

**CARACTERIZACIÓN DE UN SENSOR DE HUMEDAD CAPACITIVO CON
SALIDA ANÁLOGA E IMPLEMENTACIÓN EN EL DISEÑO DE UN CONTROL
ON/OFF DE SECADO DE CAFÉ.**

DAVID ESTEBAN ARDILA NIETO

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGIAS
PEREIRA
2011

**CARACTERIZACIÓN DE UN SENSOR DE HUMEDAD CAPACITIVO CON
SALIDA ANÁLOGA E IMPLEMENTACIÓN EN EL DISEÑO DE UN CONTROL
ON/OFF DE SECADO DE CAFÉ.**

DAVID ESTEBAN ARDILA NIETO

Trabajo de grado para optar a título de TECNÓLOGO EN MECATRONICA

Director
WILSON PEREZ CASTRO

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGIAS
PEREIRA
2011

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

CONTENIDO

| | |
|--|----|
| 1. TITULO | 6 |
| 2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA | 6 |
| 2.1. PLANTEAMIENTO | 6 |
| 2.2. FORMULACIÓN | 6 |
| 2.3. SISTEMATIZACIÓN | 6 |
| 3. JUSTIFICACIÓN..... | 8 |
| 4. OBJETIVOS..... | 10 |
| 4.1. OBJETIVO GENERAL..... | 10 |
| 4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 10 |
| 5. MARCO REFERENCIAL..... | 11 |
| 5.1 Contenido de humedad en granos | 11 |
| 5.2 Medida del contenido de humedad | 11 |
| 5.2.1 Métodos empíricos | 12 |
| 5.2.2 Métodos de medida directa | 13 |
| 5.2.3 Métodos de medida indirecta | 14 |
| 6. DISEÑO METODOLÓGICO..... | 15 |
| 7. RESULTADOS..... | 16 |
| 7.1 Componentes que integran el sensor capacitivo con salida análoga..... | 16 |
| 7.2 Principio de funcionamiento del sensor capacitivo con salida análoga | 17 |
| 7.3 Practicas para la caracterización del sensor de humedad | 17 |
| 7.3.1 Secado de las muestras..... | 17 |
| 7.3.2 Prueba gravimetrica..... | 18 |
| 7.3.3 Pruebas de humedad con el sensor capacitivo de salida análoga..... | 24 |
| 7.4 Diseño del sistema de control de secado ON/OFF de granos de café | 27 |
| 7.4.1 Crircuito de control de secado ON/OFF de granos de café | 30 |
| 7.5 Presentacion de simulacions del circuito de control ON/OFF de secado de café | 31 |
| 8. CONCLUSIONES | 35 |
| 9. RECOMENDACIONES..... | 36 |
| 10. PERSONAS QUE PARTICIPAN EN EL PROYECTO..... | 37 |

| | |
|--------------------------------|----|
| 11. RECURSOS DISPONIBLES | 37 |
| 12. BIBLIOGRAFIA | 38 |

1. TÍTULO DEL ANTEPROYECTO

Caracterización de un sensor de humedad capacitivo con salida análoga e implementación en el diseño de un control on/off de secado de café.

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

2.1 PLANTEAMIENTO

Se implementará un sensor de humedad capacitivo con salida análoga ya existente, desarrollado por el Ingeniero Wilson Pérez en su tesis de grado "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA PARA LA MEDICIÓN DE CONTENIDO DE HUMEDAD EN GRANOS". Este sensor aun no se ha caracterizado, por tal motivo no se conoce su curva de comportamiento.

Al no estar caracterizada la curva de respuesta del sensor, no se puede garantizar que su comportamiento sea lineal. Esto es de gran importancia si se desea que el sensor tenga una buena salida comercial, para que el manejo de otros procesos como: guardar datos de lotes de las muestras, o accionar dispositivos con base en esta señal, sea más sencillo.

Generalmente en las secadoras actuales de café, el proceso de secado es controlado por el método de tiempos. En este método se pone el café en la secadora y se deja allí las horas o tiempo estimado durante el cual el café queda "seco", lo cual podría no ser así ya que no hay nada que lo garantice. Simplemente se realiza, con base en las experiencias del personal encargado del secado del café, el cual ya ha determinado un tiempo específico dependiente de la cantidad de café.

Cabe resaltar que el contenido de humedad del café es el factor de mayor importancia para determinar su calidad y precio, por lo cual garantizar que el café esté completamente seco es tan importante.

2.2 FORMULACIÓN

Caracterizar la curva de respuesta del medidor, que permita describir el comportamiento en todos los puntos de su curva, determinar la linealidad de su señal de respuesta, e implementar esta señal en el sistema de control de secado del café.

2.3 SISTEMATIZACIÓN

¿Por qué caracterizar la curva de respuesta de un sensor?

¿Cómo caracterizar la curva de respuesta de un sensor?

¿Cómo linealizar la señal de respuesta de un sensor?

¿Qué tecnología podría implementarse para el diseño del sistema de control on/off de secado de granos?

¿Qué empresas podrían hacer uso de este tipo de control de secado?

¿Cuáles son los elementos necesarios para el montaje de todo el sistema de control on/off de secado de granos?

¿Se dispone en el país de los elementos necesarios para la construcción de un sistema de control de secado como éste?

¿Qué empresas podrían servir como proveedoras de estos materiales?

3. JUSTIFICACIÓN

En el mercado cafetero, la variable a controlar de mayor importancia es el contenido de humedad de los granos de café, debido a las situaciones adversas que esta variable le puede provocar al cultivo.

Empezando por la parte de almacenamiento del grano, en el cual el contenido de humedad del mismo reduce el tiempo que puede estar almacenado en óptimas condiciones, ya que el efecto de la humedad es facilitar el crecimiento de hongos e insectos que deterioran los granos de café, despojando al productor de las ventajas de tener una cosecha adelantada.

Esa cosecha adelantada significa menos cantidad de plantas caídas (por lo tanto menos pérdidas de granos en el rastrojo), disposición del campo más tempranamente, posibilidad de mejores precios por disponer de mercadería en forma anticipada en los mercados y más seguridad de cosecha, pero esta práctica trae inherente a ella granos más húmedos.

Para disminuir la pérdida de granos en los sitios de almacenamiento, se hace necesario renovar las técnicas de secado, las cuales buscan reducir los tiempos de éste proceso y aprovechar al máximo todas las ventajas de tener una cosecha temprana.

Otros factores que se ven afectados por el contenido de humedad del grano, son el precio y la calidad del café. Son inversamente proporcionales al contenido de humedad en los granos. Cabe anotar que el sabor de un café seco es mucho mejor que el del húmedo.

Por estas razones es de vital importancia mejorar los métodos actuales de secado. Generalmente en las secadoras actuales son controlados por la experiencia del personal encargado utilizando el conocido método de tiempo, en éste método ya se ha determinado un período de secado que depende de la cantidad y tipo de café. Pero nada garantiza que pasado este tiempo el café quede realmente seco en su totalidad.

Por esto se propone implementar un sensor de humedad capacitivo con salida análoga, el cual haga parte del control del proceso de secado y detenga el proceso cuando los granos estén en el punto óptimo, garantizando de esta manera que toda la cantidad de granos estén secos.

