DISEÑO DE UN SISTEMA DE RIEGO AUTOMÁTICO CON MONITORIZACIÓN DE NIVEL DE HUMEDAD

LAURA VIVIANA PACHECO RIOS

JULIÁN FERNANDO SUAREZ VÁSQUEZ

ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES

BUCARAMANGA

2015

DISEÑO DE UN SISTEMA DE RIEGO AUTOMÁTICO CON MONITORIZACIÓN DE NIVEL DE HUMEDAD

LAURA VIVIANA PACHECO RIOS

JULIÁN FERNANDO SUAREZ VÁSQUEZ

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de ingeniero electrónico

Director

GERMAN ALFONSO OSMA PINTO, Dr(c).

Codirector

RODOLFO VILLAMIZAR MEJÍA, Dr.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES

BUCARAMANGA

2015

DEDICATORIA

A nuestros familiares, amigos, compañeros y profesores que nos acompañaron en este proceso de crecimiento profesional y personal; quienes que con su sabiduría nos guiaron para desarrollar cada uno de los objetivos y así finalizar una etapa más de nuestra formación.

A todas aquellas personas que de uno u otra manera influyeron en nuestras vidas, para tomar la mejor decisión en los momentos más difíciles. A Dios que bendice nuestro camino día a día. A nuestro director Dr(c). Germán Alfonso Osma y al codirector Dr. Rodolfo Villamizar, por su liderazgo, colaboración y apoyo.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 15

1. GENERALIDADES Y ANTECEDENTES 17

1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN 17
1.2 PLANTEAMIENTO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA 17
1.3 OBJETIVOS 17
1.3.1 Objetivo general 18
1.3.2 Objetivos específicos 18
1.4 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO 18

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS 19

2.1 EVAPOTRANSPIRACIÓN 20
2.2 SISTEMA DE RIEGO ASPERSIÓN – GOTEO 21
2.2.1 Riego por goteo 21
2.2.2 Riego por aspersión 23
2.3 MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA 25
2.3.1 Termistor 25
2.3.2 Sensor analógico de circuito integrado (IC) 26
2.3.3 Termocupla 26
2.3.4 RTD 27
2.3.5 Sensor Vegetronix de temperatura del suelo 28
2.4 MEDICIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO 29
2.4.1 Sensor Vegetronix de humedad del suelo 30
2.4.2 Curva característica del sensor de humedad del suelo 30

3. DISEÑO Y CONTROL DEL SISTEMA DE RIEGO 32

3.1 DISEÑO DEL SISTEMA DE RIEGO 32
3.1.1 Análisis de presión y flujo 37
3.1.2 Filtrado 40
3.1.3 Tipos de filtros 40
3.1.4 Tubería 41
3.1.5 Tipos de tubería principal 41
3.1.6 Pérdidas de presión 42
3.1.7 Tuberías laterales 44
3.1.8 Tipos de válvulas 45
3.2 MÓDULO DE CONTROL 46
3.3 ADQUISICIÓN DE DATOS 48
3.4 CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO PARA EL TERMISTOR 49

4. SELECCIÓN DE COMPONENTES BOARD DE RIEGO 52

4.1 ALIMENTACIÓN PCB 53
4.2 SENSORES 55
4.2.1 Sensor de temperatura termistor 55
4.2.2 Sensor de humedad y temperatura del suelo 56
4.3 TRANSMISIÓN DE DATOS INALÁMBRICOS 56
4.4 CONTROL Y TRANSMISIÓN DE DATOS 57
4.5 VÁLVULA SOLENOIDE 58
5. RESULTADOS EXPERIMENTALES 60
5.1. RESULTADOS GRÁFICOS 60
5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS 63
5.3 ANÁLISIS DE LA INTENSIDAD DE SEÑAL 66
6. CONCLUSIONES 68
7. OBSERVACIONES Y TRABAJO A FUTURO 69
BIBLIOGRAFÍA 70
ANEXOS 75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Techo verde piso 5 Edificio de Ingeniería Eléctrica 19
Figura 2. Techo verde terraza Edificio de Ingeniería Eléctrica.....20
Figura 3. Sistema de riego por goteo.....22
Figura 4. Cobertura de riego de los aspersores (NETAFIM, 2009).....24
Figura 5. Área de riego del aspersor (NETAFIM, 2009).....24
Figura 6. Cobertura de riego, según la posición de los aspersores (NETAFIM, 2009).....24
Figura 7. Comportamiento del sensor de temperatura.....28
Figura 8. Parámetros del agua en el suelo 29
Figura 9. Comportamiento del sensor de humedad.....31
Figura 10. Distribución de zonas de riego quinto piso 32
Figura 11. Distribución de zonas de riego sexto piso.....32
Figura 12. Ubicación de los goteros.....33
Figura 13. Micro-aspersor Netafim SuperNet LR (NETAFIM, n.d.) 34
Figura 14. Ubicación de los aspersores.....35
Figura 15. Línea lateral zona 2 44
Figura 16. Pérdidas de presión válvula solenoide.....46
Figura 17. Comunicación en estrella para transmisión de datos entre zonas...48
Figura 18. Divisor de voltaje para el termistor.....49
Figura 19. Termistor con divisor de tensión Temperatura vs Resistencia.....51
Figura 20. Resistencia vs Temperatura del termistor.....51
Figura 21. Diagrama metodología de diseño.....53
Figura 22. Circuito alimentación 5 (V).....54
Figura 23. Circuito regulador.....55
Figura 24. Señal Termistor 56
Figura 25. Señal sensor de temperatura y humedad.....56
Figura 26. Conexión de la XBee®.....57
Figura 27. Conexión Arduino Nano.....58
Figura 28. Activación de la válvula.....58
Figura 29. Tarjeta sistema de riego 59
Figura 30. Prueba de implementación 5to piso Edificio Ingeniería Eléctrica.....60
Figura 31. Contenido volumétrico de agua (VWC- siglas en ingles).....61
Figura 32. Perfiles de temperatura.....62
Figura 33. Intensidad de la señal de acuerdo a la zona.....67
Figura 34. Distribución de las zonas.....78
Figura 35. Distribución cajas de control.....80
Figura 36. Caja Dexson DXN501DG (Caja Derivación Gris 18148) 80
Figura 37. Montaje board de riego en Caja Dexson DXN501DG.....81
Figura 38. Perforación del taladro en la cara B.....81
Figura 39. Perforación de la cara E para el tornillo de sujeción de la regleta ...82

Figura 40. Montaje cable encauchetado con bornera 82
Figura 41. Conexión entre salidas del transformador y board de riego 83
Figura 42. Montaje de la válvula solenoide 83
Figura 43. Soldadura del sensor a la regleta 84
Figura 44. Soldadura del sensor a la regleta 84
Figura 45. Montaje arduino y XBee® s2 85
Figura 46. Montaje bornera derivación transformador 86
Figura 47. Perforaciones cara B caja Dexson 221714 86
Figura 48. Alimentación para zonas 2 y 4 a partir de la zona 3 87
Figura 49. Montaje caja Dexson pequeña cara E 87
Figura 50. Perforaciones caja Dexson pequeña cara B 88
Figura 51. Perforaciones caja Dexson cara B zona de control 88
Figura 52. Perforaciones caja Dexson cara E zona de control 89
Figura 53. Montaje caja control 89
Figura 54. Platinas montaje caja control 90
Figura 55. Distribución del riego en la zona 1 93
Figura 56. Distribución del riego en el sexto piso 94
Figura 57. Distribución del riego en la zona 2 95
Figura 58. Distribución del riego en la zona 3 96
Figura 59. Distribución del riego en la zona 4 97
Figura 60. Estado de la válvula abierta 101
Figura 61. Estado de la válvula cerrada 102

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Métodos Evapotranspiración.....20
Tabla 2. Criterios de selección.....23
Tabla 3. VWC vs Rango de voltaje 31
Tabla 4. Área por zona de implementación 33
Tabla 5. Pérdidas de presión 36
Tabla 6. Presión de trabajo aspersores 37
Tabla 7. Medidas de tiempo para cada piso 38
Tabla 8. Flujo de agua para las medidas tomadas en el piso 5 y 6 39
Tabla 9. Módulos de control.....47

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. TABLAS 75
ANEXO B. P&ID.....78
ANEXO C. MANUAL DE MONTAJE CONTROL PARA LAS ZONAS.....79
ANEXO D. MONTAJE ESTRUCTURA DE RIEGO.....91
ANEXO E. UBICACIÓN DE LOS SENSORES 98
ANEXO F. MANUAL DE MANTENIMIENTO 99
ANEXO G. PRESUPUESTO.....103

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO DE UN SISTEMA DE RIEGO AUTOMÁTICO CON MONITORIZACIÓN DE NIVEL DE HUMEDAD[1]

AUTORES: Laura Viviana Pacheco Rios, Julián Fernando Suarez Vázquez[2]

PALABRAS CLAVE: Aspersión, Goteo, Temperatura, Humedad, Sensor, Arduino.

El proyecto de grado expone el diseño de un sistema de riego para suministrar agua requerida de forma eficiente a las cubiertas verdes ubicadas en el Edificio de Ingeniería Eléctrica. El diseño del sistema se basa en mantener el nivel deseado de humedad en el sustrato del techo verde, lo que se controla a partir del sensado de humedad del suelo. El área total de cubiertas se dividió en cuatro zonas, dos por goteo y dos por aspersión. Una de las zonas se asoció al piso 5 con riego por goteo en un área aproximada de 120 m^2 y las otras tres zonas se ubicarían en la terraza; dos por aspersión y una por goteo con un área total de 360 m^2 aproximadamente.

Para cada una de las zonas se realizó un análisis de pérdidas de presión y flujo, con el fin determinar el número de goteros y aspersores necesarios de acuerdo al área. Para cada zona se dispuso una válvula solenoide, un sensor de humedad del suelo y temperatura del suelo Vegetronix, un sensor termistor para temperatura ambiente y un sensor termistor para la temperatura en la caja de control. De igual manera se ubica una tarjeta de adquisición de datos para los sensores, utilizando 4 boards de riego en total, junto con cinco módulos XBee® para la transmisión inalámbrica de datos.

Se observa que el nivel de humedad del sustrato, presenta un cambio significativo con el sistema de riego implementado. Las pruebas de campo que se realizaron fueron la medición de la humedad del suelo, las temperaturas del suelo, ambiente y de la caja de control, con el fin de demostrar la eficacia del sistema de riego automatizado con monitorización del nivel de humedad.

[1] Trabajo de grado

[2] Facultad de ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: German Alfonso Osma Pinto, Dr(c). Codirector: Rodolfo Villamizar Mejía, Dr.

SUMMARY

TITLE: DESIGN OF AN IRRIGATION SYSTEM WITH AUTOMATIC HUMIDITY MONITORING[3]

AUTHORS: Laura Viviana Pacheco Rios, Julián Fernando Suarez Vázquez[4]

KEYWORDS: Sprinkling, Drip, Temperature, Humidity, Sensor, Arduino.

The graduation project enabled the design of an irrigation system that efficiently provides the required water for the green roof located at the Electrical Engineering Building. The system design´s main function is to maintain the desired level of moisture required at the substrate of the green roof and this will be based on the roof´s moisture. The system is divided into four areas; two of them working by drip one located at the fifth floor covering an area of 120 m^2 and the other at the roof. The remaining two functioning by sprinkling are located also at the roof and one more by drip covering an area of 360 m^2.

A pressure and flow losses analysis was performed for each area in order to determine the number of necessary sprinklers and drippers. Each area will include a solenoid valve, a sensor of soil moisture and soil temperature Vegetronix and a thermistor sensor in order to measure the temperature into the control box. One data acquisition board will be located for the sensors which will be using a total of four irrigation boards together with 5 XBee® for wireless data transmission.

It's observed that the level of soil moisture represent a significant change by the irrigation system implemented. Field tests performed were measuring soil moisture, soil temperature, ambient temperature and the temperature into the control box, to demonstrate the efficiency of an irrigation system with automatic humidity monitoring.

[3] Degree work.
[4] Physico-mechanical Engineering Faculty. School of Electrical Engineering. Supervisor: German Alfonso Osma Pinto, Dr(c). Co-supervisor: Rodolfo Villamizar Mejía, Dr.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático ha venido en incremento en los últimos años, producto de la contaminación y la falta de responsabilidad con nuestros propios recursos. Por lo que, se ha buscado disminuir el consumo excesivo de energía para alimentar sistemas de regulación de temperatura en las edificaciones, siendo una alternativa viable el uso de sistemas artificiales que logren espacios confortables de trabajo y convivencia; y a la vez que sean amigables con el medio ambiente. Por ello, se ha buscado implementar alternativas ecológicas como los techos verdes, los cuales favorecen temperaturas confortables al interior de las edificaciones eliminando el uso de sistemas artificiales con un alto costo de mantenimiento.

Al realizar una búsqueda de temática y seguimiento de proyectos similares en relación con los techos verdes, condiciones y beneficios de los mismos, se encontró que a nivel internacional son muchos los países que han incursionado en este tipo de aplicaciones, mayormente con el fin de dar un aporte al cambio climático actual, como Alemania; uno de los pioneros en promover estas técnicas. Además, países como China, Japón, Estados Unidos y Canadá están liderando e incentivando la utilización de techos verdes, con fines específicos como la disminución de la temperatura en las edificaciones y ayudar a la descontaminación de las áreas urbanas.

En Colombia, es una práctica reciente que busca desarrollar proyectos de investigación y análisis de los beneficios que los techos verdes proveen en materia ambiental y su influencia para la captura del carbono. Mayormente, se enfocan en la influencia de éstos en condiciones térmicas, ambientales y sociales. Sin embargo, hace falta referenciar como afectará un sistema de riego las condiciones de sostenimiento y desarrollo de las plantas sin dejar de lado los costos de estos.

Con este proyecto se busca diseñar un sistema de riego automático con monitorización de nivel de humedad del suelo, que permita mantener la humedad necesaria de las plantas del techo verde implementado en el Edificio de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander. Con ello, se favorecerá la eficacia en la disminución de la temperatura interna edificaciones sin dejar a un lado la consideración en los costos de implementación.

En el proyecto se presentan los fundamentos teóricos de un sistema de riego, el diseño de éste en cuanto a la estructura y la implementación del control con la respectiva selección de componentes.

Adicionalmente, se muestran los resultados de un piloto implementado para evaluar la efectividad del diseño. De igual manera se facilita un manual con las recomendaciones para la instalación del sistema de riego, el control y el mantenimiento de los elementos y dispositivos.

1. GENERALIDADES Y ANTECEDENTES

Se realiza una descripción de los antecedentes y justificación el desarrollo de este proyecto de grado, además del objetivo general como objetivos específicos que comprenden este trabajo.

1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

Los techos verdes son una buena opción para mantener las condiciones ambientales deseadas en cualquier tipo de construcción, además es una técnica económica y de fácil elaboración.

Gracias a los techos verdes se obtiene un aislamiento térmico para los espacios interiores en zonas donde los niveles de temperatura ambiente son elevados, o no permiten desarrollar actividades de manera confortable. Éstos logran mitigar el uso de aires acondicionados.

Estos techos requieren de un mantenimiento constante para lograr su prolongación, siendo la irrigación de las plantas parte fundamental para ello. El riego que comúnmente se conoce es el manual, a partir del uso de una manguera en horas de la mañana o tarde, según se considere. Este tipo de riego puede provocar estados de poca o excesiva humedad en el suelo de las plantas. Es por tal razón, que se advierte la necesidad del diseño de un sistema de riego que tenga en cuenta requerimientos de funcionamiento, uso racional de agua y valores que garanticen la estabilidad de los techos verdes.

1.2 PLANTEAMIENTO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El Edificio de Ingeniería Eléctrica dentro de las aplicaciones verdes, implementó un techo verde para lograr conservar condiciones de temperatura en el interior del edificio. Sin embargo, las plantas que componen el techo necesitan, de igual manera, preservar su estado; su permanencia depende directamente del tratamiento que se les brinde, por esa razón se diseña un sistema de riego automático con monitorización del nivel de humedad, que favorezca el crecimiento vegetal, el uso eficiente de agua y el aislamiento térmico.

1.3 OBJETIVOS

A continuación se describirán los objetivos generales y específicos para el desarrollo de este proyecto.

1.3.1 Objetivo general

Realizar el diseño de un sistema de riego para las dos cubiertas verdes del Edificio del Edificio de Ingeniería Eléctrica, a partir de la medición y control del nivel de humedad.

1.3.2 Objetivos específicos

El cumplimiento del objetivo general del trabajo de grado comprende:

- Realizar el diseño de un sistema de riego para las cubiertas verdes.
- Seleccionar los equipos e instrumentación necesarios para el diseño.
- Diseñar el programa de control para el sistema de riego.
- Realizar un documento con el manual de montaje y mantenimiento del sistema para su posterior implementación.

1.4 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El escrito se encuentra dividido de acuerdo a los pasos que se siguieron para el desarrollo del proyecto de grado. En cada uno de las etapas se presenta una descripción detallada de la ejecución que se llevó a cabo.

En general comprende:

- Fundamentos teóricos
- Diseño y control del sistema de riego
- Resultados y selección de componentes board de riego
- P&ID
- Manual de montaje para las zonas de control y estructura de riego
- Manual de mantenimiento

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En la Universidad Industrial de Santander, el Edificio de Ingeniería Eléctrica es piloto de algunas aplicaciones verdes, que se encuentran ubicadas en el quinto piso y la terraza. Allí se implementaron techos verdes para favorecer los niveles de temperatura interna del edificio.

Con el fin de mantener las plantas en un estado equilibrado, se diseñó un sistema de riego; para su desarrollo se realizó un estudio de las necesidades del suelo, las plantas y las condiciones ambientales de humedad y temperatura. El proceso de elaboración de cada una de las partes del diseño es presentado a lo largo de este texto. En las Figuras 1 y 2 se presentan los techos verdes.

