

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Subdirección Académica

Departamento de Ingeniería Electrónica

TESIS DE MAESTRÍA EN CIENCIAS

**Modelado y Construcción de un Sensor Indirecto de Humedad del
Suelo Basado en un Pulso de Calor**

presentada por
Ing. Luis Antonio Regalado Luis

como requisito para la obtención del grado de
Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica

Director de tesis
Dr. Juan Reyes Reyes



"Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos"

Cuernavaca, Mor., 11 de mayo de 2017.

OFICIO No. DIE/043/2017
Asunto: Aceptación de documento de tesis

DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del **C. Luis Antonio Regalado Luis** con número de control **M13CE085** de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado "**Modelado y Construcción de un Sensor Indirecto de Humedad del Suelo Basado en un Pulso de Calor**" y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

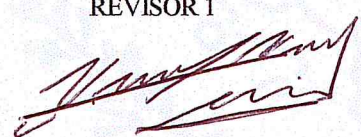
DIRECTOR DE TESIS

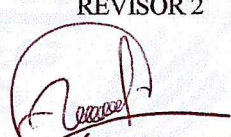
CODIRECTOR DE TESIS


Dr. Juan Reyes Reyes
Doctor en Ciencias en la Especialidad de Control
Automático
Cédula profesional 4214833

REVISOR 1

REVISOR 2


Dr. Luis Gerardo Vela Valdés
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
profesional 7980044


Dr. Carlos Mantel Astorga Zaragoza
Doctor en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 5505019

C.p. M.T.I. María Elena Gómez Torres- Jefa del Departamento de Servicios Escolares

Estudiante
Expediente
RFEJ/lrr.



SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

"Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos"

Cuernavaca, Mor., 12 de mayo de 2017

OFICIO No. SAC/181/2017

Asunto: Autorización de impresión de tesis

**ING. LUIS ANTONIO REGALADO LUIS
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
P R E S E N T E**

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado "**Modelado y Construcción de un Sensor Indirecto de Humedad del Suelo Basado en un Pulso de Calor**", ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"CONOCIMIENTO Y TECNOLOGIA AL SERVICIO DE MEXICO"

**DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO**



SEP TecNM
CENTRO NACIONAL
DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO
TECNOLÓGICO
SUBDIRECCIÓN
ACADÉMICA

C.p. M.T.I. María Elena Gómez Torres- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
Expediente

GVGR/mcr



Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Mor.
Tels. (01) 777 362-77-70 Ext. 4106, e-mail: direccion@cenidet.edu.mx
www.cenidet.edu.mx



Dedicatoria

A **mi madre** que ha sabido educarme con buenos sentimientos, hábitos y valores, las cuales me formaron como persona lo cual me han ayudado a salir adelante en momentos difíciles.

A **mi padre** por apoyarme en todos los sentidos, por enseñarme valores como la humildad, perseverancia y paciencia.

A **mis hermanos** que siempre han creído en mí, por todo su apoyo, su confianza y sobre todo sus palabras de aliento, las cuales, siempre me motivaron a seguir adelante con mis objetivos.

Este logro es de todos.

Agradecimientos

Primero a Dios por haberme permitido culminar esta etapa en mi vida y en mi profesión, por no dejarme caer ante las adversidades, por darme paciencia y sabiduría.

A mis padres José cruz y Aurelia, gracias de todo por su apoyo incondicional, por su confianza, por sus consejos para hacer de mí una mejor persona, por motivarme constantemente, por enseñarme que con esfuerzo y trabajo puedo alcanzar mis metas.

A mi hermano José Juan, por formar parte de mi vida, por aconsejarme siempre, por brindarme tu cariño, apoyo y por todos los momentos que hemos pasado juntos, gracias por ser mí hermano.

A mi hermana María de Lourdes, gracias por tus enseñanzas, por tu apoyo en todos los sentidos, sé que siempre crees en mí y en lo que puedo llegar a ser, gracias por estar siempre a mí lado.

A mi hermana Lidia Lizbeth, por apoyarme y por creer en mí, por preocuparse por mi salud y mi por venir, gracias por estar siempre conmigo.

Le doy gracias a dios por haberte puesto en mi solitario camino; gracias Iris por tu amor, por tu gran paciencia, por tu apoyo y el de tus padres, por creer en mí incluso cuando creí que no podía más, por estar a mi lado en todo momento, te amo.

A mi asesor de tesis al Dr. Juan Reyes Reyes, gracias por su apoyo y por sus valiosos consejos y sobre todo gracias por su gran paciencia.

A mis revisores el Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza y Dr. Luis Gerardo Vela Valdés, gracias por sus comentarios, consejos y observaciones, los cuales, me permitieron

mejorar la realización de la tesis.

A mis profesores Dr. Alejandro Rodríguez Palacios, Dr. Carlos Daniel García Beltrán, Dr. Gerardo Vicente Guerrero, Dr. Juan Reyes Reyes, Dr. Jesús Mina, Dr. Manuel Adam Medina, Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza y Dr. Víctor Manuel Alvarado Martínez, gracias por sus enseñanzas y por todos los conocimientos que me brindaron.

A mis compañeros de generación del CENIDET por los buenos momentos y con los que compartí muchos momentos divertidos y de trabajo. A mi amiga Amy e Ivonne, gracias por su apoyo, por los buenos momentos que hemos pasado y por su amistad.

Al CENIDET por brindarme todos los medios necesarios para seguir creciendo profesionalmente, a la Lic. Patricia Armas por su tiempo, paciencia y sus enseñanzas en el idioma inglés. A todo el personal que ahí labora por las atenciones prestadas durante mi estancia. Gracias a la Lic. Lorena Ruiz por su tiempo y por nunca rendirse con los estudiantes, gracias al Dr. Manuel Adam Medina por tener siempre una palabra de aliento para mí, espero que nunca cambien su ánimo.

Finalmente, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (**CONACYT**) por haberme brindado el apoyo económico durante el desarrollo del posgrado.

Resumen

El manejo eficiente de los sistemas de riego requiere el uso de sensores de humedad del suelo con mediciones confiables. En la literatura, se dispone de un gran número de sensores de humedad basados en diferentes técnicas, en general, estos métodos tienen varias limitaciones que restringen su integración en la gestión de sistemas de riego, en donde, las principales desventajas son, la inexactitud y su alto costo. En la presente tesis se desarrolló un sensor indirecto de humedad de suelo basado en un pulso de calor, como una solución a la lectura de la humedad volumétrica en suelos agrícolas.

Basado en un pulso de calor aplicado en el suelo, se registró y se analizó la lectura de la temperatura tomando principalmente en consideración, el incremento máximo de la temperatura Δ_{max} y el tiempo de inercia térmica n , donde n es calculado de la diferencia entre el tiempo en el que ocurre Δ_{max} y el final del tiempo del pulso de calor. Estos valores son necesarios para la obtención la humedad a partir de el modelo de humedad presentado, basado en el método de un solo punto de (Bristow et al., 2001).

Se presenta el diseño del sensor con un emisor de calor de $q = 35,88 \frac{w}{cm}$, el cual, esta basado en una resistencia de 104Ω sometida a un escalón de corriente de $60mA$. El receptor de calor, es un sensor de temperatura basado en termistor de $50k\Omega$ a temperatura nominal ($25^{\circ}C$). La estructura de soporte del sensor esta elaborada de una resina epóxica SAE860A-B.

El sensor arrojó resultados aceptables, realizando la comparación de las humedades obtenidas con el método gravimétrico. Los resultados obtuvieron errores absolutos medios del 1% los cuales son tomados como la exactitud, el porcentaje de error relativo es al rededor del 3% el cual es tomado como la precisión.

Abstract

The efficient management of irrigation systems requires the use of soil moisture sensors with reliable measurements. In the literature, there are a large number of moisture sensors based on different techniques, in general, these methods have several limitations that restrict their integration in the management of irrigation systems, where the main disadvantages are inaccuracy and its high cost. In the present thesis an indirect sensor of soil moisture was developed based on a heat pulse, as a solution to the volumetric moisture reading in agricultural soils.

Based on a heat pulse applied to the soil, the temperature reading was recorded and analyzed, taking into account, in particular, the maximum increase of the temperature ΔT_{max} and the thermal inertia time n , where n is calculated from the difference between the time in which ΔT_{max} occurs and the end of the heat pulse time. These values are required to obtain moisture from the moisture model presented, based on the single-point method of (Bristow et al., 2001).

The sensor design consists of a heat emitter of $q = 35,88 \frac{w}{cm}$, which is based on a resistor of 104Ω Subjected to a current step of $60mA$. The heat sink is a thermistor-based temperature sensor of $50k\Omega$ At nominal temperature ($25^{\circ}C$). The sensor support structure is made of an SAE860A-B epoxy resin.

The sensor showed acceptable results, comparing the humidity obtained with the gravimetric method. The results obtained mean absolute errors of 1 % which are taken as the accuracy, the relative error percentage is around 3 % which is taken as the precision.

Índice general

1	Introducción	1
1.1	Antecedentes	3
1.1.1	Sensores de humedad por diferentes métodos	3
1.1.2	Sensores de humedad por pulso de calor	8
1.2	Estado del arte	10
1.3	Planteamiento del problema	10
1.3.1	Fenómenos asociados a la dinámica de la humedad en el suelo	11
1.3.2	Estimación de la humedad de suelo	11
1.3.3	Distribución de la humedad en el suelo	13
1.3.4	Limitaciones del pulso de calor en el suelo	14
1.4	Justificación	15
1.5	Objetivos	16
1.5.1	Objetivos generales	16
1.5.2	Objetivos específicos	16
1.6	Metas	17
1.7	Estructura de la tesis	17
2	Marco teórico	19
2.1	Conducción de calor en régimen transitorio en un medio poroso (suelo)	20
2.2	Solución de la integral exponencial debido a ciertas singularidades	25
2.3	Capacidad calorífica volumétrica del suelo	28
2.4	Cálculo del contenido de agua de suelo a partir de gravimetría	29
3	Resultado principal	31
3.1	Procedimiento propuesto para la medición indirecta de la humedad	32
3.1.1	Registro de la respuesta al pulso de calor (On line)	32
3.1.2	Determinación del incremento de temperatura máxima ΔT_{max} y el tiempo de inercia térmica n (Off line)	33

3.2	Modelo del sensor de humedad por pulso de calor.	35
3.2.1	Modelo térmico del sensor por pulso de calor	35
3.2.2	Modelo para la estimación de la humedad a partir del método por pulso de calor	36
3.3	Construcción de un sensor indirecto de humedad basado en un pulso de calor. .	37
4	Simulaciones e implementaciones	45
4.1	Implementación del sensor en un medio saturado	46
4.2	Instrumentación y adquisición de datos de 5 probetas a diferentes humedades .	47
5	Conclusiones y trabajos futuros	55
5.1	Mejoramientos de componentes electrónicos para uso no agrícola.	56
5.2	Implementación en control de riego	56
5.3	Conclusiones	58
	Bibliografía	59
	Anexos	64
A	Densidad aparente del suelo a partir de gravimetría	65
B	Humedades de suelo relacionadas con la gestión agrícola	70
C	Otras pruebas realizadas en los 5 lotes	72
D	Consideraciones al programar usando la exponencial integral	79
E	Programa para adquisición y procesamiento de datos para la obtención de hu- medad	81

Índice de tablas

Tabla 3.3.1	Propiedades térmicas-eléctricas de la resina epóxica SAE860A-B. . . .	41
Tabla 4.1.1	Capacidad calorífica volumétrica \hat{c}_p aproximada por el sensor en un medio saturado.	46
Tabla 4.2.1	Humedad obtenida de las pruebas en 5 Lotes.	54
Tabla 5.3.1	Media de Errores por lotes.	58
Tabla A.0.1	Densidad aparente para algunos suelos.	68

Índice de figuras

Figura 1.3.1 Fenómenos asociados a la dinámica del sustrato	11
Figura 1.3.2 Distribución de la humedad en el suelo	13
Figura 1.3.3 Pulso de calor a través de un suelo para un sensor de humedad.	14
Figura 3.1.1 Esquema general de la aplicación de un pulso de calor en el sustrato. La variable de lectura V_{Rt} esta en función de la humedad θ_V y la temperatura $T_m(t)$	32
Figura 3.1.2 Incremento de la temperatura debido a un pulso de calor.	34
Figura 3.3.1 Esquema de conexión del sensor de temperatura (Termistor NTC).	38
Figura 3.3.2 Aplicación del TL431 configurado como fuente de corriente.	40
Figura 3.3.3 Circuito para el sensor de humedad por pulso de calor.	42
Figura 3.3.4 Sensor de humedad por pulso de calor.	44
Figura 4.1.1 Respuesta del pulso de calor en una muestra en agua.	46
Figura 4.2.1 Pulso de calor en un sustrato con humedad volumétrica por gravimetría $\theta_v = 35,22$. Para este caso la humedad estimada es $\hat{\theta}_v = 35,01$	47
Figura 4.2.2 Pulso de calor en un sustrato con humedad volumétrica por gravimetría $\theta_{vg} = 31,86$. Para este caso la humedad estimada es $\hat{\theta}_v = 33,08$	48
Figura 4.2.3 Pulso de calor en un sustrato con humedad volumétrica por gravimetría $\theta_{vg} = 26,83$. Para este caso la humedad estimada es $\hat{\theta}_v = 25,91$	49
Figura 4.2.4 Pulso de calor en un sustrato con humedad volumétrica por gravimetría $\theta_{vg} = 23,48$. Para este caso la humedad estimada es $\hat{\theta}_v = 23,91$	50
Figura 4.2.5 Pulso de calor en un sustrato con humedad volumétrica por gravimetría $\theta_{vg} = 21,80$. Para este caso la humedad estimada es $\hat{\theta}_v = 21,99$	51
Figura 4.2.6 Comparativa entre humedades aproximadas $\hat{\theta}_v^i$ y humedades de referencia θ_{vg}^i (basadas en gravimetría), donde $i = 1, 2, 3, 4, 5$ las cuales corresponden a el número de probetas.	52

Figura 4.2.7 Comparativa entre humedades aproximadas $\hat{\theta}_v i$ y humedades de referencia $\theta_{vg} i$ después de la regresión lineal $y = 1,423x - 0,06906$; donde $i = 1, 2, 3, 4, 5$ las cuales corresponden a el número de probetas.	53
Figura 5.2.1 Perspectiva de la Humedad volumetrica (θ_v) respecto a la Capacidad de Campo (θ_{cc}), el Punto de Marchitez Permanente (θ_{pmp}) y riego deseable para diferentes texturas de suelo. Los anterior es una generalización de las texturas del los suelo según (Shaxson and Barber, 2008)	57
Figura 5.3.1 Control de riego basado en un sensor de humedad de suelo por pulso de calor	59
Figura A.0.1 Bascula digital Rhino de 0.2 g de resolución	66
Figura A.0.2 Muestra de tierra húmeda en una probeta.	66
Figura C.0.1 Pulso de calor en un sustrato con humedad volumétrica por gravimetría $\theta_v = 35,22$. Para este caso la humedad estimada es $\hat{\theta}_v = 35,01$	72
Figura C.0.2 Pulso de calor en un sustrato con humedad volumétrica por gravimetría $\theta_{gv} = 31,86$. Para este caso la humedad estimada es $\hat{\theta}_v = 33,08$	73
Figura C.0.3 Pulso de calor en un sustrato con humedad volumétrica por gravimetría $\theta_{vg} = 26,83$. Para este caso la humedad estimada es $\hat{\theta}_v = 25,91$	74
Figura C.0.4 Pulso de calor en un sustrato con humedad volumétrica por gravimetría $\theta_{vg} = 23,48$. Para este caso la humedad estimada es $\hat{\theta}_v = 23,91$	75
Figura C.0.5 Pulso de calor en un sustrato con humedad volumétrica por gravimetría $\theta_{vg} = 21,80$. Para este caso la humedad estimada es $\hat{\theta}_v = 21,99$	76
Figura C.0.6 Pulso de calor en un sustrato con humedad volumétrica por gravimetría $\theta_v = 35,22$. Para este caso la humedad estimada es $\hat{\theta}_v = 35,01$	77
Figura C.0.7 Pulso de calor en un sustrato con humedad volumétrica por gravimetría $\theta_{gv} = 31,86$. Para este caso la humedad estimada es $\hat{\theta}_v = 33,08$	77
Figura C.0.8 Pulso de calor en un sustrato con humedad volumétrica por gravimetría $\theta_{vg} = 26,83$. Para este caso la humedad estimada es $\hat{\theta}_v = 25,91$	78

NOTACIONES

Acrónimos

NTC	Negative Temperature Coefficient
LSB	Least Significant Bit
NAP	Nivel de Agotamiento Permisible
CRA	Capacidad real de agua de suelo

Nomenclatura

$f(s)$	Función dependiente de s
t	Tiempo
$c\rho$	Capacidad Calorífica Volumétrica
ρ	Densidad
c	Calor específico
t	Tiempo
m	Minerales
a	Aire
o	Orgánico
w	Agua
p	Porosidad
s	Sólidos
fr_s	Fracción de volumen de sólidos s
ρ_b	Densidad aparente del suelo
ρ_s	Densidad de sólidos
V_m	Volumen de muestra
M_{ref}	Masa de referencia

V_{ref}	Volumen de referencia
M_a	Masa del agua
M_s	Masa de sólidos
$T_m(t)$	Temperatura de la muestra de sustrato s
R_t	Termistor
R	Resistencia
I	Corriente
d	Distancia
T_{sus}	Temperatura del sustrato
T_{rt}	Temperatura del emisor de calor
ΔT_m	Incremento de temperatura
ΔT_{max}	Incremento máximo de temperatura
tm	Instante de tiempo en que ocurre ΔT_{max}
n	Tiempo de inercia térmica
Q	Cantidad de calor
k	Conductividad térmica
t_i	Instantes de tiempo
t_p	Tiempo del pulso
t_N	Tiempo del proceso
γ	Termino de simplificación
R_{aux}	Resistencia auxiliar
V_{Rt}	Voltaje del termistor
R_o	Resistencia nominal del termistor
β	Coefficiente de fabricación del termistor
T_o	Temperatura nominal del termistor
W	Watts
P_r	Potencia de la resistencia R_E
V_{ref}	Voltaje de referencia
R_E	Resistencia del emisor de calor
R_s	Resistencia de ajuste de corriente
θ_{vg}	Humedad volumétrica basada en gravimetría
w	Humedad gravimétrica
$\hat{\theta}_v$	Humedad volumétrica aproximada
V_w	Volumen del agua de la muestra
V_s	Volumen de sólidos de la muestra

V_t	Volumen total de la muestra
h	Altura
L	Longitud de la resistencia R_E
C	Constante global
θ_{cc}	Humedad a capacidad de campo
θ_{pmp}	Humedad a punto de marchitez permanente
θ_a	Agua útil

Capítulo 1

Introducción

La estimación del contenido de humedad disponible en el suelo para uso de las plantas resulta de gran importancia, pues se trata de una de las variables más críticas para explicar la actividad vegetativa entendida como el buen crecimiento de una planta cumpliendo estándares de calidad. El conocimiento más detallado, tanto en las zonas o regiones de suelo, así como en los cambios del contenido de agua de un cultivo en regadío nos permitiría mejorar la gestión de los recursos hídricos, aportando agua al cultivo cuándo y dónde sea más vital. En el ámbito de la vegetación herbácea o arbustiva, el contenido de agua resulta un parámetro clave para explicar la evolución fenológica de las formaciones vegetales, detectando situaciones de déficit que puedan dar lugar a deterioros críticos del tejido vegetal.

La gestión a corto y largo plazo de los sistemas de riego requiere el uso de sensores de humedad de suelo fiable y preciso. Hoy en día existen un gran número de sensores de humedad, los cuales tienen como base fenómenos electromagnéticos, tensiométrico, capacitancia entre otras técnicas que están disponibles para la medición indirecta de la humedad (Bristow et al., 2001).

Durante mucho tiempo se ha reconocido que las técnicas fiables, robustas y automatizadas para la medición del contenido de humedad del suelo pueden ser extremadamente útiles, si no esenciales, en aplicaciones hidrológicas, ambientales y agrícolas. En los últimos 70 años, este reconocimiento ha fomentado la inversión de una cantidad considerable de ingenio en el desarrollo de tales técnicas. El método estándar para medir el contenido de humedad del suelo es el método gravimétrico, que requiere el secado en horno de un volumen conocido de tierra a $105^{\circ}C$ y la determinación de la pérdida de peso. Este método consume mucho tiempo y es destructivo para el suelo muestreado, lo que significa que no puede utilizarse para mediciones repetitivas en el mismo lugar. Sin embargo, es indispensable como un método estándar para la calibración y

la evaluación comparativa. En general, estos métodos tienen varias limitaciones que restringen su integración en la gestión de la humedad, estas limitaciones van desde el costo monetario, la resolución con respecto a sus unidades, la exactitud, las dimensiones del dispositivo para su implementación y su consumo energético.

El sensor de humedad por pulso de calor ha sido desarrollado para proporcionar las mediciones frecuentes de las propiedades térmicas del suelo: capacidad de calor volumétrico $c\rho$, conductividad térmica λ y la difusividad térmica α . A partir de estas variables térmicas calcular la humedad del suelo o sustrato. La capacidad de calor volumétrico del suelo influye tanto en el almacenamiento y la transferencia de calor, por lo que es un parámetro necesario en los modelos de temperatura del suelo y el flujo de calor (Vandegheuchte and Steppe, 2012). En un suelo los cambios en la conducción de calor se deben principalmente a cambios en el contenido de agua, por lo tanto, una aplicación de un pulso de calor permitirá la determinación de la humedad volumétrica θ_v en el suelo (Valente et al., 2004).

El desarrollo de un sensor de humedad dependiente de la temperatura, miniaturizado, de bajo costo, con buena precisión y de resolución aceptable será un gran avance. Esta solución permite el uso de una interfaz con la electrónica a partir de componentes electrónicos accesibles que permita su implementación, por lo tanto, el desarrollo del sensor por pulso de calor proporcionará mediciones espaciales a pequeña escala de la humedad del suelo, que puede ser realizadas cerca de la superficie del suelo donde se encuentra la raíz de las plantas.

El uso de sensores de humedad para hacer eficiente el riego es crucial para realizar una gestión más precisa de los recursos que están relacionados, por lo tanto, el presente trabajo muestra el diseño y construcción de un sensor de humedad de suelo basado en pulso de calor, en la cual, se mostraran los componentes con la que se construyó, el uso de un dispositivo para adquisición de datos, la física que describe el fenómeno del método indirecto por pulso de calor, la estructura del dispositivo y el programa con la que se procesa la información adquirida.

1.1. Antecedentes

Los métodos utilizados para medir el agua en el suelo se clasifican como directos e indirectos. El método directo se refiere al método gravimétrico, en el cual, se recolecta una muestra del suelo, se pesa, se seca en el horno y se pesa nuevamente para determinar el contenido de agua de la muestra. Para obtener el contenido volumétrico se multiplica por la densidad aparente. El método gravimétrico es el estándar contra el cual se calibran los métodos indirectos. Esta subsección describe algunos métodos indirectos utilizados e implementados para medir la humedad del suelo.

1.1.1. Sensores de humedad por diferentes métodos

a) Sensores de humedad tensiométricos

En (Hoppula and Salo, 2007) los sensores tensiométricos se utilizan para el monitoreo de la humedad del suelo en el cultivo de fresas, ya que operan de manera efectiva a menos de 1000 hPa de tensión del agua en el suelo, que incluye el rango de humedad del suelo para las fresas. Para este estudio se aplicaron cuatro umbrales de riego por goteo diferentes, a 150, 300, 600 hPa y, dependiendo de la etapa de desarrollo de las plantas, entre 300 o 600 hPa , en un ensayo realizado en el suroeste de Finlandia en junio del 2001-2003. Una mayor humedad del suelo aumentó el rendimiento y el contenido de sólidos solubles en las frutas, pero disminuyó la fructificación. En plantas sanas, no se observaron efectos notables sobre la humedad del suelo sobre el crecimiento de las plantas, pero en los años 2002-2003 se observó que el aumento de la humedad del suelo en la temporada de crecimiento anterior y las lesiones de invierno siguientes disminuyeron el crecimiento del año siguiente. El consumo de agua de las plantas varió considerablemente dependiendo de la etapa de crecimiento, el potencial de rendimiento y los factores ambientales. Los volúmenes de agua de riego variaban de 5 a 22 litros por planta por estación de crecimiento.

