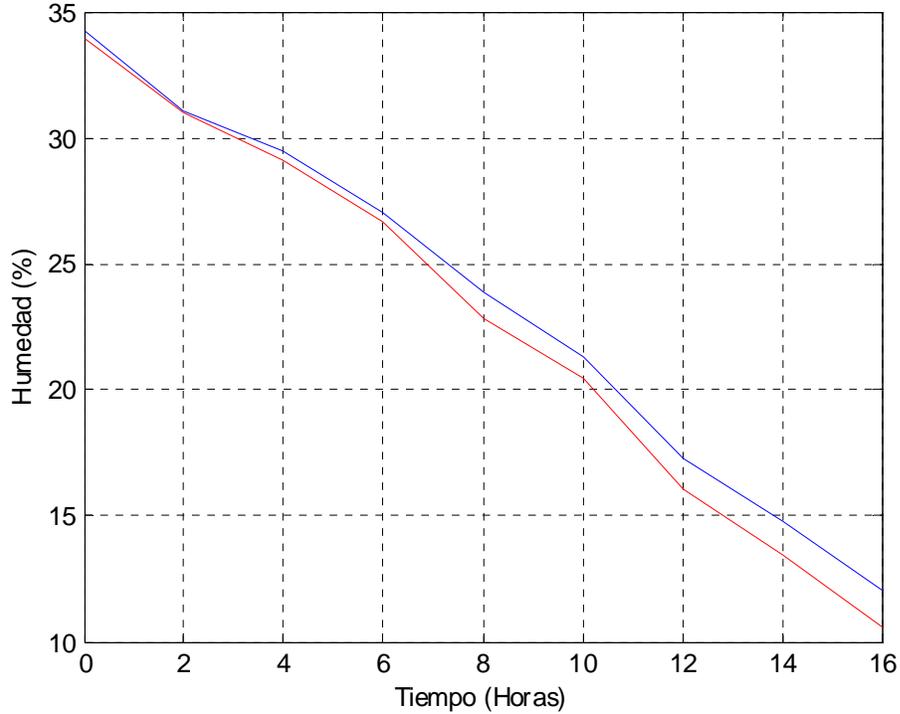


Figura 5.18 Gráfica del comportamiento de la humedad de la carga 2 a lo largo del tiempo

Roja: Respuesta Real; Azul: Respuesta Estimada

El modelo obtenido es:

$$\begin{aligned}
 y(n) = & 0.1695 \cdot y(n-2) + 1.1516 \cdot y(n-1) - 0.7911 \cdot T_1(n) + 0.2780 \cdot T_2(n) + 0.3000 \cdot T_M(n) \\
 & + 0.1216 \cdot V(n) - 0.4246 \cdot T_1^2(n) + 0.3954 \cdot T_1(n)T_2(n) - 0.3547 \cdot T_1(n)T_M(n) \\
 & + 0.2579 \cdot T_1(n)V(n) + 0.0379 \cdot T_2^2(n) + 0.5012 \cdot T_2(n)T_M(n) + 0.2557 \cdot T_2(n)V(n) \\
 & + 0.5665 \cdot T_M^2(n) - 0.2286 \cdot T_M(n) \cdot V(n) + 0.1205 \cdot V^2(n) - 0.2856 \cdot T_1(n-1) \\
 & + 0.1541 \cdot T_2(n-1) + 0.3580 \cdot T_M(n-1) + 0.1782 \cdot V(n-1) - 0.8435 \cdot T_1^2(n-1) \\
 & + 0.2395 \cdot T_1(n-1)T_2(n-1) - 0.3397 \cdot T_1(n-1)T_M(n-1) - 0.0782 \cdot T_1(n-1)V(n-1) \\
 & + 0.4867 \cdot T_2^2(n-1) + 0.3343 \cdot T_2(n-1)T_M(n-1) - 0.4974 \cdot T_2(n-1)V(n-1) \\
 & + 0.1510 \cdot T_M^2(n-1) + 0.3847 \cdot T_M(n-1) \cdot V(n-1) + 0.2103 \cdot V^2(n-1) - 0.4989 \cdot T_1(n-2) \\
 & - 0.0916T_2(n-2) - 0.5072 \cdot T_M(n-2) + 0.1928 \cdot V(n-2) - 0.1813 \cdot T_1^2(n-2) \\
 & + 0.4586 \cdot T_1(n-2)T_2(n-2) - 0.0127 \cdot T_1(n-2)T_M(n-2) - 0.1794 \cdot T_1(n-2)V(n-2) \\
 & + 0.2563 \cdot T_2^2(n-2) + 0.0307 \cdot T_2(n-2)T_M(n-2) - 0.2054 \cdot T_2(n-2)V(n-2) \\
 & + 0.5516 \cdot T_M^2(n-2) + 0.5906 \cdot T_M(n-2) \cdot V(n-2) + 0.1434 \cdot V^2(n-2) + 0.0343 * k
 \end{aligned} \tag{5.9}$$