Figura 1. Techo verde piso 5 Edificio de Ingeniería Eléctrica

Figura 2. Techo verde terraza Edificio de Ingeniería Eléctrica

2.1 EVAPOTRANSPIRACIÓN

En la evapotranspiración se consideran dos procesos diferentes: la evaporación y la transpiración; por tanto, se explica como la pérdida de agua por la evaporación directa desde el suelo, la planta y la transpiración de la superficie (Shahidian et al., 2009). Ésta se puede hallar en función de diversos métodos Tabla 1 (Shahidian et al., 2009).

Tabla 1. Métodos Evapotranspiración

METODO	DESCRIPCIÓN	FORMULA
Penman-Monteith	Se considera como el método más confiable y preciso, aunque el utilizar tantos parámetros, es el más costoso debido al procesamiento y adquisición de los datos, siendo poco rentable para grandes áreas de riego	$ET_0 = \frac{0{,}408\Delta\ R_n - G\ + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma\ 1 + 034u_2}$
Priestley-Taylor	Solo necesita radiación y temperatura para medir la evapotranspiración, la cual es más dependiente de estos parámetros que de la misma humedad relativa	$ET_0 = \alpha \frac{\Delta\ R_n - G}{\Delta + \gamma} + \beta$
Makkink Method	Forma reducida del método Priestley-Taylor	$ET_0 = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \times \frac{R_s}{2{,}45} + \beta$

Turc Method	Diseñado para climas húmedos y sólo utiliza dos parámetros (radiación y temperatura)	$ET_0 = \alpha \quad 23{,}9001 R_s \ + 50 \quad \frac{T}{T+15}$
Jensen y Haise	Utiliza los parámetros de temperatura y radiación	$ET_0 = \alpha \frac{TR_s}{2{,}450} + \beta$
Hargreaves-Samanni	Utiliza los parámetros de temperatura y radiación siendo necesario calibrarlo de acuerdo al área donde se implementará	$ET_0 = \alpha \ T + 17{,}78 \quad T_{max} - T_{min} \ ^{0{,}5} R_s$

Donde:

ETo = evapotranspiración de referencia [mm /día]
Rn = radiación neta en la superficie de cultivo [MJ / m^2 * día]
G = densidad de flujo de calor del suelo [MJ / m^2 * día]
T = temperatura del aire a 2 metros de altura [°C]
u_2 = velocidad del viento a dos metros de altura [m / s]
e_s = saturación de vapor de presión [KPa]
e_a = presión actual de vapor [KPa]
$e_s - e_a$ = déficit de presión en el vapor de saturación [KPa]
Δ = pendiente en la curva de presión de vapor [KPa / °C]
γ = constante psicrométrica [KPa / °C]
α = factor de calibración
β = factor de calibración
$R_{s\,=}$ radiación solar incidente

2.2 SISTEMA DE RIEGO ASPERSIÓN – GOTEO

Debido a las fortalezas y debilidades de cada sistema, se realiza una comparación entre sistemas de riego por goteo y aspersión.

2.2.1 Riego por goteo

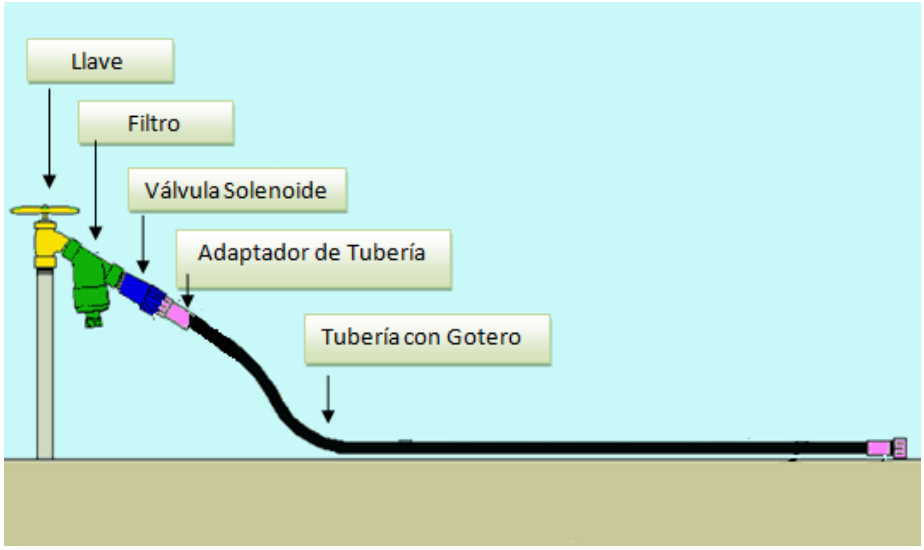
Es el método más eficiente de irrigación; por lo general los aspersores tienen una eficiencia de 75% – 85%, mientras que para el riego por goteo es mayor al 90%; esto significa un menor consumo de agua. Otras ventajas del goteo con respecto a la aspersión, es su fácil instalación, diseño y de bajo costo.

El riego por goteo es más lento que la aspersión; esto debido a que es un sistema diseñado para irrigar por medio de gotas; sin embargo, permite tener un control más preciso del agua, porque no sobre-irriga una planta y evita los excesos de humedad.

Por esta razón, la eficiencia del riego por goteo radica en que el agua se filtra por el sustrato antes de evaporarse; puesto que cae directamente en éste y no es dispersado por el aire como en la aspersión. Además el agua en este tipo de riego es aplicada en la zona directa donde se desea.

El sistema se encuentra compuesto por válvulas, filtro, adaptador de tubería, tubería de gotero, como se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Sistema de riego por goteo



TIPOS DE GOTEROS: Existen los goteros compensados, estos se usan cuando hay diferencias de altura y por tanto cambios de presión. También existen los emisores de flujo para áreas turbulentas.

Existen goteros de diversos flujos que se usan de acuerdo al tipo de sustrato, como los emisores de 2,0 (L/h) utilizados en la mayoría de suelos o los emisores 4,0 (L/h) para suelos arenosos.

Cuando las plantas o los árboles son grandes con gran espaciado entre ellos, se utilizan 1 o más goteros; cuando son de tamaño reducido y están unas junto a otras, se usa un espaciado de 45 (cm) – 60 (cm) como mínimo.

Para determinar el flujo nominal de cada gotero es necesario determinar cómo será el desplazamiento de la gota y este comportamiento depende del tipo de sustrato.

En el caso del techo verde del Edificio de Ingeniería Eléctrica, el suelo tiene una composición de tierra, compost, partes de carbón y madera; por lo tanto, el sustrato tiene una composición media y de acuerdo a (Irrigation Tutorials.com. Stryker, 2014), se puede utilizar un espaciado de 50 (cm) entre goteros con un emisor de 2,0 (L/h).

2.2.2 Riego por aspersión

Cada sistema necesita un aspersor que se adapte a la zona de riego y a las presiones de trabajo. A continuación se presentan dos tipos de aspersores de acuerdo al método que utilizan para distribuir agua, dentro de las diversas tecnologías estas son las más conocidas:

ROCÍO (SPRAY): Son cabezas que rocían en forma de abanico de agua, algunos de ellos pueden controlar el ángulo de riego; ya sea en medio círculo, completo, 90° o de acuerdo a las necesidades a las necesidades variando el radio de riego. La tecnología y diseño de estos aspersores limita el radio de riego con respecto a los sistemas por rotor.

ROTOR: Los aspersores con rotor tienen un patrón de riego rotatorio de agua de ida y de vuelta o en círculos a través del terreno; un ejemplo son los rotores de impacto (Irrigation Tutorials.com. Stryker, 2013), el cual va de atrás hacia adelante, disparando ráfagas de agua. Este tipo de rotores están siendo reemplazados por cabezas más eficientes, silenciosas y de bajo mantenimiento; como los son los rotores de flujo simple (multi-stream rotors). La desventaja de los rotores es que necesitan presión mayor a 40 PSI para funcionar correctamente (Irrigation Tutorials.com. Stryker, 2013).

CABEZA ROTATORIA (ROTARY NOZZLE): Existen cabezas rotatorias del tamaño de las cabezas de rocío que tienen un menor radio de irrigación con respecto a los rotores y son más eficientes; además, de ser más económicas ajustándose a áreas más pequeñas, por lo que se evaluaron unos criterios de selección Tabla 2 (Shahidian et al., 2009).

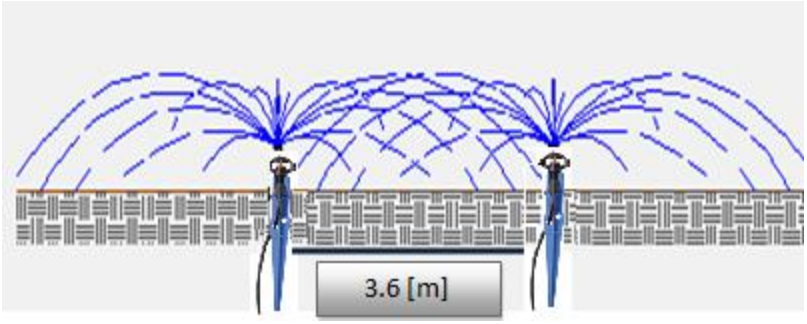
Tabla 2. Criterios de selección

TIPO ASPERSOR	CRITERIO SELECCIÓN
Rocío o cabeza rotatoria	Presión estática menor a 40 (PSI) o La curva a regar es menor 6 (m) de radio
Cabeza rotatoria	Área larga y estrecha entre 3,6 (m) y 8,5 (m) de ancho
Rotor	Área cuadrada mayor a 9,1 (m) x 9,1 (m) en dimensiones

Cada aspersor debe traslapar en cierto porcentaje el área al aspersor adyacente; es decir, el aspersor tiene un radio de riego circular para cubrir todos los espacios entre ellos y es necesario que se sobrepongan un poco sin dejar espacios Figura 4 (NETAFIM, 2009). Asimismo, se debe cumplir que los aspersores tengan un espaciado específico Figura 5 (NETAFIM, 2009). Ya que el agua que suministra un aspersor no es igual en el área externa que en la interna.

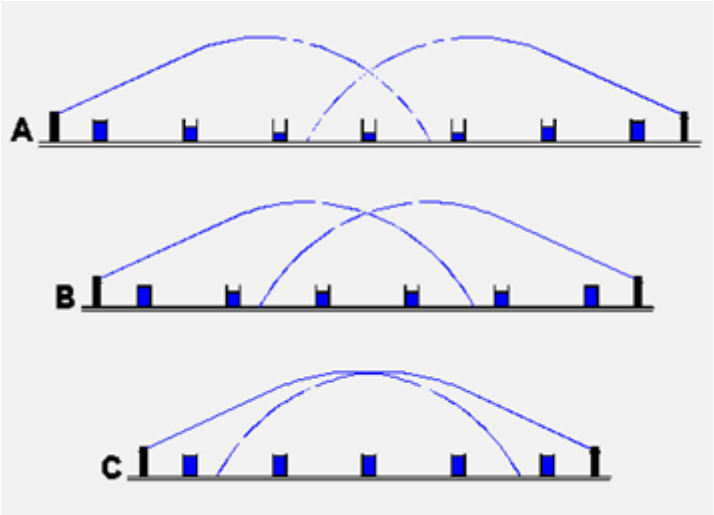
Figura 4. Cobertura de riego de los aspersores (NETAFIM, 2009)

Figura 5. Área de riego del aspersor (NETAFIM, 2009)



El radio de riego debería ser igual a la distancia entre aspersores; sin embargo, se puede trabajar con un radio un poco mayor, para permitir mayor flexibilidad del sistema sin afectar la calidad del riego. De los aspersores que se utilizarán se conoce el diámetro de riego y no el radio; entonces, este se multiplica por 0,6 para determinar el espaciado máximo entre cabezas, de esta manera se aumenta el área de riego; puesto que usualmente los aspersores tienen un riego más fuerte en la parte más cercana al aspersor que en la parte externa Figura 6 (NETAFIM, 2009).

Figura 6. Cobertura de riego, según la posición de los aspersores (NETAFIM, 2009)



De esta forma la distribución del agua es más uniforme en el sistema sin dejar lugares más húmedos que otros, garantizando la eficiencia de los sensores sin importar la ubicación.

Teniendo en cuenta que el sistema se implementará en el techo verde del Edificio de Ingeniería Eléctrica, donde se presenta viento por la altura, es conveniente ubicar los aspersores a la misma distancia que el radio de riego y como complemento multiplicar el diámetro por un coeficiente 0,5.

2.3 MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA

Un sensor de temperatura convierte una señal térmica en una señal física de otra naturaleza; en donde se obtiene como salida un voltaje, corriente, variación en amplitud u otras formas de señal. De tal manera, es necesario determinar el circuito de acople adecuado para la señal sin sacrificar exactitud (TEXAS INSTRUMENT, 2013); para ello es importante analizar:

- La influencia de las señales.
- El error generado por el convertidor A/D.
- Si la salida del sensor es o no lineal.
- La capacidad del sensor de medir una y otra vez el mismo valor en similares condiciones; es decir, la precisión del sensor.
- El tiempo de respuesta del sensor

Por esta razón, se compararon 4 tipo de sensores analógicos entre ellos: termistores, termocuplas, RTD's y circuitos integrados (IC's). A continuación se presenta un resumen de las ventajas y desventajas de cada uno.

2.3.1 Termistor

Es un semiconductor hecho de dos óxidos metálicos unidos entre sí en forma de esfera, disco u otra; recubierto con epóxido o vidrio ("SENSORES," n.d.) y una de sus grandes ventajas es el bajo costo.

Los termistores pueden medir temperaturas desde -50°C hasta los 300°C; este rango es adecuado para la implementación del sistema, porque miden temperatura ambiente. Además de ello son sensores resistivos, la exactitud de la medición no se afecta por la tensión de alimentación y por último son de fácil implementación al solo usar dos hilos ("SENSORES," n.d.).

Debido a que los termistores no son lineales, estos presentan una curva exponencial; por lo tanto a mayor resistencia mayor será el error en la medición. Comúnmente presentan tolerancias de 1, 3 y 5% en su resistencia, esto significa que a menor resistencia, su corriente de alimentación es mayor; sin embargo, estos termistores deben tener una corriente de excitación pequeña para evitar el auto calentamiento y de paso errores de medición.

A temperaturas altas y bajas la curva del termistor se empieza a saturar, en estos rangos se afecta la exactitud en la medición de la temperatura, para contrarrestarlo se utiliza un ADC de alta resolución. También es de consideración conocer que los termistores tienden a tener una mayor impedancia en la salida que los sensores analógicos (TEXAS INSTRUMENT, 2013).

2.3.2 Sensor analógico de circuito integrado (IC)

Son sensores de temperatura analógicos formados por circuitos integrados todos en un encapsulado; presentan salidas lineales proporcionales a la temperatura, con una medida de temperatura máxima de 150°C. Una ventaja es que no requiere componentes adicionales que si necesita el termistor como resistencias y su consumo de corriente es mínimo y constante; una consideración importante en aplicaciones de ahorro de energía.

La impedancia de estos sensores es baja a comparación del termistor, sin requerir buffer para casos específicos y su implementación es sencilla.

Las desventajas del sensor son el limitado rango de temperatura, la necesidad de alimentación y el auto calentamientos por ser un IC (“SENSORES,” n.d.). Por esta razón, su aplicación para la medición de la temperatura ambiente a la intemperie sobre radiación directa es restringida; porque estas condiciones afectarían su funcionamiento e inclusive su vida útil. Por último estos sensores necesitan un amplificador con alta ganancia para lograr la mayor resolución.

2.3.3 Termocupla

El funcionamiento se basa en el principio físico de la unión de dos alambres metálicos de diferente composición, los cuales producen una diferencia de potencia en sus extremos en función de la temperatura a la cual se encuentra la unión; esto a su vez produce un voltaje del orden de mV con una salida no lineal.

Existen diversos tipos de termocuplas en función a la composición de la unión. Estos tipos se denotan por letras mayúsculas de acuerdo a las convenciones

establecidas por el American National Standards Institute (ANSI) (“SENSORES,” n.d.), Tabla A.1 ubicada en el Anexo A.

Una diferencia significativa entre la termocupla y los sensores anteriormente mencionados, es la necesidad de una referencia para realizar mediciones absolutas en ésta; aunque para realizar una medida más precisa se utilizan termocuplas de 3 y 4 hilos. Sin embargo, los sensores de este tipo son más difíciles de implementar, sobre todo por la necesidad de conocer los voltajes de cada uno de los hilos y la implementación de un amplificador para poder medir la salida.

La ventaja es que no requieren fuente de alimentación, además, son económicas y de fácil construcción, poseen amplios rangos de medición; las más populares son las de tipo J, K y T.

Por otro lado, las desventajas son la exigencia de una instrumentación exacta debido al bajo voltaje que generan y su baja sensibilidad; asimismo, necesitan otro sensor para realizar la compensación de la unión fría.

2.3.4 RTD

Se caracteriza por su alta precisión y excelente estabilidad. Mide temperaturas entre 0°C a 450°C; su resistencia metálica es de alambres finos o de película de metales como cobre, plata, oro, tungsteno, níquel y platino, este último es el más común por su alta estabilidad y resistividad con respecto a los otros metales. Su resistencia varía proporcionalmente con la temperatura. Las RTD’s de platino son mayormente conocidas como pt100 (“SENSORES,” n.d.).