Para garantizar el éxito comercial del sensor de humedad capacitivo con salida análoga, este debe ser caracterizado, para conocer su curva de respuesta y poder linealizarla, de tal manera que los procedimientos que se deseen comandar a

través de la señal de salida del sensor sean más fáciles de programar y realizar, como en este caso controlar el proceso de secado con base en la salida del sensor.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

- Caracterizar el sensor de contenido de humedad con salida análoga y con base en su salida diseñar un sistema de control ON/OFF para el secado de grano.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar una práctica experimental orientada a la medición de contenido de humedad en café.
- Determinar la cantidad de la muestra óptima para el medidor.
- Realizar las pruebas experimentales de medición de humedad por método capacitivo y compararlas con un método patrón como el gravimétrico.
- Diseñar el circuito electrónico de control mediante un diagrama de flujo donde se represente todos los factores y variables que intervienen en el proceso.

5. MARCO REFERENCIA

5.1 Contenido de humedad en granos

El contenido de humedad es uno de los factores más importantes que afectan los granos y semillas. El efecto de la humedad sobre el mantenimiento de la calidad de granos y semillas tiene aún mayor importancia. Granos secos y sanos, pueden ser mantenidos bajo almacenamiento apropiado, por muchos años, en tanto, que los granos húmedos se pueden deteriorar en tan solo unos cuantos días. [1]

La influencia del contenido de humedad en la determinación de granos y semillas durante el almacenamiento ha sido extensamente discutida e investigada. Es bien conocido que el tiempo de almacenamiento de granos y semillas disminuye a medida que el contenido de humedad aumenta. Así como que el contenido de humedad ha tenido un efecto dominante en el predominio y en la actividad de insectos y hongos durante el almacenamiento. [1]

La acción perjudicial de estas plagas destructivas de los granos y semillas aumenta a medida que el contenido de humedad también aumenta. Altos contenidos de humedad propician el deterioro de los granos almacenados y los granos son vendidos teniendo el peso como base, del cual el agua forma parte. [1]

Varios factores, además del contenido de humedad, tienen efectos económicos sobre el comportamiento del almacenamiento, sin embargo el contenido de humedad es usualmente el principal factor que gobierna el mantenimiento de la calidad de los granos. Próximo a los niveles críticos de humedad, las pequeñas diferencias en el contenido de humedad, hacen grandes las diferencias cuando se trata de mantener la calidad. Por lo tanto los métodos adecuados para la determinación de la humedad son de considerable importancia práctica. [1]

5.2 Medida del contenido de humedad [2]

La determinación del contenido de humedad de los granos es una operación de una importancia particular en todas las fases del sistema de operaciones poscosecha.

Antes de la recolección, por ejemplo, permite apreciar el estado de madurez de los granos. Después de la trilla, sirve para decidir respecto al modo y el tiempo de secado. Antes de la transformación de los productos, indica si los granos están en condiciones de ser tratados.

Cuando se trata de la comercialización, esta operación permite conocer la cantidad de materia seca que se compra y establecer así el precio justo de venta (el agua no tiene el mismo valor comercial que los granos).

Antes del almacenamiento y durante el mismo, ayuda a decidir respecto a las condiciones de colocación y a apreciar el estado de conservación de los granos.

5.2.1 Métodos empíricos [2]

En el campo, los agricultores tienen la costumbre de evaluar de manera aproximada el contenido de humedad de los granos por métodos empíricos.

Estos métodos, basados en la experiencia de cada uno, no dan una verdadera medida objetiva, sino una estimación del grado de humedad por la percepción subjetiva y sensorial (tacto, vista, olfato) de ciertas características de los granos.

Algunos campesinos, por ejemplo, acostumbran a masticar los granos, o a rasparlos con la uña del pulgar, o a aplastarlos con los dedos, para evaluar su dureza y su consistencia, calculando así su contenido de humedad.

Otros se fían del olor, más o menos agradable, que se desprende de un puñado de granos; otros se basan en el tintineo, más o menos sordo, producido por algunos granos sacudidos en una caja metálica.

Hay quienes evalúan la fluidez de los granos tratando de hundir el brazo, con la mano abierta, en una masa de granos relativamente importante (en un saco o en una capa espesa de granos a granel).

De todos los métodos empíricos, el menos incierto es tal vez la prueba de la sal. Consiste en mezclar en un recipiente de vidrio una muestra de granos con sal ordinaria de cocina, bien seca. Después de haber sacudido varias veces el recipiente, se examina si la sal se ha adherido o no a las paredes. En caso afirmativo, ello significa que el contenido de humedad de la muestra de granos es superior al 15% aproximadamente.

Aunque estén muy generalizados en los ambientes rurales, es conveniente que estos métodos empíricos se sustituyan progresivamente por el empleo de instrumentos que permitan una medida real del contenido de humedad de los granos.

Hay que desaconsejar formalmente el empleo de estos métodos empíricos en los lugares de almacenamiento o en las transacciones comerciales.

Actualmente, los métodos que recurren al empleo de instrumentos de medida adecuados pueden dividirse en dos categorías: los métodos de medida directa y los de medida indirecta.

5.2.2 Métodos de medida directa [2]

La muestra, pesada primero en una balanza de precisión, se seca en una estufa, tras lo cual se pesa de nuevo. La diferencia de peso antes y después del secado revela la cantidad de humedad contenida en la muestra. La complejidad tecnológica en los instrumentos y la delicadeza de las medidas requieren la intervención de un personal calificado.

Entre los instrumentos de medida basados en el principio de la deshidratación del producto cabe citar:

- la estufa lenta,
- la estufa rápida CHOPIN,
- la lámpara infrarroja.

Tan precisos como complejos, estos instrumentos son más propios de laboratorios especializados, encargados de la graduación de otros aparatos de medida indirecta (por ejemplo, los humidómetros) o de la determinación del contenido de humedad en importantes organismos de almacenamiento o en el marco de transacciones comerciales.

Métodos de estufa

Actualmente el método padrón para la determinación de la humedad de los granos es el método de la estufa. Alternativamente a lo largo de los años, la humedad de los granos ha sido medida en la práctica a través de medidores eléctricos, que son calibrados por el método de la estufa. [1]

1. Estufa con aire: Este método de medición es realizado colocándose una cantidad conocida de granos para secar en la estufa, determinando la humedad mediante el peso antes y después del secado. El tiempo y la temperatura necesarios para el proceso de secado dependen del tipo de grano y si éstos están enteros o molidos. La precisión depende la exactitud del equipo utilizado, (balanza estufa). Su principal desventaja es el periodo de tiempo requerido, por ser realmente largo (24-72 horas) y el equipo necesario (estufa controlada con un termostato) por ser un tanto voluminoso. [3]

A pesar de ser este un método considerado como padrón para la determinación de la humedad, no existe una combinación de tiempo y temperatura de secado, aceptada universalmente como padrón. [3]

2. Estufa húmeda: Este método es más eficientemente usado para maíz y se utiliza una muestra de granos enteros por 96 horas a 99-100°C. Es similar al de la estufa a aire, con la excepción de que la fuente de calor es el agua hirviendo en lugar del aire. [3]

3. Estufa al vacío: Este método está basado en el secado a temperaturas de 98 - 100°C., de granos finamente molidos, en una cámara sometida a presión de 25 mm de Hg. o menos. La muestra es calentada hasta constatar el peso, lo que lleva cerca de 5 horas. [3]

5.2.3 Métodos de medida indirecta [2]

Estos métodos permiten determinar el contenido de humedad por la medida de los tamaños o de características eléctricas relacionadas con la humedad de los granos.

Entre los instrumentos de medida que utilizan este principio, pueden citarse:

- Los humidómetros que miden la resistencia eléctrica de los granos,
- Los humidómetros que miden la constante dieléctrica de los granos.