j. Validando la carga 3 de la guardiola 8

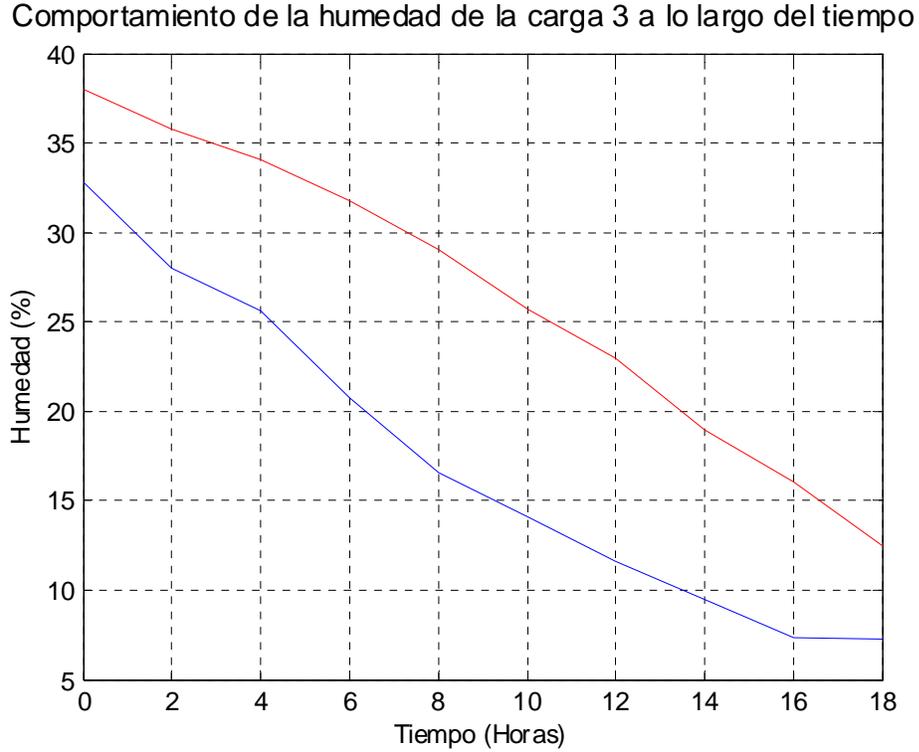


Figura 5.19 Gráfica del comportamiento de la humedad de la carga 3 a lo largo del tiempo
 Roja: Respuesta Real; Azul: Respuesta Estimada

El modelo obtenido es:

$$\begin{aligned}
 y(n) = & 0.6129 \cdot y(n-2) + 0.2239 \cdot y(n-1) - 0.0027 \cdot T_1(n) - 0.6420 \cdot T_2(n) + 0.1846 \cdot T_M(n) \\
 & - 0.4415 \cdot V(n) - 0.3686 \cdot T_1^2(n) + 0.2746 \cdot T_1(n)T_2(n) + 0.6609 \cdot T_1(n)T_M(n) \\
 & - 0.1324 \cdot T_1(n)V(n) + 0.3733 \cdot T_2^2(n) - 0.0386 \cdot T_2(n)T_M(n) + 0.2599 \cdot T_2(n)V(n) \\
 & + 0.7121 \cdot T_M^2(n) + 0.2642 \cdot T_M(n) \cdot V(n) + 0.1130 \cdot V^2(n) + 0.3499 \cdot T_1(n-1) \\
 & - 0.0008 \cdot T_2(n-1) + 0.1209 \cdot T_M(n-1) - 0.3242 \cdot V(n-1) - 0.2280 \cdot T_1^2(n-1) \\
 & + 0.0474 \cdot T_1(n-1)T_2(n-1) + 0.3179 \cdot T_1(n-1)T_M(n-1) - 0.0134 \cdot T_1(n-1)V(n-1) \\
 & + 0.1385 \cdot T_2^2(n-1) - 0.0264 \cdot T_2(n-1)T_M(n-1) - 0.1894 \cdot T_2(n-1)V(n-1) \\
 & + 0.5903 \cdot T_M^2(n-1) + 0.0647 \cdot T_M(n-1) \cdot V(n-1) + 0.2420 \cdot V^2(n-1) - 0.3824 \cdot T_1(n-2) \\
 & - 0.0791T_2(n-2) + 0.3139 \cdot T_M(n-2) + 0.0476 \cdot V(n-2) + 0.0928 \cdot T_1^2(n-2) \\
 & + 0.4668 \cdot T_1(n-2)T_2(n-2) + 0.2056 \cdot T_1(n-2)T_M(n-2) + 0.1070 \cdot T_1(n-2)V(n-2) \\
 & - 0.1963 \cdot T_2^2(n-2) + 0.2673 \cdot T_2(n-2)T_M(n-2) - 0.0255 \cdot T_2(n-2)V(n-2) \\
 & + 0.3534 \cdot T_M^2(n-2) + 0.4132 \cdot T_M(n-2) \cdot V(n-2) + 0.5359 \cdot V^2(n-2) + 0.0286 * k
 \end{aligned} \tag{5.10}$$