Entre las desventajas se resalta:

- Costo elevado
- Baja resistencia (100Ω a 0°C) y sensibilidad (0,4 Ω/°C), esta condición afecta la medición a dos hilos, por lo tanto exige utilizar 4 hilos; de los cuales dos llevan y traen la corriente necesaria para alimentar el sensor y los otros dos se emplean para la medición de la tensión de salida.
- Debido a la excitación de corriente constante disipa potencia, generando calentamiento de manera que incrementa la temperatura en la medición; por lo tanto necesita una corriente de excitación lo más pequeña posible para reducir este error de medición.

De acuerdo a lo mencionado, se acogió el uso de termistores para medir la temperatura ambiente en el techo del Edificio de Ingeniería Eléctrica; por las siguientes características: bajo costo, fácil implementación y rango adecuado de temperatura.

2.3.5 Sensor Vegetronix de temperatura del suelo

El sensor de temperatura del suelo a utilizar es un THERM200; con una precisión de ±0,5 (°C), un voltaje de alimentación de 3,6 (V) a 20 (V), una resolución de 0,125 (°C) y un consumo de potencia menor a 3 (mA), en un rango de operación entre -40 y 85 (°C). Estas condiciones hacen que sea un sensor versátil, preciso y eficiente; también es de bajo costo comparado con otros del mercado. Una de las principales ventajas es la linealidad que presenta en la salida, con un valor entre 0 (V) y 3 (V).

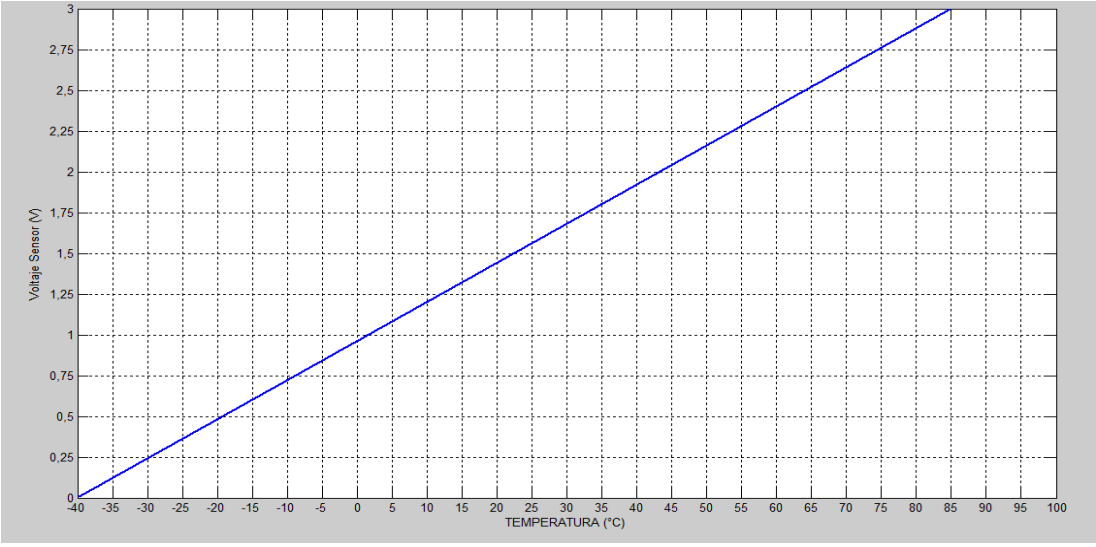
Como la salida es lineal, se puede calcular la temperatura del suelo por medio de (2.1).

$$Temperatura\ (ºC)\ =\ Vout * 41{,}67\ -\ 40 \qquad (2.1)$$

Curva característica del sensor de temperatura

Este sensor presenta un comportamiento lineal que se muestra en la Figura 7, en comparación con el termistor; aunque requiere estar en el ambiente de medición como mínimo 15 minutos, para lograr un resultado preciso de la temperatura. Por esta razón, no es útil cuando hay que medir cambios bruscos de temperatura ambiente.

Figura 7. Comportamiento del sensor de temperatura



Una de las razones por las cuales se seleccionó este sensor y no un termistor para medir temperatura del suelo, es debido a la resistencia del material del sensor, puesto que los suelos tienen sales y minerales, que pueden corroer rápidamente el dispositivo; a pesar que el sensor trae una cobertura de acero inoxidable.

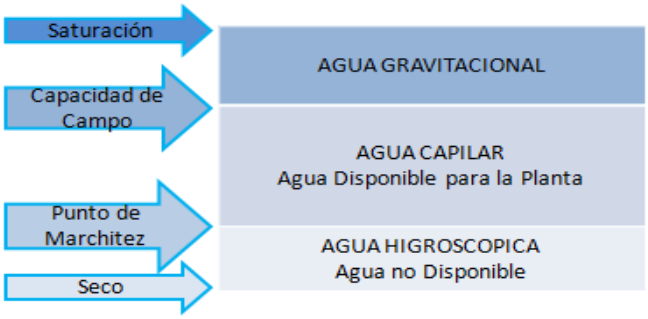
2.4 MEDICIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO

Los sensores de humedad miden la conductividad eléctrica del suelo, puesto que al ser de tipo capacitivo la conductividad eléctrica del sustrato varía de acuerdo al nivel de agua; es decir, es mayor el voltaje de salida cuando éste tiene mayor nivel de agua en el sustrato.

Por tal razón, para lograr una mejor comprensión en cómo se realiza la medición de la humedad del suelo, se debe conocer la capacidad de almacenamiento de agua en el mismo, con el fin de determinar cuál es la capacidad de agua en el sustrato disponible para la planta Figura 8. (Díaz V, Tomás. Pérez D, Wilfredo. López G, Aldo. Partidas R,., Leopoldo. Suárez, 2009).

De acuerdo a la Figura 8 (Díaz V, Tomás. Pérez D, Wilfredo. López G, Aldo. Partidas R,., Leopoldo. Suárez, 2009) los parámetros de almacenamiento del agua en el suelo son determinados por la saturación, capacidad de campo, punto de marchitez y seco del suelo, que afectan como es absorbida el agua por parte de la planta en este. El riego debe sobrepasar el punto de marchitez en el sustrato para que la planta pueda absorber el agua necesaria para su desarrollo aunque no debe saturar el sustrato ya que la capacidad de drenaje de esta se vuelve más lento y puede afectar el desarrollo siendo ideal un riego que no sea pobre ni excesivo en el suministro de agua.

Figura 8. Parámetros del agua en el suelo



CAPACIDAD DE CAMPO: Contenido de agua en el suelo, posterior a un riego pesado y cuando su capacidad de drenar se vuelve más lenta.

PUNTO DE MARCHITEZ PERMANENTE: En este punto el contenido de agua en el suelo se encuentra en un punto crítico en el cual las plantas se marchitan sin importar que se le agregue agua. Por debajo de este punto, el agua higros-

cópica[5] es cuando las raíces no pueden absorber el agua del suelo debido a que este retiene el agua de forma que no permite ser absorbida.

AGUA CAPILAR: Es el agua disponible para la planta, es decir la cantidad de agua que puede absorber la planta y depende de la textura del suelo, la densidad aparente de este y su estructura (Díaz V, Tomás. Pérez D, Wilfredo. López G, Aldo. Partidas R,., Leopoldo. Suárez, 2009).

Se estudiaron dos tipos de sensores producidos por Vegetronix, un sensor de humedad y uno de temperatura del suelo. Este último mide la temperatura bajo la superficie, con el fin de analizar la efectividad del aislamiento en el techo verde.

2.4.1 Sensor Vegetronix de humedad del suelo

El sensor VH400 es de bajo costo, bajo consumo de energía, durabilidad, alta precisión, tamaño compacto, insensible a la sal, entrada de voltaje regulada y un amplio rango de voltaje de entrada. A pesar del bajo costo, es de gran precisión y calidad, lo que garantiza su implementación.

El sensor cuenta con un voltaje de alimentación entre 3,3 (V) a 20 (VDC), con una temperatura de operación de -40 a 85 (°C); por lo tanto debe ser alimentado mínimo por 400 (ms) para dar una medición estable. Esta varía entre 0 (V) y 3 (V) de acuerdo al contenido volumétrico de agua del suelo (VWC-siglas en inglés), 3 (V) es el punto más alto de agua en el sustrato; sin embargo, aunque sea el valor máximo no alcanza un valor de tal magnitud por la capilaridad del suelo; es decir, cuando se sature, el agua se deposita por encima del sustrato, en este caso se presenta un contenido volumétrico de agua VWC máximo de 50 aproximadamente, que corresponde de acuerdo a los datos del fabricante a una salida de voltaje de 2,2 (V).

El consumo de potencia del sensor es de 7 (mW), que representa un consumo bajo acorde para la aplicación en este proyecto. El sensor tiene una precisión de 2% a 25 (°C), considerado un buen valor, dado que al brindar una salida máxima de 3 (V), tendrá un error de ±0,06 (V).

2.4.2 Curva característica del sensor de humedad del suelo

El sensor tiene un comportamiento lineal por trozos, que se puede aproximar con 4 segmentos de la forma (VEGETRONIX, 2008):

[5] Agua higroscópica es el agua directamente absorbida de la humedad del aire, la cual se adhiere a la superficie del suelo, creando una fina película sobre este, siendo imposible su succión por parte de las raíces.

$$VWC = mV - b \tag{2.2}$$

Donde *m* es la pendiente de la curva característica del señor

$$m = \frac{VWC_2 - VWC_1}{V_2 - V_1} \tag{2.3}$$

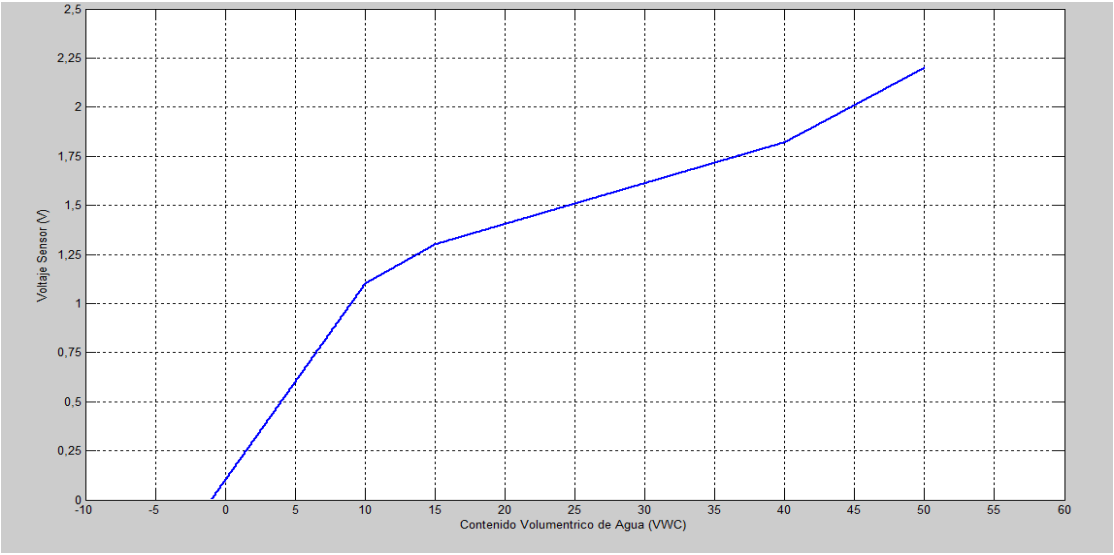
Ahora; de acuerdo a los datos del fabricante, se pueden utilizar las ecuaciones de los cuatro segmentos de la curva, para determinar el contenido volumétrico de agua, tal como muestra la Tabla 3 (VEGETRONIX, 2008).

Tabla 3. VWC vs Rango de voltaje

Rango de Voltaje (V)	Ecuación
0 – 1,1	VWC = 10V – 1
1,1 – 1,3	VWC = 25V – 17,5
1,3 – 1,82	VWC = 48,08V – 47,5
1,82 – 2,2	VWC = 26,32V – 7,89

En la Figura 9 se puede observar el comportamiento del sensor de acuerdo a los voltajes suministrado.

Figura 9. Comportamiento del sensor de humedad



3. DISEÑO Y CONTROL DEL SISTEMA DE RIEGO

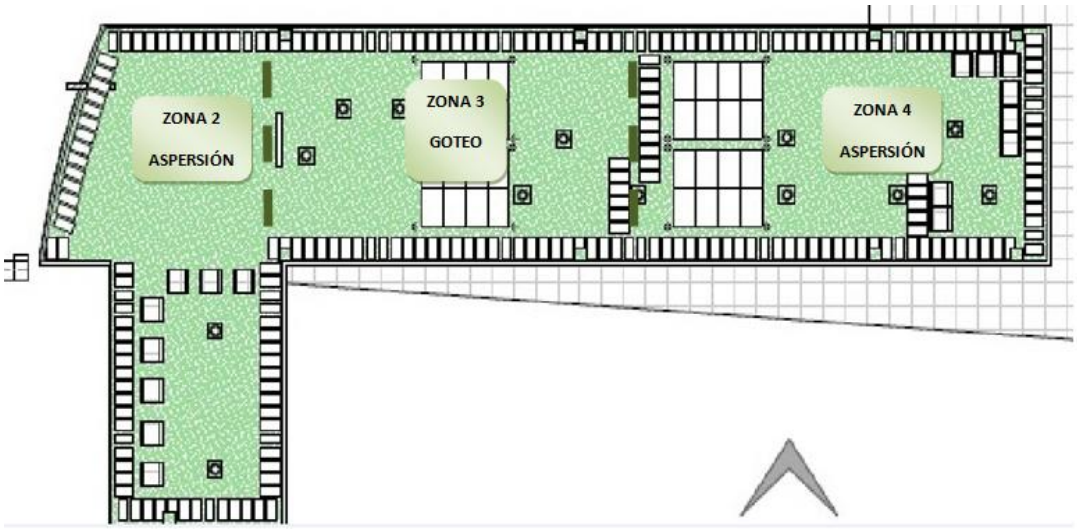
En este capítulo se presentan las consideraciones para el diseño de infraestructura de riego como componentes de acuerdo a las pérdidas de presión, flujo suministrado, área de trabajo de los aspersores y goteros, tipos de válvulas, filtrado, tubería de alimentación y tuberías laterales, además, de la selección de sensores de humedad y temperatura del suelo, como sensores para la medición de temperatura ambiente para el sistema de control.

3.1 DISEÑO DEL SISTEMA DE RIEGO

El sistema de riego se encuentra basado en cuatro zonas distribuidas uniformemente de manera que se trate de obtener áreas similares que se muestran en las figuras 10 y 11 (Universidad Industrial de Santander, 2010).

Figura 10. Distribución de zonas de riego quinto piso

Figura 11. Distribución de zonas de riego sexto piso



Como se puede observar, se ubica una zona en el quinto piso y 3 zonas en la terraza. Para esto se toma la medida de cada zona, siendo las áreas de implementación las que se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Área por zona de implementación

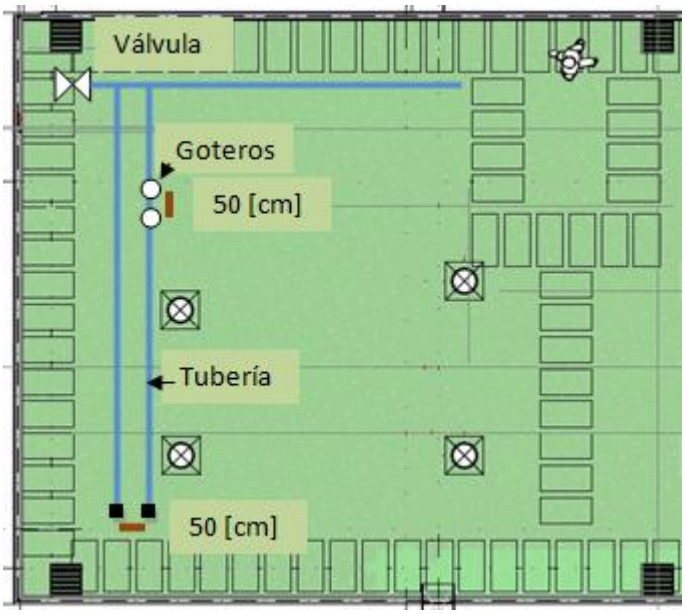
Zona	Área (m^2)
1	120,00
2	96,68
3	109,27
4	116,25

Teniendo en cuenta que se lleva a cabo el riego por medio de dos técnicas: goteo y aspersión, se determina que las zonas 1 y 3 sean por goteo mientras que las zonas 2 y 4 por aspersión. Esta distribución permite analizar posteriormente los efectos del tipo de riego en cada zona respectivamente.

Es importante resaltar que la operación del sistema se base en una buena presión y flujo de agua; por lo que, cuando alguna de las zonas presente fallas, se deberá a causas generadas por la presión y flujo o por solo uno de estos factores.

GOTEO: Para tener un solapamiento en el riego del techo se ubicaron los emisores cada 50 (cm), como se muestra en la Figura 12.

Figura 12. Ubicación de los goteros



Tomando como ejemplo las medidas de la zona 1, que corresponde a 16 (m) de largo y 7,5 (m) de ancho; se ubican los goteros cada 50 (cm), en cada línea lateral separadas cada 50 (cm), creando cuadriculas de 50x50 (cm), las cuales en el área total de la zona 1 dan un total de 480 goteros, siendo 15 goteros por línea lateral, para ver el diseño de riego en cada zona respectivamente ver Anexo D. Cada gotero puede proveer 2,0 (L/h) de agua; si multiplicamos el flujo de agua suministrado por cada gotero por la cantidad de goteros en la zona 1 que es de 480 unidades, se obtiene un consumo de 960 (L/h) de agua en esta zona.

Ahora esto no quiere decir que el sistema se encuentre abierto durante 1 hora constante, ya que muchas veces es necesario unos pocos minutos de riego para suplir las necesidades hídricas de la planta, aunque el tiempo de riego varía dependiendo del tipo de planta, sustrato y radiación solar incidente.