Los humidómetros son aparatos eléctricos gracias a los cuales se lee directamente, en un cuadrante, el valor del contenido de humedad de una muestra de granos.

Los humidómetros que miden la resistencia eléctrica de los granos son instrumentos portátiles relativamente poco precisos, pero muy prácticos y económicos.

Los humidómetros que miden la constante dieléctrica de los granos, más caros y más complejos, se utilizan generalmente en los grandes centros de almacenamiento y para las transacciones comerciales.

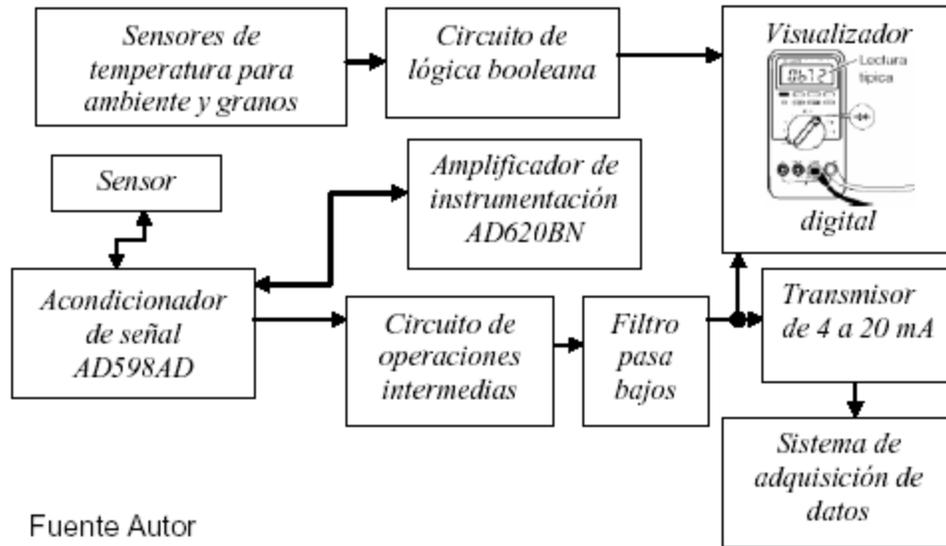
6. DISEÑO METODOLÓGICO

El proyecto se realizará de manera teórico-práctica, al realizar las pruebas necesarias para caracterizar la curva de respuesta del sensor mediante la práctica experimental y realizando las siguientes actividades, para cumplir con todos los objetivos.

- Entender el funcionamiento de cada componente que integra el sensor de humedad.
- Diseñar la practica experimental, que permita realizar la toma de puntos para describir la curva característica del sensor de humedad.
- Determinar el tamaño óptimo de la muestra. Se evidenciara que a medida que la muestra va creciendo, la lectura del medidor crecerá también hasta llegar a un punto donde por mas que crezca la muestra, la lectura no variará. Ese punto es la muestra óptima.
- Realizar la toma de datos de la práctica experimental.
- Graficar la caracterización de la curva de respuesta del sensor de humedad.
- Comparar estos puntos tomados en la práctica experimental, con un método de medición patrón de humedad, como el método gravimétrico.
- Verificar que la curva de respuesta del sensor es lineal, o no.
- Diseñar un control de humedad en las secadoras de granos, que esté en función de las lecturas tomadas por el medidor de humedad, eliminando de esta manera el método de secado por tiempos y teniendo ahora la seguridad de que el proceso de secado se parará, una vez los granos estén realmente secos.
- Diseñar el circuito electrónico de control ON/OFF de secado de café.
- Esquematizar el diagrama de flujo donde se represente todos los factores y variables que intervienen en el proceso.
- Realizar las simulaciones del circuito de control ON/OFF de secado de café.

7. RESULTADOS

7.1 Componentes que integran el sensor capacitivo con salida análoga



Fuente Autor

Figura 1. Diagrama de bloques del sensor capacitivo con salida análoga

Tomado de trabajo de grado ingeniero Wilson Pérez Castro [4].

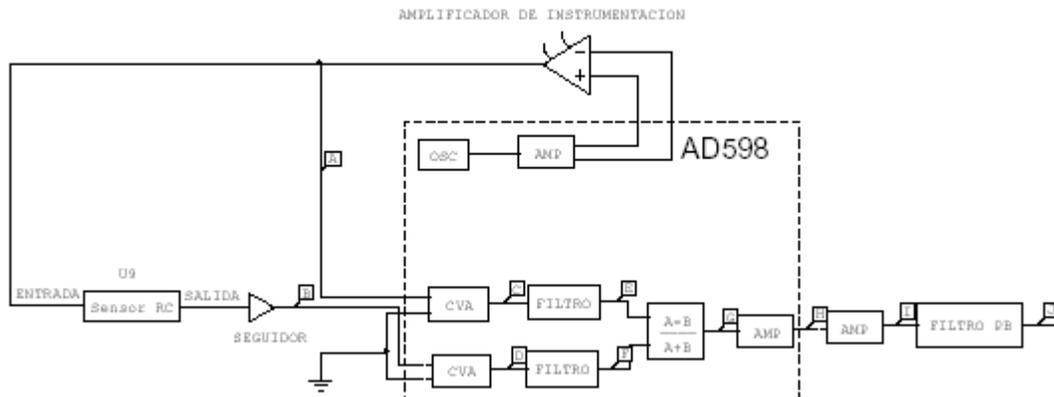


Figura 2. Diagrama general del sistema eléctrico del sensor capacitivo con salida análoga

Tomado de trabajo de grado ingeniero Wilson Pérez Castro [4].

7.2 Principio de funcionamiento del sensor capacitivo con salida análoga.

El sensor está aplicado en este caso para medir el contenido de humedad, pero lo que sensa realmente es la *capacitancia* de la muestra, que tiene variaciones directamente proporcionales a la cantidad de partículas de agua que contenga ésta, debido a que la constante dieléctrica del agua es bastante elevada, (hablando de cerca de 80 a 85, y comparándola con la de un suelo seco que está entre 3 y 4). A medida que el contenido de agua y por ende de humedad de la muestra va aumentando, su capacitancia también aumenta.

La sonda del sensor se compone de un par de placas de baquelita virgen, separadas por un dieléctrico bastante grande como es el vidrio, haciendo que las líneas de campo se produzcan hacia afuera, y por ende la sonda sea sensible al medio en que se encuentra sumergida. Este es el principio de funcionamiento de un capacitor, dos placas metálicas separadas por un dieléctrico, que son atraídas por líneas de campo, producidas por la polarización contraria de las placas.

Los efectos que produce la humedad, al variar la capacitancia de la sonda, son reflejados a la salida del sensor, el cual produce una respuesta en voltaje, que aumenta dependiendo de la capacitancia de la sonda y por ende del contenido de humedad de la muestra. A mayor contenido de humedad, mayor voltaje.

7.3 Prácticas para la caracterización del sensor de humedad.

Para determinar el comportamiento de la salida del sensor que es en voltaje, dependiente de la excitación a su entrada, proporcionada por el contenido de humedad del café, se planteó:

Seleccionar varias muestras de café, secarlas a intervalos de tiempo diferentes con el fin de que las distintas muestras se encuentren a diferentes contenidos de humedad.

7.3.1 Secado de las muestras

El secado de estas, en el caso de no contar con hornos o secadores, se puede realizar bajo el sol, pero por la temporada invernal en la cual se encuentra Colombia, esta no fue una opción. Por tal motivo las muestras fueron secadas en el horno de metalurgia, de la Facultad de Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira.