k. Validando la carga 4 de la guardiola 8

Comportamiento de la humedad de la carga 4 a lo largo del tiempo

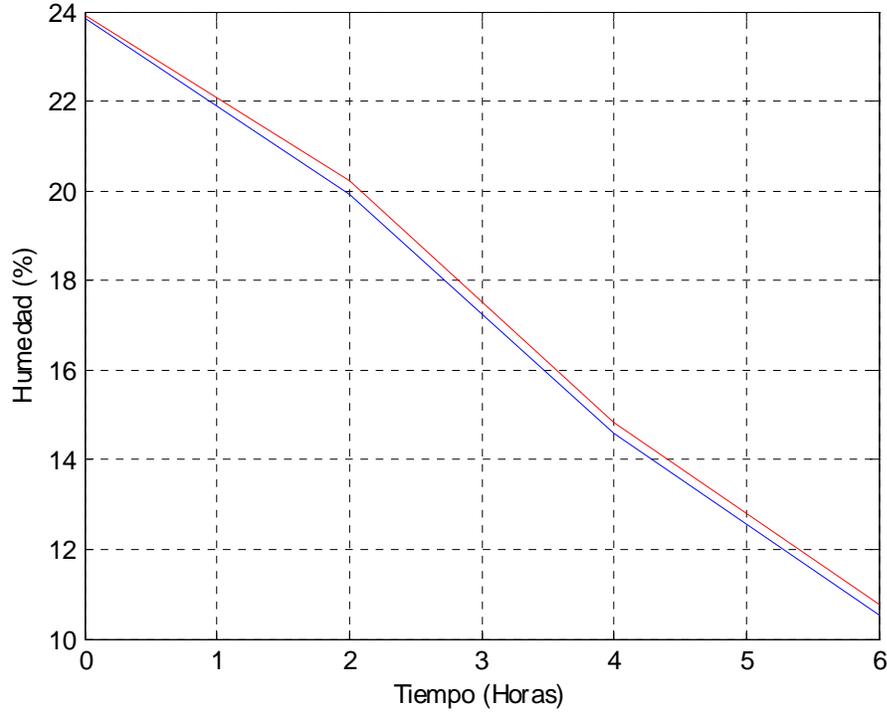


Figura 5.20 Gráfica del comportamiento de la humedad de la carga 4 a lo largo del tiempo

Roja: Respuesta Real; Azul: Respuesta Estimada

El modelo obtenido es:

$$\begin{aligned}
 y(n) = & 0.9092 \cdot y(n-2) + 0.1015 \cdot y(n-1) - 0.6247 \cdot T_1(n) + 0.2005 \cdot T_2(n) + 0.1786 \cdot T_M(n) \\
 & - 1.5767 \cdot V(n) - 0.4458 \cdot T_1^2(n) - 0.3405 \cdot T_1(n)T_2(n) + 0.1172 \cdot T_1(n)T_M(n) \\
 & - 0.6665 \cdot T_1(n)V(n) + 0.8601 \cdot T_2^2(n) + 0.2380 \cdot T_2(n)T_M(n) + 0.3230 \cdot T_2(n)V(n) \\
 & + 0.4007 \cdot T_M^2(n) - 0.6144 \cdot T_M(n) \cdot V(n) + 1.8399 \cdot V^2(n) - 0.0510 \cdot T_1(n-1) \\
 & - 0.7314 \cdot T_2(n-1) + 0.8512 \cdot T_M(n-1) + 1.6767 \cdot V(n-1) + 1.0879 \cdot T_1^2(n-1) \\
 & + 0.9841 \cdot T_1(n-1)T_2(n-1) + 0.3202 \cdot T_1(n-1)T_M(n-1) - 2.7177 \cdot T_1(n-1)V(n-1) \\
 & + 0.3236 \cdot T_2^2(n-1) - 0.4178 \cdot T_2(n-1)T_M(n-1) - 2.8552 \cdot T_2(n-1)V(n-1) \\
 & + 0.5961 \cdot T_M^2(n-1) - 0.2967 \cdot T_M(n-1) \cdot V(n-1) + 3.3809 \cdot V^2(n-1) - 0.1800 \cdot T_1(n-2) \\
 & + 0.4672T_2(n-2) + 0.3366 \cdot T_M(n-2) + 0.1898 \cdot V(n-2) + 0.1224 \cdot T_1^2(n-2) \\
 & - 0.0443 \cdot T_1(n-2)T_2(n-2) + 0.4054 \cdot T_1(n-2)T_M(n-2) - 0.2784 \cdot T_1(n-2)V(n-2) \\
 & - 0.3718 \cdot T_2^2(n-2) + 0.2013 \cdot T_2(n-2)T_M(n-2) + 0.0248 \cdot T_2(n-2)V(n-2) \\
 & - 0.0179 \cdot T_M^2(n-2) + 0.3164 \cdot T_M(n-2) \cdot V(n-2) - 0.7148 \cdot V^2(n-2) + 0.0248 * k
 \end{aligned} \tag{5.11}$$

Con base en las gráficas comprendidas entre la Figura 5.10 y la Figura 5.20 puede notarse que para algunas de las cargas a validar el modelo obtenido presenta un comportamiento en que el error es constante a lo largo del proceso, o en su defecto durante intervalos prolongados, por ejemplo la Figura 5.11, la Figura 5.16 y la Figura 5.20. En estos casos el modelo predice acertadamente los cambios en la “pendiente” de la humedad como consecuencia de los cambios en las entradas, pero no logra precisar el valor correcto de la humedad.