ASPERSIÓN: Los aspersores son sistemas de riego que simulan la lluvia al dispersar las gotas de agua sobre el área, de la forma más uniforme posible, la cual puede variar de acuerdo al aspersor a utilizar, la presión de trabajo, tipo de tecnología utilizado y diámetro de aspersión, por lo que se ha decidido utilizar el micro-aspersor Netafim SuperNet LR presentado en la Figura 13 con cabeza rotatoria (NETAFIM, n.d.), ya que su radio de aspersión se adapta al área de las zonas a irrigar y además permite una irrigación uniforme sin importar la variación de la presión; desde que se encuentre en el rango de operación (1,5-4,0 BAR). (NETAFIM, 2009).

Figura 13. Micro-aspersor Netafim SuperNet LR (NETAFIM, n.d.)

Como se puede observar en la Tabla A.2 ubicado en el Anexo A, la cabeza del aspersor de 30 (lt/h) tiene un diámetro de riego de 6 (m) uniforme en un rango de presión de trabajo de (1,5-4,0 BAR), por lo que será ideal para el área a irrigar (NETAFIM, n.d.).

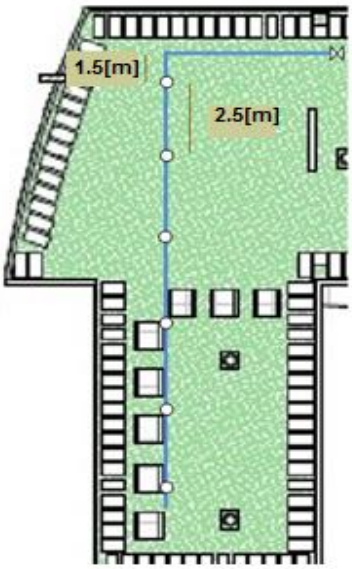
CANTIDAD DE ASPERSORES

El valor máximo seguro para la tubería de suministro de 1/2" es de 6 (GPM) Tabla A.3 (Irrigation Tutorials.com. Stryker, 2014), a partir de esto se determina la cantidad de aspersores; ya que el aspersor tiene un diámetro de 6 (m), se debe solapar el radio de cada aspersor, pero debido a que las condiciones de viento en el techo verdes son un poco altas se utiliza un factor de 0.4 para tener un riego más uniforme, entonces:

Área del aspersor: 6 (m) x 0.4 = 2.4 (m)

En la Figura 14 se observa el distanciamiento entre las cabezas de los aspersores el cual se aproxima a 2.5 (m) entre cada uno para tener un distanciamiento más uniforme entre aspersores de acuerdo al área a irrigar y de 1.5 (m) en el extremo de la línea, dando un total de 6 aspersores por línea que da como total 12 aspersores en dos líneas para la zona 2. Los doce aspersores consumen 30 (lt/h) de agua cada uno, los cuales al multiplicar por 12 aspersores dan un total de 360 (lt/h) que pasados a GPM son 1.58 aproximadamente.

Figura 14. Ubicación de los aspersores



Ahora para un flujo de 6 GPM que es igual a

$$6\ GPM\ \times\ 3{,}78\ = 22{,}68(\ lt/min) \tag{3.1}$$

Se obtienen

$$22{,}68\ \frac{lt}{min} \times \frac{60\ min}{1\ h}\ =\ 1360{,}8(\ lt/h) \tag{3.2}$$

Que equivale a

$$cantidad\ aspersores\ maxima = \frac{flujo\ en\ \frac{lt}{h}}{flujo\ aspersor\ en\ \frac{lt}{h}} = \#\ maximo\ aspersores \tag{3.3}$$

$$cantidad\ aspersores\ maxima = \frac{1360.8(\frac{lt}{h})}{30\ (\frac{lt}{h})} = 45\ aspersores \tag{3.4}$$

De acuerdo a los cálculos, ya se tiene el número de aspersores máximo posible por zona, entonces se confirma que el sistema puede alimentar un máximo de 45 aspersores por zona con un flujo de 30 (L/h) cada uno sin generar ningún contratiempo, porque es menor la cantidad de aspersores necesaria que el número máximo.

La presión disponible para los aspersores es de 25 (PSI) e independientemente de la cantidad de aspersores esta no varía; es decir, si se conecta 1 aspersor o 10 la presión de trabajo es igual.

Se recomienda no combinar diversas marcas o tipos de aspersores en una sola zona, por las diferencias en el patrón de riego, flujos de operación y presiones de trabajo; lo que puede generar zonas secas, sobre-irrigadas o una combinación.

Al tomar en cuenta las diversas pérdidas de presión generadas por los componentes presentados en la Tabla 5 y restarlas a la presión suministrada por la alimentación, se obtiene la presión de trabajo del aspersor en el sistema, la cual se calcula en cada piso donde se va a realizar el montaje del sistema de riego, como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 5. Pérdidas de presión

COMPONENTE	PÉRDIDAS DE PRESIÓN (PSI)
Válvula weather matic 12000 series 1”	2
Filtro 1” amiad	1
Tubería principal 1”	1
Tubería lateral	0,33
Pérdidas desde la motobomba hasta el 6to piso	4,33
Pérdida total	8,66

Tabla 6. Presión de trabajo aspersores

PISO	PRESIÓN DE TRABAJO ASPERSORES (PSI)
5to	28,34
6to	25,34

3.1.1 Análisis de presión y flujo

Para diseñar un sistema de riego preciso se debe analizar la presión y flujo del suministro de agua, que en este caso son dos llaves de 3/4'' con una tubería de alimentación de 1/2'', distribuidas de a una por cada piso.

Para medir la presión suministrada por cada llave, se utiliza un manómetro marca Astro con un rango de medición de 0-150 libras por pulgada cuadrada (psi-siglas en inglés: pounds-force per square inch), con medidor inmerso en glicerina para una mayor precisión.

Durante la prueba de medición se realizaron 3 medidas en cada suministro de agua y como resultado se obtuvo un promedio de cada una:

- Presión quinto piso: 37 (PSI)
- Presión sexto piso: 34 (PSI)

Estos resultados son coherentes teniendo en cuenta las diferencias de presión por la altura y además debido a que la presión en el edificio es suministrada por una motobomba.

En cuanto al cálculo del flujo o caudal máximo de las llaves se realiza una medición física; es decir, tomando el tiempo de llenado de un envase de plástico con un volumen específico.

Así mismo se tiene en cuenta la Tabla A.3 (Irrigation Tutorials.com. Stryker, 2014), donde se presentan los galones por minuto (GPM) de acuerdo al tipo de tubería y el diámetro de esta respectivamente.

El flujo de agua se determina por el diámetro de la tubería más restrictiva; es decir, la tubería más pequeña porque esta es la que más afecta el flujo del sistema, no obstante si se desea aumentar el flujo de agua para incrementar la capacidad del sistema se recomienda trabajar hasta el máximo de velocidad de 10 [ft/s] de acuerdo a lo que se muestra en la Tabla A.4 ubicada en el Anexo A (Irrigation Tutorials.com. Stryker, 2014); sin embargo, se debe tener presente que con estos valores se expone a un desgaste de la tubería; por lo que, lo ideal es trabajar con los valores indicados en la Tabla A.3 ubicada en el Anexo A.

CTS: Tamaño del tubo de cobre, por sus siglas en inglés “Copper Tube Size” (Irrigation Tutorials.com. Stryker, 2014).

IPS: Tamaño tubería de hierro, por sus siglas en inglés “Iron Pipe Size” (Irrigation Tutorials.com. Stryker, 2014).

SDR: Relación de dimensión estándar; es la relación entre el espesor de la pared con el diámetro de la tubería. (Irrigation Tutorials.com. Stryker, 2014)

Existen otras formas para determinar el flujo del sistema de una manera más precisa; sin embargo, se incurre en cálculos adicionales laboriosos para un diseñador, porque se debe conocer la velocidad del agua y esto a su vez hace necesario un medidor de flujo o conocer las pérdidas por fricción de la tubería, tipo de tubería, variaciones en el diámetro de la tubería interna, la medida en cada tipo de tubería, la altura desde la motobomba al suministro de agua y la potencia de la misma; por lo tanto no se entra a evaluar este método, debido a que solo se necesita un valor aproximado de flujo para consideraciones del diseño y capacidades del sistema.

Para la medición del flujo se utiliza un envase plástico con una capacidad de 12 litros y un cronómetro para medir el tiempo de llenado del envase, aunque este método es para determinar si se encuentra disponible el valor máximo seguro de acuerdo a la Tabla A.3.

Para realizar esta prueba se mantiene la llave completamente abierta proporcionando su flujo máximo, en este momento se pone el envase de 12 litros y se toma el tiempo con el cronómetro hasta que el envase cumpla con la medida, obteniendo los valores para cada piso de acuerdo a la Tabla 7.

Tabla 7. Medidas de tiempo para cada piso

Piso 5		Piso 6	
Tiempo(s)	**Cantidad (L)**	**Tiempo (s)**	**Cantidad (L)**
15,35	12	17,97	12
17,26	12	19,02	12
17,27	12	20,16	12

De acuerdo a la Tabla 7, el valor máximo de tiempo es 17,27 [s]; por lo que este es el valor a utilizar porque este es el menor flujo posible suministrado por el sistema, en (3.5) se puede apreciar lo que se requiere para desarrollar el cálculo.

$$\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{t}} \times \frac{60\mathrm{s}}{1\mathrm{min}} = \mathrm{L/min} \tag{3.5}$$

En donde;

C = Capacidad del envase

t= tiempo de llenado del envase

Al remplazar el tiempo máximo de llenado en (3.5) se obtiene

$$\frac{12L}{20{,}16\ s} \times \frac{60s}{1min} = 35{,}71\ (^{L}\ _{min}) \tag{3.6}$$

La unidad de medida necesaria para el flujo de agua es en galones por minutos (GPM), por lo cual:

Si 1 (GPM) equivale a 3,7854118 (L), entonces;

$$\frac{35{,}71\ ^{L}\ min}{3{,}7854118\ L} = 9{,}4335\ \ GPM \tag{3.7}$$

De esta manera se obtiene la Tabla 8 con los flujos aproximados de cada medida.

Tabla 8. Flujo de agua para las medidas tomadas en el piso 5 y 6

Piso 5		Piso 6	
Tiempo (s)	**Flujo (GPM)**	**Tiempo (s)**	**Flujo (GPM)**
15,35	12,3911	17,97	10,5789
17,26	11,0199	19,02	10,0002
17,27	11,0135	20,16	9,4335

Se utiliza el flujo máximo seguro de la Tabla 8, para determinar si el número de goteros y aspersores es acorde con el flujo suministrado de agua y no el valor máximo mostrado en la Tabla A.3, debido a que se puede producir un efecto llamado *water hammer* o martillo de agua. Este término se refiere a una presión que surge por exceder el flujo de agua afectando la integridad de la tubería a largo plazo, ocasionando daños a los puntos débiles de la tubería de alimentación; es por esta razón que se decide utilizar el valor seguro de GPM en la tubería de alimentación de 1/2” (FlexPVC, 2002) (Irrigation Tutorials.com. Stryker, 2014).

Además es de considerar que el martillo de agua es proporcional a la presión del sistema, aunque en este caso la presión es media; es decir, usualmente la presión de suministro normal está entre 50 y 60 (PSI). De igual manera se debe tener en cuenta que la alta velocidad del agua en el sistema de riego puede afectar a futuro la solidez de la tubería de alimentación, efecto conocido como “*scrubbing*” o depuración. (Irrigation Tutorials.com. Stryker, 2014)

Sin embargo, si se cierra la llave manualmente no se produce el efecto de martillo de agua, porque el flujo no es suficientemente rápido para que lo provoque, pero al utilizar una válvula solenoide repercute en el funcionamiento del sistema debido a que cierra instantáneamente el flujo de agua y como consecuencia crea el efecto "*water hammer*", es así como se aconseja trabajar siempre con una velocidad máxima de 7 (ft/s).

Teniendo en cuenta que los aspersores y los goteros trabajan con una presión específica, se debe tomar en consideración el diámetro de riego en función de la presión que alimenta el aspersor y/o gotero. Es por tal razón que se hace necesario conocer en detalle las pérdidas que presenta el sistema, lo que incluye: válvulas, tubería y filtrado, esto con el fin de lograr determinar la presión a la cual funcionan los aspersores y/o goteros. Establecer esta presión permite garantizar el funcionamiento del sistema de forma adecuada, es así como se presenta el diseño respectivo para cada zona, de acuerdo a las condiciones y el tipo de riego.

3.1.2 Filtrado

El filtrado es fundamental para el funcionamiento del sistema de riego, gracias a que ayuda a incrementar la vida útil de los aspersores, goteros y las válvulas; el filtrado evita que sólidos como tierra o materiales orgánicos obstruyan el sistema cuando estos se acumulan.

3.1.3 Tipos de filtros

Existen diversas variedades de filtros de acuerdo al método utilizado para filtrar el agua; a continuación se mencionan los filtros más comerciales, de gran disponibilidad en el mercado:

MALLA: Son los filtros más comunes y menos costosos del mercado. Son excelentes para remover partículas grandes del agua como arena y arcilla; sin embargo, no lo son para remover partículas orgánicas como algas y moho. Este tipo de filtros se limitan por el tamaño de la malla, de acuerdo a esto se filtran partículas de tamaño mayor a ella, la cual puede ser de metal o plástico. La cantidad de filtración de la malla es medida por el tamaño de la malla "mesh size", o por el máximo tamaño en micrones de un objeto que puede pasar a través del filtro (Irrigation Tutorials.com. Stryker, 2011).

DISCO (ANILLOS): Son discos donde se superponen muchos discos de plástico, los cuales presentan pequeños espacios entre sí; por ellos el agua es forzada a pasar debido a la presión, filtrando las partículas más grandes que los espacios. Es de fácil mantenimiento, porque solo es necesario separar los dis-

cos entre si y limpiarlos con agua. Estos filtros son buenos para remover arena y materia orgánica; con la diferencia que generan mayores pérdidas de presión en el sistema siendo generalmente usados en sistemas con motobomba. (Irrigation Tutorials.com. Stryker, 2011)

El suministro de agua en el Edificio de Ingeniería Eléctrica es suministrado por un tanque que almacena agua lluvia y además, mantiene un nivel constante alimentándose por agua del suministro municipal cuando el agua lluvia se hace insuficiente. Es por esta razón que se implementa un filtro de malla, el cual es adecuado para procesar impurezas del sistema que sean poco frecuentes.

El filtro de malla a implementar es un Amiad Tagline de 1" con pérdidas de 1 (PSI) a 6 (GPM) con filtrado de 100 micrones (155 mesh) (AMIAD FILTRATION SYSTEMS LTD, n.d.).

Aunque los sistemas por goteo necesitan mayor filtración que los sistemas por aspersión, no es necesario implementar un filtro diferente, puesto que el suministro de agua no presenta tantas impurezas. No obstante si es necesario tenerlo presente, pues hasta la más mínima partícula puede obstruir los goteros o afectar el funcionamiento de los aspersores. Es por ello que se debe implementar una limpieza constante del filtro para evitar obstrucción de la malla y por consiguiente evitar posibles pérdidas en la presión del sistema.

3.1.4 Tubería

Para determinar qué tubería utilizar para el sistema de irrigación, se debe definir la principal; es decir, la tubería entre el punto de conexión (POC-Point of Connection) al suministro de agua y la válvula de control, pues este es el punto inicial en el sistema (Irrigation Tutorials.com. Stryker, 2013).

Siendo que la tubería principal de irrigación del sistema siempre está llena con agua presurizada, se debe utilizar una tubería de gran calidad debido a la alta presión en ella; además, es el componente del sistema que más sufre por el martillo de agua. Si este elemento del sistema falla puede crear grandes pérdidas de agua.

3.1.5 Tipos de tubería principal

PVC: Los tipos de PVC más utilizados para irrigación son "Schedule 80", "Schedule 40", "clase 315" y "clase 200", normalmente abreviados SCH y C1 para Schedule y clase respectivamente. La más recomendada es SCH 40.

POLIETILENO (PE): Es una tubería de plástico negro flexible que debido a su gran maleabilidad se adapta al terreno fácilmente. Soporta más el frio que el PVC, aunque soporta una presión menor que el PVC, es por esta razón que es propensa a estallar o partirse.

PEX: Es una forma de polietileno reforzado, haciéndolo más fuerte mientras mantiene buena flexibilidad y resistencia al frio a diferencia del PVC, aunque tiene una menor capacidad de carga a igual diámetro de tubería que el PVC y PE (Irrigation Tutorials.com. Stryker, 2013).

TUBERÍA METÁLICA: Compuesta generalmente de cobre o acero galvanizado. Aunque el costo del cobre es elevado su duración es alta, por lo que es posible usarlo en tuberías principales cortas. El acero galvanizado en cambio se corroe internamente disminuyendo con el tiempo el flujo de agua y adicionalmente desprendiendo trozos de acero oxidado que causa grandes problemas en el sistema de irrigación.

De acuerdo al estándar de la industria la presión de la tubería debería ser el doble de la presión de trabajo; entonces, si la presión es de 37 (PSI), la presión que soporte el tubo debe ser del doble, es decir 74 (PSI); esto debido al martillo de agua, porque cuando las válvulas automáticas paran bruscamente, la tubería sufre un incremento de presión brusco también, debido al peso del agua que choca contra la válvula mas la presión existente.

De manera que si la tubería no es de buena calidad o tiene puntos débiles puede ocasionar daños y pérdidas de agua, por lo que para este diseño es posible utilizar tubería de polietileno gracias a su bajo costo, flexibilidad y presión que soporta adaptándose a las necesidades del sistema.