El objetivo de esta prueba experimental es recrear las condiciones en un secador industrial. Por esto el horno se programó para que el punto de ajuste del control de temperatura, estuviera en 105°C, que tuvo algunos sobrepasos por ser esté un

sistema térmico; al aumentar la temperatura, el control interno del horno lo apaga, cuando sobrepasa los 105°C, y por inercia térmica el horno sigue subiendo hasta 123°C, lo que también sucede en los secadores industriales; los intervalos de tiempo a los cuales fueron secadas las muestras se registran en la tabla 1.

Tabla 1. Tiempo de secado para las muestras de café.

| MUESTRA | TIEMPO DE SECADO (horas) |
|-----------|--------------------------|
| Muestra 0 | 0 |
| Muestra 1 | 3 |
| Muestra 2 | 6 |
| Muestra 3 | 9 |
| Muestra 4 | 12 |

Como se evidencia en la tabla 1 se tomaron 5 muestras. Por el factor tiempo no se tomo un número mayor de muestras. Se deseaba tomar una muestra más, la cual se secaría a 16 horas, tiempo promedio que se demora el café en los secadores, a 105°C. Pero la disponibilidad del horno no lo permitió, puesto que no se le podía dejar encendido en la noche sin que alguien lo vigilara.

El tamaño de muestra secada fue de 600 gramos, para cada una de las 5 muestras.

7.3.2 Prueba gravimétrica

Este método es utilizado como patrón en las calibraciones de los equipos de medida de humedad actuales, por esto se tomó como patrón para caracterizar la curva de respuesta del sensor capacitivo con salida análoga.

Esta prueba se desarrolló en las instalaciones del edificio de aguas y alimentos de la Facultad de Química, en la Universidad Tecnológica de Pereira; se utilizó el horno de estas instalaciones, 10 envases petrí, el desecador y la balanza de alta precisión.



Figura 3. Horno de la Facultad de Química de la Universidad Tecnológica de Pereira.



Figura 4. Balanza de alta precisión de la Facultad de Química de la Universidad Tecnológica de Pereira.



Figura 5. Envase petrí con muestra de café.

Esta prueba consiste en sacar una porción de muestra igual, a cada una de las 5 muestras cercana a 10 gr, por el tamaño del petrí y buscando el menor tiempo de secado en el horno, pero con un buena representación de humedad de la muestra total.

Para cada una de las 5 muestras se sacan 2 de 10 gr, para realizar la prueba y promediar los resultados entre las 2 muestras, obteniendo de esta forma un bajo porcentaje de error.



Figura 6. Como no pesar una muestra.



Figura 7. Procedimiento para pesar las 10 submuestras.

Primero se pesa el envase petrí, se tara la balanza, y después se adicionan los 10 gramos de muestra; si el peso se pasa un poco de los 10 gramos, no importa ya que el resultado es la diferencia de peso entre la muestra inicial y el gramaje obtenido de la misma, después de secada. Importante usar guantes para no adicionar humedad, ni grasa, a las muestras o a los petris. Este procedimiento se repite para las 10 submuestras, obteniendo la tabla 2.

Tabla 2. Pesos de las 10 submuestras antes de ser secadas.

| MUESTRA | PESO DEL ENVASE PETRÍ (gr) | PESO DE LA MUESTRA (gr) |
|-------------|----------------------------|-------------------------|
| Muestra 0,1 | 40,8280 | 10,0658 |
| Muestra 0,2 | 44,0251 | 10,0648 |
| Muestra 1,1 | 32,3479 | 10,2770 |
| Muestra 1,2 | 47,6081 | 10,0399 |
| Muestra 2,1 | 44,0793 | 10,2200 |
| Muestra 2,2 | 47,1647 | 10,1393 |
| Muestra 3,1 | 40,4948 | 10,1247 |
| Muestra 3,2 | 41,9896 | 10,0625 |
| Muestra 4,1 | 43,2861 | 10,0701 |
| Muestra 4,2 | 46,6026 | 10,0808 |

Después de pesadas las 10 submuestras, se llevaron al horno, por 23,5 horas, a 105°C, con el fin de secar el contenido de humedad del grano.

Al pasar este tiempo las muestras se retiran y se introducen al desecador, que se encarga de absorber la humedad, para que al enfriarse las muestras, no recuperen la humedad que contenían, o a tomar humedad del medio. Estuvieron en el desecador por 8 horas.



Figura 8. Desecador de la Facultad de Química de la Universidad Tecnológica de Pereira.



Figura 9. Desecador con muestras de café.

Después se retiran del desecador. Se pesa la muestra junto a su envase petrí, teniendo en cuenta que el petrí es de vidrio y no perdió peso; la diferencia de peso es la que perdió la muestra de café de 10 gr, obteniendo la tabla 3.

Tabla 3. Pesos de las muestras después del secado.

| MUESTRA | PESO DE LA MUESTRA MAS EL ENVASE PETRÍ (gr) |
|-------------|---|
| Muestra 0,1 | 47,1885 |
| Muestra 0,2 | 50,2755 |
| Muestra 1,1 | 38,9555 |
| Muestra 1,2 | 54,2437 |
| Muestra 2,1 | 50,8396 |
| Muestra 2,2 | 53,9743 |
| Muestra 3,1 | 49,2648 |
| Muestra 3,2 | 50,7880 |
| Muestra 4,1 | 52,2008 |
| Muestra 4,2 | 55,8294 |

Después de realizar todas estas mediciones de peso, se aplica una fórmula que determina el porcentaje de humedad de la muestra, la fórmula es la siguiente:

$$\% \text{ humedad} = \frac{P_i - P_f}{P_i} * 100$$

Dónde:

Pi = Peso inicial de la muestra en gramos (antes de secar).

Pf = Peso final de la muestra en gramos (después de secar).

En la siguiente tabla 4 se registran los promedios de los pesos iniciales, los pesos finales, y su correspondiente porcentaje de humedad.

Tabla 4. Porcentajes de humedad para cada muestra por método gravimétrico.

| MUESTRAS | PROMEDIO PESO INICIAL (gr) | PROMEDIO PESO FINAL (gr) | % HUMEDAD |
|----------|----------------------------|--------------------------|-------------|
| 0 | 10,0653 | 6,30545 | 37,35457463 |
| 1 | 10,15845 | 6,6216 | 34,81682737 |
| 2 | 10,17965 | 6,78495 | 33,34790489 |
| 3 | 10,0936 | 8,7842 | 12,97257668 |
| 4 | 10,07545 | 9,07075 | 9,971763048 |

7.3.3 Pruebas de humedad con el sensor capacitivo de salida análoga

La parte del sensor que va en contacto con el café fue necesario cambiarla por una más pequeña para realizar estas pruebas, ya que la original está diseñada para grandes cantidades de café, como bultos o mayores cantidades. Como la muestra a medir está en promedio a 550gr por el secado que ha tenido, el sensor no queda cubierto del todo. El ambiente le provee señales erróneas a la medida del sensor, pues lo que en realidad mide es la capacitancia de la muestra.

La nueva pieza de contacto con el café tiene las siguientes dimensiones.