Este comportamiento indica que las entradas del modelo y/o el modelo en sí son de orden mayor a 2 ó bien que hacen falta entradas para la satisfactoria predicción del comportamiento de la humedad. Estas entradas pueden ser condiciones ambientales (temperatura, presión atmosférica y/o humedad relativa por ejemplo) o bien alguna otra variable inherente al proceso y que no fueron contempladas en la obtención de este primer modelo. El determinar cual(es) variable(s) es la faltante implicaría una nueva investigación en la que se incluyan más variables en la obtención del modelo.

El aspecto anterior se ve reforzado con los resultados mostrados en la Figura 5.10, durante las primeras 4 horas del proceso la diferencia entre la respuesta real y la estimada fue prácticamente constante. Cerca de las 4 horas hubo un cambio en la respuesta real que no pudo ser estimado correctamente por el modelo obtenido, este comportamiento refleja que una de las entradas no contempladas en el modelo varió, lo que hizo que el error entre las respuestas cambiara. Luego de las 6 horas la diferencia entre ambas respuestas nuevamente vuelve a ser constante lo que implica que la entrada no contemplada volvió a su valor anterior o bien compensó su aporte en el cambio de humedad con otras variables y por tanto generó nuevamente un error constante, situación similar sucede cerca de las 10 horas.

Este comportamiento también se observa en la Figura 5.16, en donde es posible notar que durante casi todo el proceso el error fue constante, esto a excepción de los intervalos cercanos a las 6 horas y las 14 horas del proceso, en donde se presentó la situación explicada en el párrafo anterior.

Lo mismo sucede en la Figura 5.18 aproximadamente a las 6 horas de proceso y en la Figura 5.17 a las 10 horas. La Figura 5.14 también presenta esta situación sólo que, a diferencia de las anteriores, el error entre las respuestas disminuyó, el cambio más notorio se da cerca de las 14 horas, en donde el orden de las curvas se invierte y el error cambia de signo.

La Figura 5.13 presenta un comportamiento particular en el que la respuesta estimada se mantiene cerca de la real pero oscilando alrededor de ella, es decir, en algunos intervalos la respuesta real es mayor a la estimada (desde el inicio hasta la primer hora y desde poco antes de la hora 5 hasta el final de la carga) mientras que en otras la respuesta estimada es mayor a la real (desde la primer hora hasta poco antes de las 5 horas). Este comportamiento también es atribuible a las razones expresadas anteriormente.

Con respecto a las cargas cuyo resultado no fue satisfactorio (Figura 5.12, Figura 5.15 y Figura 5.19) debe aclararse el hecho de que durante la etapa de la obtención del modelo se entrenaba la neurona con un conjunto de valores, los cuales reúnen una serie de comportamientos que varían según las cargas contempladas para obtención y validación. De ahí que los resultados no satisfactorios son debidos a que los patrones usados para entrenamiento no reúnen los comportamientos encontrados en la carga de validación, por lo que ante un comportamiento nuevo el modelo se pierde.

Con base en el error obtenido para cada uno de los modelos encontrados se decidió que el modelo final para la guardiola 2 es el mostrado en (5.1), mientras que para la guardiola 6 es (5.5) y para la guardiola 8 es (5.11), pues estos modelos son los que presentan el menor error, como se observa en la Tabla 5.6.

Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

- a. La discrepancia en el tiempo de secado del café en guardiola se debe principalmente a las diferencias tanto en la humedad de entrada del café a la etapa de secado como en la humedad del grano al descargar la guardiola.
- b. Para las guardiolas 2, 6 y 8 las condiciones promedio de temperatura y caudal del aire varían, como máximo, un 2.29% de una carga a otra. De ahí que su aporte a la diferencia en el tiempo de secado es menor de 1.25 horas.
- c. El modelo que presentó el menor error considera dos salidas y dos entradas pasadas en el cálculo, además las entradas son de segundo orden.
- d. Para modelar a cabalidad el comportamiento de la humedad del proceso de secado en guardiola deben incluirse, como entrada al modelo, más variables de las consideradas en esta investigación.

6.2. Recomendaciones

- a. Colocar los sensores restantes en las guardiolas no incluidas en esta investigación y considerar éstas en un futuro trabajo.
- b. Ampliar el intervalo de estudio, al menos, a una cosecha completa.
- c. Buscar la forma de medir la humedad del café cuando ésta es mayor a 45.2%.
- d. Para mejorar el modelado, medir la humedad y temperatura del café dentro de la guardiola y así hacer que esta variable sea independiente del factor humano.
- e. Agregar más variables como entradas al modelo, por ejemplo, la humedad y temperatura ambiente así como la presión atmosférica.
- f. Validar los modelos obtenidos para cada guardiola en otra cosecha.