3.1.6 Pérdidas de presión

Cuando se realiza una medición de la presión en el suministro de agua con manómetro, se está haciendo una medida de la presión estática; dado que el agua no está en movimiento por lo que no existen pérdidas de fricción o pérdidas de presión en la tubería. Esto es totalmente opuesto a cuando el sistema se encuentra en funcionamiento.

Para calcular el tamaño de la tubería principal se deben calcular las pérdidas de esta misma y si son muy altas, se debe incrementar el tamaño de la tubería para disminuir las pérdidas de presión por fricción, puesto que a medida que disminuye el tamaño de la tubería incrementa la velocidad del agua y la presión disminuye; es decir, es inversamente proporcional la velocidad a la presión del agua, esto de acuerdo al principio de Bernoulli.

Las pérdidas por presión en tuberías se calculan de acuerdo al tamaño de la tubería y al flujo a través de ella, variando de acuerdo al tipo, por lo que se presentan las tablas de pérdidas de presión en los tipos más comunes de tubería (Irrigation Tutorials.com. Stryker, 2013) (NEIBLING. Howard and ROBBINS, n.d.).

Cuando el sistema está en funcionamiento existen pérdidas de presión por la tubería de alimentación y teniendo en cuenta que el sistema se implementará en el quinto y sexto piso del Edificio de Ingeniería Eléctrica respectivamente, se tiene que por cada metro de distancia vertical las pérdidas son de 0.433 (PSI) aproximadamente (Irrigation Tutorials.com. Stryker, 2013); por tal razón tomando como altura la distancia entre el suministro y cada uno de los pisos (Irrigation Tutorials.com. Stryker, 2013), la pérdida de presión será:

- Pérdida de presión piso 5: 0,433 x 15 = 6,495 (PSI)
- Pérdida de presión piso 6: 0,433 x 18 = 7,794 (PSI)

Las pérdidas de presión en la tubería principal se deben a la turbulencia que se presenta internamente, conocida como pérdidas por fricción.

La cantidad depende del tipo de tubería, el diámetro, la cantidad de agua fluyendo a través de la tubería y el tamaño de la misma. La fórmula que determina las pérdidas por fricción, es la fórmula Williams/Hazen; sin embargo, también se utilizan tablas para calcularlas por el método de Chart (Irrigation Tutorials.com. Stryker, 2011).

Teniendo en cuenta que se va a utilizar tubería de polietileno tanto para la tubería principal como en las laterales, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\frac{perdidas\ \ PSI\ *100}{longitud\ tuberia\ \ m\ \times 3{,}28} = \frac{PSI}{100} \tag{3.8}$$

En la Tabla A.5 ubicada en el Anexo A (Irrigation Tutorials.com. Stryker, 2011), los valores en rojo tienen velocidad mayor a 5 (ft/s). La línea en azul es PSI/100 de acuerdo a las pérdidas deseadas y size, es el diámetro de tubería. Los valores internos, son el flujo máximo disponible para cada tubería en GPM.

Si se desean pérdidas de 1 [PSI] para la zona (zona 2 con tubería más larga de aspersión) y 25 [m] de lateral, entonces en (3.8):

$$\frac{1\ \ PSI\ *100}{25\ \ m\ \times 3{,}28} = 1{,}2195\,\frac{[PSI]}{100} \tag{3.9}$$

El valor que se obtiene de la ecuación es mayor a 1, por lo tanto se usa el valor de 1,5 en la tabla y este corresponde a 11 [GPM] para una tubería de 1”; esto

significa que si se desea 1 [PSI] de perdidas en la tubería, se debe utilizar una tubería de 1” con un flujo máximo de 11 [GPM] lo que es más que suficiente ya debido a que la tubería de suministro tiene un flujo máximo de 6 [GPM] de acuerdo a lo mencionado anteriormente.

3.1.7 Tuberías laterales

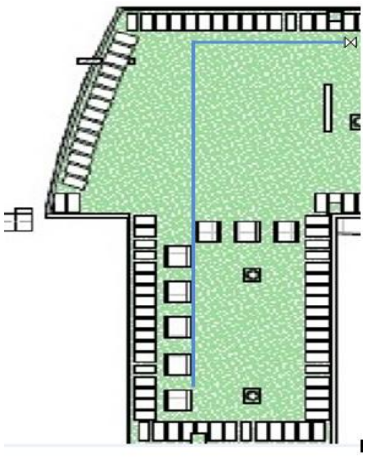
Son las tuberías entre las válvulas de control y los aspersores como se presenta en la Figura 15. Las tuberías laterales solo se encuentran presurizadas cuando la válvula de control se encuentra abierta y los aspersores están en funcionamiento. Por lo general estas presentan menores pérdidas de presión, fugas o estrés y es por esta razón que se puede utilizar tubería de menor resistencia y precio. Las tuberías que comúnmente se utilizan son las de polietileno (PE).

La presión de las tuberías no debe ser mayor al 20% de la presión de trabajo de los aspersores; entonces, si el aspersor trabaja a 30 (PSI), las pérdidas no pueden ser mayores a 6 (PSI).

La tubería de polietileno utiliza insertos de PE para realizar las uniones y adaptaciones de esta entre las laterales, válvulas y demás elementos. Se recomienda utilizar abrazaderas para disminuir la probabilidad de fugas en las uniones, porque en algunos casos por la presión se generan fugas. Sin embargo, las abrazaderas no son necesarias para uniones de presión.

Ahora se deben calcular las pérdidas para cada lateral; es decir, la distancia entre cada aspersor hasta llegar a la válvula de control.

Figura 15. Línea lateral zona 2



3.1.8 Tipos de válvulas

Usualmente se necesitan dos válvulas; una de emergencia y otra de control, esto con el fin de poder cortar el suministro de agua independientemente de la válvula de control y realizar mantenimiento del sistema; sin embargo, como se utiliza una conexión directa a la llave de suministro de agua, esta sirve como válvula de emergencia.

VÁLVULA DE EMERGENCIA: Debe ser instalada en el punto más cercano posible al suministro del agua con fines de mantenimiento. Las más comunes son las “válvulas de compuerta” por ser económicas, desafortunadamente las más económicas tienden a fallar después de un periodo de tiempo. De igual forma están las “válvulas de bola” que son muy comunes en el mercado, además de tener un ciclo de vida mucho mayor aunque pueden costar más, por ultimo están las “válvulas de disco” y “válvulas de mariposa” (NETAFIM, n.d.).

VÁLVULAS DE CONTROL: También conocidas como válvulas solenoides, son válvulas on/off; es decir, que abren o cierran el suministro de agua de acuerdo a una excitación o falta de esta en el solenoide.

Las válvulas de control operan por lo general a 24 (Vac). También existen válvulas “latch solenoid” que funcionan con pulsos, ayudando al ahorro de energía porque no necesitan ser alimentadas constantemente, solo requieren un pulso para abrir y otro para cerrar (NETAFIM, n.d.).

Las válvulas de control pueden ser activadas por un microcontrolador, temporizador o sistema de control; entre las comunes tenemos: válvulas de globo, anti-siphon y de ángulo. Lo ideal para un sistema es utilizar válvulas con control de flujo para variar el flujo del sistema de acuerdo a las necesidades de cada zona; además, permitir cerrarla manualmente; este tipo de válvulas usualmente tiene una especie de tornillo manual ubicado en la parte externa de estas.

El material de las válvulas puede ser en plástico o metal; sin embargo para la zona a implementar es más duradera la segunda, dado que las de plástico se desgastan rápidamente cuando se encuentra a la intemperie por la incidencia solar. Pero debido a su alto costo se decide utilizar válvulas plásticas, las cuales si se ubican en zonas donde el sol no incida directamente o se cubren con alguna protección, se aumenta la vida útil de estas.

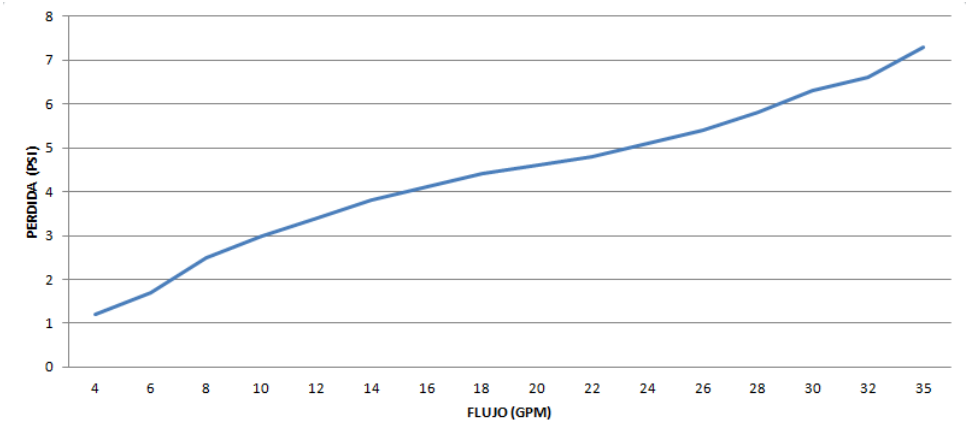
De acuerdo a lo anterior, para la aplicación del sistema de irrigación se implementará una válvula solenoide de globo, que tiene un comportamiento adecuado a las necesidades de este sistema. Las características del sistema que influyen en su uso, es por su bajo flujo, no se incurre en altos costos y además no presenta presión elevada como para exigir sistema anti-siphon, el cual se

usa cuando el sistema de riego está conectado a un suministro potable y con esto evitar la contaminación inducida por un flujo inverso.

Para el diseño del sistema se debe tener en cuenta las pérdidas de la válvula Figura 16 (Weathermatic, n.d.), es así como se usa la válvula solenoide marca Weather Matic silver bullet serie 12000 de 1”, a 24 (Vac) / 60 (Hz); con un consumo de 0,395 (A) para la activación y 0,213 (A) para mantenerse abierta.

Esta válvula tiene un material de construcción más resistente, con control de flujo, pérdidas por presión bajas y por último un buen precio.

Figura 16. Pérdidas de presión válvula solenoide



VÁLVULA ANTIRRETORNO: Estas válvulas son dispositivos con un control del fluido (CEPEX, n.d.); es decir, permite que el flujo de agua vaya hacia una dirección e impide que retorne. El uso de este tipo de válvulas es mayormente preventivo, con el fin de evitar que aguas con impurezas ingresen al suministro de agua (CEPEX, n.d.) (Irrigation Tutorials.com. Stryker, 2013).

3.2 MÓDULO DE CONTROL

Para definir el sistema de control se analizaron algunas opciones disponibles en el mercado; entre ellas el Controlador Lógico Programable (PLC) y tres tarjetas de desarrollo, Beaglebone Black (BBB), Arduino Uno y Arduino Nano. Estas son las herramientas más comunes y de fácil adquisición; a continuación se resaltan las ventajas y desventajas de cada sistema en la Tabla 9 (“SENSORES,” n.d.).

Tabla 9. Módulos de control

MÓDULO	DESCRIPCIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Controlador Lógico Programable (PLC)	Utilizados en grandes áreas de automatización por su versatilidad y diversidad de puertos de entrada analógico/digital, que permite su aplicación en numerosos campos de forma fácil y eficiente. Con este sistema se pueden realizar subrutinas, interrupciones, contadores, etc.	• Fácil implementación • Fácil programación • Robusto	• Alto costo • Interfaz de programación paga
Beaglebone Black (BBB)	Es un computador construido en una simple placa de circuito, con un microprocesador, memoria, periféricos y demás elementos; que permite desarrollar aplicaciones de manera rápida en distintos sistemas operativos como Linux, Android, Ubuntu y muchos otros.	• Gran versatilidad • Bajo costo • Alta capacidad de procesamiento	• Requiere algo de experiencia para su programación e implementación • Requiere sistema operativo
Arduino Uno	Board basada en el microcontrolador ATmega328, compuesto por 14 gpio digitales, 6 entradas analógicas, un resonador cerámico de 16 (MHz), conexión USB y otros componentes	• Programación amigable con el usuario • No necesita un sistema operativo • Interfaz de programación gratuita • Bajo costo	• Capacidad de procesamiento baja en comparación a la de un microprocesador
Arduino Nano	Board pequeña basada en el microcontrolador ATmega328, compuesta por 14 gpio, 8 entradas analógicas, un resonador cerámico de 16 (MHz), conexión mini USB y otros componentes	• Programación amigable con el usuario • No necesita un sistema operativo • Interfaz de programación gratuita • Bajo costo • Pequeño tamaño	• No tiene conector para alimentación por medio de un cargador • Necesita boards para adaptar a otros sistemas

Con base en lo anterior, se selecciona el Arduino Uno para el módulo principal de control, ya que no se necesita una gran capacidad de procesamiento además de su reducido costo a comparación del PLC, y tener una programación más sencilla que el BBB. Se selecciona el Arduino Nano por su reducido tamaño y funcionalidades iguales a las del Arduino Uno, permitiendo aplicarlo en las zonas de riego sin incurrir en un gran tamaño en la board de riego.

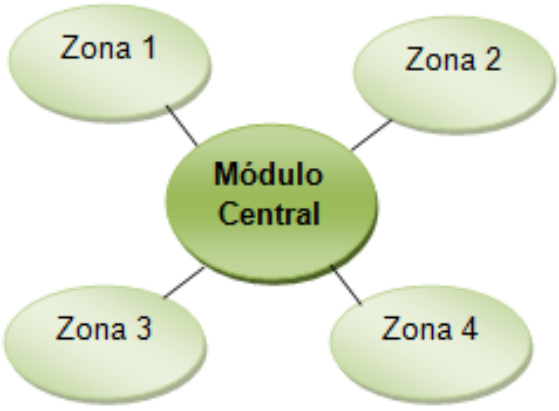
3.3 ADQUISICIÓN DE DATOS

Para la adquisición de datos se diseña una tarjeta que adquiera la información por medio de un Arduino Nano, la cual es una tarjeta de desarrollo mucho más pequeña que tiene las mismas funcionalidades del Arduino Uno; esta ultima se utiliza para el control, dado que se adapta más fácilmente a la Wireless Shield, que permite guardar información en una memoria SD y transmitir datos inalámbricamente.

Se realiza la transmisión y recepción de datos inalámbricamente por medio de una XBee®, la cual se conecta a la board de riego desarrollada y adquiere la información de los sensores por medio de un Arduino Nano el cual tiene 8 entradas analógicas con un voltaje máximo de 5(V); para el termistor se utiliza un circuito divisor de tensión para adecuar la señal y el sensor de humedad del suelo al tener una salida entre 0 (V) y 3 (V) se puede implementar perfectamente; por lo tanto se pueden utilizar correctamente los sensores de temperatura y humedad del suelo con el Arduino Nano (Digi International Inc., n.d.).

Cada zona tiene una tarjeta de adquisición de datos que permite sensar la humedad y temperatura del suelo de cada una de ellas, además de dos termistores que miden la temperatura ambiente presente en el techo y la temperatura interna de la caja de control respectivamente; de manera que cada Arduino Nano tiene una programación para la adquisición de datos, los cuales son enviadas por medio de un módulo XBee® a un módulo maestro que envia la información a un Arduino Uno; en donde se realiza el control central, esto se hace con el fin de poder controlar la prioridad de funcionamiento de cada zona; ya que debido a la presión del sistema y las diferentes tecnologías aplicadas en cada zona, no es aconsejable más de una zona a la vez. Los módulos XBee® se configuran como estrella para permitir una comunicación sencilla como se presenta en la Figura 17.

Figura 17. Comunicación en estrella para transmisión de datos entre zonas



El módulo central recibe datos de la zona en el quinto piso y controla 3 zonas directamente en base a la humedad del suelo presente en el sustrato de las zonas del sexto piso; en donde cada una de las zonas tiene una tarjeta de adquisición de datos y cada una puede ser controlada por el mismo módulo central, de esta forma se puede eliminar el uso de una tarjeta de adquisición de datos adicional sin incurrir en mayores costos, como se resume en la Figura 17.

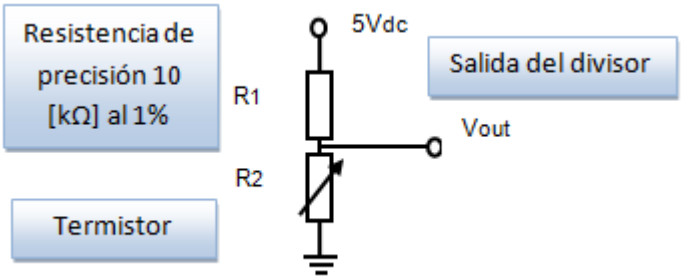
Para la implementación de las XBee® en cada zona, se deben configurar las zonas como router api y la XBee® maestra como coordinador api, para llevar a cabo esta distribución se utiliza el programa XCTU de la misma empresa que produce las XBee®, gracias a su sencilla interfaz de programación.

3.4 CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO PARA EL TERMISTOR

Se utiliza un termistor NTC de 10 (kΩ) a temperatura ambiente (25°C) con tolerancia del 1% y coeficiente β de 3380 con un rango de medición de -20 (°C) a 105 (°C), sellado en sonda de acero inoxidable para permitir la implementación a intemperie sin afectar su vida útil.

Para alimentar el termistor, se utiliza una fuente de voltaje que alimenta una resistencia en serie de precisión de 10 (kΩ) con el termistor para producir un divisor de voltaje Figura 18.