En (Chard, 2002) se presentó un sensor de matriz granular, similar a un bloque de yeso (Perteneiente a Irrometer Company, Riverside, CA). Consta de dos electrodos concéntricos incrustados en un material de matriz de referencia, que está rodeado por una membrana sintética para proteger contra el deterioro. Una malla de acero inoxidable y una cubierta exterior de caucho hacen que el sensor sea más duradero que un bloque de yeso. El movimiento del agua entre el suelo y el sensor produce cambios en la resistencia eléctrica entre los electrodos en el sensor. La resistencia eléctrica puede entonces convertirse en potencial de agua del suelo. El sensor puede medir el potencial de agua del suelo en un rango más amplio (0 a -2 bares o 0 a -200 kPa) que

los tensiómetros comunes. Los sensores son compactos, fáciles de instalar y de bajo mantenimiento. A mediados de los años noventa, Irrometer mejoró el modelo Watermark 200 a 200SS. El método usado para compactar el material de la matriz de referencia se cambió para mejorar la uniformidad del empaquetamiento y la malla externa de plástico del 200 se transformó en acero inoxidable. Las aberturas en la malla de acero inoxidable en el modelo 200SS son más grandes y más numerosas que en el 200. Esto da al modelo 200SS una mayor superficie para el contacto con el suelo y por lo tanto un tiempo de respuesta más rápido. Los investigadores encontraron que el modelo 200 tenía una respuesta lenta en condiciones de secado rápido o rehumectación parcial y una respuesta lenta en potenciales de agua más negativos. Varios autores han informado de que los sensores tienen una respuesta pobre en el suelo húmedo de 0 a -10 kPa .

b) Sensores de humedad por electromagnetismo

En (Jones et al., 2005) Se sugiere que actualmente se carece de estándares para realizar la caracterización y evaluación de los sensores electromagnéticos, en un fluido homogéneo de permitividad conocida más que en un medio poroso de permitividad desconocida. Los objetivos en este trabajo fueron: (i) desarrollar una metodología para evaluar los atributos de medición de sensores de EM (Electromagnético) que hacen referencia a las características específicas de los sensores y a las propiedades específicas del suelo y (ii) sugerir estándares para la caracterización y comparación de sensores. Los criterios para la evaluación cualitativa de los sensores incluyen la determinación de la frecuencia de medida efectiva; Susceptibilidad a variaciones en la salinidad, relajación dieléctrica y temperatura; Y una mirada a la variación espacial en el área de muestreo del sensor. Las frecuencias de medición para sensores de banda ancha pueden deducirse de las mediciones del analizador de red y del sensor correlacionado o de las sugerencias del fabricante. Se seleccionaron fluidos para proporcionar efectos sucesorios relacionados con el suelo tales como relajación que se producía tanto dentro como fuera del intervalo de frecuencia de medición eficaz de sensores comunes. Las condiciones de ensayo incluyeron líquidos dieléctricamente relajantes (R) y no relajantes (NR), así como líquidos conductores de electricidad (C) y no conductores (NC) y combinaciones de los mismos (por ejemplo, NR-C). No se encontró una combinación adecuada de fluido dieléctrico relajante y conductor (RC) en este estudio, pero esto sigue siendo una meta de trabajo futuro porque representa una condición difícil y a menudo común para las mediciones de sensores EM en suelos que contribuyen a la relajación (por ejemplo, materia orgánica). Los estándares del sensor se basan en fluidos conocidos (basados de parámetros de Cole–Cole) o medibles (usando un analizador de red) dependientes de la frecuencia que proporcionan un sistema homogéneo y reproducible para inmersión de sensores EM. La metodología descrita aquí se aplicó utilizando siete diferentes sistemas de detección EM.

En (Blonquist et al., 2006) con el fin de estimar el uso del agua de los cultivos para la programación del riego y debido a los avances recientes en la tecnología de los sensores electromagnéticos (EM) han hecho que la programación automatizada del riego sea una realidad usando el estado de la técnica de detección de la humedad del suelo. Los objetivos del trabajo fueron, (i) comparar la programación de riego en el césped a partir de las estimaciones de evapotranspiración de la estación meteorológica con las de un sensor de humedad del suelo TDT (Transmisión de dominio en el tiempo) y (ii) aplicar un modelo numérico computarizado para simular el agua volumétrica del suelo, la dinámica a la profundidad de enterramiento del sensor y cualquier drenaje que ocurre debajo de la profundidad de enraizamiento del césped. El sensor TDT fue diseñado para conectarse directamente a un controlador de riego personalizado o para interconectar una pequeña caja de visualización y control con un temporizador de riego convencional donde la programación de riego se basa en un umbral de contenido de agua. El circuito del sensor controlaba el programa de riego permitiendo que lo preprogramado funcionara siempre que el contenido de agua estimado por el sensor descendiera por debajo de la humedad de referencia. El sensor TDT se instaló bajo bluegrass de Kentucky con una estación meteorológica cercana que proporciona estimaciones de ET para la comparación durante un período de aproximadamente 7 semanas. El modelo de simulación numérica HYDRUS-2D se utilizó para predecir el contenido de agua (uSim) en el perfil del suelo. Los requisitos de entrada del modelo incluyen la geometría del dominio de flujo y las condiciones de los límites, junto con estimaciones de los datos de evaporación, transpiración, precipitación, irrigación y captación de agua de raíz. En relación con las recomendaciones de riego basadas en ET, el sistema TDT aplicó aproximadamente un 16 % menos de agua al regar con un rociador que tenía una profundidad de aplicación relativa de 0,80m en la posición del sensor. Con respecto a una tasa de riego fijo de 50mm semanal, el sistema TDT aplicó aproximadamente un 53 % menos de agua. Los resultados de modelado del control del sensor de TDT indicaron que no se detectó ninguna humedad por debajo de la profundidad estimadas de enraizamiento de 30 cm de césped cuando se ignoraron los eventos de aplicación no controlados (por ejemplo, lluvia). El rendimiento del sistema TDT depende de la profundidad del entierro del sensor y de la humedad de referencia.

c) Sensor de humedad por sonda de neutrones

En (Warren et al., 2013) el objetivo fue demostrar la capacidad de monitorear de forma no invasiva la funcionalidad de las raíces individuales y los flujos de agua dentro de las plántulas de *Zea mays* L. (maíz) y *Panicum virgatum* L. (pasto) utilizando imágenes de neutrones. Las plántulas se propagaron durante 1 a 3 semanas en cámaras de aluminio que contenían arena. Los impulsos de agua u óxido de deuterio fueron seguidos a través de los sistemas radiculares recolectando radiografías consecutivas durante la exposición a una fuente de neutrones fríos. El

flujo de agua fue manipulado por ciclación en una lámpara para alterar la demanda foliar de agua. La radiografía de neutrones fácilmente iluminó la estructura de las raíces, el crecimiento de las raíces y el contenido relativo de agua de la planta y del suelo. Después del riego, la absorción rápida de agua de la raíz del suelo recién humedecido, seguido por la redistribución hidráulica del agua a través del sistema de raíces a las raíces que terminan en el suelo seco. El flujo de agua dentro de las raíces individuales respondió diferencialmente a la iluminación foliar basada en la oferta y la demanda de agua dentro del sistema radicular. La resolución de la imagen en escala sub-milimétrica reveló el momento y las magnitudes de absorción del agua de la raíz, la redistribución dentro de las raíces y los enlaces hidráulicos de las raíces y las ramas, estas relaciones no están bien caracterizadas por otras técnicas.

d) Sensores de humedad por capacitancia

En (Kizito et al., 2008) se evaluó la familia de sensores ECH20 para medición del contenido de humedad del suelo, conductividad eléctrica (EC_b) y temperatura para un rango de suelos, a través de un rango de frecuencias de medición entre 5 y 150 MHz. La frecuencia de medición es uno de los principales factores que afectan la sensibilidad de las mediciones del sensor de capacitancia como las variables del suelo tales como la textura del suelo, la conductividad eléctrica y la temperatura. Las mediciones tanto en suelo demostraron que las mediciones de ECH20 eran cercanas. Utilizando una frecuencia de medición de 70 MHz, se determinó una única curva de calibración para un rango de suelos minerales; independientemente de la salinidad del suelo, podría no ser necesaria una calibración específica del suelo. Al combinar todos los datos para cada tipo de suelo, los valores de R² (coeficiente de correlación) se mantuvieron altos (R² = 0.98) con poca variabilidad de la sonda. Después de la calibración de laboratorio, el error del sensor fue de aproximadamente 2 %, independientemente de la EC_b del suelo, hasta una solución aproximadamente $12 \frac{dS}{m}$. Los resultados mostraron que una única curva de calibración podría ser utilizada para todos los suelos minerales probados, independientemente de la salinidad del suelo. Los datos de contenido de EC_b fueron descritos excelentemente por una expresión polinomial. Las mediciones de sensibilidad a la temperatura del contenido de agua en el suelo y EC_b fueron suficientemente pequeñas. Los requisitos limitados de calibración del sensor son importantes cuando se están desplegando grandes redes de sensores de humedad del suelo. Se concluye que se dispone de un sensor de humedad del suelo exacto y rentable que opera a una frecuencia de medición de 70 MHz, con una baja sensibilidad a los factores ambientales del suelo.

En (Dean et al., 1987) se muestra un método para medir la constante dieléctrica del suelo en el campo el cual consiste en incorporar el suelo como parte del dieléctrico de un condensador. En este trabajo se describe un nuevo sensor de capacitancia que funciona a 150 MHz; Hace

uso de los avances en la tecnología de componentes electrónicos para proporcionar una sonda estable y sensible para mediciones de campo in situ. El sensor se desarrolló como parte de un sistema integrado de medición de la humedad del suelo que comprende además una técnica para la instalación de tubos de acceso y calibración adecuada.

e) Sensores de humedad por resistencia eléctrica del suelo

En (Seyfried, 1993) se combinaron la resistencia eléctrica con sistemas de adquisición de datos, ofreciendo un medio relativamente barato de monitorear continuamente el contenido de agua del suelo (θ) en sitios remotos apenas accesibles. Los sensores de resistencia de fibra de vidrio responden a todo el rango de θ pero requieren calibración. Con la calibración de campo, las condiciones del suelo específicas del sitio se explican implícitamente, pero los resultados de la calibración no han sido presentados en la literatura. Los objetivos de este estudio fueron determinar la precisión y precisión de los sensores de resistencia de fibra de vidrio calibrados en el campo y demostrar su aplicación al monitoreo en sitios remotos. Para la calibración se utilizó reflectometría en el dominio del tiempo (TDR). Dieciséis calibraciones individuales TDR-sensor y una calibración total combinando todas las mediciones mostraron una relación log-lineal fuerte entre $T\theta$ medido y resistencia medida por el sensor. Los intervalos de confianza del sensor son de 80 % oscilando entre 0.02 y 0.045 $\frac{m^3}{m^3}$. Las estadísticas de calibración no se desplazaron apreciablemente durante el estudio. Estos resultados y las mediciones posteriores no fueron afectados por la congelación del suelo, lo que indica que los sensores responden al contenido de agua líquida. El intervalo de confianza total del 80 % de calibración fue 0,065 $\frac{m^3}{m^3}$, debido en gran parte a la alta variabilidad entre sensores. Sin embargo, los cambios en θ se pueden estimar con una precisión razonable. La mayoría (73 %) de las mediciones de resistencia realizadas el año después de la calibración estaban dentro de $\pm 0.05 \frac{m^3}{m^3}$ del valor medido TDR. Se demostró que el tiempo de respuesta del sensor estaba dentro del intervalo de medición de 1 h. En este estudio, los sensores de resistencia de fibra de vidrio calibrados en campo proporcionaron estimaciones razonablemente precisas de θ con un alto nivel de resolución espacial y temporal.

f) Sensor de humedad por reflectancia

En (Hummel et al., 2001) se informa de la investigación realizada para documentar la capacidad de un sensor de reflectancia infrarroja cercana (NIR) desarrollado previamente para predecir la materia orgánica del suelo y el contenido de humedad de los suelos superficiales y subsuperficiales. Se recogieron tres núcleos de suelo (5.56 cm de diámetro x 1,5 m de longitud) en cada uno de los 16 sitios en un área de 144 000 km^2 del Corn belt de los Estados Unidos. Los núcleos se submuestrearon a ocho incrementos de profundidad, y se mojaron a seis niveles de humedad del suelo que variaban de aire seco a saturado. Se obtuvieron datos de reflectancia espectral (1603-

2598 nm) en el laboratorio en muestras de suelo no perturbadas. Los datos se recogieron en un espaciamiento de 6.6 nm con cada valor de reflectancia que tenía un paso de banda de 45 nm. Los datos fueron normalizados, transformados a densidad óptica [DO, definida como $\log_{10}(1 / \text{normalizado reflectancia})$], y analizados mediante una regresión lineal múltiple por pasos. Los errores estándar de predicción para la materia orgánica y la humedad del suelo fueron de 0.62 y 5.31 %, respectivamente. La predicción de la humedad del suelo NIR se puede comercializar más fácilmente que la predicción de la materia orgánica del suelo, ya que se requiere un número reducido de bandas de longitud de onda.

1.1.2. Sensores de humedad por pulso de calor

A continuación, se presentan sensores basados en pulso de calor, ordenados por su forma, tamaño y por su uso o aplicación.

a) Sensores por pulso de calor basados en un emisor y múltiples receptores

En (Bristow et al., 2001) se ofrece una visión general de la sonda de pulso de calor multi-aguja que puede proporcionar mediciones de la temperatura del suelo, la difusividad térmica del suelo, la capacidad calorífica volumétrica, la conductividad térmica, el contenido de agua volumétrica y la conductividad eléctrica del suelo a granel, todo en misma zona y al mismo tiempo. Mostramos que la sonda multi-aguja puede proporcionar mediciones de alta calidad, en algunos casos tan buenas o mejores que las obtenidas usando otra metodología actual.

En (Mori et al., 2003) se muestra un sensor que consta de un solo calentador central, cuatro termistores, y cuatro electrodos que juntos se incorporan en seis tubos de acero inoxidable. El caso de estudio es determinar propiedades térmicas del suelo y mayor contenido volumétrico de agua de una duna de arena el cual se determinó a partir de la medición de la respuesta de la temperatura de los cuatro sensores de termistor después de la aplicación de un pulso de 8 segundos desde el calentador.

En (Valente et al., 2006) La sonda multifuncional propuesta fue diseñada para la medición simultánea de la temperatura, contenido de agua volumétrico, flujo de agua, y la salinidad de los volúmenes de suelo a pequeña escala en zonas vadosas. El sensor consta de un elemento de calefacción y 4 termistores. El sistema propuesto incluye circuitos de señales de procesamiento,

un microcontrolador y un transceptor de *RF*(radiofrecuencia).

b) Sensores por pulso de calor utilizados para encontrar la cantidad de hielo

En (Liu and Si, 2011) el objetivo fue examinar si un método sonda pulso de calor (HPP) se puede utilizar para medir el contenido de hielo del suelo. Para reducir al mínimo la fusión del hielo se usó un pulso de calor de duración de $60s$ y la fuente fue de $q = 25W/m$. En este estudio, las arenas se envasaron en recipientes pequeños con sondas pulso de calor.

En (Zhang et al., 2011) se este estudio explora la posibilidad de utilizar pulso de calor para determinar el contenido total de agua de los suelos congelados. Evaluaron de la aplicabilidad de los métodos HPP(sonda de pulso de calor) bajo diversas condiciones de temperatura y humedad. Un pulso de calor fue probado en niveles totales de humedad que variaban desde saturación completa a la de un suelo seco. Las duraciones de pulso térmicos aplicados variaban de 8 a $60s$, con una fuente total de calor q que varía de 100 a $2000J/m$.

c) Sensores por pulso de calor para calcular propiedades térmicas en líquidos

En (Van der Held and Van Drunen, 1949) se desarrolló un aparato para la determinación de la conductividad térmica de los líquidos. El aparato es adecuado para todo tipo de líquidos, incluidos los ácidos fuertes. Desde un momento dado se pasa una corriente eléctrica a través de un alambre delgado y recto, colocada en un material homogéneo, la producción de calor constante en el alambre provoca una temperatura cilíndrica en el material. La convección del líquido se evadió, debido a que el tiempo en el que se realiza la medición, es tan corto que las diferencias de densidad no pueden desarrollar una corriente de convección perturbadora dentro de este tiempo.

d) Mejoras en los sensores por pulsos de calor

En (Valente et al., 2004) el sensor se basa en la aplicación de un pulso de calor durante un intervalo de tiempo fijo. El aumento máximo en la temperatura es supervisado por la sonda de medición, colocado a una cierta distancia de la fuente de calentador que es un **CMOS** que por su naturaleza reduce la incertidumbre.

1.2. Estado del arte

El fácil acceso a la instrumentación de bajo coste fiable para su uso en laboratorio y campo de experimentación sigue siendo una prioridad para muchas personas que trabajan en la zona del suelo y las ciencias ambientales. El uso de los sensores por pulso de calor como método indirecto para la lectura de la humedad se ha estudiado y comprobado su eficacia desde hace unos años atrás en los 90's, los trabajos que se han realizado se han centrado en el sensado de una porción mayor de sustrato y en mejoramiento de sus componentes.

Resientes Sensores indirectos de humedad por pulso de calor

En (Vandegheuchte and Steppe, 2012) se presenta una teoría basada en principios termodinámicos para determinar tanto axial y tangencial la difusividad térmica en la albura (ultimo anillo de un tronco de madera), mediante la medición de la respuesta de la temperatura después de la aplicación de un pulso de calor de un calentador en línea. La difusividad térmica es un parámetro crucial para los cálculos de flujo de savia.

En (Yang et al., 2013) se usa el método para determinar la densidad de flujo de agua del suelo. La sonda pulso de calor emplea una sonda calentadora central rodeado por una disposición ortogonal de cuatro sondas de termistores, para la estimación de la densidad de flujo de agua de dos componentes.

En (Dias et al., 2013) se desarrolló un sensor que se compone de un transistor bipolar de unión npn, que funciona como elementos de calentamiento y sensor de temperatura. Se usa una técnica que incrementa simultáneamente la tensión base colector V_{CB} y la corriente colectora I_C del transistor que permite la aplicación del impulso térmico con corrientes de bajo nivel, del orden de $6mA$. Las variaciones de $V_{BE}(T)$ en función de la temperatura se utilizan para medir la temperatura del sensor.

1.3. Planteamiento del problema

El agua y los nutrientes son muy importantes e implican condiciones necesarias para asegurar un crecimiento y desarrollo normal de la planta. Los sistemas y métodos para ahorrar agua juegan

un papel clave en el uso sostenible de los recursos hídricos, por lo cual, la tecnología en la agricultura debe proporcionar las condiciones necesarias para el uso preciso de agua a partir de sensores de humedad.

1.3.1. Fenómenos asociados a la dinámica de la humedad en el suelo

Para entender el comportamiento de los fenómenos asociados a la acumulación de agua en la zona de la raíz se consideran factores ambientales que son determinantes en la dinámica de la humedad de suelo tales como la temperatura y de los fenómenos relacionados con el sustrato, como la evapotranspiración, infiltración, la precipitación y la escorrentía, como se muestra en la Figura 1.3.1.

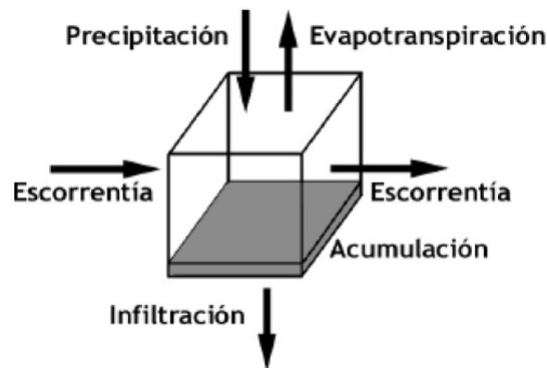


Figura 1.3.1: Fenómenos asociados a la dinámica del sustrato

La Figura 1.3.1 muestra los fenómenos que repercuten con no linealidades en la dinámica de la humedad en el sustrato, estos fenómenos para efectos de lecturas de la humedad en la zona radical no considerar estos aspectos, podrían repercutir en problemáticas de diferentes índoles.

1.3.2. Estimación de la humedad de suelo

La estimación del contenido de agua en los suelos se puede realizar básicamente por cuatro métodos generales que a su vez se engloban con los métodos directos (Muestreo de campo) e indirectos (Información meteorológica, teledetección y Sensores indirectos) las cuales tienen inconvenientes y se presentan a continuación:

(A) Información meteorológica

El empleo de métodos para encontrar la humedad basados en datos meteorológicos, suelen basarse en variables como la temperatura y humedad del aire, precipitación y velocidad del viento, a partir de las que se intentan simular el efecto de estas sobre la actividad fisiológica de las plantas. La respuesta de las distintas plantas a las mismas condiciones atmosféricas puede ser muy variable, por lo cual, los índices meteorológicos pueden estar sobre estimando el contenido de agua, es decir las variables reales pueden no ser aproximadas a las estimadas por el método.

(B) Teledetección

Se basan en imágenes de satélite que presentan problemáticas similares a las meteorológicas. Por un lado, facilitan una cobertura espacial exhaustiva, con buena frecuencia temporal, lo que asegura poder observar cualquier zona de interés. Por otro lado, se basa en la señal reflejada y emitida por la propia planta, en este caso, el principal problema radica en demostrar que hay una buena relación entre el estado hídrico y el comportamiento espectral de la planta.

(C) Muestreo de campo

El trabajo de campo es el método más directo y preciso, pero tiene el inconveniente de ser costoso y lento en algunos casos, además de contar con un carácter muy local, lo que dificulta su aplicación operativa. Habitualmente se aplica un sistema de muestreo, seleccionando ciertas plantas que se consideren representativas de la situación hídrica del conjunto, por lo cual, complica el método al considerar las diversas variables que influyen en el estado hídrico de la planta (situación topográfica, textura, densidad aparente, tipo de especie, etc.).

Habitualmente el contenido hídrico se mide por métodos gravimétricos, comparando el peso húmedo y seco de la muestra, lo que implica que la estimación no es inmediata, sino que requiere un cierto tiempo (24-48 h) para conseguir el secado de la muestra.

(D) Sensores indirectos

Como se mostró en los antecedentes existen métodos diversos para la estimación de la humedad a partir de otras variables o fenómenos que ocurren en el suelo, cada uno tiene inconvenientes

estructurales, de energía y de calibración, sin embargo la distribución del agua en el suelo hace posible la implementación de sensores en áreas específicas como lo son la zona radical de las plantas, por lo cual solo se necesita saber la humedad volumétrica en una pequeña área, en nuestro caso se enfocó en el sensor indirecto por pulso de calor.

1.3.3. Distribución de la humedad en el suelo

Como consecuencia de la composición del suelo y los fenómenos asociados, la distribución del agua provoca diferentes humedades en las capas del sustrato por efecto de la infiltración, en este caso nos centraremos en la zona de las raíces como se muestra en la Figura 1.3.2 ya que en esta zona es en donde tendría una aplicación el sensor de humedad, por lo cual debe considerarse ciertos aspectos como tamaño y aplicación de sus componentes.

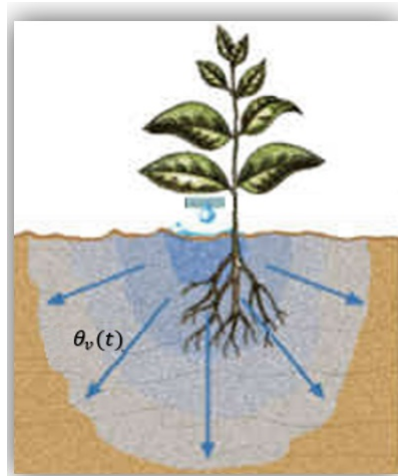


Figura 1.3.2: Distribución de la humedad en el suelo

En la Figura 1.3.2 se observa la distribución de la humedad de manera general en donde la composición del sustrato influye en la retención de la humedad y en los nutrientes, como consecuencia de esto es fundamental el conocimiento de la humedad en la zona de las raíces. Las humedades están relacionadas entre sí ya que en el punto en donde el agua de riego incide en el sustrato normalmente está en saturación, la humedad de las regiones circundantes de este punto cambia debido a que el sustrato opone cierta resistencia al paso del agua lo cual está relacionado con conductividad hidráulica.

1.3.4. Limitaciones del pulso de calor en el suelo

El problema de una medición de humedad indirecta por pulso de calor, es encontrar una manera que un pulso de calor q conduzca calor a través de un suelo húmedo hasta una distancia r en la cual la temperatura registrada estará relacionada con la humedad volumétrica θ_v como se muestra en la Figura 1.3.3, el pulso de calor es una señal escalón de cierta duración.

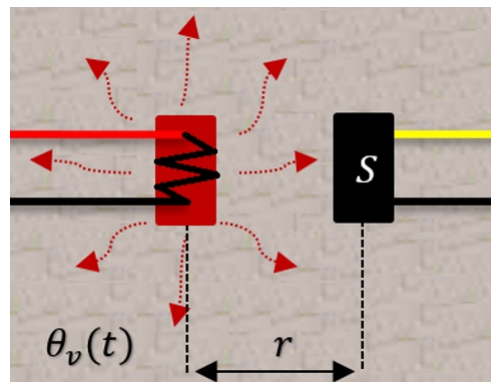


Figura 1.3.3: Pulso de calor a través de un suelo para un sensor de humedad.

En la Figura 1.3.3 se observa de manera general la forma en que se aplica un pulso de calor en el suelo, donde se observa que existe una separación entre el calefactor y el lector de temperatura por una distancia r , la cual, es una fracción de sustrato por donde incide una cantidad de calor que a su vez es afectada por la humedad volumétrica θ_v , los problemas relacionados con esta implementación son las siguientes.

Las siguientes suposiciones deben cumplirse para evitar males lecturas y para que el método sea efectivo.

- **La distancia r debe ser constante**, un cambio en este provocaría una mala lectura de la humedad.
- **El pulso de calor q debe ser constante**, se aplica un escalón de cierta duración, de modo que, la temperatura que incide en la tierra humedad es suficiente para conducir calor hasta una distancia r , donde un sensor realizara lecturas de temperatura.
- **Se debe conocer la densidad aparente**, un conocimiento de ciertas características del suelo son de gran importancia, la cuales se obtienen por pruebas de laboratorio.
- **El lector de temperatura debe ser sensible**, la adquisición de datos y el sensor deben tener una buena resolución, es decir, la relación entre el aumento de temperatura en $^{\circ}C$ y

la variable de lectura (*volts*) deben tener cierta resolución con respecto a la adquisición de datos (por ejemplo $1^{\circ}C$ es a $20mV$).

1.4. Justificación

El cálculo de la humedad en el suelo o sustrato ha sido muy difícil de encontrar por diferentes métodos ya que las características del sustrato pueden variar dependiendo de la concentración de minerales, cantidad de aire atrapado suelo poroso, contenido volumétrico de agua y cantidad de materia orgánica.

Con el fin de poner en práctica las técnicas de agricultura de precisión para la gestión del riego, el uso de sensores de humedad del suelo, confiables y precisos es obligatorio. Hoy en día, existen sensores, basados en la transferencia de calor (Vandegheuchte and Steppe, 2012), electromagnetismo (Blonquist et al., 2005), medidas tensiométricas (Hoppula and Salo, 2007), nuclear (Warren et al., 2013), la capacitancia (Kizito et al., 2008) y la resistencia eléctrica del suelo (Seyfried, 1993), estas técnicas están disponibles para la medición de la humedad del suelo, aunque muchos de los sensores fabricados utilizando las técnicas antes mencionadas tienen una buena precisión, la mayoría de ellos son adecuados sólo para uso en laboratorio, ya que son muy caros y no son prácticos para ser utilizados en aplicaciones reales en campos de cultivo.