Bibliografía

- [1] Cleves Serrano, Rodrigo. Tecnología en beneficiado de café. Impresora Tica, S.A, 1era edición, San José, Costa Rica, 1995.
- [2] National Semiconductor. Nacional Semiconductor. [En línea]. 2000. [Consulta: 4 ago. 2006]. URL <http://www.national.com> (Información técnica del LM35DT)
- [3] Dwyer Instruments. Dwyer Instruments. [En línea]. 2005. [Consulta: 30 ene. 2007]. URL <http://www.dwyers-inst.com> (Información técnica del transmisor de velocidad de aire 641-6)
- [4] Imagen tomada de: Dwyer Instruments. Dwyer Instruments. [En línea]. 2005. [Consulta: 30 ene. 2007]. URL <http://www.dwyers-inst.com/htdocs/airvelocity/Series641Spec.CFM>
- [5] Imagen tomada de: Seedburo Equipment Company. Seedburo Equipment Company. [En Línea]. 2000. [Consulta: 30 ene. 2007] URL http://www.seedburo.com/online_cat/categ01/pb7021.asp
- [6] National Semiconductor. Nacional Semiconductor. [En línea]. 2000. [Consulta: 30 ene. 2007]. URL <http://www.national.com> (Información técnica del LM317)
- [7] On Semiconductor. ON Semiconductor. [En línea]. 2007. [Consulta: 30 ene. 2007]. URL <http://www.onsemi.com> (Información técnica del MC14051B)
- [8] On Semiconductor. ON Semiconductor. [En línea]. 2007. [Consulta: 30 ene. 2007]. URL <http://www.onsemi.com> (Información técnica del MC14053B)
- [9] Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ingeniería Eléctrica [En línea]. *Tutorial de redes neuronales*. "2.3 Backpropagation". URL <http://ohm.utp.edu.co/neuronales/maindown.htm>
- [10] J. G. Proakis and D. G. Manolakis. Tratamiento Digital de Señales. Prentice Hall, 1998.
- [11] Montgomery, Douglas. C. Runger, George. C. Probabilidad y Estadística Aplicadas a la Ingeniería. Segunda edición. México. Limusa Wiley, 2005.

- [12] Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ingeniería Eléctrica [En línea]. *Tutorial de redes neuronales*. “1. Características principales de las redes neuronales”. URL <http://ohm.utp.edu.co/neuronales/maindown.htm>
- [13] Imagen tomada de: Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ingeniería Eléctrica [En línea]. *Tutorial de redes neuronales*. “1.2 Funcionamiento de una neurona biológica”. URL <http://ohm.utp.edu.co/neuronales/maindown.htm>
- [14] Imagen tomada de: Imagen tomada de: Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ingeniería Eléctrica [En línea]. *Tutorial de redes neuronales*. “1.3 Características de una neurona artificial”. URL <http://ohm.utp.edu.co/neuronales/maindown.htm>
- [15] Picado Sanabria, Joel. F.J. Orlich Hnos Ltda. Análisis y mejoras en la administración de la producción en la Planta Santa María. Tesis. Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2003.

Apéndices

A.1. Introducción a las redes neuronales

A.1.1 Redes neuronales biológicas y artificiales^[12]

Las redes neuronales se desarrollaron bajo la idea de lograr un algoritmo computacional que trabajara como lo hace el cerebro, ya que éste es capaz de interpretar información difusa y ruidosa generando resultados coherentes, por ejemplo al reconocer a una persona en un lugar con poca luz.

Para entender como trabaja una red neuronal artificial (RNA) primero debe conocerse la forma en que lo hace una neurona biológica así como su conexión con otras neuronas. Con base en la Figura A.1, puede notarse que una neurona biológica está constituida básicamente por tres partes, a saber:

- Dendritas: Se encargan de “cargar” el cuerpo de la neurona de señales eléctricas de entrada.
- Soma: Es el cuerpo de la célula, su labor es sumar las señales de entradas.
- Axón: Se encarga de llevar la señal desde la neurona hasta otras neuronas.

Se llama sinapsis al punto de conexión entre el axón de una célula y las dendritas de otras células.

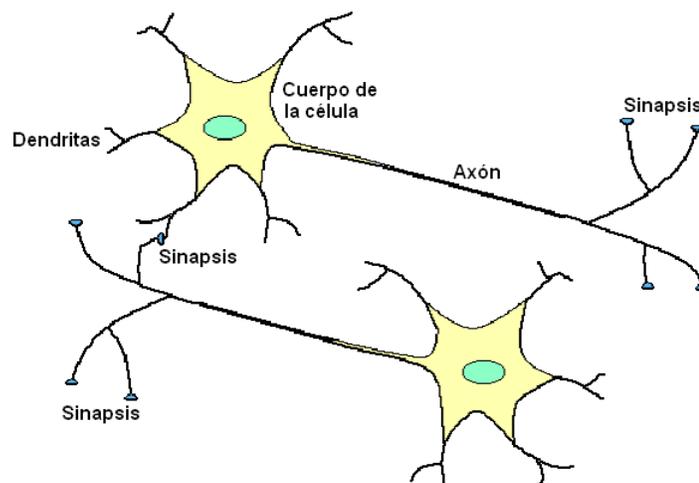


Figura A.1 Neuronas biológicas^[13]

Las RNA trabajan de forma similar a una red neuronal biológica, aunque en un nivel más reducido (el cerebro cuenta con aproximadamente 10^{11} neuronas y 10^4 conexiones por neurona). En la Figura A.2 se muestra una comparación entre la neurona artificial y la biológica. Las entradas X_i son las señales que ingresan por medio de las dendritas y vienen de otras neuronas; los términos W_i representan las sinapsis y son llamados pesos; θ es la función umbral o de transferencia que activa la neurona, en las neuronas biológicas es un proceso biológico y en las artificiales una ecuación.