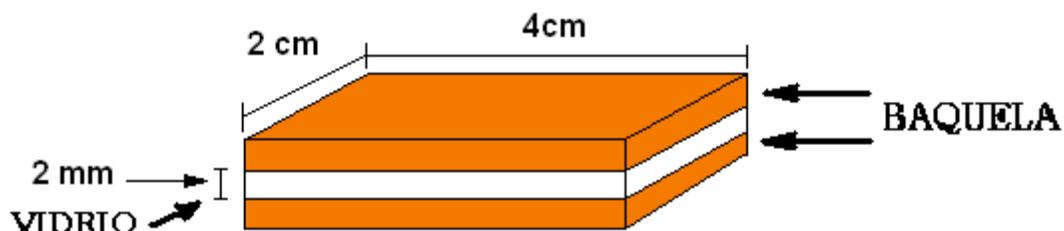


Figura 10. Pieza nueva de contacto del sensor con el café.

Se midió el contenido de humedad de las 5 muestras, con el sensor capacitivo de salida análoga obteniendo la tabla 5.

Tabla 5. Mediciones de humedad con el sensor capacitivo de salida análoga.

| MUESTRAS | RESPUESTA DEL SENSOR (Volts) |
|----------|------------------------------|
| 0 | 3,5 |
| 1 | 3,27 |
| 2 | 2,74 |
| 3 | 2,19 |
| 4 | 1,26 |

7.3.4 Comparativa método gravimétrico y sensor.

Enfrentando las tablas 4 y 5 de los porcentajes de humedad por el método gravimétrico, que es el método patrón, contra las lecturas del sensor capacitivo de salida análoga, se realizó la siguiente tabla de Excel para graficar la curva de respuesta del sensor.

Tabla 6. Porcentajes de humedad método gravimétrico versus lecturas del sensor capacitivo de salida análoga.

| MUESTRAS | % HUMEDAD | RESPUESTA DEL SENSOR (Volts) |
|----------|-------------|------------------------------|
| 0 | 37,35457463 | 3,5 |
| 1 | 34,81682737 | 3,27 |
| 2 | 33,34790489 | 2,74 |
| 3 | 12,97257668 | 2,19 |
| 4 | 9,971763048 | 1,26 |

Con esta tabla se obtuvo la siguiente curva de respuesta para el sensor capacitivo de salida análoga.

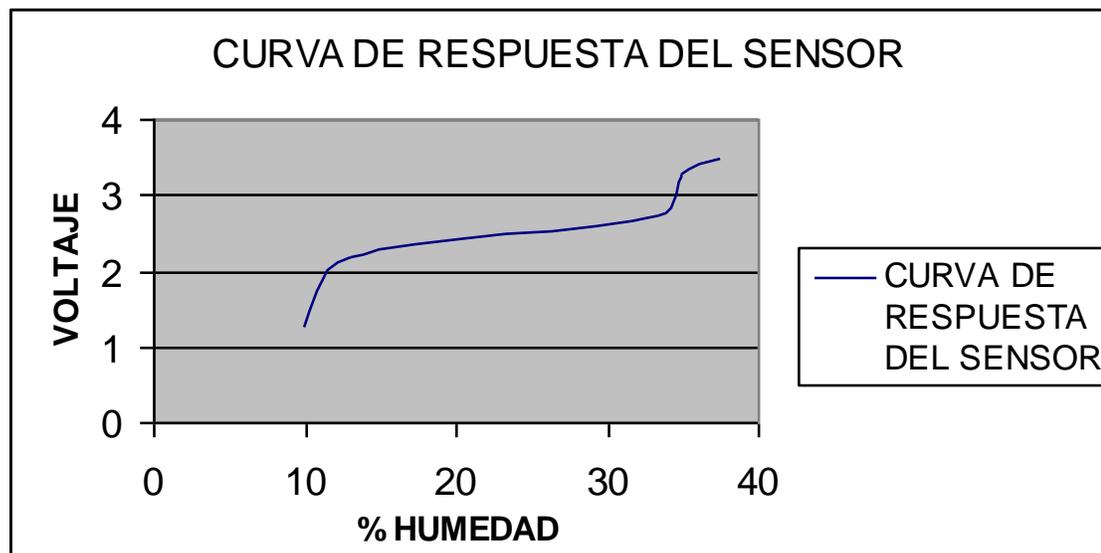


Figura 11. Curva de respuesta para el sensor capacitivo de salida análoga.

Con ayuda de esta curva el operario puede tomar la lectura del sensor, ubicar el punto de voltaje en la gráfica y de esta manera determinar el contenido de humedad que contiene la muestra.

Teniendo en cuenta el medio en el cual se está implementando el sensor, de medir el contenido de humedad de muestras de café que en promedio se encuentran entre el 9% al 30%, en el caso de un café muy húmedo, esta parte de la curva sería suficiente para esta aplicación.

Como el objetivo de este proyecto es caracterizar el sensor de contenido de humedad con salida análoga y, con base en su salida, diseñar un sistema de control ON/OFF para el secado de grano, debe tenerse en cuenta que los

porcentajes de humedad óptimos para las muestras de café van del 10% al 12%, y la gráfica cubre perfectamente este rango, dando voltajes de entre 1,26 V a 2V, que serían los valores de consigna o (“set point”), para el circuito de control ON/OFF para el secado de grano.

Como se evidencia, la curva del sensor no es lineal, pero es de gran ayuda ya que conociendo uno de los puntos, sea voltaje o porcentaje de humedad, se puede conseguir el otro fácilmente. Aun así, la curva podría ser linealizada por métodos de programación, con microcontroladores, pero este no es el objetivo del proyecto.

7.4 Diseño del sistema de control de secado ON/OFF de granos de café.

La idea de este proyecto es implementar un método que garantice al productor de café que su cosecha está seca, lista para el almacenamiento o comercialización, mediante un método de medición de contenido de humedad directo, como es el sensor capacitivo de salida análoga, el cual brinda la medida de humedad inmediatamente, no como el método de estufa o gravimétrico, que lleva demasiado tiempo en realizarse y esto repercute en pérdida de tiempo y a la vez de dinero para el productor.

El diseño propone que una vez el café entre al silo, el sensor capacitivo con salida análoga, tome la medida de humedad del café, la compare con la variable de consigna o (“set point”), y si está por encima de tal valor encienda el secador, y lo mantenga a 105°C, hasta cuando la medida de humedad registrada por el sensor sea igual a la variable de consigna; en ese momento apaga el secador y genera una señal de alarma, ya sea luminosa o sonora, o las dos, dependiendo de las necesidades del productor.

El diagrama de flujo del proceso es el siguiente.