En el caso de los sensores basados en transferencia de calor y específicamente por pulso de calor, son dependientes de la capacidad volumétrica (cp) que presenta el sustrato (Vandegheuchte and Steppe, 2012) la cual es una medida necesaria para lectura indirecta de la humedad, a su vez esta es dependiente de la difusividad térmica. Estas propiedades térmicas pueden ser encontradas analizando los aumentos de temperatura y los tiempos en los que ocurre. La razón para este éxito es que los sensores de transferencia de calor son generalmente pequeños, de bajo costo, y se pueden aplicar fácilmente en los campos (Valente et al., 2004). El sensor de pulso de calor se desarrolla para proporcionar a pequeña escala, las mediciones frecuentes de las propiedades térmicas del suelo.

Si bien el pulso de calor como método indirecto para la lectura de humedad en el sustrato es conocido actualmente, se pueden trabajar aspectos como el mejoramiento de los componentes electrónicos, de generación de calor, de lectura de la temperatura, software, etc. Las mejoras pueden ser en un sentido de implementación como las dimensiones de los componentes o en lo económico.

En el sustrato, los cambios en cp se deben principalmente a cambios en el contenido de agua

del suelo, por lo tanto, una aplicación del sensor por pulso de calor permitirá la determinación del contenido volumétrico de agua en el suelo (θ_v), el método permite asociar la temperatura máxima alcanzada y el tiempo en que esto ocurre con la capacidad de calor volumétrico ($c\rho$) (Valente et al., 2004),(Bristow et al., 2001),(Valente et al., 2006).

El uso racional del agua en los cultivos de regadío en la actualidad reciben mucha atención por parte de la comunidad científica debido al cambio climático (Allen, 2006). El uso de técnicas avanzadas de control es una posibilidad prometedora sobre todo en la aplicación de sensores de humedad.

1.5. Objetivos

A continuación se muestran los objetivos generales y específicos.

1.5.1. Objetivos generales

- Diseñar un sensor para la lectura de la humedad indirecta usando el método del pulso de calor.
- Obtener una metodología de trabajo para experimentación y obtención de datos.
- Obtener un modelo del sistema para la obtención de la humedad a partir de mediciones térmicas.

1.5.2. Objetivos específicos

- Diseñar y construir un sensor para lectura de humedad (materiales y electrónicos que sean accesibles en el mercado).
- Definir el sistema computacional que almacene y adquiera datos.
- Realizar una adquisición y almacenamiento de datos en un sustrato libre de cultivo.
- Mostrar un modelo dinámico del comportamiento de la temperatura en un suelo húmedo donde se definan los términos conocidos del modelo y los términos inciertos.
- Un modelo del sensor de humedad por pulso de calor donde se muestren las variables dependientes del pulso de calor y términos conocidos.

1.6. Metas

- Diseño y construcción de un sensor indirecto de humedad del suelo para propósitos de control de sistemas de riego.
- Obtención de modelo del comportamiento de la humedad en el sustrato.

1.7. Estructura de la tesis

La tesis esta estructurada en cinco capítulos, la bibliográfica y cinco anexos. En el **capítulo 1** se mostró la introducción al tema, donde se observaron los antecedentes de los sensores de humedad y propiamente los basados en el pulso de calor, también se observo los problemas relacionados con respecto a la estimación de la humedad, así como lo son los fenómenos asociados al suelo, la forma en que se distribuye la humedad y las condiciones que se deben cumplir para aplicar un pulso de calor. También se expuso la justificación del la realización del trabajo de investigación, por lo cual, se presentaron las metas y los objetivos para cumplir con la realización del sensor de humedad por pulso de calor. En los próximos capítulos podremos observar lo siguiente.

En el **Capítulo 2** se presenta la teoría que respalda la realización del sensor a partir del análisis de la conducción de calor en el suelo, la resolución de aspectos matemáticos que compone el modelo térmico para facilitar la adquisición de datos, la composición del suelo desde un punto de vista general en función de las capacidades volumétricas caloríficas y un método gravimétrico para la obtención de la humedad en muestras de suelo para fines comparativos.

En el **Capítulo 3** se muestran los resultados principales en donde se muestra una propuesta de procedimiento para la obtención de la humedad a partir de un pulso de calor en donde se toman en cuenta tiempos y temperaturas máximas, también se presenta un modelo térmico para fines comparativos con la dinámica de la temperatura y para calibración del sensor, también se incluye un modelo para la estimación de la humedad tomando en cuenta el procedimiento propuesto para la obtención de parámetros térmicos y temporales necesarios para el método del pulso de calor, por ultimo se presenta el diseño y construcción del sensor de humedad en donde se muestran los circuitos, sustancias que componen el sensor de humedad.

En el **Capítulo 4** se muestran las simulaciones e implementaciones realizadas, en la que destaca una en un medio saturado para corroborar el método y para fines de calibración, y por último una serie de pruebas realizadas a cinco muestras de sustrato con diferentes concentraciones de humedad, en donde se comparan con el método gravimétrico y se obtienen los errores con sus respectivas correcciones.

En el **Capítulo 5** se presentan las conclusiones y los trabajos futuros, en donde se toman en cuenta aspectos a mejorar como lo son los componentes electrónicos y la adquisición de datos. Se muestran las condiciones en las que el sensor de humedad puede ser implementado para el control de riego y por último las conclusiones finales sobre el desarrollo y la implementación del sensor de humedad.

Capítulo 2

Marco teórico

En la siguiente sección se mostrará teoría relacionada con la física y térmica del sustrato y su influencia con respecto a la concentración de humedad, enfocándose en cuatro partes.

- **Conducción de calor en un medio poroso (suelo)**, en la cual se desarrolló de manera matemática un modelo unidimensional en el que se toma en cuenta las características de condiciones geométricas, propiedades físicas, condiciones iniciales o de reposo y condiciones de contorno o frontera.
- **Solución a la integral exponencial**, esto debido a que en el modelo térmico del sensor de humedad presenta esta función especial que en ciertos valores puede tener singularidades, por lo que se resuelve usando series de Taylor y mas específicamente la serie de McLaurin. Esto permite identificar los puntos en los que se deben considerar en la programación.
- **Capacidad calorífica volumétrica del suelo**, se explica a partir de la composición materiales que la estructuran, es decir, las fracciones de elementos orgánicos, minerales, de aire y agua que la conforman.
- **Cálculo contenido de agua en el suelo a partir de gravimetría**, esto para realizar una comparativa entre este método y el del pulso de calor, la gravimetría usa las masas y los volúmenes de muestras de sustrato para encontrar la fracción de agua que contienen en comparación a una referencia de la muestra de suelo seco.

2.1. Conducción de calor en régimen transitorio en un medio poroso (suelo)

El interés en describir lo que ocurre en el sustrato cuando hay cambios de temperatura durante la conducción de calor y la transferencia de calor en el tiempo, nos lleva al estudio de estos fenómenos. Los problemas que se estudian en este caso son de dos tipos.

- Cuerpos que evolucionan hacia el equilibrio térmico (calentamientos o enfriamientos).
- Cuerpos que están sometidos a variaciones periódicas de temperatura.

Para obtener el campo de temperaturas, la vía de resolución requerida son métodos matemáticos clásicos que nos da una solución analítica. La información que necesitamos para que el problema se pueda resolver son las siguientes.

- **Condiciones geométricas:** debemos conocer formas y dimensiones del cuerpo que estudiamos, así como las zonas que tienen material con propiedades uniformes.
- **Propiedades físicas:** Es necesario conocer las propiedades físicas del material y su variación con la temperatura.
- **Condiciones Iniciales:** El campo de temperaturas en el instante inicial debe ser dato.
- **Condiciones de Contorno o Frontera:** Definen la interacción de las piezas con el entorno.

Campos de Temperaturas en Flujos de Calor Unidimensionales

Cuando las características del problema permitan considerar que el campo de temperatura es función de una única coordenada estaremos en un caso donde el flujo de calor que tiene una única dirección y se podrán en general plantear soluciones analíticas. La temperatura en un medio varía con la posición y con el tiempo; es decir, $T = T(x, y, z, t)$. Se dice que la conducción en un medio es estacionaria cuando la temperatura no varía con el tiempo, y no estacionaria o transitoria, cuando lo hace. La conducción de calor en un medio es unidimensional cuando la transferencia de calor por conducción es significativa sólo en una dimensión y despreciable en las otras dos direcciones primarias (Cengel and Ghajar, 2011). La ecuación que representa la transferencia de calor de manera unidimensional es la siguiente.

$$\alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.1)$$

Donde T es temperatura, t es tiempo, α es la difusividad térmica del material y y una coordenada cartesiana cualquiera. Consideremos entonces el caso de un flujo unidimensional de calor en un cuerpo que se calienta o enfría. La ecuación general de la conducción del calor en diversas geometrías se representa de la siguiente manera:

Geometría plana (flujo según la coordenada cartesiana r)

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \quad (2.2)$$

Geometría cilíndrica (flujo según la coordenada radial r)

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2.3)$$

Geometría esférica (flujo según la coordenada radial r)

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2.4)$$

Para el caso de un pulso de calor se toma la ecuación 2.3 ya que el cambio de temperatura se asume en una unidad de volumen determinada. Se analiza la conducción de calor unidimensional transitoria, entonces, si se transfiere energía al cuerpo en forma constante, en el instante $t = 0$ y se supone que la energía completa entra al cuerpo, sin pérdida de calor con las siguientes condiciones iniciales Para $t > 0$ en $r \rightarrow \infty$, entonces, $T = T_0$, Para $t > 0$ en $r = 0$, entonces, $T = T_s$ junto con la condición

$$T_s - T_0 = r \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{Q}{2\pi k} \quad (2.5)$$

donde Q es la fuente de calor, k es la conductividad térmica, T_0 es la temperatura inicial, T_s es la temperatura del emisor de calor a distancia $r = 0$ y Q es la cantidad de calor liberado.

Por simplicidad consideremos que el medio tiene dimensiones unitarias y comencemos por adimensionalizar las temperaturas de la siguiente forma (Cengel and Ghajar, 2011),(Valente et al., 2006):

$$\phi = \frac{T(r, t) - T_0}{T_s - T_0} \quad (2.6)$$

donde ϕ es una variable para adimensionalizar la temperatura. Partiendo de la transferencia de calor en coordenadas cilíndricas y con la ecuación 2.3 tenemos de acuerdo con (Cengel and Ghajar, 2011), (Mori et al., 2003) que la ecuación a resolver es:

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \quad (2.7)$$

Con las siguientes condiciones iniciales que son equivalentes a anteriores, para $t > 0$ en $r \rightarrow \infty$, entonces, $\phi = \phi_0 = 0$, Para $t > 0$ en $r = 0$, entonces $\phi = 1$. Planteando el problema se observa que existen tres únicas variables (ϕ, r, t) y que el problema está gobernado por un solo parámetro ϕ que consiste en la diferencia inicial de temperatura entre el plano límite y el resto del espacio. Considerando que se pueden conseguir un parámetro adimensional de semejanza asociando la difusividad térmica α , el tiempo t y la distancia r , todo esto para facilitar el procedimiento de solución, tenemos lo siguiente.

$$\eta = \frac{r}{\sqrt{4\alpha t}} \quad (2.8)$$

Entonces podemos asumir que ϕ se puede expresar como

$$\phi = \phi f(\eta) \quad (2.9)$$

Los términos para la ecuación 2.7 con respecto a la ecuación 2.9 son

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{d\phi}{d\eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{-r}{2t\sqrt{4\alpha t}} \frac{d\phi}{d\eta} \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial r} = \frac{d\phi}{d\eta} \frac{\partial \eta}{\partial r} = \frac{1}{\sqrt{4\alpha t}} \frac{d\phi}{d\eta} \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} = \frac{d}{d\eta} \left(\frac{\partial \phi}{\partial r} \right) \frac{\partial \eta}{\partial r} = \frac{1}{4\alpha t} \frac{d^2 \phi}{d\eta^2} \quad (2.12)$$

Así tomando en cuenta lo anterior (Ecuaciones 2.10, 2.11 y 2.12) y de las Ecuación 2.7 se tiene la siguiente expresión

$$\frac{1}{\alpha} \frac{-r}{2t\sqrt{4\alpha t}} \frac{d\phi}{d\eta} = \frac{1}{r} \frac{1}{\sqrt{4\alpha t}} \frac{d\phi}{d\eta} + \frac{1}{4\alpha t} \frac{d^2 \phi}{d\eta^2} \quad (2.13)$$

$$\frac{d^2 \phi}{d\eta^2} = \left[\frac{-2r}{\sqrt{4\alpha t}} - \frac{\sqrt{4\alpha t}}{r} \right] \frac{d\phi}{d\eta} \quad (2.14)$$

$$\frac{d^2 \phi}{d\eta^2} = \left[-2\eta - \frac{1}{\eta} \right] \frac{d\phi}{d\eta} \quad (2.15)$$

si tomamos $w = \frac{d\phi}{d\eta}$ podemos aplicar el método de integración por variables separadas, por lo cual tenemos lo siguiente.

$$\frac{dw}{d\eta} = \left[-2\eta - \frac{1}{\eta} \right] w \quad (2.16)$$

$$\int \frac{dw}{w} = \int \left[-2\eta - \frac{1}{\eta} \right] d\eta \quad (2.17)$$

Resolviendo la integral con respecto a w y con respecto a η obtenemos algunos logaritmos y ordenamos.

$$\ln w = -\eta^2 - \ln \eta \quad (2.18)$$

Se aplica la operación inversa al logaritmo y se simplifica como se muestra.

$$e^{\ln w + \ln \eta} = e^{\eta^2} \quad (2.19)$$

$$e^{\ln w \eta} = e^{-\eta^2} \quad (2.20)$$

$$w \eta = e^{-\eta^2} \quad (2.21)$$

Integramos por segunda vez con respecto a η , recordando que $w = \frac{d\phi}{d\eta}$.

$$\frac{d\phi}{d\eta} \eta = e^{\eta^2} \quad (2.22)$$

$$d\phi = \frac{e^{\eta^2}}{\eta} d\eta \quad (2.23)$$

Completando la operación debido a que la derivada de η^2 es 2η tenemos

$$\phi = -\frac{1}{2} \int_{\eta}^{\infty} \frac{e^{-U^2}}{U^2} \quad (2.24)$$

donde U es una variable de cambio y ϕ es una variable para adimensionalizar las temperaturas en cuestión. Retomando que $\eta = \frac{r}{\sqrt{4\alpha t}}$ al aplicar el cambio de variable con U se nota que podríamos simplificar de manera que $\eta^2 = \frac{r^2}{4\alpha t}$, entonces podemos renombrar con una nueva variable de cambio u , es decir, $u = U^2$, de igual manera podemos renombrar η con $x = \eta^2$, con esto podemos reescribir la Ecuación 2.24 como se muestra a continuación.

$$\phi = -\frac{1}{2} \int_x^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} \quad (2.25)$$

Donde u es una variable de cambio y $x = \frac{r^2}{4\alpha t}$. Las soluciones de esta expresión conocida como integral exponencial se muestran en la siguiente la sección, la Ecuación 2.25 es utilizada como un modelo que relaciona la temperatura con propiedades térmicas del suelo ante un pulso de calor en la sección 3.2.1.

2.2. Solución de la integral exponencial debido a ciertas singularidades

La solución de la integral exponencial se presenta debido a singularidades que se presentan en el modelo térmico y que se deben tomar en cuenta para su futura programación. Ahora bien, en calculo existen algunas integrales que no pueden resolverse por medios convencionales, como se mostró en la sección anterior para representar la conducción de calor en un medio poroso como lo es el suelo, en el modelo térmico existe el caso de la integral exponencial, que es una integral impropia de la siguiente forma.

$$- Ei(-x) = \int_x^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (2.26)$$

Donde u es una variable de cambio correspondiente a una función x , en la cual, ocurre una singularidad cuando $u = 0$ (Corrington, 1961), (Abramowitz et al., 1966). Para poder integrar es necesaria encontrar la equivalencia en forma de una serie de McLaurin, el cual es un caso particular de la serie de Taylor (Sadosky and de Guber Rebeca, 1975) a continuación se resuelve.

La serie de Taylor es una aproximación de funciones mediante una serie de potencias o suma de potencias enteras de polinomios llamados términos de la serie, dicha suma se calcula a partir de las derivadas de la función para un determinado valor o punto a suficientemente derivable sobre la función y un entorno sobre el cual converja la serie.

$$f(s) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{f^m(a)}{m!} (s - a)^m \quad (2.27)$$

Donde $f^m(a)$ denota la n -ésima derivada de la función f para el valor a de la variable respecto de la cual se deriva. Si una serie de Taylor está centrada sobre el punto $a = 0$, se le denomina serie de McLaurin como se muestra.

$$f(s) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{f^m(0)}{m!} (s)^m \quad (2.28)$$

Al determinar la serie de McLaurin de la función $f(x) = e^x$ de modo que $f^n(0) = 1$ para toda n -ésima derivada, es decir:

$$f^n(0) = \begin{cases} f(0) = e^0 = 1 \\ f'(0) = e^0 = 1 \\ f''(0) = e^0 = 1 \\ \vdots \\ f^m(0) = e^0 = 1 \end{cases} \quad (2.29)$$

Así, de la Ecuación 2.28 y de las derivadas en Ecuación 2.29 tenemos que:

$$e^x = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{x^m}{m!} \quad (2.30)$$

Las series de McLaurin son utilizadas para encontrar integrales de los cuales no podemos sacar primitiva (referencia), en el caso de la Integral exponencial será de la siguiente manera: Sea $f(x) = e^{-x}x^{-1}$ la función a obtener como serie, utilizando la ecuación 2.30 como base, para la cual, en este caso tendremos una serie alternante para e^{-x} , es decir

$$e^{-x} = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-x)^m}{m!} \quad (2.31)$$

Ahora x^{-1} multiplica los dos miembros de la igualdad, dando como resultado la serie

$$e^{-x}x^{-1} = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-x)^m x^{-1}}{m!} = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m x^{m-1}}{m!} \quad (2.32)$$

Ahora podemos resolver la exponencial integral a partir de una serie de McLaurin, es decir:

$$\int_a^\infty e^{-x} x^{-1} = \int_a^\infty \sum_{m=0}^{\infty} \frac{-1^m x^{m-1}}{m!} = \left[\int_a^\infty \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m x^m}{mm!} \right]_a^\infty \quad (2.33)$$

En la Ecuación 2.33 podemos observar que existe una singularidad en $m=0$, por tanto procedemos a hacer lo siguiente partiendo de la ecuación 2.32:

$$\int_a^\infty \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m x^{m-1}}{m!} = \int_a^\infty \left(\frac{1}{x} - \frac{x^0}{1!} + \frac{x^1}{2!} - \frac{x^2}{3!} + \dots - \frac{x^{m-1}}{m!} dx \right) \quad (2.34)$$

$$= \left[\ln(x) - \frac{x^1}{1 \cdot 1!} + \frac{x^2}{2 \cdot 2!} - \frac{x^3}{3 \cdot 3!} + \dots - \frac{x^m}{m!} \right]_a^\infty \quad (2.35)$$

$$= \left[\ln(x) + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m x^m}{mm!} \right]_a^\infty \quad (2.36)$$

$$= - \lim_{x \rightarrow a} \left[\ln(x) + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m x^m}{mm!} \right] + \lim_{x \rightarrow \infty} \left[\ln(x) + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m x^m}{mm!} \right] \quad (2.37)$$

De tal manera que al evaluar los límites de la integral de la Ecuación 2.37 tenemos que para el caso particular del $\lim_{x \rightarrow \infty} \left[\ln(x) + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m x^m}{mm!} \right]$ la sumatoria $\sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m x^m}{mm!}$ puede simplificarse de la siguiente manera si $x \geq 0$, esto se cumple ya que la variable de cambio para el modelo térmico del sensor de humedad es siempre positivo, debido a que es dependiente del tiempo, así $u = \frac{r^2}{4\alpha t_i}$, donde r, α son constantes y t_i son instantes de tiempo, por lo cual, si $u \geq 0$, tenemos lo siguiente.

$$\sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m x^m}{mm!} = \sum_m = 1^\infty \frac{1}{m} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m x^m}{m!} = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \left(\frac{1}{e^x} - 1 \right) \quad (2.38)$$

Con lo anterior podemos resolver de la siguiente manera.

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \left[\ln(x) + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m x^m}{mm!} \right] = \lim_{x \rightarrow \infty} \left[\ln(x) + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left(\frac{1}{e^x} - 1 \right) \right] \quad (2.39)$$

$$= \lim_{x \rightarrow \infty} \left[\ln(x) + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \right] = -\Gamma \quad (2.40)$$

Donde $\Gamma=0.5772$ es la constante de Euler-Mascheroni, finalmente la integral exponencial queda de la siguiente manera.

$$\int_a^{\infty} e^{-x} x^{-1} = -\Gamma - \ln(x) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n x^n}{mm!} \quad (2.41)$$

Esta solución es importante ya que es necesaria para el conocimiento de la programación del modelo térmico que se muestra en la sección 3.2, las consideraciones al programar se muestran en el anexo D.

2.3. Capacidad calorífica volumétrica del suelo

La capacidad calorífica volumétrica $c\rho$ es la principal variable a conocer para encontrar la humedad del suelo a partir de un pulso de calor, la cual se evalúa mediante la adición de las capacidades caloríficas volumétricas de las sustancias que contiene el suelo (Valente et al., 2004)(Bristow et al., 2001):

$$c\rho = c_m \rho_m fr_m + c_a \rho_a fr_a + c_o \rho_o fr_o + c_w \rho_w \theta_v \quad (2.42)$$

donde ρ es densidad, c es calor específico, fr es fracción de volumen, θ_v es el contenido volumétrico del agua y los subíndices m, a, o, w refieren a minerales, aire, material orgánico y agua. Si el aire se ignora y redefinimos como solidos a las fracciones de la materia mineral y orgánica entonces la Ecuación 2.42 puede reescribirse de la siguiente manera.

$$c\rho = c_s \rho_s (1 - P) + c_w \rho_w \theta_v \quad (2.43)$$

Donde el subíndice (*s*) indica propiedades promedio de los sólidos (minerales+ materia orgánica), *P* es la porosidad total $P = 1 - fr_s$ en la cual fr_s es la fracción de volumen de sólidos. Dado que $fr_s = \frac{\rho_b}{\rho_s}$, donde ρ_b es la densidad aparente del suelo, por lo cual la ecuación 2.43 también se puede expresar como sigue.

$$c\rho = c_s\rho_b + c_w\rho_w\theta_v \quad (2.44)$$

La ecuación 2.44 es la manera más simplificada para relacionar la capacidad calorífica volumétrica $c\rho$ del suelo a partir de su composición física, es decir de la combinación de calores específicos y densidades de las fracciones volumétricas de los materiales que los componen, resaltando el contenido volumétrico del agua θ_v como el más significativo.

2.4. Cálculo del contenido de agua de suelo a partir de gravimetría

La idea de utilizar este método es la comparación de las lecturas entre el sensor por pulso de calor y las muestras por gravimetría. El contenido volumétrico de agua del suelo θ_v puede ser medido directamente muestreando el peso y los volúmenes de muestras del suelo, comparando su peso al de una referencia de igual volumen puede calcularse la cantidad de agua que existe.

Para el cálculo de la humedad por gravimetría se necesitan muestras sin agua, por lo cual se somete el sustrato a un proceso de secado, la idea es secar el sustrato hasta un punto en el que no exista cambio en su peso además se somete a una compresión constante para poder calcular su densidad (Yin et al., 2013)(Radulovich, 2008). Existen dos maneras generales de realizar los cálculos de la humedad por gravimetría, el uso de alguna de ellas depende de los datos con los que se cuenten, estas se muestran a continuación.

1.- El cálculo usado por (Radulovich, 2008) es el siguiente.

$$\theta = \left(\frac{M_m}{V_m} - \frac{M_{ref}}{V_{ref}} \right) \frac{1}{\rho_w} \quad (2.45)$$

Donde M_m es la masa de la muestra (*Kg*), M_{ref} es la masa de la referencia (*Kg*), V_m es el volumen de la muestra en cuestión (m^3), V_{ref} es el volumen de la referencia, ρ_w es la densidad del agua.

2.- El cálculo usado por (Yin et al., 2013) es el siguiente.

$$w = \frac{M_m - M_{ref}}{M_s} = \frac{M_a}{M_s} \quad (2.46)$$

$$\theta_v = w \left(\frac{\rho_b}{\rho_w} \right) 100 \quad (2.47)$$

Donde w es un porcentaje de contenido de agua a partir de la masa es decir la humedad gravimétrica, ρ_b es la densidad aparente del sustrato, M_a es la masa del agua, M_s es la masa de la muestra del sustrato o tierra. El método 2 es el implementado para comparar el sensor de humedad por pulso de calor.

Capítulo 3

Resultado principal

Los siguientes resultados se presentan en tres partes:

- **Procedimiento propuesto para la medición de humedad.** En esta sección se explica los pasos a seguir para encontrar los parámetros necesarios para el funcionamiento del sensor de humedad, es decir, las temperaturas y los tiempos necesarios según la metodología del pulso de calor.
- **Modelo para un sensor de humedad por pulso de calor.** En primer lugar se mostrara la dinámica de las temperaturas con respecto a sus propiedades térmicas a partir de un pulso de calor, todo esto para obtener la humedad de manera indirecta con base a un método fuera de línea. Por último se presenta un modelo para la aproximación de la humedad a partir de los parámetros encontrados a partir del procedimiento propuesto.
- **Construcción de un sensor indirecto de humedad basado en un pulso de calor.** En esta parte se observará la construcción y diseño del sensor, se muestra la selección y aplicación de componentes (electrónicos, químicos) que lo forman, tomando en cuenta las características para el aprovechamiento en cuanto a la aplicación y lectura del pulso de calor.

3.1. Procedimiento propuesto para la medición indirecta de la humedad

En la siguiente sección se muestran una serie de pasos que son propuestos y son utilizados para la obtención de la humedad a partir de un sensor indirecto por pulso de calor, los pasos se efectúan en línea (On line) y fuera de línea (Off line).