Figura 18. Divisor de voltaje para el termistor



En la Figura 18 se observa que se alimenta el divisor a 5 (V); esto con el fin de que cuando el termistor tenga su resistencia máxima a –20 (°C), su tensión de salida máxima sea de 5 (V) aproximadamente, puesto que la resistencia en serie de 10 (kΩ) tendrá una tensión mínima de acuerdo (3.10) (Marcombo, Garc, & Mancha, 2003).

$$V_{salida} = \frac{R_2}{R_1+R_2} \times V_{entrada} \qquad (3.10)$$

Donde, como ejemplo para una temperatura ambiente de 25°C, una resistencia de 10 (kΩ) en el termistor y un voltaje de entrada de 5 (V); se obtiene:

$$V_{salida} = \frac{10K}{10K+10K} \times 5 \tag{3.11}$$

$$V_{salida} = 2{,}5\ (V) \tag{3.12}$$

El divisor de voltaje aportará una salida de tensión proporcional a la resistencia del termistor, la cual entra al ADC del XBee®; esta resistencia se puede utilizar por medio de la ecuación de Steinhart-Hart (Gregg Lavenuta, n.d.):

$$\frac{1}{T} = A + B \ln R + C \ln R^{3} \tag{3.13}$$

Donde A, B y C son los coeficientes de Steinhart-Hart, determinados a partir de la curva R vs T. Tomando tres pares de valores y resolviendo un sistemas de tres ecuaciones con tres incógnitas ("SENSORES," n.d.) y donde T es la temperatura en °K.

Como no se conocen los coeficientes A, B y C; se puede hallar la temperatura por medio de (3.14);

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{\beta} \times \ln \frac{R}{R_{T0}} + \frac{1}{T_0} \tag{3.14}$$

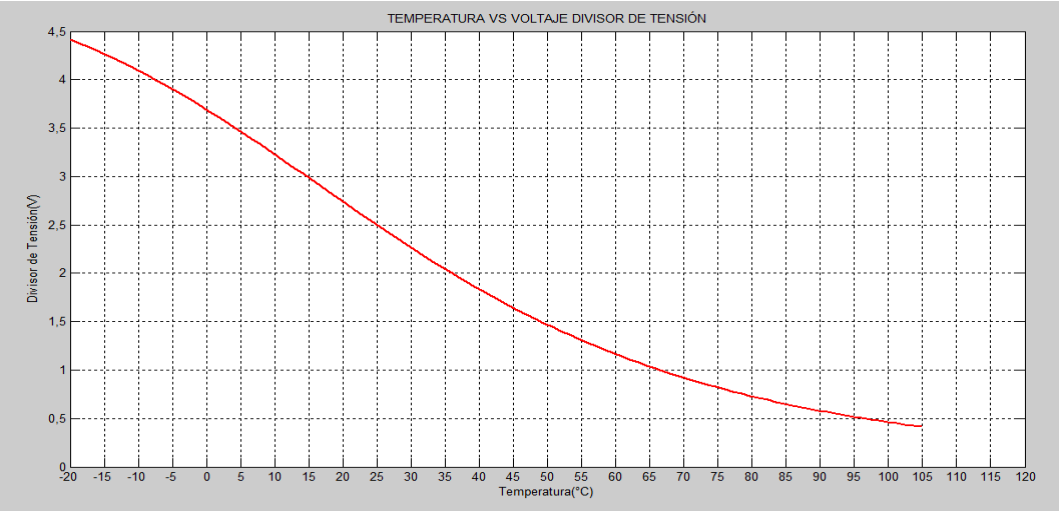
Siendo:

- T: Temperatura
- β $beta$: Coeficiente temperatura del termistor
- T_0: Temperatura ambiente
- R_{T0}: Resistencia temperatura ambiente
- R: Resistencia variable con la temperatura

Como se puede observar β para el termistor que se utiliza es de 3380K al 1%, con una temperatura ambiente de 25 (°C) y resistencia ambiente (R_{T0}) de 10 (KΩ), al 1% de tolerancia; de esta forma la variable es la resistencia media por el Arduino Nano. La constante de disipación típica es de 5 (mW/°C).

El termistor tiene un rango de operación entre -20 a 105 (°C), con una cobertura de acero inoxidable resistente al agua y con una larga duración. De acuerdo a (3.14), se obtiene la Figura 19.

Figura 19. Termistor con divisor de tensión Temperatura vs Resistencia

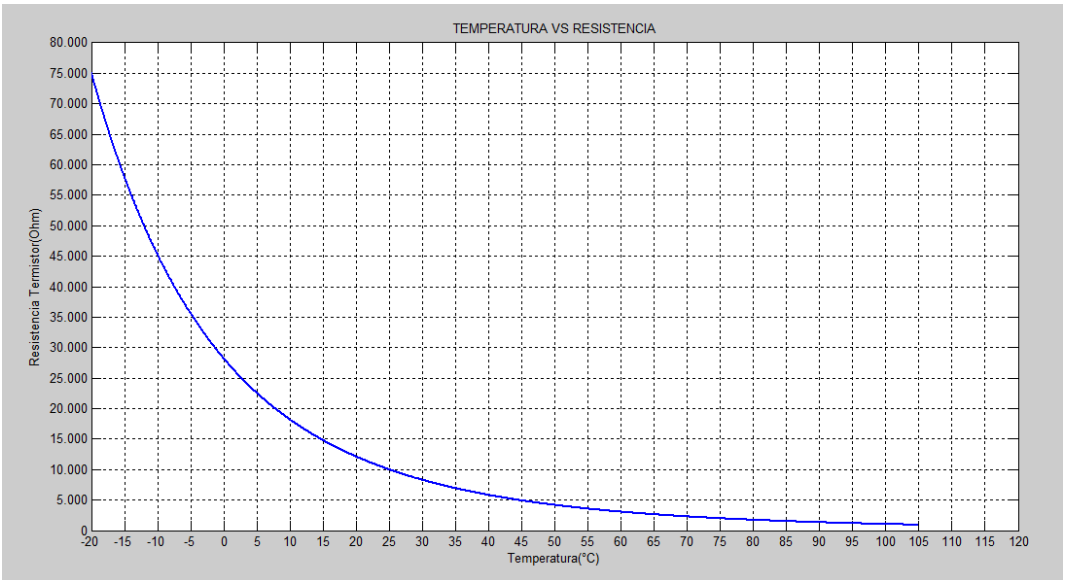


La resistencia del termistor varía de acuerdo a (3.15)

$$R = R_{T0} \times e^{\beta(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0})} \tag{3.15}$$

A partir de (3.15); se puede obtener la resistencia vs la temperatura, como se muestra en la Figura 20.

Figura 20. Resistencia vs Temperatura del termistor



4. SELECCIÓN DE COMPONENTES BOARD DE RIEGO

En este capítulo se resalta el porqué de la selección de los componentes para el diseño de la board de riego, además del comportamiento y resultados del sistema implementado.

Comercialmente no existe una shield para el Arduino Nano que permita adecuar la señal de los termistores y los sensores de humedad, además de tener la conexión directa al módulo XBee® y a la vez poder habilitar el relé; por lo que sería necesario adaptar muchas shield y realizar conexiones con cables, que disminuyen la robustez del sistema y a la vez afectan la calidad y desempeño del mismo, sobre todo en la medición de datos.

Al desarrollar la tarjeta se quiso implementar tanto la alimentación de la válvula solenoide como del Arduino Nano, el módulo XBee®, el relé y los sensores en una sola tarjeta. Para ello, se implementa una alimentación de 5(Vdc) para el Arduino Nano, sensores y relé y de 3,3(V) para el módulo XBee®. La tarjeta tiene un LED blanco y uno azul, para ser más fácil percibir cuando esta se encuentra alimentada y cuando el relé se encuentra en funcionamiento respectivamente.

Ya que la válvula se alimenta a 24(Vac) y los demás componentes en dc, se debe usar un transformador bidevanado con bobinados aislados para evitar interferencias electromagnéticas. Las conexiones de alimentación se realizan por medio de tres conectores de tornillo doble, permitiendo diferenciar la alimentación de 5(V), 24(V) y la conexión de la válvula respectivamente.

La XBee® transmite la información de los sensores y el control desarrollado por medio del Arduino Nano al módulo central, el cual toma la decisión de cual zona habilitar según el orden deseado. El relé se activa por medio del pin digital 2 (D2), de acuerdo al valor de humedad del suelo programado (HS).

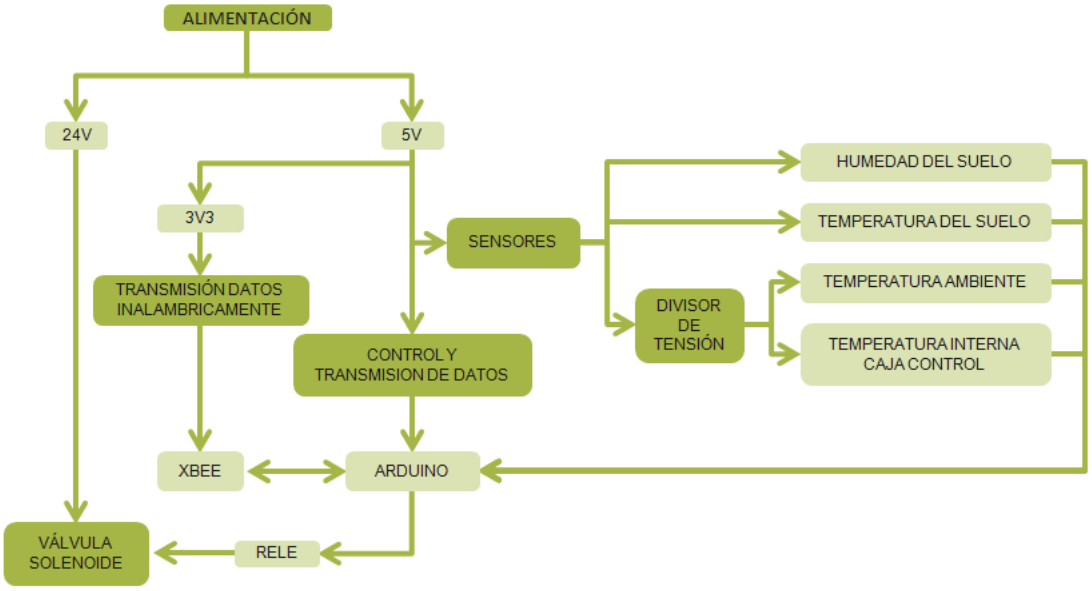
Los sensores de humedad y temperatura del suelo necesitan una conexión de tres pines los cuales se realizan por medio de una regleta de tres pines a la *board* y los termistores por medio de regleta de 2 pines.

Habiendo explicado el porqué del desarrollo de la tarjeta, además, de la estructuración de esta, se describen a continuación los circuitos implementados en la tarjeta de riego en orden de implementación con su respectiva justificación y selección de componentes Figura 21 de acuerdo al siguiente orden:

- Desarrollo de la alimentación
- Adecuación de sensores

- transmisión inalámbrica de datos (XBee®)
- Control (Arduino Nano)
- Activación de la válvula solenoide

Figura 21. Diagrama metodología de diseño



Posteriormente, al desarrollar completamente la tarjeta de riego, se pasa a su manufactura e implementación; por último se realizan las pruebas de campo que demuestran la eficiencia del sistema de riego automatizado con control del nivel de humedad.

4.1 ALIMENTACIÓN PCB

Se selecciona un transformador bidevanado con dos salidas de 5 (Vac) y 24 (Vac) y alimentación de 110 (Vac), con el fin de tener dos salidas aisladas entre sí, evitando corrientes parasitas e interferencias electromagnéticas provenientes de la válvula ya que esta es una bobina solenoide, de forma que no puedan afectar la medición de los sensores por parte del Arduino Nano.

Se seleccionó un TL720M05QKVURQ1 De Texas Instruments de acuerdo a las siguientes razones:

- Debido que es un regulador de voltaje con empaquetado TO-252 el cual permite acoplarlo superficialmente a la board, elimina la necesidad de disipadores de temperatura externos, ya que al estar soldado superficialmente a la board, el material de la pcb actua como el disipador.
- Tiene un amplio rango en el voltaje de entrada permitiendo cualquier voltaje de alimentación entre 5,5 y 42 (Vdc), aunque se alimenta con un vol-

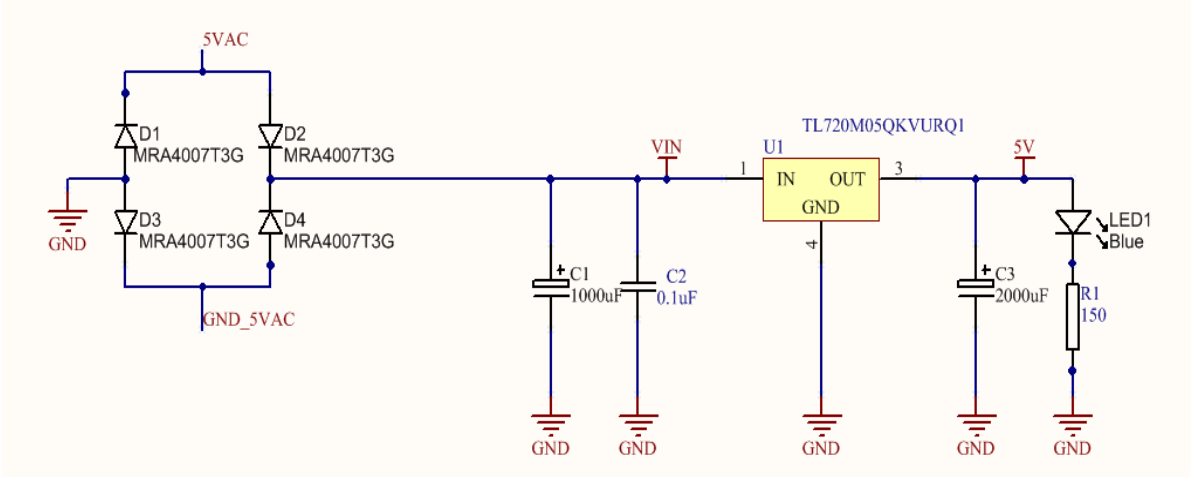
taje de 5(Vac) el cual al ser rectificado será de 7(V), aproximadamente (TEXAS INSTRUMENT, 2013).

- Se alimenta con 7(V) ya que al ser un regulador de voltaje con una salida constante de 5(V), ya que si se alimenta con mayor tensión, la tensión excedente es transformada en disipación de temperatura lo que a futuro reducirá la vida útil del componente y aumentará el riesgo de daño.
- Tiene una salida de corriente de 700 (mA), más que suficiente para alimentar el Arduino Nano, la XBee® S2 con antena cableada, sensores y demás componentes, los cuales tienen un consumo aproximado de 40 (mA), 40 (mA) (Digi International Inc., n.d.), 34 (mA) y 30 (mA) respectivamente, dando un consumo total de 144 (mA) aproximadamente, lo que es muy menor a la corriente que puede suministrar el regulador.

Se utiliza un capacitor en la salida de 2000 (uF) 25 (V) para eliminar rizados que se producen por la demanda de corriente por parte del Arduino Nano y la XBee®. El LED1 se incorpora para saber si la tarjeta se encuentra alimentada.

Los diodos D1, D2, D3 y D4 están configurados de forma que sean un rectificado de tensión pasando la alimentación de 5 (Vac) a 5 (Vdc) y los capacitores de 1000 y 0,1 (uF) dan una salida más lineal para el regulador de voltaje, como se presenta en la Figura 22.

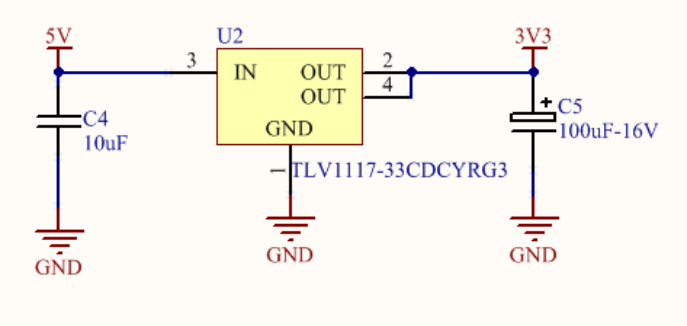
Figura 22. Circuito alimentación 5 (V)



En la Figura 23. se presenta la implementación de un circuito regulador de tensión TLV1117-33CDCYRG3 de Texas Instruments, el cual tiene una salida de 3,3 (V); con una alimentación de 4,75 a 10 (V) y una corriente de 800 (mA) razón por la cual se alimenta con 5 (V) (TEXAS INSTRUMENT, 2014) provenientes del regulador de voltaje TL720M05QKVURQ1.

La razón para la selección del regulador de voltaje de 3,3V es poder alimentar la XBee® serie 2, la cual soporta valores entre 2,8 (V) y 3,4 (V) y consume 40 (mA), ya que si se alimenta a una mayor tensión puede dañar la XBee®.

Figura 23. Circuito regulador



4.2 SENSORES

Los circuitos para los sensores están determinados por 2 termistores los cuales miden la temperatura ambiente e interna de la caja de control y los sensores de temperatura y humedad del suelo los cuales tienen un comportamiento bastante lineal.

4.2.1 Sensor de temperatura termistor

Para el sensor de temperatura ambiente e interna de la caja de control se debe implementar el circuito de adquisición de acuerdo a lo que ya se ha mencionado; por lo tanto se realiza un sencillo divisor de tensión para poder adecuar la señal del termistor Figura 24.

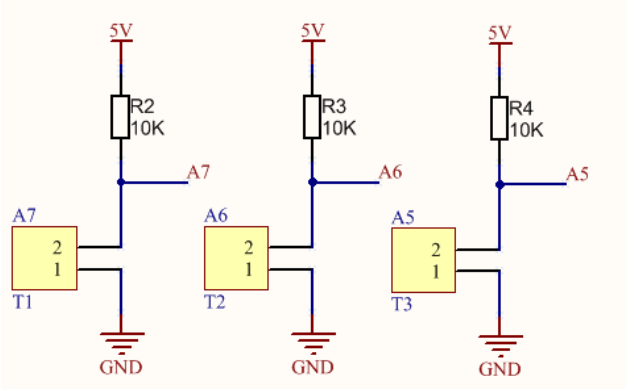
Se puede utilizar una configuración en puente de wheatstone, puesto que linealiza más la salida del sensor que un divisor. Sin embargo, cuando el puente linealiza tanto la señal, tiene un rango de operación muy reducido; por lo tanto si la temperatura cae debajo de un margen especifico, esta linealidad hace que pierda exactitud en la medición de datos y que sean erróneos. Por lo general este se aplica para procesos en los cuales se controla la temperatura directamente y no se presentan cambios bruscos.