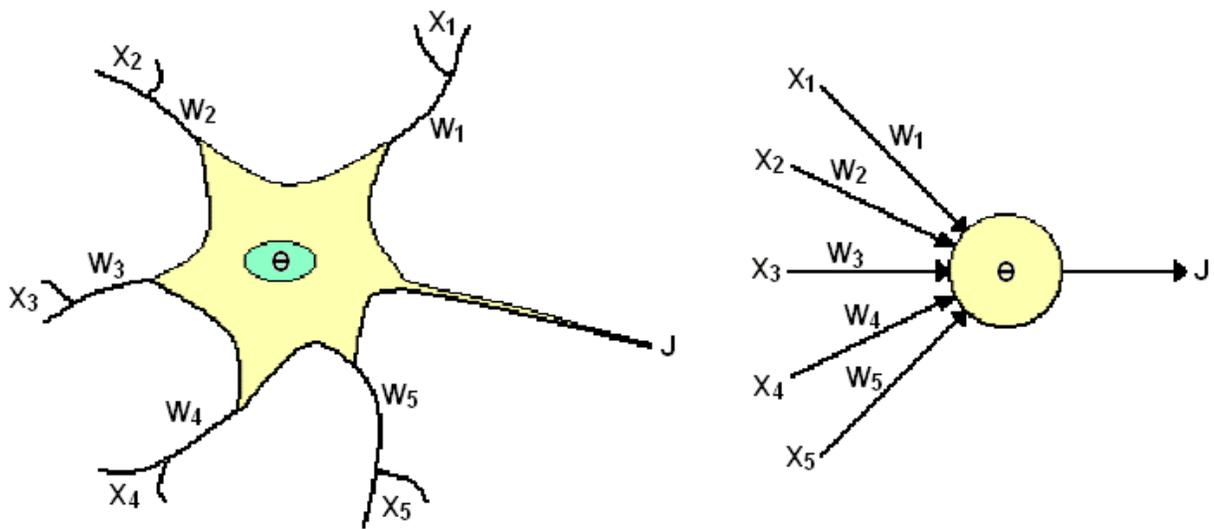


Figura A.2 Comparación entre una neurona biológica y una artificial^[14]

Las diversas señales de entrada X_i pasan a través de los pesos W_i , todos estos resultados son sumados para generar una entrada neta a la neurona, como se muestra en (A.1). Ésta es aplicada a la función umbral o de transferencia, la salida de la neurona se muestra en (A.2), f_i es la función de transferencia de la neurona. Considerando como función de transferencia la ecuación (A.3), la relación entre las entradas y la salida de la neurona a utilizar es la mostrada en (A.4).

$$\text{Entrada Neta}_i = \sum_{i=0}^n x_i w_i \quad (\text{A.1})$$

$$J_i = f_i(\text{Entrada Neta}_i) \quad (\text{A.2})$$

$$f_i = \text{Entrada Neta}_i \quad (\text{A.3})$$

$$J_i = \sum_{i=0}^n x_i w_i \quad (\text{A.4})$$

A pesar de que las redes neuronales como tales implican la utilización de varias neuronas en diversas capas (entrada, oculta y salida), para fines de este apéndice no se profundizará en ello, a pesar de que la teoría es más amplia, pues se necesitó solamente una neurona.

A.2. Manual de usuario

Al iniciar el programa “SPAAD” (Software para adquisición y almacenamiento de datos) la interfaz del mismo es la mostrada en la Figura A.3, en la parte superior se encuentra el menú y debajo de éste tres pestañas desde las cuales se puede seleccionar la sección correspondiente a los gráficos (“Graficación”) o bien la que muestra las mediciones (“Visualización (Mód1)” y “Visualización (Mód2)).

Si se selecciona la pestaña correspondiente a la graficación, en la parte inferior, en el “Combo Box 1”, aparecen las señales existentes en la base de datos, para que el usuario seleccione la señal a graficar, además debe seleccionar el intervalo de graficación (ubicado a la derecha del anterior Combo Box), la señal se grafica al presionar el botón Aplicar Cambios. La señal graficada se agrega al “Combo Box 2”, para eliminarla basta con seleccionarla en el “Combo Box 2” y presionar el botón Aplicar Cambios. El programa permite graficar un máximo de 20 señales.