3.1.1. Registro de la respuesta al pulso de calor (On line)

Consideremos el caso en el que el sustrato agrícola es considerado un sólido semi-infinito en el que la conducción es unidireccional es decir, el vector flujo de calor tiene una única dirección en coordenadas (Cengel and Ghajar, 2011) en la cual se transfiere energía en forma instantánea, en una cantidad de calor $q(\frac{W}{m})$, el cual es suministrado por un pulso de corriente I aplicada a una resistencia como se muestra de manera general en la Figura 3.1.1.

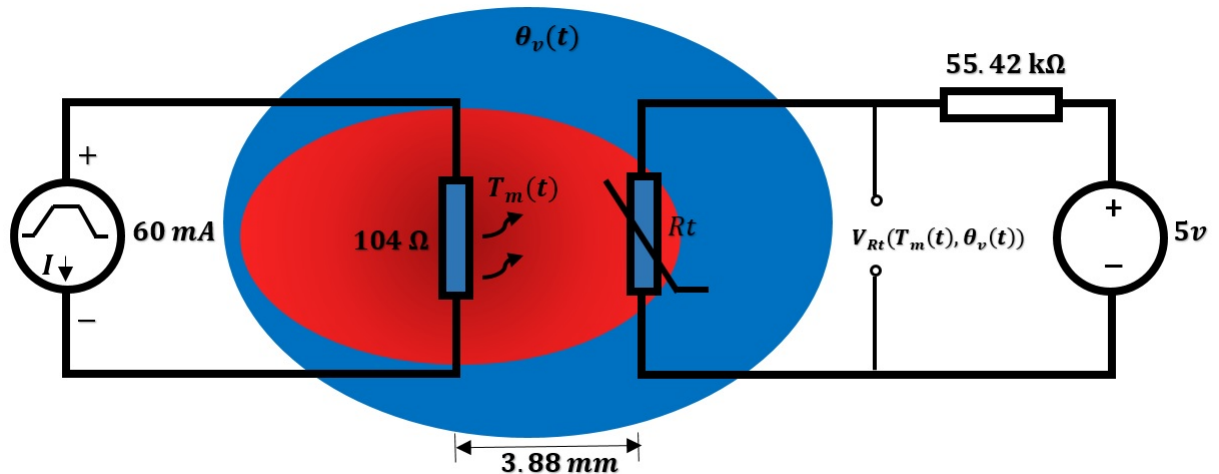


Figura 3.1.1: Esquema general de la aplicación de un pulso de calor en el sustrato. La variable de lectura V_{Rt} esta en función de la humedad θ_v y la temperatura $T_m(t)$.

En la Figura 3.1.1 se observa la manera en que se aplica un pulso de calor q usando una resistencia de $R = 104\Omega$ a partir de un pulso de corriente de $I = 60mA$ durante un tiempo determinado, considerando la resistencia como un cilindro que emite calor de manera unidimensional, θ_v es la humedad volumétrica circundante, $T_m(t)$ es el aumento de la temperatura en el suelo, el cual, es registrado por por el termistor R_t . Según lo mostrado en (Cengel and Ghajar, 2011) q puede representarse de la siguiente manera.

$$q = \frac{I^2 R}{d} = \frac{(0,06^2)(104)}{1} = 0,3744 \left(\frac{W}{m} \right) \quad (3.1)$$

Donde I es la corriente (Amplitud del pulso), R es la resistencia del calefactor y d es la longitud axial de la resistencia en cm (para este caso se considera unitaria). Esto se efectúa en instantes de tiempo de muestreo t_i con $i = 0, 1, 2, 3, \dots, N$ muestras, en nuestro caso se define un tiempo de muestreo de $t_{mu} = 0,2$ segundos. Teniendo esto en cuenta, suponga que en un instante t_i la energía entra completa al sustrato sin pérdida desde la fuente de calor con las siguientes condiciones iniciales, para el instante de tiempo $i > 0$ con $\lim_{r \rightarrow \infty}(r)$ tenemos que la temperatura del suelo $T_m(t_i) = T_{sus}$; Para $i > 0$ con $\lim_{r \rightarrow 0}(r)$ tenemos que $T_m(t_i) = T_{rt}$, donde T_{sus} es la temperatura del sustrato en equilibrio térmico o sin variaciones de temperatura y T_{rt} es la temperatura del emisor de calor. Tomando en cuenta que el sistema es muestreado en instantes de tiempo t_i tenemos que el incremento de temperatura es

$$\Delta T_m := \max_i [T_m(t_0) - T_{sus}, T_m(t_1) - T_{sus}, T_m(t_2) - T_{sus}, \dots, T_m(t_N) - T_{sus}] \quad (3.2)$$

cada incremento ΔT_m está asociado a un instante de tiempo y a la temperatura inicial del sustrato T_{sus} o en equilibrio térmico.

3.1.2. Determinación del incremento de temperatura máxima ΔT_{max} y el tiempo de inercia térmica n (Off line)

El incremento de temperatura ΔT_{max} en el instante t_i es definido como incremento máximo de temperatura, cabe mencionar que esta temperatura es necesaria para el método de solución, la cual, es definida como sigue.

$$\Delta T_{max} := \max_i [\Delta T_m(t_0) - \Delta T_{sus}, T_m(t_1) - T_{sus}, \Delta T_m(t_2) - \Delta T_{sus}, \dots, \Delta T_m(t_N) - T_{sus}] \quad (3.3)$$

Esto se determina a partir de mediciones de calor debido al pulso, este incremento máximo es utilizando el método de un solo punto o curva de ajuste no lineal como se muestra en (Bristow et al., 2001), este método es usado para encontrar el tiempo máximo discreto en que ocurre ΔT_{max} , este tiempo está definido como sigue.

$$t_m := t_{100} + \frac{n}{t_{mu}} \quad (3.4)$$

Donde $t_{mu} = 0,2s$ es el tiempo de muestreo, t_m es el tiempo discreto en el cual ocurre el aumento de temperatura máximo después de un pulso de calor de duración t_{100} como se muestra en la Figura 3.1.2, en la que resalta el termino n el cual, es el tiempo inercia térmica debido al pulso de calor.

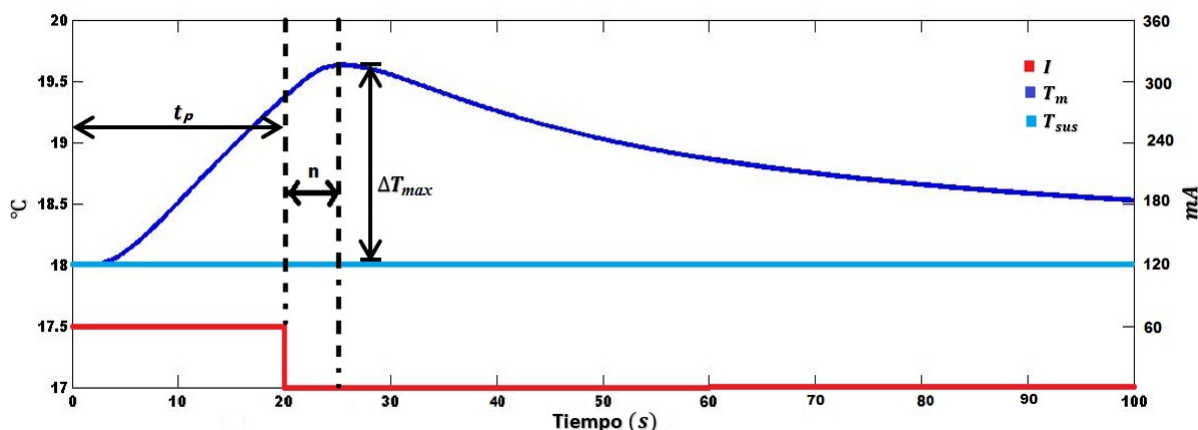


Figura 3.1.2: Incremento de la temperatura debido a un pulso de calor.

En la figura 3.1.2 se observa cómo se utiliza el método del pulso de calor, el cual es provocado por un pulso de corriente de $I = 60mA$ en un tiempo $t_p = 20s$, también se observa que la temperatura ΔT_{max} se alcanza en un tiempo $t_m > \frac{20s}{t_{mu}}$ esto es debido a que estos sistemas acumulan el calor ya que su difusividad térmica α es relativamente baja, de lado izquierdo de la gráfica las unidades están dadas en mA esto solo corresponde a la señal del pulso (Línea roja), las señales restantes están en unidades de temperatura $^{\circ}C$ (Líneas azules). El tiempo que transcurre entre el fin del pulso y el tiempo en el que ocurre el ΔT_{max} , se define como **tiempo de inercia térmica** y se muestra a continuación.

$$n := (t_{100} + t_m)(t_{mu}) \quad (3.5)$$

El método anterior es fundamentalmente para estimar los parámetros térmicos $c\rho$ y α como se muestra en (Welch et al., 1996) a partir de un pulso de calor las cuales se asocian con datos conocidos obtenidos por gravimetría como se muestra en la Sección 2.4, sin embargo en este trabajo se utilizan para englobar estos parámetros en un modelo único para la obtención de la humedad en función de n y Δ_{max} .

3.2. Modelo del sensor de humedad por pulso de calor.

A continuación se mostraran dos modelos, el primero consiste en un modelo dinámico térmico que muestra la dependencia de la temperatura con respecto al tiempo, los parámetros térmicos y físicos del suelo, así como también de parámetros eléctricos y estructurales del propio sensor. En segundo lugar se muestra un modelo estático que determina la cantidad de humedad volumétrica a partir de el calculo de parámetros térmicos y de tiempo definidos por el pulso de calor.

3.2.1. Modelo térmico del sensor por pulso de calor

Basado en lo visto en la sección 2.2 la Ecuación 2.25 se puede representar en función de la conducción de calor en régimen transitorio en el sustrato como un medio semi-infinito (Bristow et al., 2001), en el cual la solución para el modelo del pulso de calor queda de la siguiente manera recordando que $\phi = \frac{T(r,t)-T_0}{T_s-T_0}$.

$$\phi = \frac{T(r,t) - T_0}{T_s - T_0} = -\frac{1}{2} \int_x^\infty \frac{e^{-u}}{u} \quad (3.6)$$

Donde ϕ es una variable para adimensionalizar las temperaturas, u es una variable de cambio y $x = \frac{r^2}{4\alpha t}$. Si tomando en cuenta la Ecuación 2.5 de la sección 2.1 y la Ecuación 3.6 tenemos

$$T(r,t) - T_0 = -\frac{Q}{4\pi k} \int_x^\infty \frac{e^{-u^2}}{u^2} \quad (3.7)$$

si tomamos en cuenta que el incremento de temperatura $T(r,t) - T_0 = \Delta T_m$, la exponencial integral $Ei\left(\frac{-r^2}{4\alpha t_i}\right) = \int_{\frac{r^2}{4\alpha t_i}}^\infty \frac{e^{-u^2}}{-u^2}$, que el emisor de calor genera una cantidad $Q = \frac{I^2 R}{c\rho L}$ y la conductividad térmica $k = c\rho\alpha$, con las cuales tenemos el modelo térmico del fenómeno del pulso de calor en el suelo.

$$\Delta T_m(t_i) = -\frac{I^2 R}{4Lc\rho\pi\alpha} Ei\left(\frac{-r^2}{4\alpha t_p}\right) \quad (3.8)$$

Donde I es la corriente (Amplitud del pulso), R es la resistencia del calefactor, α es la difusividad térmica ($\frac{m^2}{s}$), r es la distancia entre el emisor de calor y el lector de temperatura, $Ei(-x)$

es la integral exponencial, $c\rho$ ($\frac{J}{m^3 \circ C}$) es la capacidad volumétrica de calor del suelo y t_p es el tiempo en el cual ocurre el pulso de calor. La Ecuación 3.8 supone que la cantidad total de calor se libera instantáneamente en t_0 a partir de una fuente de línea infinita a un medio homogéneo con temperatura inicial homogénea.

Otra expresión de la Ecuación 3.8 se introdujo para un pulsado en tiempos $t_p < t_i \leq t_N$, como se muestra en (Zhang et al., 2011) y (Bristow et al., 2001). En nuestro caso las pruebas se realizaron en un tiempo $t_p = t_{100}$ es decir 100 muestras de 0.2 segundos para un tiempo de $t_{100} = 20s$.

$$\Delta T_m(t_i) = \begin{cases} \Delta T_m(t_i) = -\frac{I^2 R}{4Lc\rho\pi\alpha} \left[Ei \left(\frac{-r^2}{4\alpha t_i} \right) \right], & t_0 < t_i \leq t_{100} \quad a) \\ \Delta T_m(t_i) = \frac{I^2 R}{4Lc\rho\pi\alpha} \left[Ei \left(\frac{-r^2}{4\alpha(t_i - t_{100})} \right) - Ei \left(\frac{-r^2}{4\alpha t_i} \right) \right], & t_{100} < t_i \leq t_N \quad b) \end{cases} \quad (3.9)$$

Donde t_i son los instantes de tiempo en que ocurren los incrementos de temperatura, L es la longitud de la resistencia calefactora. La diferencia de la Ecuación 3.9 a de la 3.9 b es que se considera la disipación en el tiempo $t_i > 100$, sin embargo, esto no ocurre de manera instantánea ya que, para el caso de estudio, se conservan o acumula el calor durante un instante, llamado tiempo de inercia térmica n como se muestra no de manera explícita en (Cengel and Ghajar, 2011), (Bristow et al., 2001). Las propiedades de transferencia y conducción de calor cambian con la cantidad de agua que esta se encuentra de manera implícita en $c\rho$. EL modelo térmico es necesario en el proceso de calibración.

3.2.2. Modelo para la estimación de la humedad a partir del método por pulso de calor

Mediante la aplicación de una cantidad controlada de calor del sensor hacia el sustrato y la medición de su temperatura, es posible relacionar el incremento de temperatura máxima ΔT_{max} y el instante $t_m(n)$ con la cantidad de agua presente en el suelo a partir del cálculo de $c\rho$ expresada en funcion del tiempo de inercia termica n basado en lo mostrado en Zhang et al. (2011), Valente et al. (2004).

$$\hat{c}\rho(n) = \frac{I^2 R}{4L\pi\hat{\alpha}(n)\Delta T_{max}} \left[Ei \left(\frac{-r^2}{4\hat{\alpha}(t_i - t_{100})} \right) - Ei \left(\frac{-r^2}{4\hat{\alpha}t_i} \right) \right] \quad (3.10)$$

Donde $\hat{c}\rho(n)$ es la capacidad de calor volumétrico estimado en función de la inercia térmica y $\hat{\alpha}(n)$ es la difusividad térmica estimada en función de la inercia térmica n , la cual se obtiene de la siguiente manera.

$$\hat{\alpha}(n) = \frac{r^2}{4} \left\{ \frac{\frac{1}{n} - \frac{1}{t_m(n)}}{\ln \left[\frac{t_m(n)}{n} \right]} \right\} \quad (3.11)$$

Finalmente tomando en cuenta la Ecuación 2.44 de la sección 2.3, se puede obtener una expresión que aproxime el contenido volumétrico de humedad del suelo a partir de método de pulso de calor, considerando las Ecuaciones anteriores 3.10 y 3.11, por lo cual el modelo del sensor de humedad es la siguiente.

$$\hat{\theta}_v(t_N) = \left[\frac{I^2 R \ln(\gamma(n)) (T_m(n))^2}{\gamma \pi r^2 \Delta T_{max} c_w \rho_w t_{100}} \right] \left\{ Ei \left[\frac{-\gamma(n) \ln(\gamma(n))}{\gamma-1} \right] - Ei \left[\frac{-\ln(\gamma(n))}{\gamma-1} \right] \right\} - \frac{\rho_b c_s}{\rho_w c_w}, \quad (3.12)$$

$$\gamma = \frac{t_m(n)}{n}$$

Donde $\hat{\theta}_v(t_N)$ es la humedad volumétrica aproximada, γ es una expresión para simplificar el uso de términos dependientes del tiempo de inercia térmica n , el periodo de tiempo t_N (recordando que $n \in t_N$) es usando para representar el tiempo total del proceso tanto calentamiento y enfriamiento del sustrato, es decir $t_N = t_1 600$ según las pruebas realizadas.

3.3. Construcción de un sensor indirecto de humedad basado en un pulso de calor.

A partir de una resistencia usada comúnmente en circuitos electrónicos, se construyó un sensor de humedad, enfocándose en primer lugar en un pulso de calor a partir de la aplicación de voltaje y corriente constante a una resistencia la cual disipa energía en forma de calor debido a un fenómeno conocido como efecto Joule. Se conoce como Efecto Joule al fenómeno en el cual un conductor en el que circula corriente eléctrica, parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor debido al choque que ocurre entre estos dentro de la resistencia elevando la temperatura.

El uso de materiales de fácil acceso es una de las opciones que se optaron para la construcción del sensor, las propiedades de los materiales tanto térmicas como eléctricas se tomaron en cuenta para su selección. La lectura de temperatura se realiza con una resistencia variable al calor (termistor NTC) aplicado de manera general según las recomendaciones del fabricante. La resistencia calefactora cumple una función particular en cuanto a su uso, ya que, para esta aplicación en la literatura no se encuentra reportes de su uso para la implementación del pulso de calor, normalmente se aplica con un hilo de metal de aleación de nicromo con propiedades resistivas.

Receptor de calor (Lector de temperatura)

La lectura de la temperatura se realiza con un Termistor $B57861s$ NTC (Coeficiente de Temperatura Negativo) la cual tiene una resistencia de $R_0 = 50k\Omega(25^\circ C)$ que se conecta en serie con una resistencia auxiliar de $R_{aux} = 55,420k\Omega$ para crear un divisor de tensión del que se obtiene el voltaje del termistor $V_{R_T}(t)$, que será usada para calcular el valor resistivo R_t del termistor el cual varía debido al calor (Lee and Yoo, 2002) (Jagtap et al., 2007), la resistencia es calculada como se muestra en la Ecuación 3.13.

$$R_t(t) = \frac{R_{aux}V_{R_T}(t)}{5v - V_{R_T}(t)} \quad (3.13)$$

Donde los $5v$ es la alimentación del circuito y estará energizada con la fuente de la tarjeta de adquisición de datos. La Ecuación 3.13 está basada en la ley de Ohm aplicado a un divisor de voltaje como se muestra en la Figura 3.3.1, esta configuración es la más típica para la obtención de temperatura a partir de la caída o aumento del voltaje del termistor, la cual estará asociada con la temperatura. Debido a que el termistor es de tipo NTC el aumento de temperatura provocará una disminución en su resistividad y por lo tanto una disminución en el voltaje $V_{R_T}(t)$.

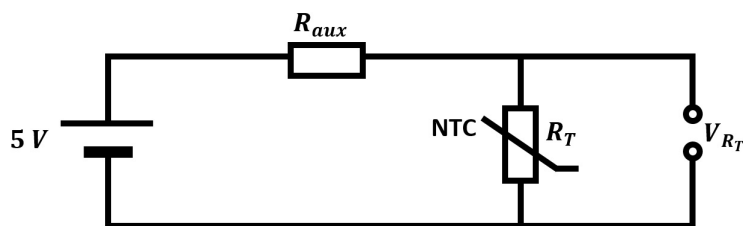


Figura 3.3.1: Esquema de conexión del sensor de temperatura (Termistor NTC).

En la Figura 3.3.1 se muestra la conexión del sensor de temperatura, donde el voltaje de alimentación es de $5v$ aportada por un ARDUINO UNO el cual tiene una resolución de 10 bits, es decir, $4,8mA$ por bit, esta tarjeta energiza la resistencia auxiliar que se encuentra en serie con el termistor, la cual es la configuración típica de conexión. La temperatura es calculada usando la Ecuación 3.2 que es un modelo no lineal que asocia el cambio de resistencia $R_t(t)$ con la temperatura $T_m(t)$.

$$T_m(t) = \left[\frac{\beta T_0}{T_0 \ln \left(\frac{R_t(t)}{R_0} \right) + \beta} \right] - 273,15 \quad (3.14)$$

Donde $\beta = 3760$ es un coeficiente proporcionado por el fabricante, $T_0 = 293,15$ es la temperatura nominal del termistor en grados Kelvin ($25^\circ C$), R_0 es la resistencia del termistor a temperatura nominal ($25^\circ C$), T_m es la temperatura instantánea en $^\circ C$ que cambia con respecto a los cambios de $R_t(t)$ debido a la influencia del calor.

Diseño del calefactor (Emisor del pulso de calor).

Está basado en una resistencia con un valor real de $R = 104\Omega$ a $1/2W$ de potencia de máxima, debido a que la resistencia es sometida a una corriente constante de $I = 60mA$ para generar el pulso calor, se debe considerar la potencia en la que la resistencia estará funcionando la cual se calculo como se muestra a continuación.

$$P_r = I^2 R = 0,3744 \quad (3.15)$$

Donde P_r es la potencia de trabajo de la resistencia. La corriente permanecerá constante debido al uso del **TL431A**, el cual es un regulador ajustable de corriente con una estabilidad térmica, la tensión de salida se puede ajustar a cualquier valor entre V_{ref} (2,5 voltios) y 36 voltios. Una de las aplicaciones en el TL431 es como regulador de corriente como se muestra en la Figura 3.3.4. Donde la corriente I_o es calculado de la siguiente manera.

$$I_o = \frac{V_{ref}}{R_s} \quad (3.16)$$

La razón por la que se utiliza el TL431 es que el circuito asegura una corriente constante I_o aportado por V_o y por lo tanto un voltaje constante en la resistencia R_E , si existen variaciones

en V_o esto no afectara el voltaje en R_E , siempre y cuando $V_o \geq V_{ref} + (R_E * I_o)$, para el caso de estudio y para un buen funcionamiento se requiere que se cumpla la condición $7,5 \geq V_o \geq 12$. El TL431 también permite regular la potencia en R_E variando R_s si es requerido. Dado que V_{ref} impone en R_s una corriente que la atraviesa al igual que en R_E , implicara que al interrumpir el circuito en R_s la corriente en R_E se vuelve cero y el voltaje se mantiene cercano a la de la fuente v_o .

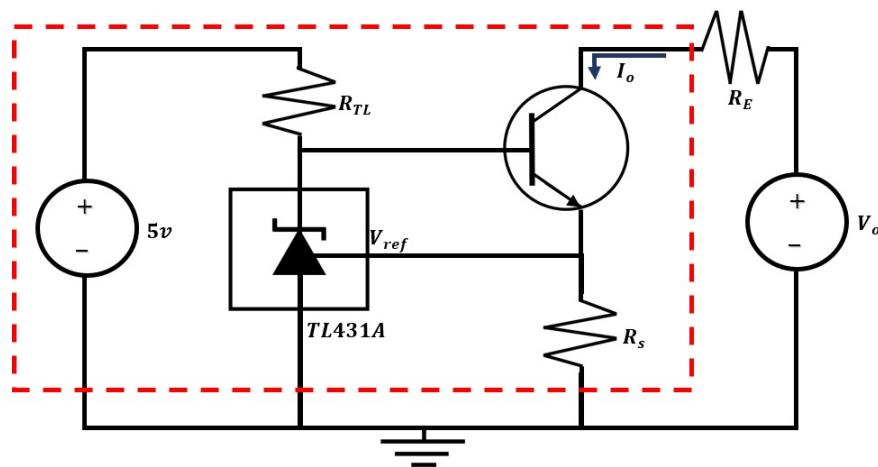


Figura 3.3.2: Aplicación del TL431 configurado como fuente de corriente.

En la Figura 3.3.4 se observa a el TL431A configurado como fuente de corriente regulable hasta de $80mA$ según los experimentos realizados, sin embargo la corriente necesaria para el pulso se establecio en $60mA$, algo que es importante resaltar es que el consumo de potencia es bajo debido si consideramos una fuente de $5v$ lo cual correspondería a un consumo de $0,75W$ facilmente aplicable en el campo para el cual esta pensado y diseñado el sensor de humedad, esto es debido a que la corriente en el cátodo es de $150mA$ máximo (TL431 et al., 2007).

Adquisición de datos

La adquisición de datos se realizara con un ARDUINO UNO como se muestra en la Figura 3.3.3, el cual es un sistema utilizado para proyectos a pequeña escala, tiene disponibles puertos digitales y analógicas, basado en un micro controlador ATmega328, tiene un tiempo de muestreo de 112 micro segundos ($8.928 kHz$). Una característica a tener en cuenta del Arduino es su resolución, el cual consta de un ADC de 10 bits, el rango de Voltaje de las placas ARDUINO UNO tiene por defecto valores de $5v$ o $3.3v$, para la aplicación del sensor de humedad se definió los $5v$, con esto tenemos una resolución igual a $4,88mv$ por bit con una precision de ± 2 LSB(bit

menos significativo), es decir $\pm 14,64mV$.

Circuito para un sensor de humedad por pulso de calor

A continuación se muestra en la Figura 3.3.3 el diagrama general del sensor de humedad por pulso de calor con los valores definidos.

En la Figura 3.3.3 se observa de manera general el circuito para la aplicación del pulso de calor interrumpiendo el V_{ref} por la cual la corriente en la resistencia R_S serían cero y esto ocurriría también en la resistencia calefactora ($R_E = 104\Omega$), sin embargo, esta se encontrará siempre energizada, pero sin potencia debido a la corriente cero impuesta por el TL431A.

Estructura y esquema general del sensor de humedad

Para el soporte de los componentes electrónicos que forman el sensor de humedad, se requería que el emisor y receptor de calor siempre mantuvieran una distancia invariante debido a que es un parámetro fundamental en la aplicación del pulso de calor. A continuación se muestra la sustancia solución.

La resina epóxica SAE860A-B para encapsulado eléctrico es un producto de dos componentes libre de solventes, que al mezclarse reaccionan químicamente formando un sólido de excelentes propiedades dieléctricas mecánicas y de adherencia. Ha sido desarrollado para cubrir diferentes necesidades en la industria eléctrica, electrónica y automotriz. En la Tabla 3.3.1 se observan algunas propiedades térmicas y eléctricas las cuales son aprovechadas para su implementación en el sensor.