Esta explicación se da, con el fin de resaltar que la implementación del termistor, con respecto al sensor de temperatura del suelo, se ejecuta para mostrar la eficiencia del techo verde; al aislar la temperatura interna del edificio con respecto a la temperatura externa.

Se selecciona un termistor con cobertura de acero inoxidable de forma que sea resistente a los condiciones externas; otro aspecto en la selección de la resistencia de 10 (KΩ) en serie del divisor de tensión Figura 24, se debe a que la

temperatura ambiente promedio es de 25 (°C) y la resistencia del termistor es de 10 (KΩ) a 25 (°C) lo que brinda una salida más precisa cuando la resistencia en serie con este se selecciona de acuerdo a la temperatura promedio.

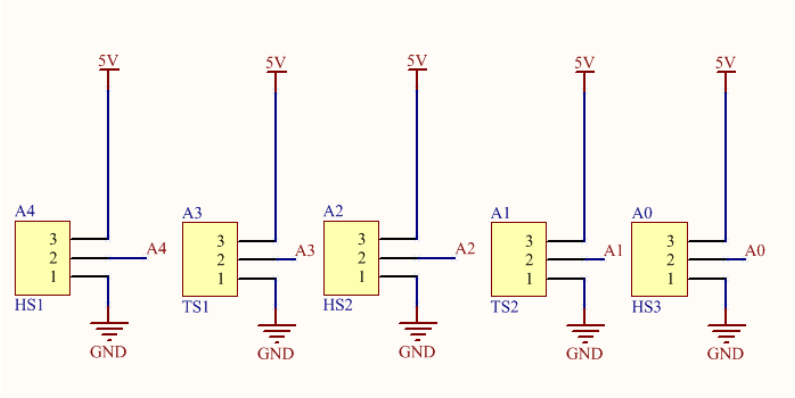
Figura 24. Señal Termistor



4.2.2 Sensor de humedad y temperatura del suelo

El sensor de humedad y temperatura del suelo tienen una salida casi lineal; por lo tanto no es necesario un circuito para adecuar la señal como en el termistor, siendo posible adquirir la señal directamente Figura 25.

Figura 25. Señal sensor de temperatura y humedad

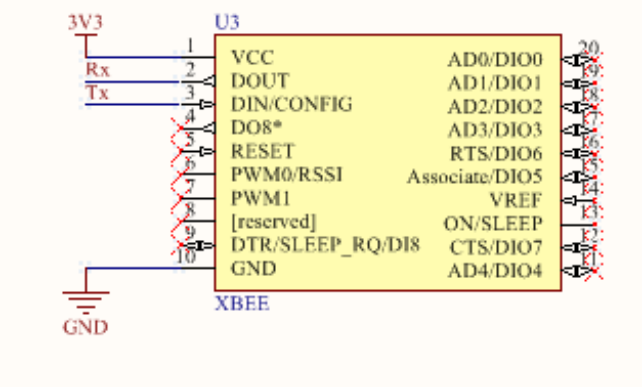


4.3 TRANSMISIÓN DE DATOS INALÁMBRICOS

Se selecciona una XBee® serie 2 con antena cableada para tener un mayor rango de comunicación (Digi International Inc., n.d.), además, de que las S2 permiten configuración API a diferencia de la S1 la cual solo permite configuración AT. La S2 permite realizar configuraciones estrella, punto-multipunto, mesh o protocolo Zigbee, en cambio la S1 solo permite comunicación punto-punto, siendo no posible utilizarlas ya que se desea enviar información de multiples XBee® a una XBee® conectada al módulo principal.

Ya que la XBee® se utiliza simplemente para la transmisión de datos, se habilitan los pines de transmisión (Tx) y recepción de datos (Rx); para tener una comunicación con el Arduino Nano, el pin Tx de la XBee® debe ser conectado al pin Rx y el pin Rx conectado al pin Tx respectivamente Figura 26. Los demás pines no es necesario habilitarlos ya que estos son para habilitar directamente pines analógicos y digitales en la XBee® los cuales no son necesarios.

Figura 26. Conexión de la XBee®



4.4 CONTROL Y TRANSMISIÓN DE DATOS

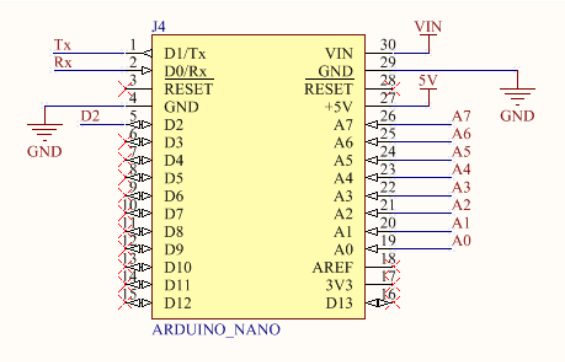
Se usa un Arduino Nano Figura 27, para la adquisición de datos y control de la válvula, puesto que permite una implementación versátil gracias a su tamaño, además, de ser perfecto para adquirir la señal de los sensores y luego transmitirla por medio de la XBee®.

El Arduino envía y recibe información por medio de la XBee® al módulo central, el cual toma la decisión y orden para habilitar el riego en las zonas; por lo que el módulo central adquiere los datos de cada zona respectivamente y toma la decisión de cual zona habilitar de acuerdo a la humedad del suelo presente en esta, sin abrir más de 1 zona al tiempo en el 6to piso.

Después de analizar cuales zonas tienen un nivel de humedad del suelo por debajo del requerido, que en este caso es 18% (Starry, 2013) se determina en cuales zonas se debe habilitar el riego y posteriormente cual es el orden de apertura y activación de las válvulas (Starry, 2013).

El Arduino Nano puede realizar el cierre de la válvula directamente por sí mismo, sin necesidad de mandar la información al módulo central y esperar respuesta; puesto que al tener un microcontrolador puede realizar el cierre de la válvula cuando el nivel de humedad del suelo se encuentre por arriba del valor deseado.

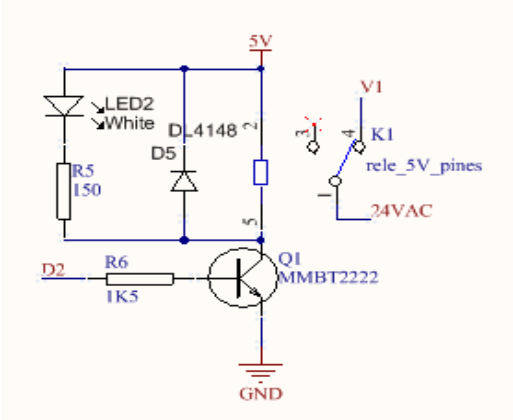
Figura 27. Conexión Arduino Nano



4.5 VÁLVULA SOLENOIDE

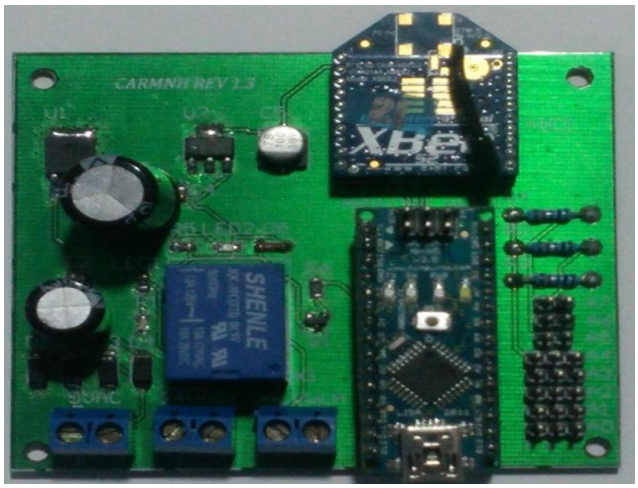
Se implementa una sencilla configuración con un transistor NPN MMBT2222 el cual es superficial. Éste es activado por la señal digital proveniente del Arduino Nano, el cual induce un “1” con un voltaje de salida de 5 (V) y un “0” en la base del transistor. Cuando existe un “1”, el transistor se abre para permitir la continuidad de la corriente que alimenta el relé y posteriormente este permite el paso de corriente hacia la válvula solenoide la cual es alimentada a 24 (Vac) y cuando se alcanza el valor deseado de humedad del suelo, el Arduino induce un “0” para lograr el cierre de la válvula Figura 28.

Figura 28. Activación de la válvula



En la Figura 29 se observa la tarjeta de riego manufacturada en su totalidad.

Figura 29. Tarjeta sistema de riego



5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este capítulo, se presentan los resultados adquiridos a partir de una prueba piloto que se realizó en techo verde el Edificio de Ingeniería Eléctrica; así mismo, se realiza un análisis de lo observado durante la prueba y a graficas obtenidas con los datos que se registraron.

5.1. RESULTADOS GRÁFICOS

Se realizaron pruebas experimentales en media área del techo verde del 5to piso. Durante 5 días, se tomaron datos cada 30 minutos para los valores de: Hs - humedad del suelo; Ts - temperatura del suelo; Ta - temperatura ambiente y Ti - temperatura interna en la caja de control Figura 30.

Figura 30. Prueba de implementación 5to piso Edificio Ingeniería Eléctrica

Con la experimentación realizada se buscó demostrar la eficiencia y comportamiento del sistema de riego automatizado por monitorización del nivel de humedad en el techo verde, resaltando las ventajas de un techo verde y a la vez brindar las condiciones necesarias para su desarrollo. A continuación se muestran los resultados de la implementación.

Figura 31. Contenido volumétrico de agua (VWC- siglas en ingles)

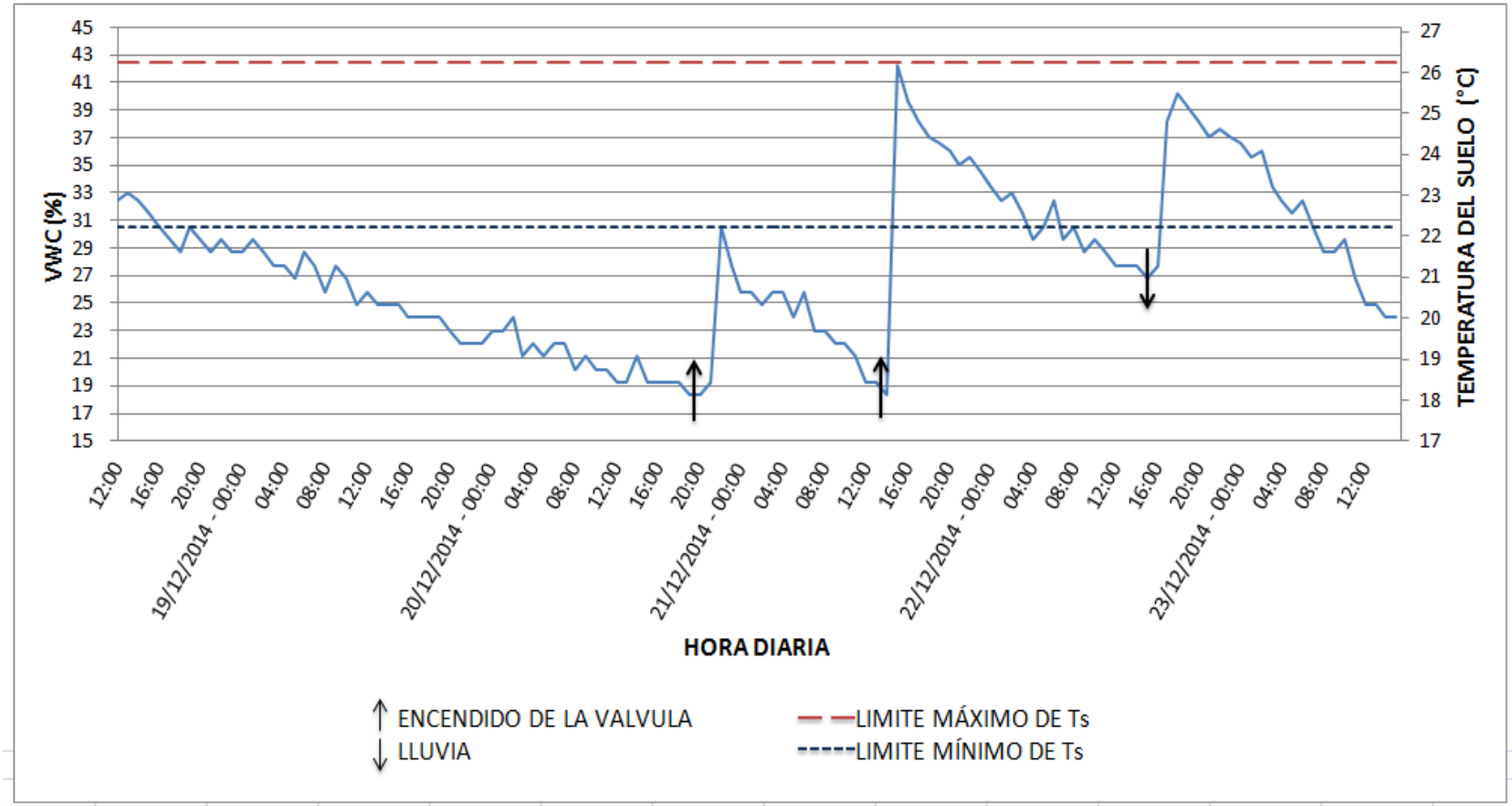
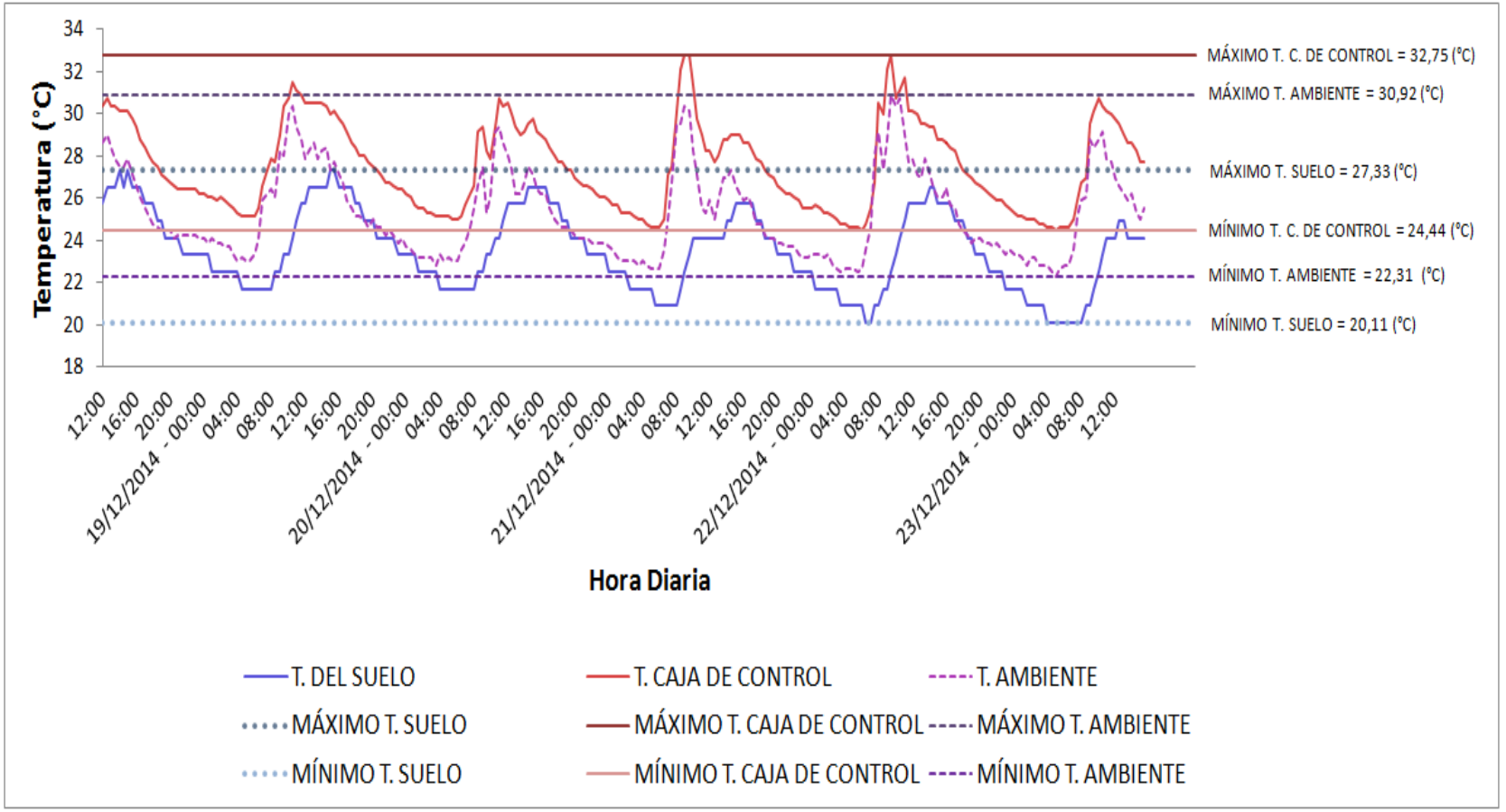


Figura 32. Perfiles de temperatura



5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Figura 31 se presenta el contenido volumétrico de agua (VWC-siglas en inglés). En esta figura se observa que cuando el VWC cae hasta un valor del 18%, este se incrementa gracias al sistema de control, de forma que se comprueba la funcionalidad del sistema.