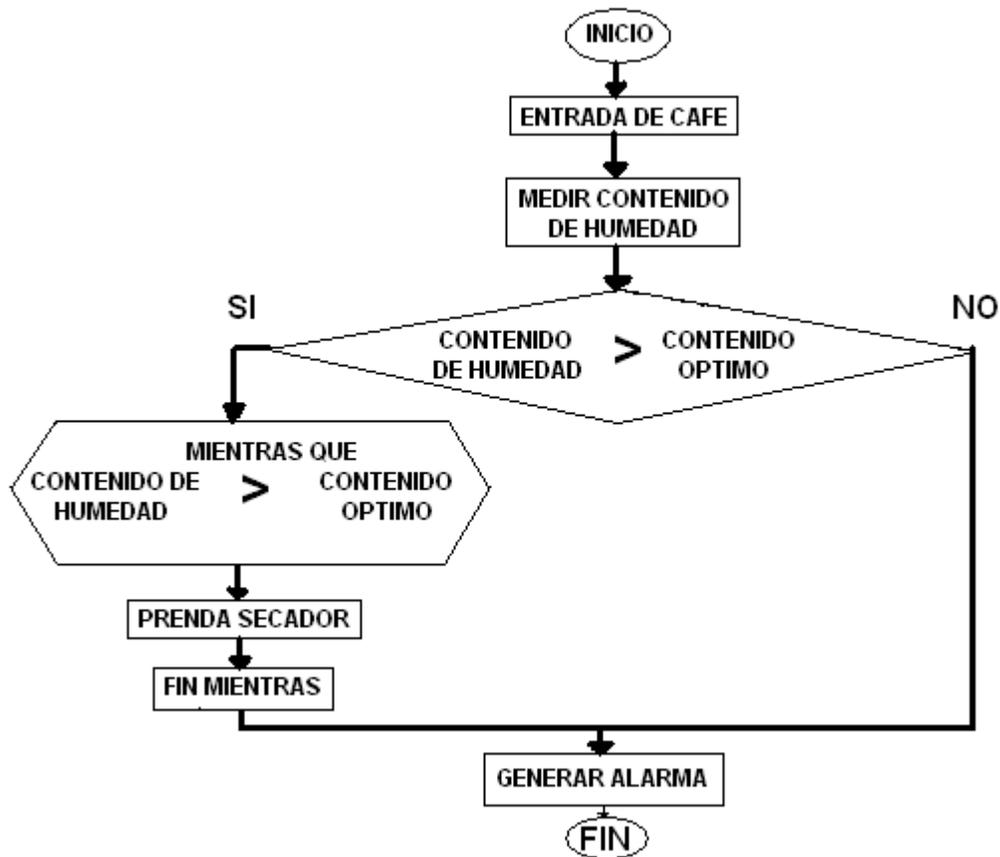


Figura 12. Diagrama de flujo.

Para mantener la temperatura del silo constante se propone un sistema de control en lazo cerrado, realimentado por un sensor de temperatura. Para este caso el LM35 cumple con las necesidades, siendo un sensor lineal de rápida respuesta, y como los rangos de temperatura son de 100°C a 130°C, estos son permisibles para el sensor.

Se plantea el siguiente circuito: el primer amplificador amplifica la respuesta del LM35 que tiene una sensibilidad de 10mV/°C, y el segundo amplificador que es un restador de ganancia infinita, este resta la entrada (+) proveniente del LM35, menos la entrada (-) del set point. Tal diferencia es multiplicada por infinito, llevando el resultado a, si es una salida negativa hasta el menos de la fuente, y si es positiva al más de la fuente. Esta señal accionará el relé, encargado de switchear, la fuente alterna del horno.

R = Resistencia entre la referencia que es tierra, y el pin medio del potenciómetro.
 R_{total} = Resistencia total del potenciómetro.
 V_{in} = Voltaje de alimentación del potenciómetro.

En este caso se ubicaran 10,5V a la salida del divisor de voltaje ya que se desea controlar la temperatura a 105°C.

7.4.1 Circuito de control de secado ON/OFF de granos de café.

El circuito encargado de parar el secador, una vez el café este en su punto óptimo de secado, es el siguiente:

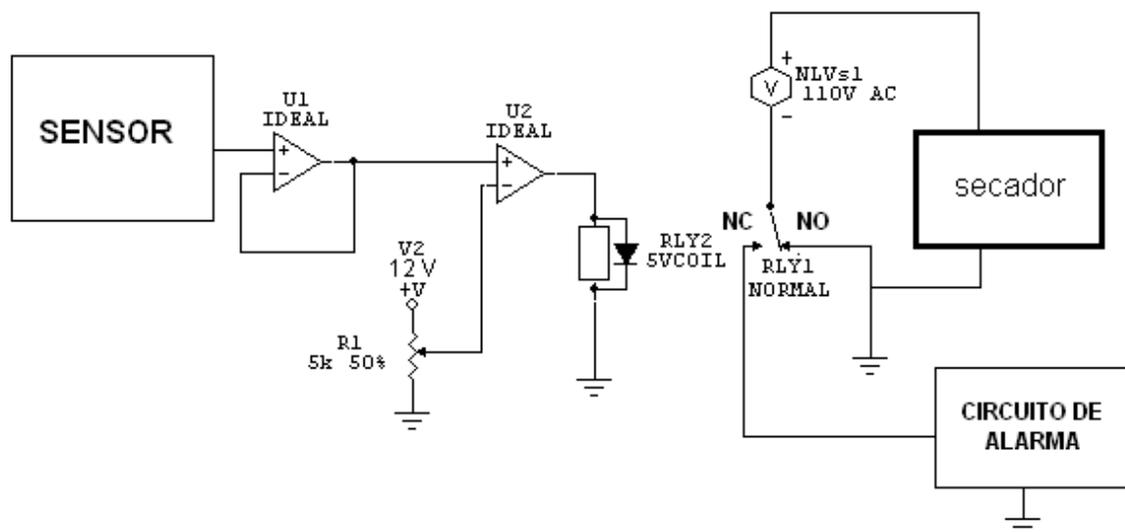


Figura 14. Circuito de control de secado ON/OFF de granos de café.

El primer amplificador del circuito U1, es un seguidor de voltaje, para que las impedancias del sensor no se sumen con las del circuito de control y la medida no sufra alteraciones. El segundo amplificador, como ya se explicó en el circuito de temperatura, es un restador de ganancia infinita, y el potenciómetro que es el set point, un divisor de voltaje encargado de poner de 1,26V a 2V, dependiendo de la cantidad de humedad a la que se desee dejar el café.

Para que el circuito de alarma no quede energizado cuando se apague el horno, ya que el relé retornará a su posición de NC (normalmente cerrado), se puede adecuar un switch interno en el circuito de alarma, que lo desenergice cuando se apaga el horno y lo energice cuando se prenda y el relé esté en posición NC.

El diseño propone para cantidades grandes de café a secar, usar varios sensores capacitivos de salida analógica; las salidas del número (n) de sensores a usar, saldrán hacia un circuito promediador, con amplificadores operacionales. La salida de este circuito será la entrada del circuito de control de secado ON/OFF de granos de café.

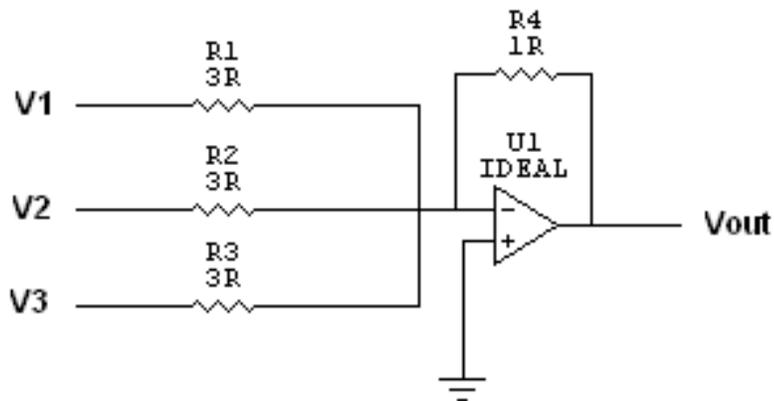


Figura 15. Circuito promediador.

Este promediador se comporta de la siguiente manera:

$$V_{out} = \left[\frac{V1}{3R} + \frac{V2}{3R} + \frac{V3}{3R} \right] * R$$

$$V_{out} = \frac{V1 + V2 + V3}{3}$$

Este circuito se puede ampliar para tantos sensores que se deseen adicionar: simplemente la relación de resistencias será, si son 5 sensores, las primeras resistencias serán 5 veces mayores que la resistencia de retroalimentación.