Tabla 3.3.1: Propiedades térmicas-eléctricas de la resina epóxica SAE860A-B.

Propiedades termoeléctricas	
Densidad	$1 \frac{g}{cm^3}$
Coefficiente de expansión térmica lineal	$90 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ C$
Temperatura de distorsión	$(90-100) \text{ } ^\circ C$
Conductividad térmica	$0.2 \frac{kcal}{mh^\circ C}$
Rigidez dieléctrica relativa($25^\circ C$)	$4 \frac{kV}{cm}$
Rigidez dieléctrica mínima ($50Hertz, 25^\circ C$)	$200-230 \frac{kV}{cm}$

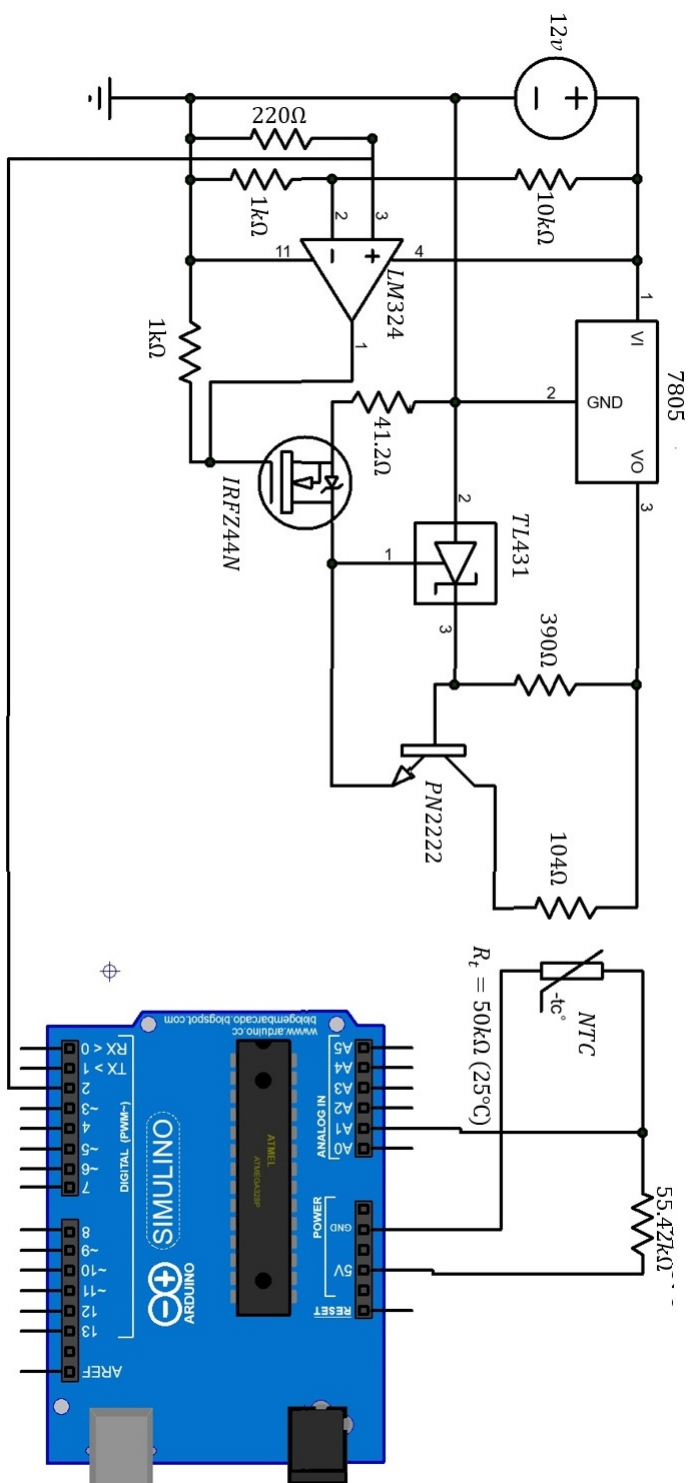


Figura 3.3.3: Circuito para el sensor de humedad por pulso de calor.

En la tabla 3.3.1 se observa algunas propiedades de la resina epóxica que actúa como soporte del sensor entre el emisor y el receptor, destacando que puede soportar un calor de máximo de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ sin presentar distorsión.

Diseño esquemático del sensor de humedad. El diseño general se muestra en la Figura 3.3.4 en la cual se observan las medidas, las proporciones y la distribución de los elementos que la componen.

En la Figura 3.3.4 se observa un esquema general del sensor indirecto de humedad por pulso de calor, se energiza con cuatro cables, uno de ellos es el de datos (amarillo), el emisor o calefactor del sensor está basado en una resistencia de $\frac{1}{2}W$ de potencia máxima es energizada con $12v$ y $60mA$, el receptor de calor está conformado por un Termistor NTC, ambos dispositivos calefactor y receptor están aislados eléctricamente por una resina epóxica y sirve de base para los mismos, esto debido a que la estructura debía permitir la exposición del emisor y receptor al medio por el cual el calor debía ser conducido.

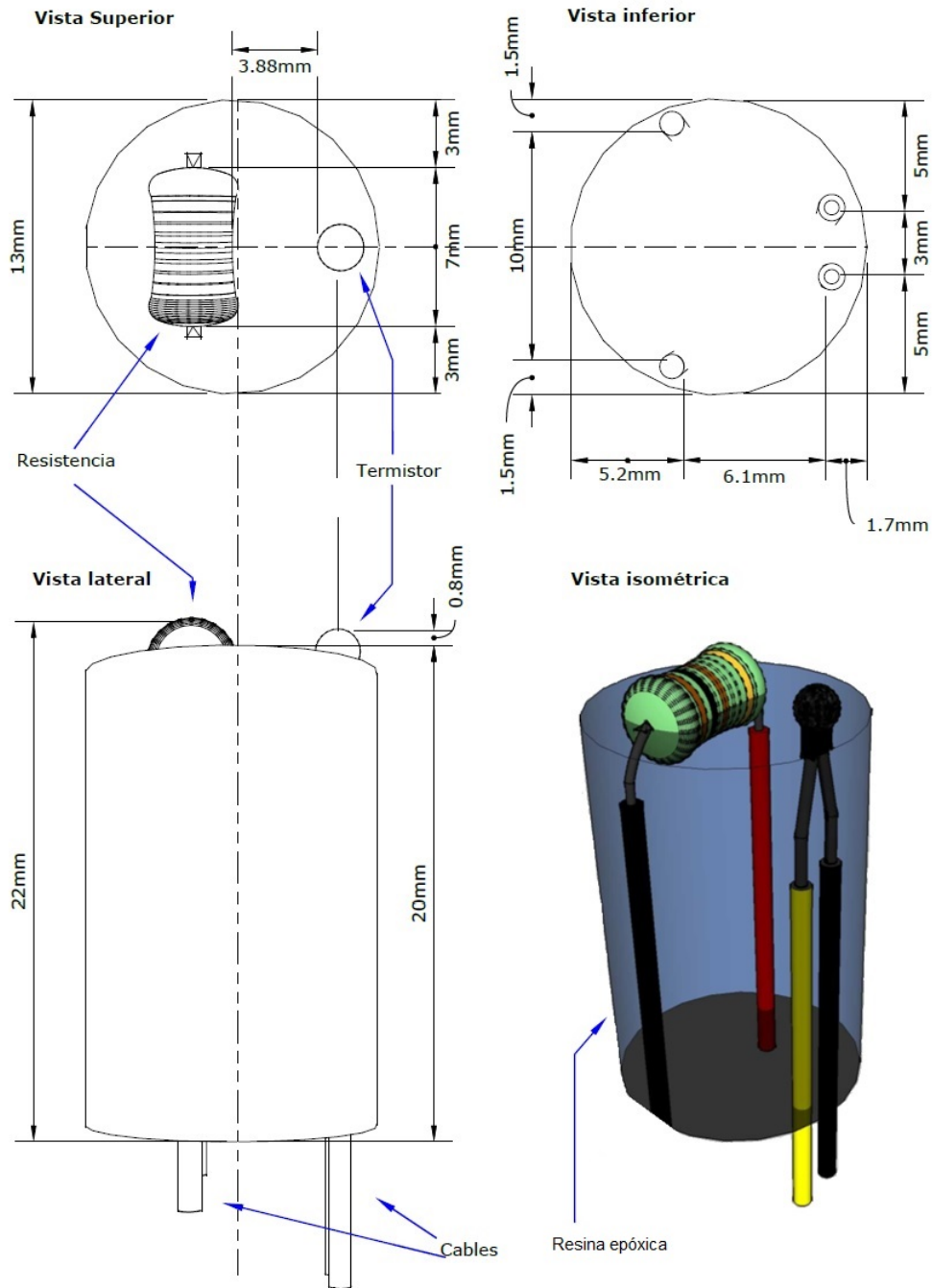


Figura 3.3.4: Sensor de humedad por pulso de calor.

Capítulo 4

Simulaciones e implementaciones

En el siguiente capítulo se observará dos implementaciones del sensor de humedad por pulso de calor acompañadas por las simulaciones correspondientes a cada caso como se muestra.

- **Implementación del sensor en un medio saturado**, esta implementación es para comprobar el método del pulso de calor en un medio saturado en 100 % agua, todo esto para aproximar la propiedad térmica de la capacidad de calor volumétrico $c\rho$. Comprobar la característica térmica del agua funciona también como método de calibración, es decir, dado el conocimiento de este parámetro, se pueden ajustar otros como lo son la distancia r y la resistencia calefactora R_e
- **Instrumentación y adquisición de datos en un lote de 5 probetas**, con cantidades diferentes de humedad para verificar la resolución del sensor, los experimentos están basados en la comparación de datos de humedad aproximado por el sensor de humedad y por datos de humedad por gravimetría.

4.1. Implementación del sensor en un medio saturado

Las pruebas se realizan en primer lugar en agua, esto debido a que sus propiedades térmicas y físicas son conocidas. Se observa variaciones en la temperatura con respecto al tiempo y se toman en cuenta la temperatura máxima que alcanza y el tiempo en que este ocurre, con lo cual se comprueba el método térmico utilizado en la ecuación 3.14 de la sección 3.2.1.

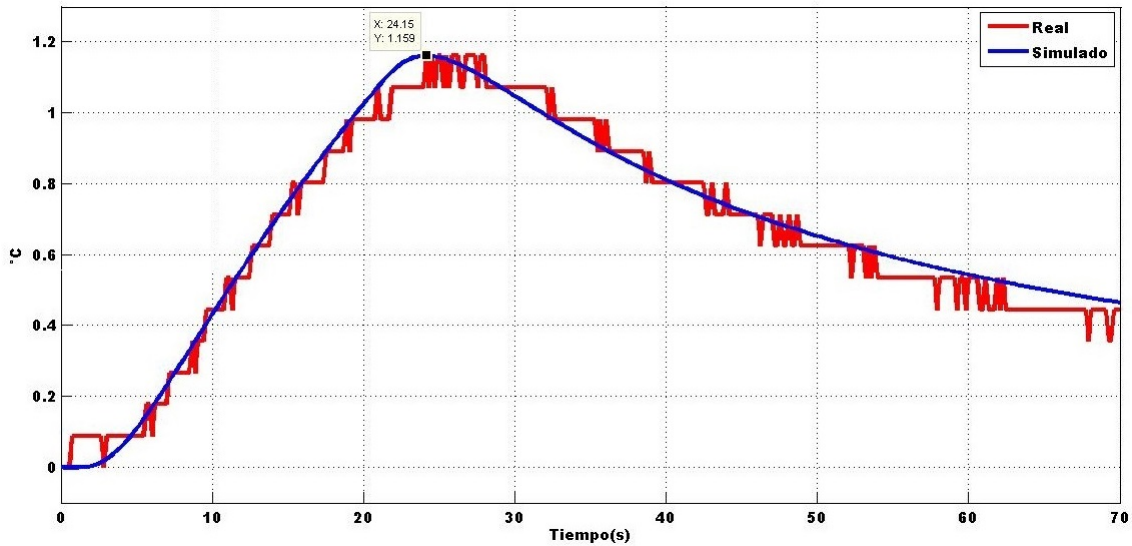


Figura 4.1.1: Respuesta del pulso de calor en una muestra en agua.

Según lo que se muestra en la Figura 4.1.1, se calculan las propiedades térmicas a partir de los datos y se observa que alcanza una temperatura máxima $\Delta T_{max} = 1,159^{\circ}C$ en el tiempo $t_m = 24,15s$, para un pulso de $q = 35,88 \frac{W}{m}$ de duración $t_0 = 20s$, también se observa que la simulación tiene un perfil similar al de los datos adquiridos, obteniendo un $\alpha = 4,26e - 7 \text{fracm}^2s$ y una $(c\rho) = 4,175e - 6 \frac{J}{m^3^{\circ}C}$. Se presenta a continuación una tabla con resultados de 4 pruebas realizadas en agua con una $c_w\rho_w = 4,18e - 6$ incluyendo la prueba antes presentada.

Tabla 4.1.1: Capacidad calorífica volumétrica $\hat{c}\rho$ aproximada por el sensor en un medio saturado.

Prueba	$\hat{c}\rho(\frac{J}{m^3^{\circ}C})$	Porcentaje del error	Error
1	$4,0089x10^{-6}$	0.0425	$0,177x10^{-8}$
2	$4,2476x10^{-6}$	0.0145	$0,060x10^{-8}$
3	$4,2190x10^{-6}$	0.0077	$0,032x10^{-8}$
4	$4,1756x10^{-6}$	0.0027	$0,011x10^{-8}$

En la Tabla 4.1.1 se observa que con el método de (Bristow et al., 2001) se puede calcular la conductividad térmica y la capacidad volumétrica, se observa que la dinámica simulada es similar a los datos, el error muy pequeño con un máximo de 0.0425.

4.2. Instrumentación y adquisición de datos de 5 probetas a diferentes humedades

A continuación, se muestra los datos de temperatura obtenidos y comparados con la simulación, consecuencia de un pulso de calor para 5 muestras de tierra húmeda, las cuales contenían una humedad volumétrica obtenida por gravimetría de $\theta_{vg1} = 35,22\%$, $\theta_{vg2} = 31,86\%$, $\theta_{vg3} = 26,83\%$, $\theta_{vg4} = 23,48\%$ y $\theta_{vg5} = 21,80\%$, estas humedades son representativas de cada lote de pruebas. A partir de las temperaturas se calcula la capacidad de calor volumétrico $c\rho$ para cada caso y el tiempo de la inercia térmica n , los resultados se muestran a continuación.

Lote I, Probeta 1. muestra compuesta por una mezcla de sustrato con masa de $M_s = 13g$ por una masa de agua de $M_a = 4,2 g$ para una humedad gravimétrica $w = 32,30$, es decir con una humedad volumétrica de $\theta_{vg} = 35,22$

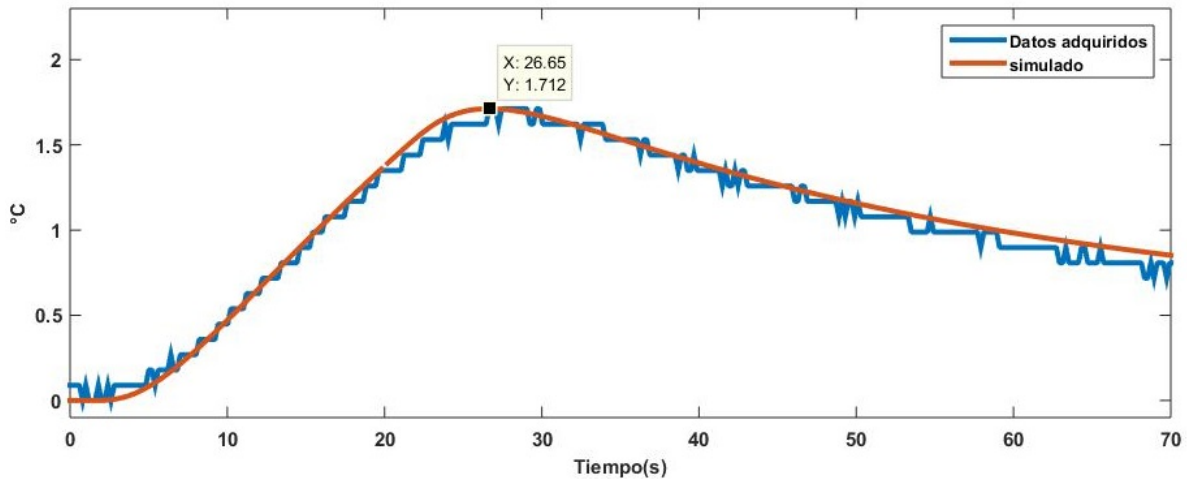


Figura 4.2.1: Pulso de calor en un sustrato con humedad volumétrica por gravimetría $\theta_v = 35,22$. Para este caso la humedad estimada es $\hat{\theta}_v = 35,01$.

En la Figura 4.2.1 se observa que alcanza una temperatura máxima $\Delta T_{max} = 1,712^\circ C$ en el tiempo máximo $t_m = 26,65s$, para un pulso de $q = 35,88W/m$ de duración $t_{100} = 20s$, esto

indica que el tiempo de la inercia térmica es de $n = 6,65s$, también se observa que la simulación tiene un perfil similar al de los datos adquiridos. De igual manera se observa que en la primera parte de la gráfica se observa que la simulación de la temperatura comienza inferior a los datos adquiridos, esto es debido a que el programa de adquisición y procesamiento de datos toma en consideración la temperatura mínima registrada, es decir, en el caso de la temperatura inicial o mínima, se toma la menor en los primeros dos segundos. En el caso de temperatura máxima se toma el primer pico máximo de los datos, esto es debido a que el programa de adquisición y procesamiento de datos toma en consideración la temperatura máxima registrada y esta se conserva para los próximos 2 segundos omitiéndose como ruido, esto es congruente para los dos casos ya que se toma en cuenta una incertidumbre de $\pm 0,1^{\circ}C$ en la amplitud de la temperatura en un tiempo de ± 2 segundos.

Lote II, Probeta 4. Muestra compuesta por una mezcla de sustrato con masa $M_s = 13g$ por una masa de agua $M_a = 3,8g$ para una humedad gravimétrica $w = 29,2308$, es decir con una humedad volumétrica de $\theta_{vg} = 31,86$.

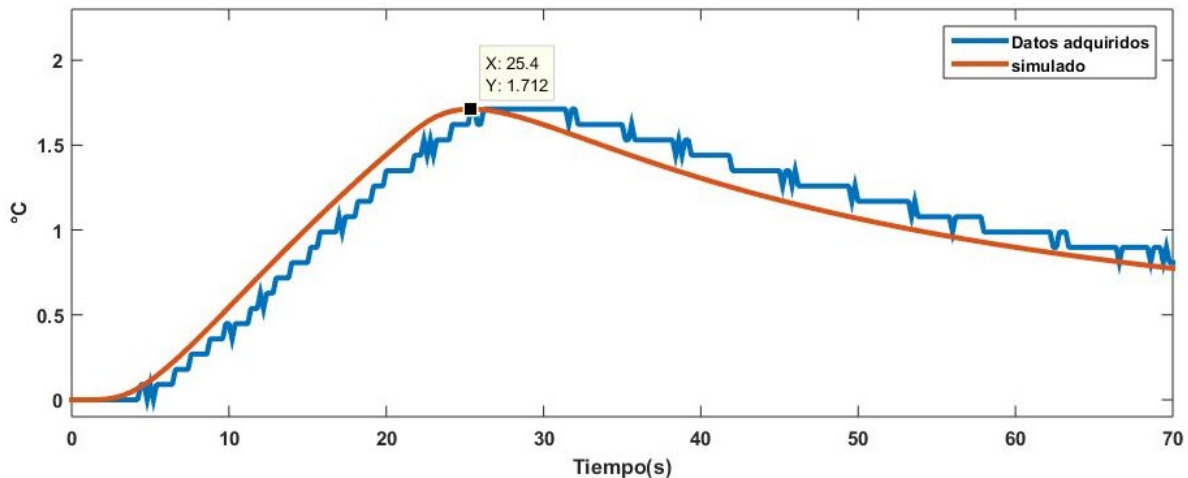


Figura 4.2.2: Pulso de calor en un sustrato con humedad volumétrica por gravimetría $\theta_{gv} = 31,86$. Para este caso la humedad estimada es $\hat{\theta}_v = 33,08$.

En la Figura 4.2.2 se observa que alcanza una temperatura máxima $\Delta T_{max} = 1,712^{\circ}C$ en el tiempo máximo $t_m = 25,4s$, para un pulso de $q = 35,88W/m$ de duración $t_{100} = 20s$, esto indica que el tiempo de la inercia térmica es de $n = 5,4s$, también se observa que la simulación tiene un perfil similar al de los datos adquiridos. Después de alcanzar la temperatura máxima, se observa que esta se mantiene por un tiempo, esto se debe a que la mezcla se vuelve menos disipativa por la disminución de humedad. De igual manera se observa que en el caso de tempe-

ratura máxima se toma el primer pico máximo de los datos, esto es debido a que el programa de adquisición y procesamiento de datos toma en consideración la temperatura máxima registrada y esta se conserva para los próximos 2 segundos omitiéndose como ruido, esto es congruente ya que también se toma en cuenta una incertidumbre de $\pm 0,1$ en la amplitud de la temperatura en un tiempo de ± 2 segundos. Después de alcanzar la temperatura máxima, se observa que esta se mantiene por un tiempo, esto se debe a que el sustrato se vuelve menos disipativa por la disminución de humedad

Lote III, Probeta 7. Muestra compuesta por una mezcla de sustrato de masa $M_s = 13g$ por una masa de agua $M_a = 3,2g$ para una humedad gravimétrica $w = 24,6154$, es decir con una humedad volumétrica de $\theta_{vg} = 26,83$.

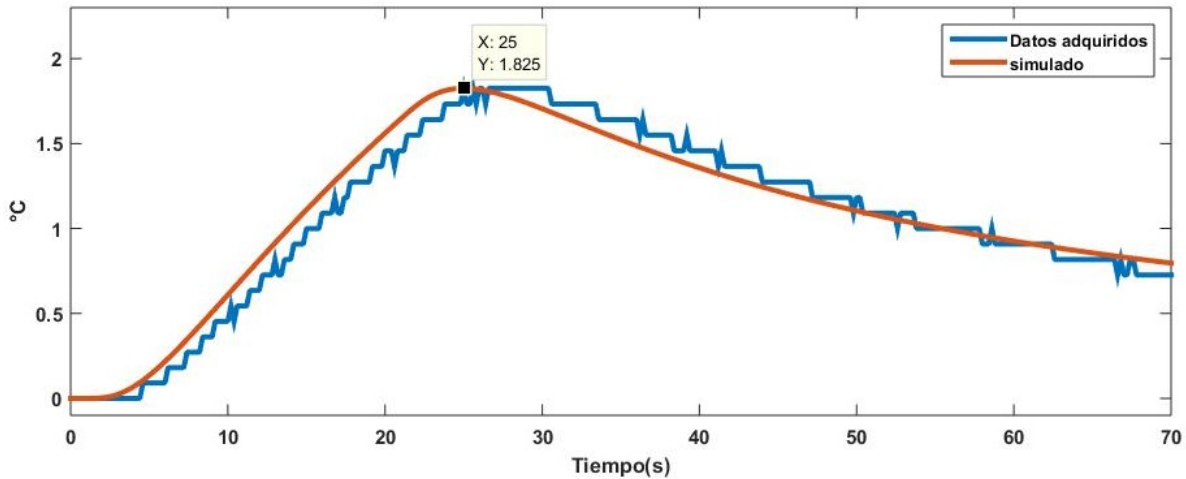


Figura 4.2.3: Pulso de calor en un sustrato con humedad volumétrica por gravimetría $\theta_{vg} = 26,83$. Para este caso la humedad estimada es $\hat{\theta}_v = 25,91$.

En la Figura 4.2.3 se observa que alcanza una temperatura máxima $\Delta T_{max} = 1,825^\circ C$ en el tiempo $t_m = 25s$, para un pulso de $q = 35,88W/m$ de duración $t_{100} = 20s$, esto indica que el tiempo de la inercia térmica es de $n = 5s$, de igual manera se observa que en la primera parte de la gráfica se observa que la simulación de la temperatura comienza inferior a los datos adquiridos, esto es debido a que el programa de adquisición y procesamiento de datos toma en consideración la temperatura mínima registrada, es decir, en el caso de la temperatura inicial o mínima, se toma la menor en los primeros dos segundos. En el caso de temperatura máxima se toma el primer pico máximo de los datos, esto es debido a que el programa de adquisición y procesamiento de datos toma en consideración la temperatura máxima registrada y esta se conserva para los próximos 2 segundos omitiéndose como ruido, esto es congruente para los dos

casos ya que se toma en cuenta una incertidumbre de $\pm 0,1^{\circ}C$ en la amplitud de la temperatura en un tiempo de ± 2 segundos. Después de alcanzar la temperatura máxima, se observa que esta se mantiene por un tiempo, esto se debe a que el sustrato se vuelve menos disipativa por la disminución de humedad

Lote IV, Probeta 10. Muestra compuesta por una mezcla de sustrato de masa $M_s = 13g$ por una masa de agua $M_a = 2,8g$ para una humedad gravimétrica $w = 21,5385$, es decir con una humedad volumétrica de $\theta_{vg4} = 23,48$.