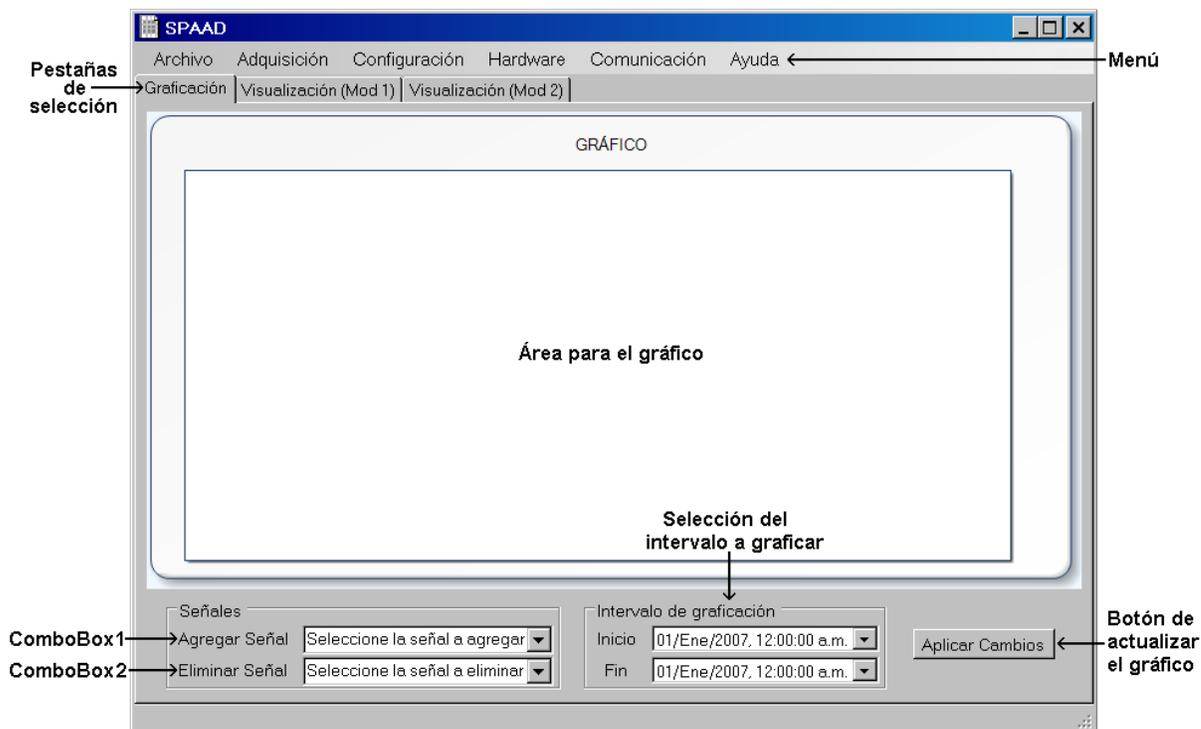


Figura A.3 Interfaz gráfica al iniciar el programa

Las pestañas llamadas “Visualización (Mod 1)” y “Visualización (Mod 2)” muestran las mediciones realizadas desde el respectivo módulo de adquisición de datos, la Figura A.4 es un ejemplo de la interfaz gráfica del programa cuando se selecciona alguna de estas dos pestañas.

En la columna “Entrada” se muestra el número de la entrada de acuerdo a su posición en el chasis, “Nombre” y “Unidad” contienen, respectivamente, el nombre y la unidad de la señal a medir, estos son configurables por el usuario. La columna “Valor” muestra la magnitud de la señal medida.

Si una entrada no está seleccionada como activa, en el programa se muestra deshabilitada su visualización, como sucede con las entradas de la 1 a la 8, 17, 19, 21 y 23.

Entrada	Nombre	Valor	Unidad	Entrada	Nombre	Valor	Unidad
1	----	----	----	13	G6_T1	52.25513	C
2	----	----	----	14	G8_T2	52.87718	C
3	----	----	----	15	G8_T1	49.45594	C
4	----	----	----	16	G8_T2	51.94411	C
5	----	----	----	17	----	----	----
6	----	----	----	18	Abanico 2	15.02727	m/s
7	----	----	----	19	----	----	----
8	----	----	----	20	Abanico 4	15.78477	m/s
9	G2_T1	50.54451	C	21	----	----	----
10	G2_T2	49.45594	C	22	Abanico 6	16.99676	m/s
11	G4_T1	49.81145	C	23	----	----	----
12	G4_T2	51.16656	C	24	Abanico 8	17.33763	m/s

Figura A.4 Interfaz gráfica al visualizar las mediciones hechas desde el módulo 1

A continuación se dará una descripción de la función de cada uno de los botones del menú.

a. Menú Archivo:

a.1. Salir: Cierra la aplicación.

b. Menú Adquisición:

b.1. Iniciar Adquisición de datos: Activa la toma de mediciones y visualización en pantalla. Tiene dos opciones “Almacenando mediciones” y “Sin almacenar mediciones”, en la primera de ellas las mediciones son tomadas, mostradas y almacenadas en la base de datos de MySQL, mientras que para la segunda opción sólo son tomadas y mostradas. Para iniciar la toma de datos debe estar inicializado el puerto serie.

b.2. Finalizar toma de datos: Termina con la toma de mediciones.

c. Menú Configuración:

c.1. Entradas analógicas: Abre un cuadro de diálogo para que el usuario configure las entradas analógicas a utilizar, en la Figura A.5 se muestra dicho cuadro. En la columna “Activar” se indica si la entrada correspondiente va a ser utilizada. En la columna “Tipo” se selecciona la salida del sensor (corriente o voltaje). La columna “Ecuación” es para indicar la función de transferencia del sensor, por ejemplo, para la Entrada 1 se está indicando que una corriente de 4mA corresponde a 0°C y que 20mA corresponden a 100°C. Las columnas “Unidad” y “Nombre” contienen, respectivamente la unidad y el nombre de la señal a medir.