7. 5 Presentación de simulaciones del circuito de control ON/OFF de secado de café.

En la siguiente imagen se simula la salida del sensor como un voltaje, en este caso 1,5V, en esta imagen se desea mostrar el divisor de voltaje, que en este caso se ha tomado como set point 1,298V aproximadamente 1,3V, con el arreglo de resistencias que se muestra, alimentados a 12V.

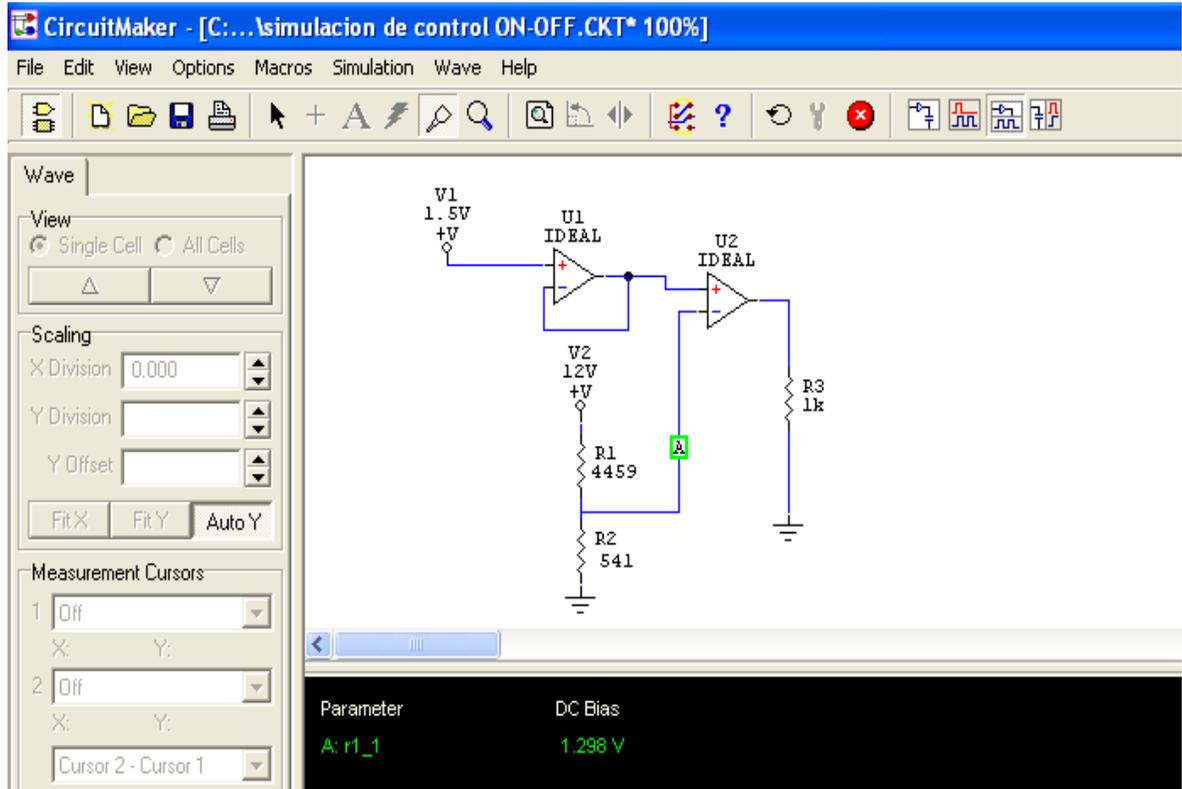


Figura 16. Simulación divisor de voltaje.

En la siguiente imagen se evidencia que cuando el voltaje en el pin negativo del amplificador U2 es menor al otro, la salida del amplificador se va a un voltaje muy alto; en este caso 20,16KV, lo que en realidad sería el voltaje máximo positivo al que esté alimentado el amplificador, lo más común a 15V.

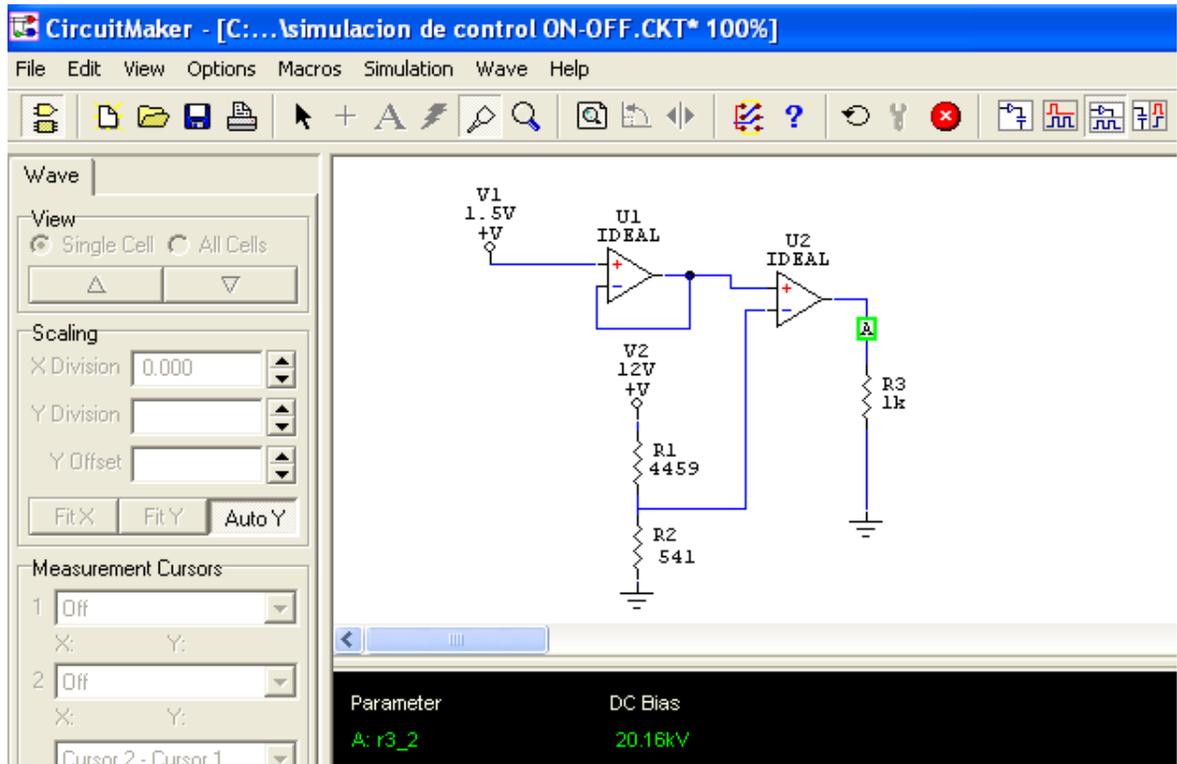


Figura 17. Salida del amplificador hacia +Vcc.

En esta imagen se evidencia que cuando el voltaje en el pin negativo del amplificador U2 es mayor al otro, que en este caso se ha cambiado a 1,2V, la salida del amplificador se va a un voltaje muy bajo: en este caso -9,841KV, lo que en realidad sería el voltaje máximo negativo al que esté alimentado el amplificador, lo más común a -15V.