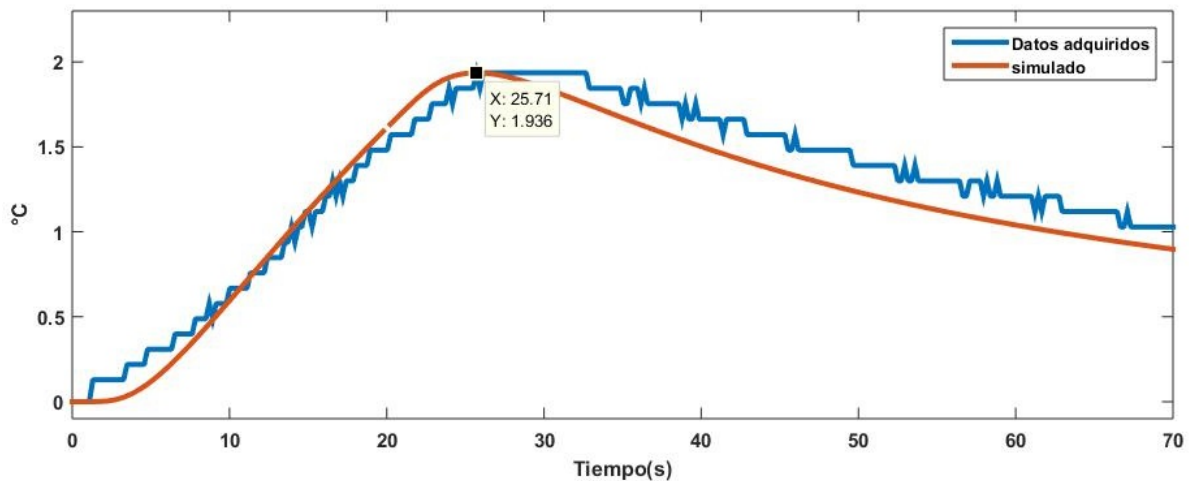


Figura 4.2.4: Pulso de calor en un sustrato con humedad volumétrica por gravimetría $\theta_{vg} = 23,48$. Para este caso la humedad estimada es $\hat{\theta}_v = 23,91$.

En la Figura 4.2.4 se observa que alcanza una temperatura máxima $\Delta T_{max} = 1,825^{\circ}C$ en el tiempo $t_m = 25s$, para un pulso de $q = 35,88W/m$ de duración $t_{100} = 20s$, esto indica que el tiempo de la inercia térmica es de $n = 5s$, de igual manera se observa que en la primera parte de la gráfica se observa que la simulación de la temperatura comienza inferior a los datos adquiridos, esto es debido a que el programa de adquisición y procesamiento de datos toma en consideración la temperatura mínima registrada, es decir, en el caso de la temperatura inicial o mínima, se toma la menor en los primeros dos segundos. En el caso de temperatura máxima se toma el primer pico máximo de los datos, esto es debido a que el programa de adquisición y procesamiento de datos toma en consideración la temperatura máxima registrada y esta se conserva para los próximos 2 segundos omitiéndose como ruido, esto es congruente para los dos casos ya que se toma en cuenta una incertidumbre de $\pm 0,1^{\circ}C$ en la amplitud de la temperatura en un tiempo de ± 2 segundos. Después de alcanzar la temperatura máxima, se observa que esta se mantiene por un tiempo, esto se debe a que el sustrato se vuelve menos disipativa.

Lote V, Probeta 12. Muestra compuesta por una mezcla de sustrato de masa $M_s = 13g$ por una masa de agua $M_a = 2,6g$ para una humedad gravimétrica $w = 20$, es decir con una humedad volumétrica de $\theta_{vg} = 21,8$.

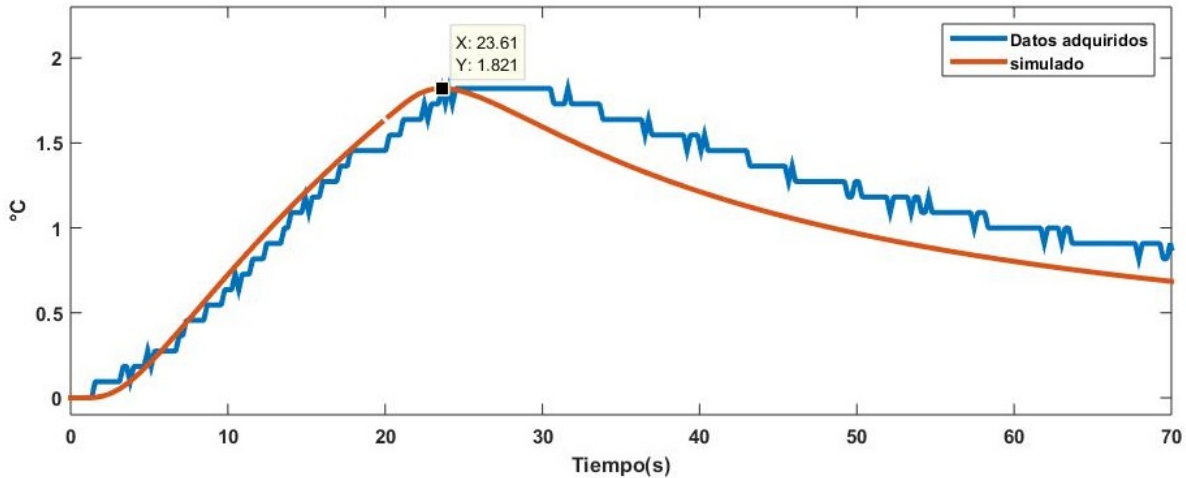


Figura 4.2.5: Pulso de calor en un sustrato con humedad volumétrica por gravimetría $\theta_{vg} = 21,80$. Para este caso la humedad estimada es $\hat{\theta}_v = 21,99$.

En la Figura 4.2.5 se observa que alcanza una temperatura máxima $\Delta T_{max} = 1,821^{\circ}C$ en el tiempo $t_m = 23,61s$, para un pulso de $q = 35,88W/m$ de duración $t_{100} = 20s$. De igual manera se observa que en la primera parte de la gráfica se observa que la simulación de la temperatura comienza inferior a los datos adquiridos, esto es debido a que el programa de adquisición y procesamiento de datos toma en consideración la temperatura mínima registrada, es decir, en el caso de la temperatura inicial o mínima, se toma la menor en los primeros dos segundos. En el caso de temperatura máxima se toma el primer pico máximo de los datos, esto es debido a que el programa de adquisición y procesamiento de datos toma en consideración la temperatura máxima registrada y esta se conserva para los próximos 2 segundos omitiéndose como ruido, esto es congruente para los dos casos ya que se toma en cuenta una incertidumbre de $\pm 0,1^{\circ}C$ en la amplitud de la temperatura en un tiempo de ± 2 segundos. Después de alcanzar la temperatura máxima, se observa que esta se mantiene por un tiempo, esto se debe a que el sustrato se vuelve menos disipativa por la disminución de humedad.

Observaciones generales.

- Conforme menos humedad contenía la probeta, menos calor disipaba, esto debido a que la dinámica térmica del sustrato se comporta más parecida a la de un sólido, sin embargo,

los sólidos que componen el sustrato como la materia orgánica y el aire tienen una baja difusividad térmica.

- La temperatura máxima ΔT_{max} fue aumentando con respecto a la disminución de la humedad, es decir, la amplitud de la temperatura aumenta mas rápido, cuando existe menos humedad.
- El tiempo máximo t_m en el que ocurre el aumento máximo de temperatura ΔT_{max} disminuyo entre cada muestra con respecto a la disminución de la humedad, es decir, existe una mayor inercia térmica relacionada con la disminución de la humedad.

Humedades estimadas para todas las pruebas realizadas en probetas

A continuación, se muestran los resultados de todas las pruebas realizadas para 5 muestras de tierra húmeda en probetas con unas humedades volumétricas (por gravimetría) de $\theta_{vg1} = 35,22\%$, $\theta_{vg2} = 31,86\%$, $\theta_{vg3} = 26,83\%$, $\theta_{vg4} = 23,48\%$ y $\theta_{vg5} = 21,80\%$ comparadas con los resultados obtenidos debido a las adquisiciones realizadas, expresadas como humedad volumétrica estimada $\hat{\theta}_v$.

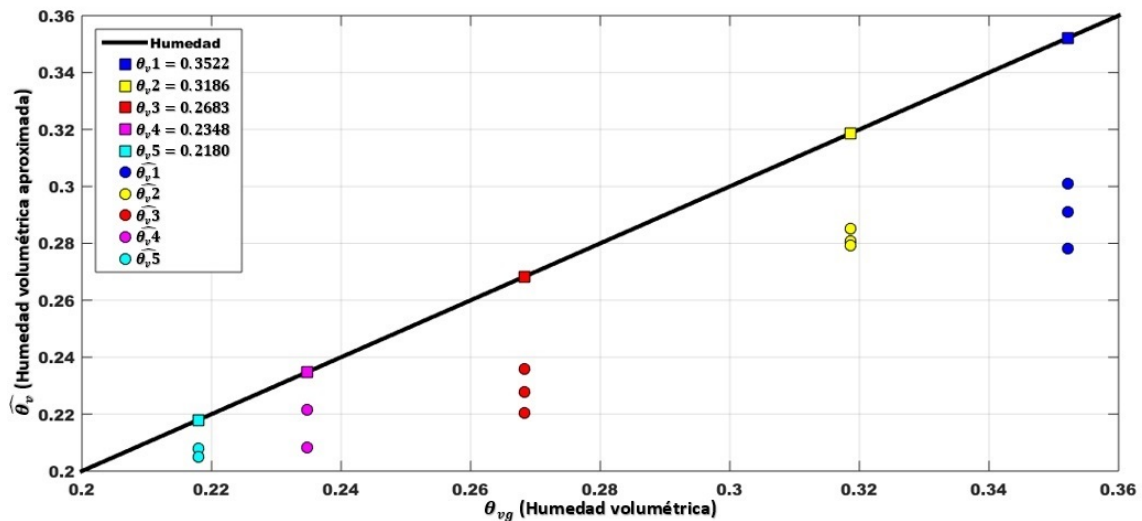


Figura 4.2.6: Comparativa entre humedades aproximadas $\hat{\theta}_{vi}$ y humedades de referencia θ_{vgi} (basadas en gravimetría), donde $i = 1, 2, 3, 4, 5$ las cuales corresponden a el número de probetas.

En la Figura 4.2.6 se observa las humedades volumétricas por gravimetría θ_{vgi} (representadas con cuadros) comparándolas con las lecturas realizadas para cada prueba y probeta, es decir, las humedades volumétricas aproximadas $\hat{\theta}_v$ (representadas con círculos), en la cual, se observa una desviación con un error que va en aumento en función de un mayor contenido de agua para

cada muestra de sustrato, en otras palabras, el error absoluto tiene una relación con el aumento de humedad volumétrica, esto puede ser debido a una variación en la densidad aparente del suelo, que estrictamente es una variable dependiente de la humedad volumétrica, para el caso de sensor, se toma la densidad aparente como constante ya que esta variación se puede compensar con una corrección. Después de obtener las humedades en cada prueba, se sometió a una corrección usando una función lineal y se muestran los resultados a continuación.

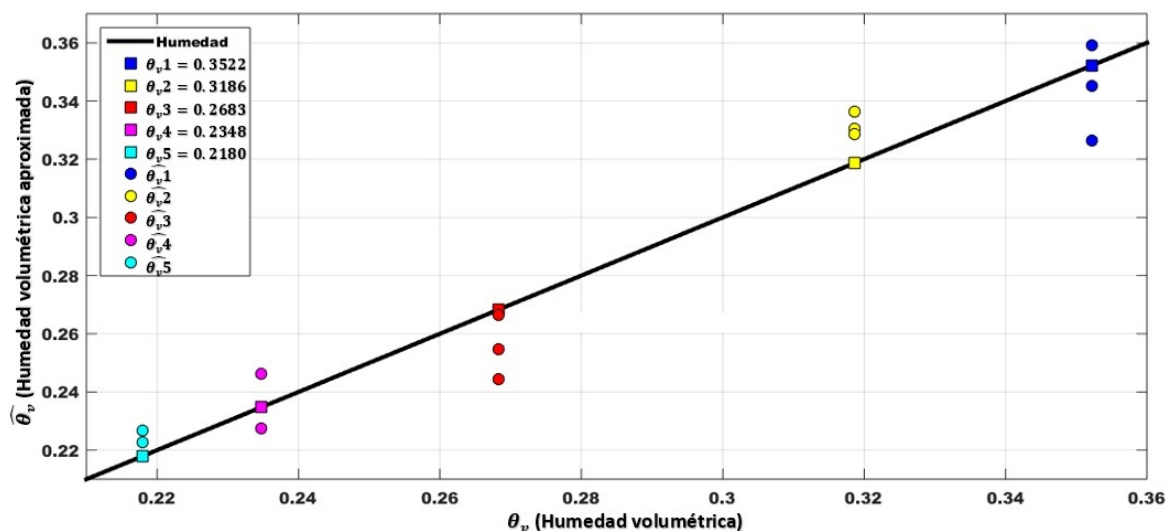


Figura 4.2.7: Comparativa entre humedades aproximadas $\hat{\theta}_{vi}$ y humedades de referencia θ_{vg}^i después de la regresión lineal $y = 1,423x - 0,06906$; donde $i = 1, 2, 3, 4, 5$ las cuales corresponden a el número de probetas.

En la Figura 4.2.7 se observa la comparación de las lecturas de humedad y las reales para cada muestra después de aplicar una regresión lineal $y = 1,423x - 0,06906$, se promediaron los resultados para cada probeta y a partir de estos se realizó la regresión con respecto a una recta de humedad optima. Se observa que aún existe error para cada lectura, sin embargo, cabe mencionar que las de menor error son las primeras lecturas realizadas en el caso, esto puede deberse a que las lecturas donde existe menor humedad, la temperatura se conservaba mas tiempo en el máximo debido a una menor difusividad térmica del sustrato, la cual permitió lecturas mas recurrentes, es decir una mayor precisión. Las comparaciones entre los datos reales y los obtenidos después de la regresión lineal se muestran en la Tabla 3.

Comparación de resultados con respecto a la referencia gravimétrica

A continuación, se presenta las humedades obtenidas para 5 muestras en probetas a diferentes

humedades, en las probetas I, II y III se realizaron 3 pruebas y en las probetas IV y V se realizaron 2 pruebas, los resultados finales mostrados tienen una corrección por regresión lineal, los resultados se muestran a continuación.

Tabla 4.2.1: Humedad obtenida de las pruebas en 5 Lotes.

Lote	Prueba	Humedad Vol. ($\frac{m^3}{m^3}$)		Error absoluto	% del error (relativo)	Media % del error	Media Del error (% _{0*})
		θ_{vg}	$\hat{\theta}_v$				
I	1	0.3522	0.3590	0.0068	1.93	3.72	1.31
	2		0.3265	-0.0256	7.26		
	3		0.3451	-0.0070	1.98		
II	4	0.3186	0.3306	0.0119	3.73	4.13	1.32
	5		0.3285	0.0099	3.10		
	6		0.3365	0.0178	5.58		
III	7	0.2683	0.2664	0.0018	0.67	4.83	1.29
	8		0.2548	-0.0134	4.99		
	9		0.2446	-0.0237	8.83		
IV	10	0.2348	0.2461	0.0113	4.81	3.96	0.93
	11		0.2274	-0.0073	3.11		
V	12	0.2180	0.2268	0.0086	3.94	3.02	0.66
	13		0.2228	0.0046	2.11		

En la Tabla 4.2.1 se muestra las pruebas realizadas en la cual error máximo fue del 0.0256 y el mínimo fue de 0.0018 , el porcentaje del error mínimo fue de 0.67 % máximo fue de 8.83 %, sin embargo, este porcentaje está basado en el error relativo y aumenta con respecto a una referencia cercana a 0, por lo cual, es más significativo la media de este porcentaje los cuales varían alrededor de 3 y 4.8 % , más importante aún es la media del error absoluto de las lecturas que muestran un promedio general entre 1 y 1.3 % del error, esto es bueno en comparación con otros instrumentos de medición de humedad como los tensiómetros los cuales tienen en general entre 2 y 3 % de error (Chard, 2002) (Bonilla and Cancino, 2001), esta comparación es importante ya que los tensiómetros o irrometros son los mas utilizados en la producción agrícola.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajos futuros

Dentro de los trabajos a futuros del sensor indirecto de humedad de suelo por pulso de calor se pueden considerar las siguientes:

- **Mejoramientos de componentes electrónicos.** Se refiere a al cambio de los dispositivos recepción de calor y adquisición de datos, para un mejoramiento estructural o de resolución de lectura.
- **Implementación en control de riego.** Se refiere a la aplicacion del sensor para uso agrícola, tomando en cuenta las características físicas del suelo y la la hortaliza.

Para finalizar el capitulo se mostraran las conclusiones finales sobre el sensor de humedad.

5.1. Mejoramientos de componentes electrónicos para uso no agrícola.

El sensor de humedad por pulso de calor puede tener mejoras en sus componentes, descartando únicamente la resistencia calefactora, debido a que es nueva en su uso como emisor de calor. Estos cambios obedecerían a una implementación en rangos superiores e inferiores a la humedad relacionada con la agricultura, por ejemplo en la industria de los alimentos y en la química con sustancias no corrosivas. Para lograr las mejoras, los cambios serían los siguientes.

Sensor de temperatura.

La lectura de la temperatura se realiza con un Termistor NTC de $50K\Omega(25^{\circ}C)$ con un rango de temperatura entre -55 a $155^{\circ}C$ con una resistencia de tolerancia de $\pm 1 - 5\%$ y el valor de tolerancia β de $\pm 1\%$, estos valores son importantes ya que implican incertidumbres en la lectura de la temperatura, por lo cual el uso de un termistor con tolerancias menores podrán mejorar la lectura y obtener una mejor resolución para casos de aplicaciones en humedades inferiores al rango en agricultura, es decir, una humedad volumétrica $\theta_v < 15\%$.

Adquisición de datos.

La adquisición se realizó con un ARDUINO UNO, el cual es basado en un microcontrolador ATmega328 que puede tener errores de precisión absoluta de 2 lsb(bits menos significativo), por lo que un dispositivo de adquisición con mejor precisión podría influir en una reducción de la incertidumbre de lectura, para casos de aplicaciones en humedades superiores al rango en agricultura, es decir, una humedad volumétrica $\theta_v > 35\%$.

5.2. Implementación en control de riego

La aplicación fundamental del sensor de humedad es la del gestión del riego o más preciso la del control del riego, en donde se toman en cuenta la humedad volumétrica acumulada como la referencia objetivo. Para el control correcto del riego se debe conocer parámetros asociados a las características del suelo, uno de estos es la capacidad de agua disponible o agua útil ($\theta_a = \theta_{cc} - \theta_{pmp}$) la cual es la cantidad de agua que un suelo puede almacenar y que está disponible para el uso de las plantas, es decir es el agua retenida entre la capacidad de campo (θ_{cc}) y punto de marchitez permanente (θ_{pmp}), más información se muestra en el Anexo B.

El conocimiento de la Capacidad de campo y del Punto de marchitez es usado para saber los

límites del agua disponible, esta agua es tomada como de referencia con la que se puede efectuar control de riego a partir de la lectura de la humedad del sustrato. Se puede considerar un riego deseable como se muestra en la Figura 5.2.1. Idealmente se puede considerar que lo más saludable para una planta es mantener la humedad del suelo cercana a la capacidad de campo θ_{cc} , de manera contraria si la humedad del suelo es cercana al punto de marchitez permanente (θ_{pmp}) la planta se enfrentara a un fenómeno llamado estrés hídrico.

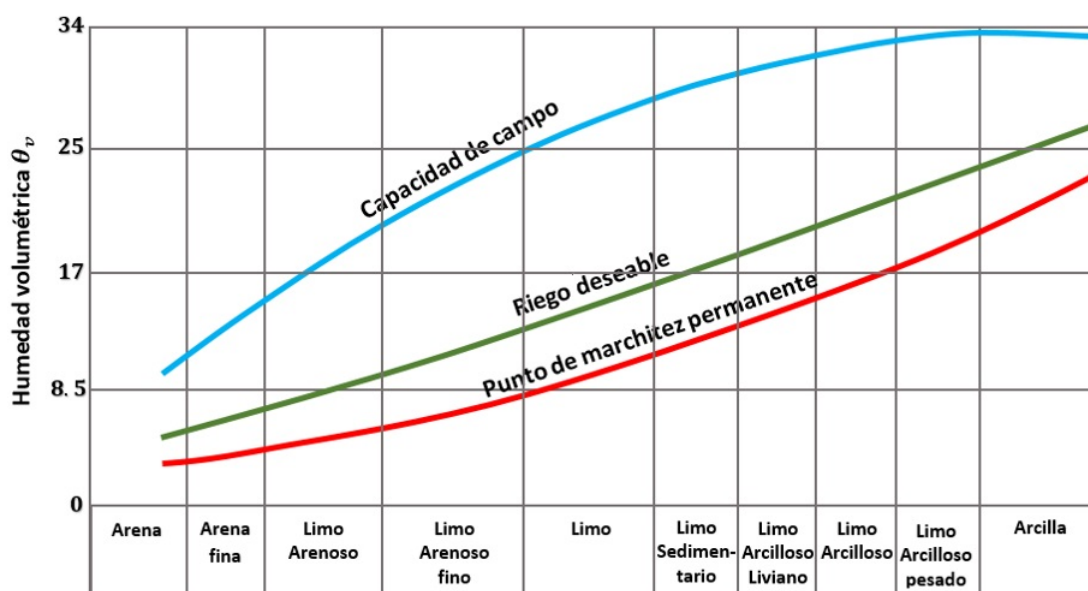


Figura 5.2.1: Perspectiva de la Humedad volumetrica (θ_v) respecto a la Capacidad de Campo (θ_{cc}), el Punto de Marchitez Permanente (θ_{pmp}) y riego deseable para diferentes texturas de suelo. Los anterior es una generalización de las texturas del los suelo según (Shaxson and Barber, 2008)

En la Figura 5.2.1 se observa que el riego deseable se debe efectuar entre θ_{cc} y θ_{pmp} , la región entre el riego deseable y el punto de marchitez permanente representaría el estrés hídrico. El riego (si está disponible) es por lo general necesario cuando dos tercios del agua disponible ($\theta_a = \theta_{cc} - \theta_{pmp}$) entre la Capacidad de Campo y el Punto de Marchitez Permanente han sido agotados (Shaxson and Barber, 2008) para las texturas de suelo, Si no se cumple con estas humedades, la planta entra a estrés hídrico. La intensidad y duración del estrés hídrico influye en efectos del crecimiento, esto puede variar debido a la capacidad de las plantas para resistirlo (Luna-Flores et al., 2012), entre los principales efectos son la reducción en la altura de la planta, tallo, raíces, área foliar, peso foliar específico y biomasa de la planta.

La resolución y precisión del sensor son suficientes para la implementación en el riego agrícola debido a la franja de humedad disponible para efectuarlo, es decir al sensor presenta

errores de precision en lectura del 1 % algo minimo comparado con el agua disponible entre el 5 y 3 %.

5.3. Conclusiones

El sensor por pulso de calor puede realizar mediciones del contenido volumétrico de agua en el suelo(θ_v) de manera indirecta a partir de la temperatura del suelo. Debido a su diseño no requiere demasiados componentes electrónicos, los cuales son comunes de fácil de acceso, esto muestra que es posible construir un sensor para la lectura de la humedad de bajo costo.

El proceso de calibración es muy sencillo y está basado en la obtención de parámetros térmicos del medio saturado en este caso se considera el agua ya que dichos parámetros como la capacidad de calor volumétrico $c_w\rho_w$ son conocidas, establecidas y pueden fácilmente compararse con los datos obtenidos.

Debido a su pequeño tamaño, el sensor por pulso de calor puede adecuarse para su uso cerca de la superficie del suelo o cerca de las raíces de las plantas, por lo que también pueden ser usados para la automatización del riego, retroalimentando a un controlador. Debido a la teoría bien desarrollada en la que se basan los sensores por pulso de calor, existe un potencial importante dentro del mercado de instrumentación agrícola, algunos de estos aspectos son debido a su tamaño y costo, por lo cual, existe un nicho de oportunidades en la investigación de este tipo de sensores por lo que siempre es necesario mejorar estos aspectos.

Los experimentos y simulaciones realizadas tuvieron resultados buenos, ya que la media de errores absolutos medida en porcentaje se mantuvieron alrededor del 1 % como se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 5.3.1: Media de Errores por lotes.

Lote	Pruebas	Media Del error absoluto(%)
I	1-3	1.31
II	4-6	1.32
III	7-9	1.29
IV	10-11	0.93
V	12-13	0.66
Media general		1.102

En la tabla 5.3.1 se muestran la media de los errores absolutos por lote y uno general de $\pm 1,102\%$ la cual equivale a la exactitud del sensor, esta medida es buena comparada con los sensores tensiómetros e Irrometros los cuales poseen una exactitud entre ± 2 a $\pm 3\%$, en el entendido de que son los sensores mas usados en la gestión de agua agrícola.

El error de lectura del sensor es pequeño comparada con margen en la que puede variar la humedad como se muestra en la Figura 5.2.1 para realizar un control, existiendo un gran holgura del agua útil entre la capacidad de campo θ_{cc} y el punto de marchitez permanente θ_{PMP} , es decir las texturas tienen una variación entre 3,6 y 5,7% de humedad volumétrica en la que se puede realizar control, esta implementación se puede observar en la siguiente figura.

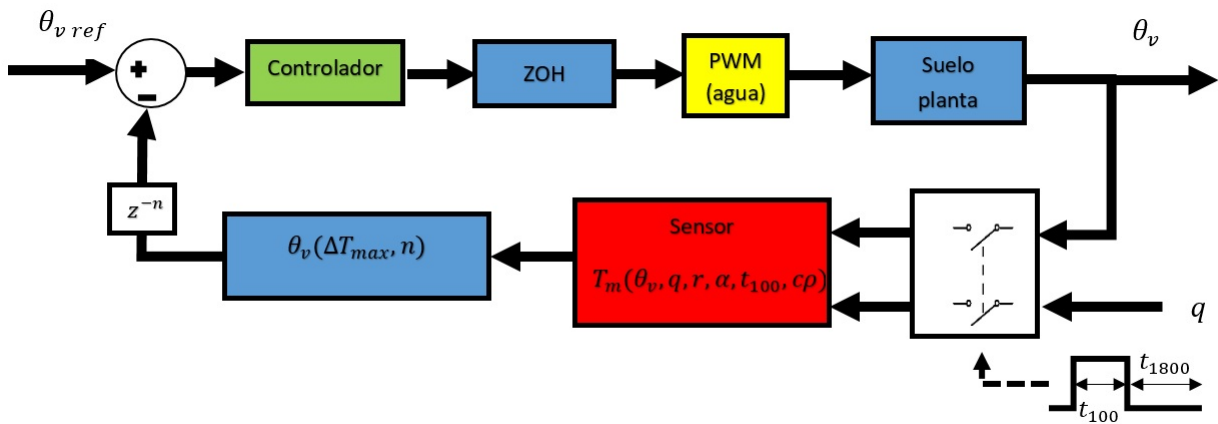


Figura 5.3.1: Control de riego basado en un sensor de humedad de suelo por pulso de calor

En la Figura 5.3.1 se observa al manera en que puede ser implementado el sensor para realizar el control de riego. Se concluye que el sensor cuenta con las características necesarias para su implementación en suelos agrícolas.