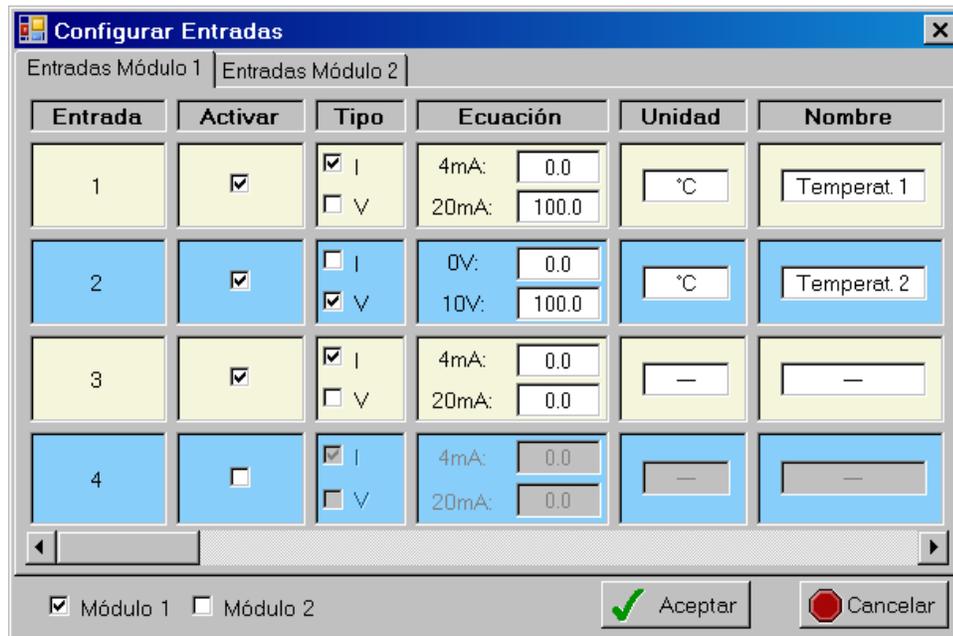


Figura A.5 Ventana de configuración de las entradas analógicas

c.2. Cargar configuración: Lee desde un archivo físico seleccionado por el usuario la configuración a utilizar.

c.3. Guardar configuración actual: Almacena en un archivo físico la configuración actual de las entradas analógicas.

c.4. Tiempo de muestreo: Permite al usuario definir el intervalo entre dos mediciones consecutivas.

d. Menú Hardware:

d.1. Configurar hardware: Descarga al hardware encargado de leer los datos la configuración actual del programa.

d.2. Comprobar Configuración: Verifica que la configuración del hardware y el software sea la misma e informa al usuario el resultado de la comprobación.

e. Comunicación:

e.1. Abrir Puerto Serie: Inicializa el puerto serie seleccionado por el usuario. Sólo puede haber un puerto abierto a la vez.

e.2. Cerrar Puerto Serie: Finaliza el puerto serie abierto en ese momento.

e.3. Revisar Comunicación: Corrobora que el software se comunique con el hardware e informa al usuario el resultado.

f. Menú Ayuda:

f.1. Acerca de...: Información general del programa.

A.3. Información sobre la empresa^[15]

F. J. Orlich & Hnos. Ltda., Planta Santa María se encuentra ubicada 2 km al sur de la Iglesia Colonial del distrito de Orosi, en la provincia de Cartago.

El principal producto que se obtiene en la empresa es el grano de café llamado “oro”, que ya ha pasado por el proceso de beneficiado, y generalmente el 90% es para exportación.

En segundo lugar y en menor medida la empresa se dedica a tostar y moler el café, empacándolo y vendiéndolo a turistas y particulares que visitan la planta, o para el consumo de los mismos empleados.

Junto con los otros 3 beneficios: Planta La Georgia, ubicada en Candelaria de Palmares; Planta Tres Volcanes, localizada en San Rafael de Alajuela y Planta La Jimena, ubicada en Agua Caliente de Cartago, además de Cafetalera Internacional Cafinter S.A. constituyen el grupo cafetalero Orlich – Cafinter.

El grupo opera en diversas zonas cafetaleras, a saber: San Ramón, Palmares, Grecia, Sarchí, Alajuela, Heredia, Puriscal, Tarrazú, Orosi, Palomo, Cachí, Tucurrique, Juan Viñas, Tres Ríos y Cartago. Además, cuenta desde 1992 con el respaldo del grupo transnacional ECOM COFFEE GROUP, que es, en América, la empresa que más café procesa y una las tres organizaciones comercializadoras de café más grandes del mundo.