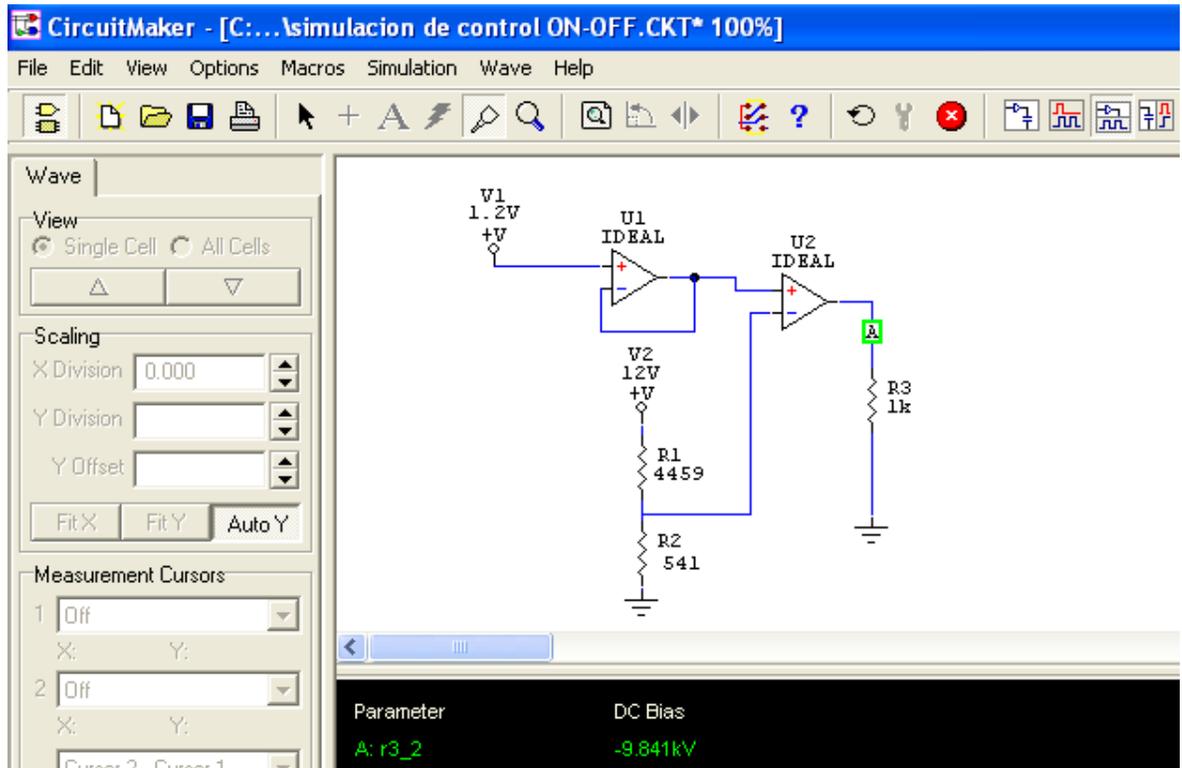


Figura 18. Salida del amplificador hacia $-V_{cc}$.

8. CONCLUSIONES

Se evidencia claramente la importancia de la caracterización adecuada de los instrumentos de medida, debido a que es la única forma en la cual este instrumento puede ser empleado en alguna aplicación industrial. De otra manera, solo es un circuito electrónico, sin mayor cualidad.

Es de vital importancia ser riguroso con todas las pruebas experimentales, tomas de datos y comparaciones con los métodos de calibración patrones. El más mínimo detalle, puede entorpecer el proceso y acabar con el objetivo de una buena caracterización del sensor de medida, brindando una curva de respuesta poco confiable, que no cumpla con el propósito de poder ser empleada en procesos industriales, como en este proyecto de medición de contenido de humedad en granos de café.

La práctica experimental orientada a la medición de contenido de humedad en café, diseñada en este proyecto, cumplió con el objetivo de ofrecer un patrón de humedades: en este caso varió del 9 al 30 %. Las variaciones sirvieron para ser comparadas con las lecturas del sensor capacitivo.

Las pruebas experimentales de medición de humedad por método capacitivo se realizaron y se compararon con el método patrón gravimétrico, obteniendo de esta manera la curva de respuesta del sensor. El tramo de la curva que se presenta en este proyecto cubre las necesidades para la aplicación que se plantea, de controlar el proceso de secado de café, puesto que cubre todos los porcentajes de secado a los cuales comúnmente se desean dejar las muestras de café.

La curva de respuesta del sensor, que se graficó en este proyecto, permite describir el comportamiento del sensor. En la parte de la curva de mayor importancia, teniendo en cuenta que en mediciones de contenido de humedad los porcentajes de humedad máximos van hasta 30% generalmente, brindando esta curva lecturas desde el 10% al 37%.

El circuito planteado en este proyecto, fue simulado en CircuitMaker, presentando el comportamiento deseado. De esta manera el sensor es el encargado de parar el secado, una vez el café este en su punto óptimo.

9. RECOMENDACIONES

Ampliar la prueba de humedad gravimétrica y de medición con el sensor capacitivo, a mayores muestras con contenidos distintos de humedad, para tener una curva de mayor confianza, se necesita bastante tiempo, pero dará una curva aún más exacta, se podría completar la curva totalmente que vaya del 0 al 100%.

Se puede incluir una comparación entre las cualidades que adquiere el café secado al sol, contra el café secado en secadoras industriales, y determinar de esta manera si es factible aplicar la idea de este proyecto de parar la secadora industrial, mediante un sensor cuando el café este en su punto óptimo, en procesos de secado al sol, retirando las muestras de la luz solar una vez estén en el punto de contenido de humedad indicado.

Estudiar más a fondo los métodos antiguos empleados para medir la humedad del grano de café, como el color del grano, rasgar el grano, el aroma, entre otros; que brindan una gama de nuevas posibilidades, para determinar el estado óptimo del grano de café, las cuales podrían ser recopiladas en sistemas electrónicos, como reconocimiento de imagen, de texturas, olores, e incluir estos parámetros como indicadores, que podrían ser empleados también para detener el proceso de secado del café automáticamente.

Se puede usar integrados como el LM3914, para construir, una especie de indicador de humedad por medio de escala de leds.

El sensor capacitivo de salida analógica, se podría mejorar, haciéndolo que se estabilice más rápido, especialmente en las muestras de mayor contenido de humedad.

10. PERSONAS QUE PARTICIPAN EN EL ANTEPROYECTO

Director: Wilson Pérez Castro.

Ejecutor: David Esteban Ardila Nieto.

11. RECURSOS DISPONIBLES (MATERIALES, INSTITUCIONALES Y FINANCIEROS)

MATERIALES

- Osciloscopio.
- Café para muestras.
- Computador.
- Papel.

INSITUCIONALES

Asesorías del ingeniero Wilson Pérez Castro.

12. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Seddnews, título “Medidores de humedad”, Dra. María Laura Luz http://www.seednews.inf.br/espanhol/seed61/artigocapa61_esp.shtml, en línea, consultado el 11 de octubre de 2010.
- [2] Depósito de documentos de la FAO. Título “La ingeniería en el desarrollo - Manejo y tratamiento de granos poscosecha”, producido Departamento de Agricultura, <http://www.fao.org/docrep/x5041s/x5041S04.htm>, en línea, consultado el 11 de octubre de 2010.
- [3] Seddnews, título “Medidores de humedad”, Dra. María Laura Luz http://www.seednews.inf.br/espanhol/seed61/artigocapa61a_esp.shtml, en línea, consultado el 11 de octubre de 2010.
- [4] Trabajo de grado ingeniero Wilson Pérez Castro, Diseño y construcción de un sistema para la medición de contenido de humedad en granos.