Bibliografía

- Abramowitz, M., Stegun, I. A., et al. (1966). Handbook of mathematical functions. *Applied mathematics series*, 55(62):39. 25
- Allen, R. G. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*, volume 56. Food & Agriculture Org. 16, 71
- Blonquist, J., Jones, S. B., and Robinson, D. (2005). Standardizing characterization of electromagnetic water content sensors. *Vadose Zone Journal*, 4(4):1059–1069. 15
- Blonquist, J., Jones, S. B., and Robinson, D. (2006). Precise irrigation scheduling for turfgrass using a subsurface electromagnetic soil moisture sensor. *Agricultural water management*, 84(1):153–165. 5
- Bonilla, C. and Cancino, J. (2001). Soil water content estimation using pedotransfer functions. *Agric. Téc*, 61(3):326–338. 54
- Bristow, K. L., Kluitenberg, G. J., Goding, C. J., and Fitzgerald, T. S. (2001). A small multi-needle probe for measuring soil thermal properties, water content and electrical conductivity. *Computers and electronics in agriculture*, 31(3):265–280. V, VII, 1, 8, 16, 28, 33, 35, 36, 47, 71
- Cengel, Y. A. and Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de calor y masa. Fundamentos y*. 20, 22, 32, 36
- Chard, J. (2002). Watermark soil moisture sensors: characteristics and operating instructions. *Utah State University*. 3, 54
- Corrington, M. S. (1961). Applications of the complex exponential integral. *Mathematics of Computation*, 15(73):1–6. 25
- Dean, T., Bell, J., and Baty, A. (1987). Soil moisture measurement by an improved capacitance technique, part i. sensor design and performance. *Journal of Hydrology*, 93(1-2):67–78. 6

- Dias, P. C., Roque, W., Ferreira, E. C., and Dias, J. A. S. (2013). A high sensitivity single-probe heat pulse soil moisture sensor based on a single npn junction transistor. *Computers and electronics in agriculture*, 96:139–147. 10
- Hoppula, K. I. and Salo, T. J. (2007). Tensiometer-based irrigation scheduling in perennial strawberry cultivation. *Irrigation Science*, 25(4):401–409. 3, 15
- Hossne, G. and Américo, J. (2008). La densidad aparente y sus implicaciones agrícolas en el proceso expansión/contracción del suelo. *Terra Latinoamericana*, 26(3):195–202. 66
- Hummel, J., Sudduth, K., and Hollinger, S. (2001). Soil moisture and organic matter prediction of surface and subsurface soils using an nir soil sensor. *Computers and electronics in agriculture*, 32(2):149–165. 7
- Jagtap, S., Rane, S., Mulik, U., and Amalnerkar, D. (2007). Thick film ntc thermistor for wide range of temperature sensing. *Microelectronics international*, 24(2):7–13. 38
- Jones, S. B., Blonquist, J., Robinson, D., Rasmussen, V. P., and Or, D. (2005). Standardizing characterization of electromagnetic water content sensors. *Vadose Zone Journal*, 4(4):1048–1058. 4
- Kizito, F., Campbell, C., Campbell, G., Cobos, D., Teare, B., Carter, B., and Hopmans, J. (2008). Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor. *Journal of Hydrology*, 352(3):367–378. 6, 15
- Lee, M. and Yoo, M. (2002). Detectivity of thin-film ntc thermal sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 96(2):97–104. 38
- Liu, G. and Si, B. C. (2011). Soil ice content measurement using a heat pulse probe method. *Canadian Journal of Soil Science*, 91(2):235–246. 9
- Luna-Flores, W., Estrada-Medina, H., Jiménez-Osornio, J., and Pinzón-López, L. (2012). Efecto del estrés hídrico sobre el crecimiento y eficiencia del uso del agua en plántulas de tres especies arbóreas caducifolias. *Terra Latinoamericana*, 30(4):343–353. 57
- Mori, Y., Hopmans, J., Mortensen, A., and Kluitenberg, G. (2003). Multi-functional heat pulse probe for the simultaneous measurement of soil water content, solute concentration, and heat transport parameters. *Vadose Zone Journal*, 2(4):561–571. 8, 22
- Noguera, M. A. and Vélez, J. A. (2011). Evaluación de algunas propiedades físicas del suelo en diferentes usos. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 28(1):40–52. 70

- Radulovich, R. (2008). Método gravimétrico para determinar in situ la humedad volumétrica del suelo. *Agronomía Costarricense Vol. 33 Núm. 1 2008*. 29
- Rodríguez Salinas, J. A. (2016). Diseño de un control inteligente para un sistema de riego basado en una información generada por una red de sensores de humedad de suelo. Master's thesis, Instituto Tecnológico De Nuevo Leon. 70, 71
- Sadosky, M. and de Guber Rebeca, C. (1975). *Elementos de Calculo Diferencial e Integral*, volume 1. Librería y Editorial Alsinas. 25
- Seyfried, M. (1993). Field calibration and monitoring of soil-water content with fiberglass electrical resistance sensors. *Soil Science Society of America Journal*, 57(6):1432–1436. 7, 15
- Shaxson, F. and Barber, R. (2008). *Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal: el significado de la porosidad del suelo*, volume 79. Food & Agriculture Org. XIII, 57
- TL431, T., TL432, T., and TL432A, T. (2007). Tl43xx precision programmable reference. Texas Instruments. 40
- Valente, A., Morais, R., Couto, C., and Correia, J. (2004). Modeling, simulation and testing of a silicon soil moisture sensor based on the dual-probe heat-pulse method. *Sensors and Actuators A: Physical*, 115(2):434–439. 2, 9, 15, 16, 28, 36
- Valente, A., Morais, R., Tuli, A., Hopmans, J., and Kluitenberg, G. (2006). Multi-functional probe for small-scale simultaneous measurements of soil thermal properties, water content, and electrical conductivity. *Sensors and Actuators A: Physical*, 132(1):70–77. 8, 16, 22
- Van der Held, E. and Van Drunen, F. (1949). A method of measuring the thermal conductivity of liquids. *Physica*, 15(10). 9
- Vandegheuchte, M. W. and Steppe, K. (2012). A triple-probe heat-pulse method for measurement of thermal diffusivity in trees. *Agricultural and forest meteorology*, 160:90–99. 2, 10, 15
- Warren, J. M., Bilheux, H., Kang, M., Voisin, S., Cheng, C.-L., Horita, J., and Perfect, E. (2013). Neutron imaging reveals internal plant water dynamics. *Plant and soil*, 366(1-2):683–693. 5, 15

- Welch, S., Kluitenberg, G., and Bristow, K. L. (1996). Rapid numerical estimation of soil thermal properties for a broad class of heat-pulse emitter geometries. *Measurement Science and Technology*, 7(6):932. 34
- Yang, C., Sakai, M., and Jones, S. B. (2013). Inverse method for simultaneous determination of soil water flux density and thermal properties with a penta-needle heat pulse probe. *Water Resources Research*, 49(9):5851–5864. 10
- Yin, Z., Lei, T., Yan, Q., Chen, Z., and Dong, Y. (2013). A near-infrared reflectance sensor for soil surface moisture measurement. *Computers and electronics in agriculture*, 99:101–107. 29, 30
- Zhang, Y., Treberg, M., and Carey, S. K. (2011). Evaluation of the heat pulse probe method for determining frozen soil moisture content. *Water Resources Research*, 47(5). 9, 36

Anexos

Anexo A

Densidad aparente del suelo a partir de gravimetría

Aunque se trata de un parámetro básico y fácil de obtener en la mayoría de los suelos hay que significar que se trata de un indicador muy general sobre las características físicas del suelo que no proporciona información sobre los tamaños de poro, ni sobre las conexiones en el espacio poroso, aspectos que resultan esenciales para predecir los movimientos de agua en el suelo y los riesgos de degradación de la estructura del suelo. Ello hace que suelos con valores similares de densidad aparente puedan tener un comportamiento muy diferente ante perturbaciones externas

La humedad del suelo influye en muchas propiedades físicas, tales como la densidad aparente, espacio poroso, consistencia, succión total de agua e incluso el color del suelo. Se entiende por humedad del suelo a la masa de agua contenida por unidad de masa de sólidos del suelo (También en relación al volumen). La humedad gravimétrica (w) es la forma más básica de expresar la humedad del suelo. Tiene las unidades adimensionales, pero normalmente se expresa en kg/kg a su vez, la humedad volumétrica, generalmente, se calcula como un porcentaje del volumen total del suelo expresado a partir de (w).

$$\theta_v = \frac{V_w}{V_t} = \frac{V_w}{V_s + V_f} \quad (\text{A.1})$$

Donde V_w es el volumen del agua, V_s volumen de sólidos, $V_f = V_s + V_f$ volumen de poros y V_t el volumen total de la muestra representativa.

Materiales que se utilizaron

- Balanza digital Rhino con una resolución de 0.2 g (Figura A.0.1)

- Horno a 105 – 120°C aproximadamente
- Recipientes de aluminio



Figura A.0.1: Báscula digital Rhino de 0.2 g de resolución

La báscula que se muestra en la Figura A.0.1 es usada para obtener la masa en gramos de las muestras en las probetas de manera directa es decir el peso de la probeta fue anulado por una función de Recalibración a cero que tiene la báscula. A continuación, se presenta los pasos a seguir para los experimentos.

La masa de suelo seca se obtiene colocándolo en la estufa a 105 – 120°C hasta obtener el peso constante que, en la mayoría de los suelos, se logra entre 24 y 48 horas, dependiendo del tamaño del volumen a secar. A este estado se le denomina “suelo seco” y es de naturaleza constante. Después de obtener la tierra seca se procede a los cálculos para 5 lotes utilizando 13 gramos de tierra por la cantidad de agua en gramos requerida en un cilindro como se muestra en la Figura A.0.2.



Figura A.0.2: Muestra de tierra húmeda en una probeta.

Las probetas de la Figura A.0.2 son cilindros de 4cm de altura por 2.5 cm de diámetro, forma es recomendada por (Hossne and Américo, 2008), continuación se explica el método. En primer lugar, se calcula la humedad gravimétrica como se muestra en la siguiente ecuación.

$$w = \frac{M_{su} - M_{ss}}{M_{ss}} = \frac{M_a}{M_s} = \left[\frac{M_{su}}{M_{ss}} - 1 \right] 100 \quad (\text{A.2})$$

Donde w es el contenido de humedad gravimétrica, M_a es la masa del agua, M_s es la masa de los sólidos, M_{su} es la masa de suelo húmedo, M_{ss} es la masa de suelo secado en horno. Para efectos prácticos, la humedad volumétrica se puede calcular utilizando la siguiente relación:

$$\theta_v = w \left(\frac{\rho_b}{\rho_w} \right) \quad (\text{A.3})$$

donde ρ_w es la densidad del agua ($1000 \frac{kg}{cm^3}$) a presión y temperatura estándar, ρ_b es la densidad aparente del suelo, el cual es un parámetro importante y se explica a continuación.

Densidad aparente del suelo (ρ_w) Método del cilindro de volumen conocido.

La densidad aparente puede ser incluida dentro de un grupo reducido de parámetros cuya medida es necesaria para evaluar la calidad de un suelo, como indicador de la estructura, la resistencia mecánica al enraizamiento y la cohesión del mismo. Cambios en la densidad aparente reflejan cambios en la estructura del suelo, debido a la relación existente entre densidad aparente y la porosidad total.

La densidad aparente del suelo es la relación entre la masa del suelo seco y el volumen total incluyendo al espacio poroso. En agricultura, la masa del suelo se refiere al peso después de secado, en nuestro caso en horno de a $110^\circ C$ aproximadamente, durante 24 hr o hasta obtener un peso constante M_s y el volumen total V_t se refiere a él volumen de la muestra, es decir, la muestra de suelo húmedo.

$$\rho_b = \frac{M_s}{V_t} \quad (\text{A.4})$$

Esta medida permite entender la facilidad de penetración de las raíces al suelo, permite la predicción de la transmisión de agua, la transformación de los porcentajes de humedad gravimétrica del suelo en términos de humedad volumétrica. En un suelo, el valor de densidad aparente es un buen índice del grado de compactación por medio del cálculo de la porosidad, es decir, la reducción del espacio poroso con radio equivalente mayor, también llamado espacio poroso no capilar, responsable del drenaje rápido del exceso de agua y de la aireación del suelo.

Materiales

- Balanza digital con una resolución de 0.2 g
- Horno a $105-120^{circ}C$ aproximadamente
- Recipiente cilíndrico

El cálculo se realiza de la siguiente manera

$$\rho_b = \frac{p_{ss}}{r^2\pi h} = \frac{13}{11,85} = 1,09 \frac{g}{cm} \quad (A.5)$$

donde $r = 1,34$ es el radio del cilindro, $h = 2,1$ es la altura del cilindro, $p_{ss} = 13$ es el peso del suelo seco. El valor de densidad aparente aumenta con la profundidad del suelo, debido al bajo contenido de materia orgánica y mayor compactación debido al agua.

Tabla A.0.1: Densidad aparente para algunos suelos.

Tipo de horizonte	Densidad aparente ($\frac{g}{cm^3}$)
arenoso	1.45-1.60
Arcillosos con estructura	1.05-1.10
Compactos	1.90-1.95
Suelos volcánicos	0.85
turbosos	0.25
Valor medio	1.35

Comúnmente se usan valores aproximados como se muestra en la tabla A.0.1 debido a que los suelos agrícolas están compuestos por mezclas de estas texturas, si se desconoce la composición del suelo entonces se recomienda los métodos gravimétricos para encontrar sus características físicas.

Los suelos de textura fina, bien estructurados y con altos contenidos de materia orgánica presentan valores más bajos de densidad aparente que los suelos de textura gruesa, poco estructurados y con bajos contenidos de materia orgánica. Los valores que puede tomar la densidad aparente dependen de muchos factores, incluyendo la textura, estructura y contenido de materia orgánica del suelo, así como del manejo del mismo. En contraste con la densidad real, que es más o menos constante, la densidad aparente es altamente variable debido a variaciones en la cantidad / calidad del espacio poroso.

La densidad aparente afecta al crecimiento de las plantas debido al efecto que tienen la resistencia y la porosidad del suelo sobre las raíces. Con un incremento de la densidad aparente, la resistencia mecánica tiende a aumentar y la porosidad del suelo tiende a disminuir, con estos cambios limitan el crecimiento de las raíces a valores críticos. Los valores críticos de la densidad aparente para el crecimiento de las raíces, varían según la textura que presenta el suelo y de la especie de que se trate.

Los valores bajos de densidad aparente son propios de suelos porosos, bien aireados, con buen drenaje y buena penetración de raíces, lo que permite un buen desarrollo de las raíces. Los valores altos de densidad aparente son propios de suelos compactos y poco porosos, con aireación deficiente e infiltración lenta del agua, lo cual puede provocar anegamiento, anoxia y que las raíces tengan dificultades para elongarse y penetrar hasta alcanzar el agua y los nutrientes necesarios. En estas condiciones, el desarrollo y crecimiento de las plantas es impedido o retardado consistentemente

Anexo B

Humedades de suelo relacionadas con la gestión agrícola

Capacidad de campo θ_{cc}

La humedad a capacidad de campo es el contenido de agua retenido en un suelo en contra de gravedad, dicho de otra manera, se puede considerar como la fracción de agua que puede retener el suelo después de una precipitación (lluvia o riego) transcurrido cierto tiempo en la que está ocurre sin llegar a la saturación. Se puede calcular arbitrariamente definiendo una cabeza de presión de referencia a $-340cm(-33kPa)$ (Rodríguez Salinas, 2016), como se muestra en la Ecuación B.1 :

$$\theta_{cc} = \Phi\left(\frac{\psi_{ae}}{340}\right) \quad (B.1)$$

Donde es Φ es la porosidad, ψ_{ae} es la tensión de entrada de aire. La capacidad de campo también se puede determinar de la siguiente manera de manera experimenta (Noguera and Vélez, 2011):

- Se selecciona un sitio de muestreo representativo.
- Se toma una muestra de volumen conocido.
- Se añade agua para saturar el suelo y se cubre del ambiente para evitar pérdidas por evapotranspiración.
- Cuando el agua se ha filtrado se inicia el muestreo de humedad a la profundidad deseada cada 6 -8 horas para suelos arenosos y cada 12 -24 horas para suelos arcillosos.

- Se obtiene la humedad gravimétrica después de una desecación a $105^{\circ}C$ por 24horas.

Punto de marchitez permanente θ_{pmp}

Es punto de marchitez permanente es el contenido de agua que limita la transpiración, por debajo del cual se marchitará una planta, esto quiere decir que el contenido de agua dentro de una planta debido a la falta de humedad en el suelo no es suficiente para mantener la rigidez de la planta. El contenido de agua del punto de marchitez permanente puede calcularse arbitrariamente definiendo una cabeza de presión de referencia a $-15000cm(-1470kPa)$ (Rodríguez Salinas, 2016) como se muestra en la ecuación B.2:

$$\theta_{pmp} = \Phi\left(\frac{\psi_{ae}}{1500}\right) = \theta_{cc} * 0,226 \quad (B.2)$$

Capacidad real de agua del suelo (CRA)

En cultivos bajo riego, nunca se debe permitir que el contenido de humedad del suelo alcance el estrés hídrico calculado el gua según las necesidades de la planta u hortaliza, a esto se le es conocido como Capacidad real de agua del suelo (CRA), es decir, cuando una fracción de la humedad o agua útil disponible (θ_a) de la zona radicular se ve agotada se debe reponer para que el cultivo no entre en niveles de estrés hídrico.

$$CRA = f_{\theta} * \theta_a \quad (B.3)$$

Donde f_{θ} es la fracción de agotamiento de la humedad en el suelo para condiciones sin estrés hídrico (cultivos comunes). Teniendo en cuenta lo anterior se puede obtener el Nivel de Agotamiento Permisible

$$\theta_{NAP} = \theta_{cc} - CRA \quad (B.4)$$

Donde θ_{NAP} es el Nivel de Agotamiento Permisible, el cual es el límite de humedad en la que las plantas no presentan esfuerzo debido estrés hídrico y no ven comprometidos su crecimiento y calidad de producto (Bristow et al., 2001), (Allen, 2006).

Anexo C

Otras pruebas realizadas en los 5 lotes

A continuación, se muestra los datos de temperatura obtenidos comparados con la simulación, consecuencia de un pulso de calor en el sustrato, las cuales contenían una humedad volumétrica obtenida por gravimetría de $\theta_{vg1} = 35,22\%$, $\theta_{vg2} = 31,86\%$, $\theta_{vg3} = 26,83\%$, $\theta_{vg4} = 23,48\%$ y $\theta_{vg5} = 21,80\%$. En los lotes I, II y III se realizaron 2 pruebas mas y en los lotes IV y V se realizo 1 prueba mas con respecto al Capitulo 4.2. A partir de las temperaturas se calcula la capacidad de calor volumétrico $c\rho$ para cada caso y el tiempo de la inercia térmica n .

Lote I, Probeta 2. Muestra compuesta por una mezcla de sustrato con masa de $M_s = 13g$ por una masa de agua de $M_a = 4,2 g$ para una humedad gravimétrica $w = 32,30$, es decir con una humedad volumétrica de $\theta_{vg} = 35,22$

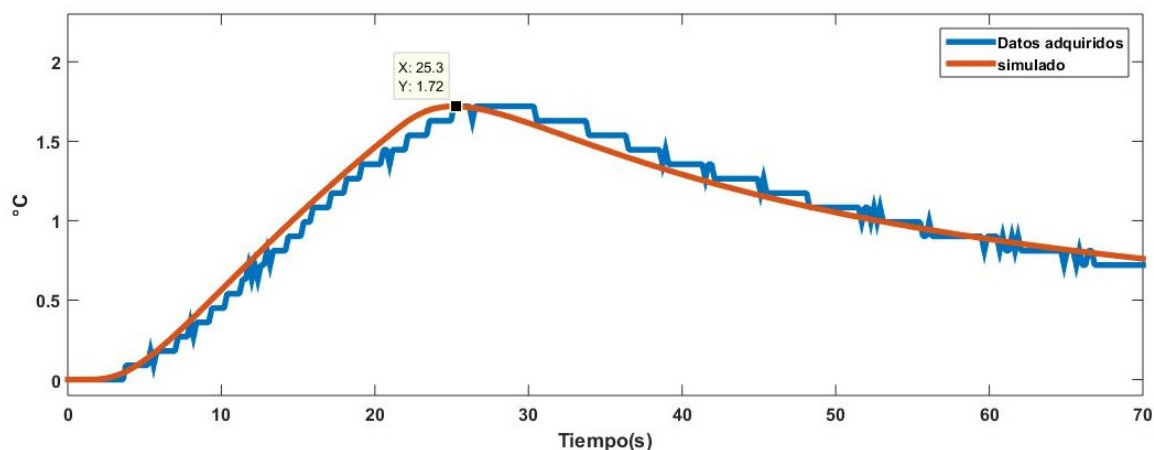


Figura C.0.1: Pulso de calor en un sustrato con humedad volumétrica por gravimetría $\theta_v = 35,22$. Para este caso la humedad estimada es $\hat{\theta}_v = 35,01$.

En la Figura C.0.1 se observa que alcanza una temperatura máxima $\Delta T_{max} = 1,712^{\circ}C$ en el tiempo máximo $t_m = 25,3s$, para un pulso de $q = 35,88W/m$ de duración $t_{100} = 20s$, esto indica que el tiempo de la inercia térmica es de $n = 5,3s$, también se observa que la simulación tiene un perfil similar al de los datos adquiridos. De igual manera se observa que el programa de adquisición y procesamiento de datos toma en consideración la temperatura mínima registrada, es decir, en el caso de la temperatura mínima, se toma la menor en los primeros tres segundos. En el caso de temperatura máxima se toma el primer pico máximo de los datos, esto es debido a que el programa de adquisición y procesamiento de datos toma en consideración la temperatura máxima registrada, siempre y cuando esta se conserva sin cambios los próximos 2 segundos, omitiéndose como ruido, esto es congruente para los dos casos ya que se toma en cuenta una incertidumbre de $\pm 0,1^{\circ}C$ en la amplitud de la temperatura en un tiempo de ± 3 segundos.

Lote I, Probeta 3. Muestra compuesta por una mezcla de sustrato con masa de $M_s = 13g$ por una masa de agua de $M_a = 4,2 g$ para una humedad gravimétrica $w = 32,30$, es decir con una humedad volumétrica de $\theta_{vg} = 35,22$

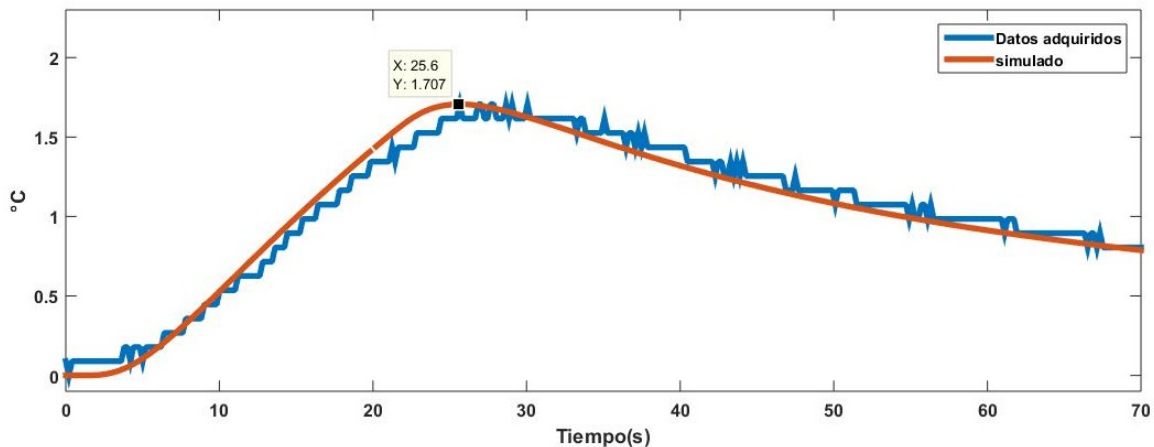


Figura C.0.2: Pulso de calor en un sustrato con humedad volumétrica por gravimetría $\theta_{gv} = 31,86$. Para este caso la humedad estimada es $\hat{\theta}_v = 33,08$.

En la Figura C.0.2 se observa que alcanza una temperatura máxima $\Delta T_{max} = 1,707^{\circ}C$ en el tiempo máximo $t_m = 25,6s$, para un pulso de $q = 35,88W/m$ de duración $t_{100} = 20s$, esto indica que el tiempo de la inercia térmica es de $n = 5,6s$, también se observa que la simulación tiene un perfil similar al de los datos adquiridos. De igual manera se observa que el programa de adquisición y procesamiento de datos toma en consideración la temperatura mínima registrada, es decir, en el caso de la temperatura mínima, se toma la menor en los primeros tres segundos.

En el caso de temperatura máxima se toma el primer pico máximo de los datos, esto es debido a que el programa de adquisición y procesamiento de datos toma en consideración la temperatura máxima registrada, siempre y cuando esta se conserva sin cambios los próximos 2 segundos, omitiéndose como ruido, esto es congruente para los dos casos ya que se toma en cuenta una incertidumbre de $\pm 0,1^{\circ}C$ en la amplitud de la temperatura en un tiempo de ± 3 segundos.

Lote II, Probeta 5. Muestra compuesta por una mezcla de sustrato con masa $M_s = 13g$ por una masa de agua $M_a = 3,8g$ para una humedad gravimétrica $w = 29,2308$, es decir con una humedad volumétrica de $\theta_{vg} = 31,86$.

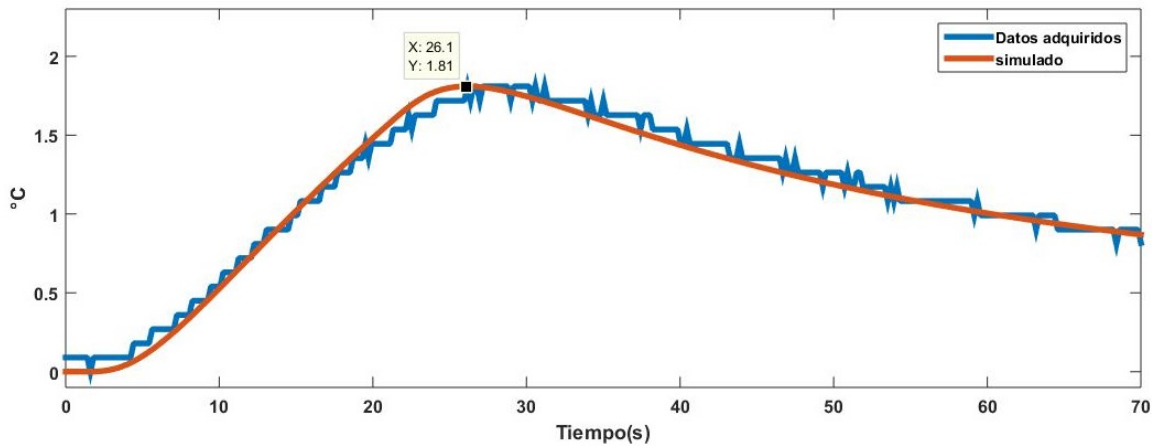


Figura C.0.3: Pulso de calor en un sustrato con humedad volumétrica por gravimetría $\theta_{vg} = 26,83$. Para este caso la humedad estimada es $\hat{\theta}_v = 25,91$.

En la Figura C.0.3 se observa que alcanza una temperatura máxima $\Delta T_{max} = 1,81^{\circ}C$ en el tiempo máximo $t_m = 26,1s$, para un pulso de $q = 35,88W/m$ de duración $t_{100} = 20s$, esto indica que el tiempo de la inercia térmica es de $n = 6,1s$, también se observa que la simulación tiene un perfil similar al de los datos adquiridos. De igual manera se observa que el programa de adquisición y procesamiento de datos toma en consideración la temperatura mínima registrada, es decir, en el caso de la temperatura mínima, se toma la menor en los primeros tres segundos. En el caso de temperatura máxima se toma el primer pico máximo de los datos, esto es debido a que el programa de adquisición y procesamiento de datos toma en consideración la temperatura máxima registrada, siempre y cuando esta se conserva sin cambios los próximos 2 segundos, omitiéndose como ruido, esto es congruente para los dos casos ya que se toma en cuenta una incertidumbre de $\pm 0,1^{\circ}C$ en la amplitud de la temperatura en un tiempo de ± 3 segundos.

Lote II, Probeta 6. Muestra compuesta por una mezcla de sustrato con masa $M_s = 13g$ por una masa de agua $M_a = 3,8g$ para una humedad gravimétrica $w = 29,2308$, es decir con una humedad volumétrica de $\theta_{vg} = 31,86$.

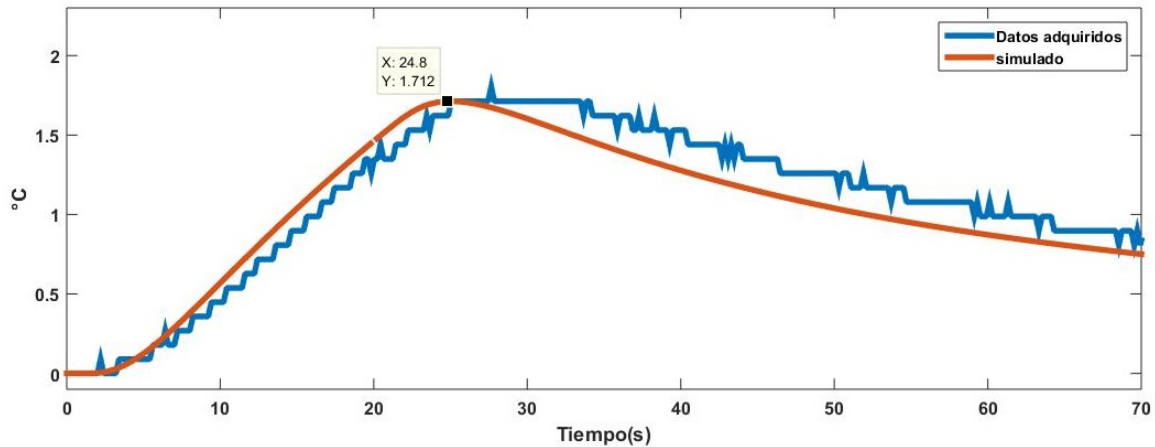


Figura C.0.4: Pulso de calor en un sustrato con humedad volumétrica por gravimetría $\theta_{vg} = 23,48$. Para este caso la humedad estimada es $\hat{\theta}_v = 23,91$.

En la Figura C.0.4 se observa que alcanza una temperatura máxima $\Delta T_{max} = 1,712^{\circ}C$ en el tiempo máximo $t_m = 24,8s$, para un pulso de $q = 35,88W/m$ de duración $t_{100} = 20s$, esto indica que el tiempo de la inercia térmica es de $n = 4,8s$, también se observa que la simulación tiene un perfil similar al de los datos adquiridos. De igual manera se observa que el programa de adquisición y procesamiento de datos toma en consideración la temperatura mínima registrada, es decir, en el caso de la temperatura mínima, se toma la menor en los primeros tres segundos. En el caso de temperatura máxima se toma el primer pico máximo de los datos, esto es debido a que el programa de adquisición y procesamiento de datos toma en consideración la temperatura máxima registrada, siempre y cuando esta se conserva sin cambios los próximos 2 segundos, omitiéndose como ruido, esto es congruente para los dos casos ya que se toma en cuenta una incertidumbre de $\pm 0,1^{\circ}C$ en la amplitud de la temperatura en un tiempo de ± 3 segundos.

Lote III, Probeta 8. Muestra compuesta por una mezcla de sustrato de masa $M_s = 13g$ por una masa de agua $M_a = 3,2g$ para una humedad gravimétrica $w = 24,6154$, es decir con una humedad volumétrica de $\theta_{vg} = 26,83$.

En la Figura C.0.5 se observa que alcanza una temperatura máxima $\Delta T_{max} = 1,899^{\circ}C$ en el

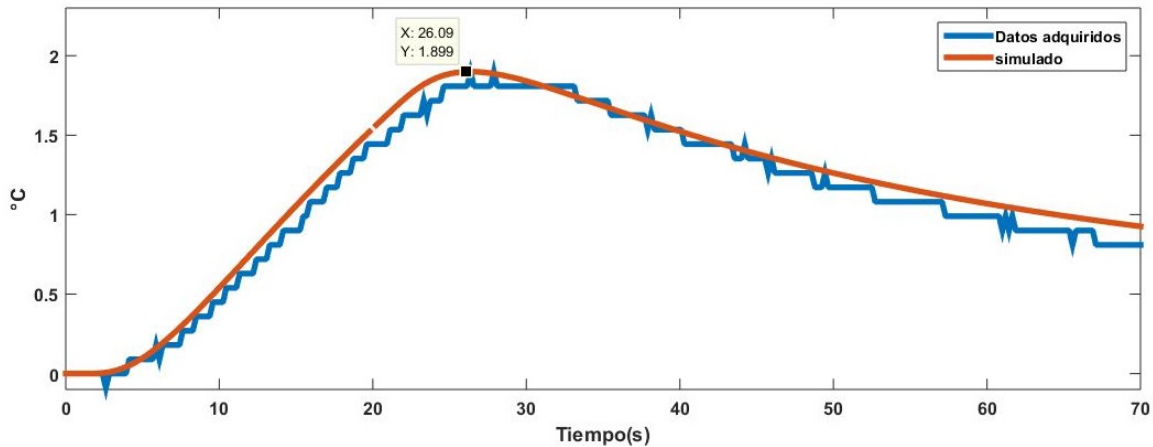


Figura C.0.5: Pulso de calor en un sustrato con humedad volumétrica por gravimetría $\theta_{vg} = 21,80$. Para este caso la humedad estimada es $\hat{\theta}_v = 21,99$.

tiempo máximo $t_m = 26,09s$, para un pulso de $q = 35,88W/m$ de duración $t_{100} = 20s$, esto indica que el tiempo de la inercia térmica es de $n = 6,09s$, también se observa que la simulación tiene un perfil similar al de los datos adquiridos. De igual manera se observa que el programa de adquisición y procesamiento de datos toma en consideración la temperatura mínima registrada, es decir, en el caso de la temperatura mínima, se toma la menor en los primeros tres segundos. En el caso de temperatura máxima se toma el primer pico máximo de los datos, esto es debido a que el programa de adquisición y procesamiento de datos toma en consideración la temperatura máxima registrada, siempre y cuando esta se conserva sin cambios los próximos 2 segundos, omitiéndose como ruido, esto es congruente para los dos casos ya que se toma en cuenta una incertidumbre de $\pm 0,1^\circ C$ en la amplitud de la temperatura en un tiempo de ± 3 segundos.

Lote III, Probeta 9. Muestra compuesta por una mezcla de sustrato de masa $M_s = 13g$ por una masa de agua $M_a = 3,2g$ para una humedad gravimétrica $w = 24,6154$, es decir con una humedad volumétrica de $\theta_{vg} = 26,83$.

En la Figura C.0.6 se observa que alcanza una temperatura máxima $\Delta T_{max} = 1,893^\circ C$ en el tiempo máximo $t_m = 25,49s$, para un pulso de $q = 35,88W/m$ de duración $t_{100} = 20s$, esto indica que el tiempo de la inercia térmica es de $n = 5,49s$, también se observa que la simulación tiene un perfil similar al de los datos adquiridos. De igual manera se observa que el programa de adquisición y procesamiento de datos toma en consideración la temperatura mínima registrada, es decir, en el caso de la temperatura mínima, se toma la menor en los primeros tres segundos.

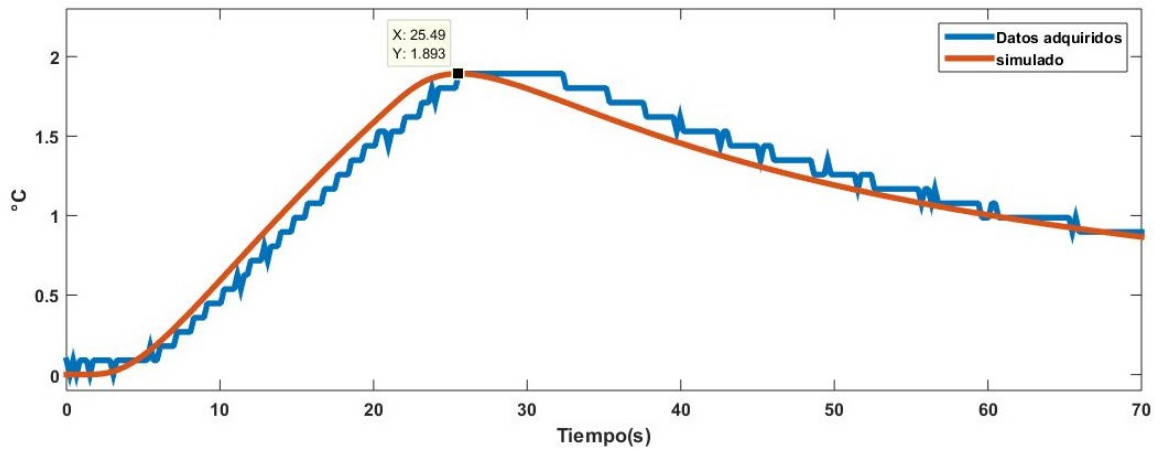


Figura C.0.6: Pulso de calor en un sustrato con humedad volumétrica por gravimetría $\theta_v = 35,22$. Para este caso la humedad estimada es $\hat{\theta}_v = 35,01$.

Lote IV, Probeta 11. Muestra compuesta por una mezcla de sustrato de masa $M_s = 13g$ por una masa de agua $M_a = 2,8g$ para una humedad gravimétrica $w = 21,5385$, es decir con una humedad volumétrica de $\theta_{vg} = 23,48$.

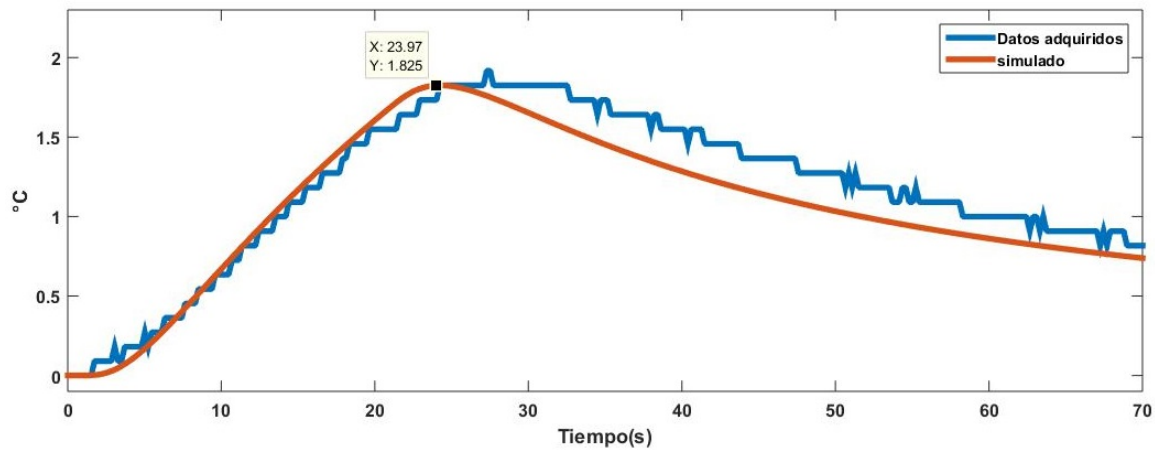


Figura C.0.7: Pulso de calor en un sustrato con humedad volumétrica por gravimetría $\theta_{gv} = 31,86$. Para este caso la humedad estimada es $\hat{\theta}_v = 33,08$.

En la Figura C.0.7 se observa que alcanza una temperatura máxima $\Delta T_{max} = 1,825^\circ C$ en el tiempo máximo $t_m = 23,97s$, para un pulso de $q = 35,88W/m$ de duración $t_{100} = 20s$, esto indica que el tiempo de la inercia térmica es de $n = 3,97s$, también se observa que la simulación tiene un perfil similar al de los datos adquiridos. De igual manera se observa que el programa de adquisición y procesamiento de datos toma en consideración la temperatura mínima registrada,

es decir, en el caso de la temperatura mínima, se toma la menor en los primeros tres segundos. En el caso de temperatura máxima se toma el primer pico máximo de los datos, esto es debido a que el programa de adquisición y procesamiento de datos toma en consideración la temperatura máxima registrada, siempre y cuando esta se conserva sin cambios los próximos 2 segundos, omitiéndose como ruido, esto es congruente para los dos casos ya que se toma en cuenta una incertidumbre de $\pm 0,1^{\circ}C$ en la amplitud de la temperatura en un tiempo de ± 3 segundos.

Lote V, Probeta 13. Muestra compuesta por una mezcla de sustrato de masa $M_s = 13g$ por una masa de agua $M_a = 2,6g$ para una humedad gravimétrica $w = 20$, es decir con una humedad volumétrica de $\theta_{vg} = 21,8$.

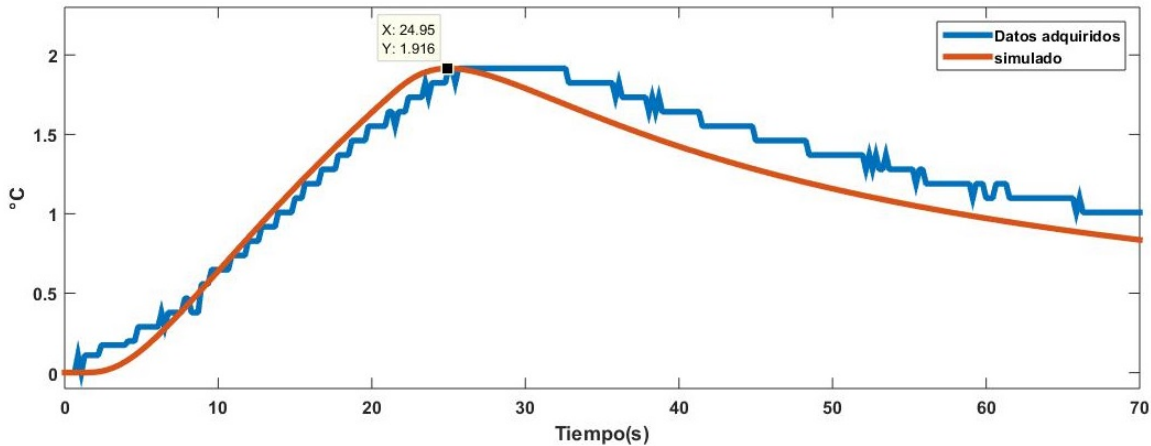


Figura C.0.8: Pulso de calor en un sustrato con humedad volumétrica por gravimetría $\theta_{vg} = 26,83$. Para este caso la humedad estimada es $\hat{\theta}_v = 25,91$.

En la Figura C.0.8 se observa que alcanza una temperatura máxima $\Delta T_{max} = 1,916^{\circ}C$ en el tiempo máximo $t_m = 24,95s$, para un pulso de $q = 35,88W/m$ de duración $t_{100} = 20s$, esto indica que el tiempo de la inercia térmica es de $n = 4,95s$, también se observa que la simulación tiene un perfil similar al de los datos adquiridos. De igual manera se observa que el programa de adquisición y procesamiento de datos toma en consideración la temperatura mínima registrada, es decir, en el caso de la temperatura mínima, se toma la menor en los primeros tres segundos. En el caso de temperatura máxima se toma el primer pico máximo de los datos, esto es debido a que el programa de adquisición y procesamiento de datos toma en consideración la temperatura máxima registrada, siempre y cuando esta se conserva sin cambios los próximos 2 segundos, omitiéndose como ruido, esto es congruente para los dos casos ya que se toma en cuenta una incertidumbre de $\pm 0,1^{\circ}C$ en la amplitud de la temperatura en un tiempo de ± 3 segundos.

Anexo D

Consideraciones al programar usando la exponencial integral

Como se observa en la Ecuación 2.41 del Capítulo 2 Sección 2.2, la solución de la exponencial integral se descompone en una constante irracional Γ y una segunda parte que se puede utilizar para tomar decisiones en la programación debido a singularidades en particular para $t_i = 0$ como se muestra en el modelo térmico siguiente.

$$\Delta T_m(t_i) = \begin{cases} \Delta T_m(t_i) = -\frac{I^2 R}{4Lc\rho\pi\alpha} \left[Ei \left(\frac{-r^2}{4\alpha t_i} \right) \right], & t_0 < t_i \leq t_{100} \\ \Delta T_m(t_i) = \frac{I^2 R}{4Lc\rho\pi\alpha} \left[Ei \left(\frac{-r^2}{4\alpha(t_i - t_{100})} \right) - Ei \left(\frac{-r^2}{4\alpha t_i} \right) \right], & t_{100} < t_i \leq t_N \end{cases} \quad (D.1)$$

Donde $\Delta T_m(t_i)$ es temperatura en función al tiempo, t_i son instantes de tiempo, $I, R, L, c, \rho, \alpha, r$ son constantes. Como se observa en el argumento de la exponencial integral en los casos $\frac{-r^2}{4\alpha t_i}$ para los tiempos $t_0 < t_i \leq t_{100}$ y con $\frac{-r^2}{4\alpha(t_i - t_{100})}$ en los tiempos $t_{100} < t_i \leq t_N$, debido a la naturaleza de ambos argumentos se vuelven indeterminados para $t_i = 0$

Analizando la Ecuación 2.40, 2.41 y tomando en cuenta los argumentos de la exponencial integral de la Ecuación D.1 con $t_i = 0$ en el cual el argumento tiende a infinito, asumiendo todas las constantes como una constante C única tenemos

$$Ei \left(\frac{-C}{t_i} \right) = -\Gamma - \ln \left(\frac{-C}{t_i} \right) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \left(\frac{-C}{t_i} \right)^n}{nn!} \quad (D.2)$$

$$= -\Gamma - \lim_{t_i \rightarrow 0} \left[\ln \left(\frac{-C}{t_i} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \left(\frac{-C}{t_i} \right)^n}{nn!} \right] \quad (\text{D.3})$$

$$= -\Gamma - (-\Gamma) = 0 \quad (\text{D.4})$$

De lo anterior podemos concluir que para el caso del modelo térmico del sensor de humedad por pulso de calor para los tiempos en inicio de pulso $t_i = 0$ y termino del pulso $t_i = t_{100}$, por lo tanto en estas condiciones la exponencial integral es igual a cero como se muestra a continuación.

$$Ei \left(\frac{-r^2}{4\alpha t_i} \right) = 0, \quad t_i = 0 \quad (\text{D.5})$$

$$Ei \left(\frac{-r^2}{4\alpha(t_i - t_{100})} \right) = 0, \quad t_i = t_{100} \quad (\text{D.6})$$

Anexo E

Programa para adquisición y procesamiento de datos para la obtención de humedad


```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Adquisicion y procesamiento de datos para un sensor de humedad basado %
en un pulso de calor. A partir de un ARDUINO 1 %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clc
close all
clear all
ar= arduino('COM3'); %enlace entre la tarjeta y MATLAB
Stop = 1; %Variable que asegura el paro de la adquisicion
nt=0; %Variable que asegura el tiempo
ar.pinMode(12, 'OUTPUT') %Configuracion de salida pin 12 digital
si=1;
num = input('Escribe si para comenzar:');
while Stop
switch num
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%---Adquisicion de datos---%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
case 1
x=0;
ar.digitalWrite(12,1) %salida pin 12 en on
while nt<100 %Condicion para 0<tiempo<100
tic %inicio del tiempo en sistema
b=ar.analogRead(0)*5/1023; %Adquisicion analógica en pin 0
x=[x,b]; %Vector para de datos adquiridos
plot(x, 'LineWidth',3);grid on; %graficar adquisicion
axis([1 550 2 2.5]);
if nt>=20 %Condicion para un pulso de 20 seg
ar.digitalWrite(12,0) %salida pin 12 en off
end
pause(0.15); %pasusa para asegurar tiempo de muestreo
nt=nt+toc; %acumulacion del tiempo de ejecucion
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%---conversión de la adquisición a temperatura---%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
num=2;
case 2
res=55400; %resistencia auxiliar
rinf=0.1344692261953; %parametro de termistor
tkc=273.15;
for i=1:length(x) %Calculo de la temperatura
temp(1,i)=(3760/log(((res*x(1,i))/(5-x(1,i)))/(rinf)))-tkc;
end
tempp=temp(1,2:length(x))-temp(1,2); %incremento de temperatura
time=0:nt/length(x):(length(tempp)-1)*(nt/length(x));
figure(2)
plot(time,tempp, 'LineWidth',3);grid on
axis([0 100 -0.1 2.8]);
num=3;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%---Comparacion entre temperatura simulada y obtenida---%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%---obtencion de parámetros térmicos---%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
case 3
cpa=4186800; %cp del agua
tt=20; %Tiempo del pulso
q=35.88; %pulso de calor en W
r=0.0039; %Distancia entre emisor y receptor de calor
ka=0;
d=0; %Variable para dar inicio en t>to
d2=1; %Variable para dar inicio en 0<t<to
p=1;

```

```

[c1,t]=max(temp); %maxima temperatura adquirida
tmax=(t*(nt/length(x))); %Tiempo maximo en segundos
%difusividad termica
alp=((r^2)/4)*((1/(tmax-tt))-(1/tmax))/log(tmax/(tmax-tt));
%Capacidad de calor volumetrico
cp=(-q/(4*pi*alp*c1))*( expint((r^2)/(4*alp*(tmax-tt)))- ...
expint((r^2)/(4*alp*tmax)));
%*****modelo del sensor para simular temperatura*****
while ka<100
if ka>tt
d=1;d2=0;
end
m=ka;m1=ka-tt;
ex32=( (q/(4*pi*(lam)))*( expint((r^2)/(4*alp*m)) ) );
ex42=( -(q/(4*pi*(lam)))*( expint((r^2)/(4*alp*m1)) - ...
expint((r^2)/(4*alp*m))));
if m==0
ex32=0;
end
if m1==0
ex42=0;
end
del42=(ex32*d2)+(ex42)*d);
if d==0&& m==0
del42=0;
end
mdelt(p,:)= [ka del42];
ka=ka+1;p=p+1;
end
%*****
figure (3)
plot(mdelt(:,1),mdelt(:,2),'r','LineWidth',3)
hold on
plot(time,temp,'LineWidth',3);grid on
axis([0 100 -0.1 2]);
legend('simulado','Real')
title('pulso de calor')
xlabel('Tiempo(s)')
ylabel('°C')
num=4;
%-----
case 4
%*****obtencion de la humedad*****
dap=1.09; %dencidad aparente del suelo
p1=1.423;p2=-0.06906; %parametros para corrección lineal
css=1.589e6; %calor especifico del suelo
gam=c1/tmax;
hvol=(q*log(gam)*((tmam)^2))/(gam*pi*(r^2)*c1*cpa *20)* . . .
(expint((-gam*log(gam))/(gam-1))-expint(-log(gam)/(gam-1)))-. . .
((dap*css)/(cpa))
Hv=(p1*hvol)+p2; %Humedad
num=5;
%-----
Otherwise
Stop=0;num=0;
end
end

```