Cuando el VWC se mantiene sobre un nivel óptimo de 18% para la planta, esta puede mantener de mejor forma la humedad del sustrato ya que tiene la cantidad de agua adecuada para su desarrollo. Es decir, si las condiciones de humedad son ideales para la planta esta se puede mantener de mejor forma y a su vez mantener prolongadamente la humedad en el sustrato, y por consiguiente incurrir en un menor riego, lo que puede producirse ya que desarrolla mayor área foliar y raíces, disminuyendo la radiación solar directa incidente sobre el sustrato y a su vez brindar mayor almacenamiento de agua en la planta respectivamente.

La flecha hacia arriba muestra el momento en el que el sistema entra en funcionamiento, cuando la humedad del sustrato cae por debajo de 18%, que corresponde al valor correcto de funcionamiento para el sistema de riego. La flecha hacia abajo describe el punto donde inicia una lluvia por lo que la humedad se incrementa sin entrar en funcionamiento la válvula de control. Esto permite demostrar que el sistema es eficiente en el uso del agua ya que no incurre en sobre-irrigación por exceso de agua gracias a la lluvia.

Lo que se puede determinar al revisar la Figura 31, es que cuando el riego se realiza en horas donde la temperatura del suelo es baja (alrededor de 22 °C); el nivel de humedad máximo generado en el sustrato por el riego, es mucho menor, que cuando se hace a una temperatura mayor (alrededor de 26,5 °C). Dado que a altas temperaturas existe un mayor retardo en la medición del sensor, se mantiene abierta la válvula durante más tiempo y al mismo flujo; entonces, quedará un mayor volumen, además de resaltar que a una mayor temperatura será mayor la evapotranspiración del agua.

Es decir, a medida que se realiza el riego, las capas superiores van recibiendo primero el agua sobre estas y van infiltrando el agua hacia las capas inferiores con una velocidad especifica, pero como el sensor se encuentra enterrado, el nivel de agua en las capas superiores será mayor inicialmente que el de las capas inferiores por lo cual estas se irán saturando de agua y la conductividad hidráulica del suelo aumentará, lo cual aumentará el caudal de drenaje.

Esto da como resultado que el sensor mida la humedad del suelo con un retardo, presentando un mayor nivel de humedad al de control después de cierto

tiempo, mientras el suelo drena el agua en exceso presente en las capas superiores, dando como resultado la medición obtenida para este caso que es de 31% y 42% para ambos riegos respectivamente (Cely Reyes, 2010).

Con esto se puede determinar, que si se realiza el riego en horarios con una temperatura o radiación solar incidente más baja, se puede disminuir el consumo de agua por parte del sistema, dado que irriga menos agua al sustrato, además de disminuir la evaporación del agua por la radiación solar incidente.

El tiempo en que se encuentra abierta la válvula no se puede dar como un valor exacto, dado que se necesitan determinar otras variables; como la radiación solar, la humedad en las primeras horas del día, el viento y la evapotranspiración. Para ello se necesitarían de otros medidores, entre ellos un medidor de flujo y un temporizador para conocer el tiempo en que la válvula se encuentra en funcionamiento.

Sin embargo, esto puede llevar a pensar, que solo se debe irrigar en las mañanas para disminuir el consumo de agua por parte de las plantas, además, del pensamiento común de que no se debe irrigar en horarios en los cuales la radiación solar incidente sea alta o existan altas temperaturas, debido a que puede producir quemaduras en las hojas por el sol; lo que es tan solo un mito; lo primordial es evitar que la planta se deshidrate; puesto que, una vez que las hojas de las plantas entran en etapa de marchitez, ya sea causada por estrés debido a la falta de agua o por otra causa, no existe ninguna cantidad de agua posible que pueda salvarla, injustificando el no irrigar las plantas aun así durante el día(Chalker-Scott, n.d.) (Egri Adám, Horváth Ákos, Kriska Gyorgy, 2010).

Cabe señalar que se puede presentar quemaduras en las hojas por irrigar plantas durante el día, para ciertos tipos de plantas en las cuales el agua quede depositada largos periodos de tiempo en esta, es decir si al momento de irrigar la planta el agua queda atrapada en formas cóncavas en la hoja en gran cantidad; ya que el agua no alcanza a evaporarse antes de que el sol pueda reflejarse en esta y causar daño. Aunque en este caso no se presenta este comportamiento debido al tipo de planta, siendo posible irrigar el techo verde durante el día.

Así mismo, disminuir el consumo de agua es algo contraproducente, porque si el nivel de humedad del suelo requerido por la planta decrece, esta se estresa produciendo disminución en el desarrollo foliar, crecimiento, fotosíntesis, marchitez y otros factores (Seyed Y. S. Lisar, Rouhollah Motafakkerazad, 2002).

Una forma de evitar puntos máximos de humedad del suelo tan elevados en el sustrato, es implementar dos sensores, uno en la parte superior de este y otro en la parte inferior, con el fin de crear un control basado en la diferencia de

medida, de forma que brinden una medición de humedad del suelo más precisa. Cabe resaltar que la implementación de dos sensores es eficiente en un sustrato con una profundidad mayor a 30 (cm), distancia ideal para la separación entre ellos, de lo contrario no se justifican los costos relacionados con el sensor y adecuación al sistema, siendo razón para implementar solo un sensor por zona en este sistema.

En la Figura 32, se observa que la temperatura del suelo en el techo verde no supera los 28°C aproximadamente, lo que es ideal para reducir la temperatura incidente sobre el techo del edificio, la que puede ser superior a 50°C en comparación con otros edificios con protección común en el techo; como lo son con teja, tela asfáltica y demás. Como se puede apreciar, la temperatura no sufre cambios bruscos en su mayoría, permitiendo mantener el ambiente fresco en el día y caliente en la noche, mostrando la eficiencia al implementar techos verdes en las edificaciones.

De la misma manera, se aprecia que la temperatura del suelo tiene un valor máximo de 27 (°C) entre 2 y 4 de la tarde y un valor mínimo de 20 (°C) entre 4 y 6 de la mañana; con una diferencia máxima de 7 (°C).

Al analizar los resultados en la Figura 32, entre la temperatura del suelo y la temperatura ambiente, se halla una diferencia de 1,5 (°C), si se tiene en consideración que la temperatura máxima en el suelo es de 27 (°C) y la temperatura ambiente es de 30,5 (°C), se puede observar una significativa diferencia de 3,5 (°C) entre las dos medidas anteriores, lo que puede significar estar entre un ambiente confortable e incomodo en cuanto a temperatura se refiere.

Además, si se percibe la variación de temperatura ambiente a lo largo del día, se observa que alcanza su valor máximo en 30,5 (°C) aproximadamente entre 10 y 12 de la mañana, y su valor mínimo en 22 (°C) a las 5 y 6 de la mañana respectivamente. La diferencia diaria será de 8,5 (°C) a diferencia de los 6 (°C) en la temperatura del suelo.

Igualmente, se debe tener en consideración que el sensor se enterró a 10 centímetros de profundidad en el sustrato; por lo que si se tiene en cuenta la placa base además del sustrato, la temperatura en el interior de la edificación será más uniforme y brindando un ambiente mucho más confortable reduciendo el uso de sistemas eléctricos, que modifiquen la temperatura interna. Cuando la cobertura del techo por las plantas sea mayor, la temperatura presentará menores variaciones y por consiguiente un mejor aislamiento, debido a la mayor cobertura de estas en el sustrato brindando una mejor aislación de la radiación solar incidente en el techo.

La temperatura interna de la caja de control aumenta más que la temperatura ambiente, debido a la disipación de potencia de los componentes electrónicos y el transformador incorporado, además de la radiación solar que incide sobre la caja de control aumentando la temperatura interna de esta.

De los resultados anteriores se puede concluir que el sistema brinda las condiciones adecuadas de humedad en el suelo para las plantas, al brindar el nivel preciso de agua que estas requieren, y a la vez optimiza el consumo del líquido sin incurrir en una irrigación excesiva del sustrato.

5.3 ANÁLISIS DE LA INTENSIDAD DE SEÑAL

Con el fin de ubicar el módulo central de manera adecuada, para que reciba y emita los datos de las zonas; se realizaron pruebas de intensidad de señal desde un módulo que simulaba la ubicación de las cuatro zonas con respecto al módulo central. De esta manera se determinó cual es la mejor área para su ubicación.

En la Figura 33 se muestra la zona de análisis por colores; los espacios de color rojo indican que en el módulo central se midió una intensidad de señal, representada en valores de tensión entre 0 – 0.9 (V), este rango de tensión es muy bajo por lo tanto no hay transmisión o recepción de datos. El área de color naranja corresponde a valores entre 0.91 – 1.8 (V); siguen siendo valores insuficientes para la recepción o transmisión de datos, por lo tanto solo se presentas pequeños instantes de comunicación. La zona de color amarillo pertenece a valores de tensión entre 1.81 – 3 (V), en este rango de valores la comunicación es más estable, lo que indica el lugar en donde se debería dejar el módulo de central.

La intensidad de la señal se mide con respecto al punto más alejado de transmisión ya que este mide por medio de RSSI en la *XBee®,* el cual es medido en el *Wireless Shield* por medio del pin 6, que da una tensión entre 3 y 0V siendo una señal excelente y pobre respectivamente.

Figura 33. Intensidad de la señal de acuerdo a la zona

6. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en el desarrollo de la prueba piloto, se pudo determinar que la ubicación del sensor, es un factor fundamental para el desempeño del sistema, porque de acuerdo a la posición se afecta el consumo de agua. Dado que la capilaridad del suelo afecta la medición del sensor, de acuerdo a la profundidad que se encuentre.

Al analizar los datos adquiridos, se pudo concluir que los mejores momentos para hacer el riego, son las primeras horas del día. Debido a que en estas horas la radiación solar incidente, es mucho menor y por consiguiente la temperatura del suelo también lo es, esto hace que disminuya el consumo de agua por parte de la planta.

Las condiciones ambientales y del suelo son factores primordiales para diseñar un sistema de riego, pues determinan el distanciamiento y uniformidad de este. Lo que permite seleccionar de manera idónea los componentes que más se adapten al sistema, sin incurrir en mayores gastos y que lo hagan a su vez más eficiente.

Por lo que se puede concluir, que un sistema de riego bien diseñado y con el control idóneo de la humedad del suelo para cada planta específicamente, permite disminuir el consumo de agua en el sistema significativamente, sin sacrificar el crecimiento y desarrollo de las plantas.

Además, se realizó el diseño de un sistema de riego para las cubiertas verdes del Edificio de Ingeniería Eléctrica, que brinda la humedad del suelo necesaria para un desarrollo óptimo de las plantas, al monitorizar variables mediante sensores que son mucho más eficientes que los sistemas temporizados, pues adaptan el sistema de riego a los requerimientos específicos de las plantas.

Se seleccionaron equipos e instrumentación idóneos para el desarrollo de este proyecto, teniendo una buena relación costo-desempeño, además de permitir una fácil implementación, junto con el manual de montaje y mantenimiento del sistema para su posterior implementación.

7. OBSERVACIONES Y TRABAJO A FUTURO

Para que el sistema se mantenga en perfecto funcionamiento se debe garantizar el flujo de energía constante.

Hacer mantenimiento al sistema cada 2 meses para garantizar la duración y eficacia de este.

Con el desarrollo de este trabajo de grado se puede dimensionar el sistema a tomar constantemente las demás variables medidas en el sistema aparte de la humedad del suelo, además de poder medir el flujo de agua utilizado, para ver como varian los requerimientos hídricos de la planta con el tiempo a medida que esta se mantenga en perfectas condiciones y poder ver la eficiencia en el uso del agua con respecto a otros sistemas.

Se puede ver el comportamiento del sistema con respecto al goteo y aspersión y verificar la eficacia de cada uno respectivamente comparando las ventajas y desventajas de estos con el tiempo en los techos verdes con plantas Sedum.

Incentivar la aplicación del sistema de riego en toda el área universitaria para reducir los costos de mantenimiento e irrigación en las zonas verdes además de reducir los gastos en agua generados por los extensivos riegos sin control.

BIBLIOGRAFÍA

- AMIAD FILTRATION SYSTEMS LTD. (n.d.). TAGLINE FILTER SERIES. Retrieved June 23, 2014, from http://www.irrigationwarehouse.com.au/images/Tagline.pdf
- Autodesk. (2010). AutoCAD P & ID 2010 Preview Guide, 1–21.
- Cely Reyes, G. E. (2010). DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE RIEGO PARA EL CULTIVO CEBOLLA DE BULBO EN EL DISTRITO DE RIEGO DEL ALTO CHICAMOCHA. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Retrieved from http://www.bdigital.unal.edu.co/2743/1/790551.2010.pdf
- CEPEX. (n.d.). PVC-U & PVC-C VALVES. Retrieved June 23, 2014, from http://www.cepex.com/download/catalogues/PVC Check valves TC v1.pdf
- CEPEX. (n.d.). VÁLVULAS CHECK EN PVC. Retrieved June 23, 2014, from http://www.cepex.com/worldwide/mexico/checkvalves.html
- Chalker-Scott, L. P. . (n.d.). The Myth of Hot-Weather Watering “Watering plants on a hot sunny day will scorch their leaves.” Retrieved February 11, 2015, from http://puyallup.wsu.edu/~linda chalker-scott/horticultural myths_files/Myths/Leaf scorch.pdf
- Díaz V, Tomás. Pérez D, Wilfredo. López G, Aldo. Partidas R,., Leopoldo. Suárez, Y. E. (2009). Sustainable water and land management in semi-arid regions : Middle East and North Africa (MENA) Philosophical Transactions of the Royal Society PAGES 3 rd Open Science Meeting. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, Universidad Agraria de La Habana., 17(2), 20–21.
- Digi International Inc. (n.d.). Datasheet: XBee®/XBee-PRO® RF Modules. Retrieved July 04, 2014, from http://www.digi.com/
- Duarte Ayala, Deisy. Moreno Rubiano, A. A. (2014). TECHOS VERDES EN VIVIENDAS DE ESTRATO 1: APLICADO AL BARRIO YOMASA. UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA.
- Egri Adám, Horváth Ákos, Kriska Gyorgy, H. G. (2010). Optics of sunlit water drops on leaves: conditions under which sunburn is possible. Eötvös University.

- FlexPVC. (2002). GPM/GPH Flow based on PVC Pipe Size. Retrieved June 20, 2014, from http://flexpvc.com/WaterFlowBasedOnPipeSize.shtml
- Gregg Lavenuta. (n.d.). AN EXPLANATION OF THE BETA AND STEIN-HART-HART EQUATIONS FOR REPRESENTING THE RESISTANCE VS . TEMPERATURE RELATIONSHIP IN NTC THERMISTOR MATERIALS Gregg Lavenuta , QTI Sensing Solutions Engineering Department. QTI Sensing Solutions Engineering Department.
- Irrigation Tutorials.com. Stryker, J. (2011). How to Select Sprinkler System Pipe Size. Retrieved June 16, 2014, from http://www.irrigationtutorials.com/lateral-sprinkler-pipe-size/
- Irrigation Tutorials.com. Stryker, J. (2011). Irrigation Water Filtration & Filter Recommendations. Retrieved June 23, 2014, from http://www.irrigationtutorials.com/filters.htm
- Irrigation Tutorials.com. Stryker, J. (2013). How to Pick the Best Sprinkler Head or Bubbler for Your Irrigation System. Retrieved June 10, 2014, from http://www.irrigationtutorials.com/selecting-a-sprinkler-head/
- Irrigation Tutorials.com. Stryker, J. (2013). How to Select the Proper Back-flow Preventer. Retrieved June 23, 2014, from http://www.irrigationtutorials.com/irrigation-backflow-preventers/#why
- Irrigation Tutorials.com. Stryker, J. (2013). Pressure Loss Tables for Com-mon Mainline Pipe & Tubing Types. Retrieved June 17, 2014, from http://www.irrigationtutorials.com/pipe-and-tube-pressure-loss-tables/
- Irrigation Tutorials.com. Stryker, J. (2013). Slopes, Hills, and How They Im-pact Water Pressure. Retrieved June 14, 2014, from http://www.irrigationtutorials.com/elevation-pressure-loss-in-irrigation-systems/
- Irrigation Tutorials.com. Stryker, J. (2013). Sprinkler System Mainline Pipes. Retrieved June 17, 2014, from http://www.irrigationtutorials.com/irrigation-mainlines/
- Irrigation Tutorials.com. Stryker, J. (2014). Designing a New Irrigation Sys-tem. Retrieved June 07, 2014, from http://www.irrigationtutorials.com/

- Irrigation Tutorials.com. Stryker, J. (2014). Drip Emitter Spacing. Retrieved June 12, 2014, from http://www.irrigationtutorials.com/drip-emitter-spacing/
- Marcombo, S., Garc, J. E., & Mancha, L. (2003). Circuitos De Acondicionamiento Para. Dpto. de Ing. Eléctrica, Electrónica Y Automática. Universidad de Castilla – La Mancha.
- NEIBLING. Howard and ROBBINS, J. A. (n.d.). Equipment Selection and Sizing for Sprinkler and Drip Irrigation. Retrieved June 14, 2014, from http://irrigation.wsu.edu/Content/Fact-Sheets/Sprinkler-and-Drip-Equipment.pdf
- NETAFIM. (2009). NETAFIM USA PRODUCT UPDATE: Supernet and supernet JR. Micro-sprinklers. Retrieved June 18, 2014, from http://www.netafimusa.com/files/literature/agriculture/sprinklers/SuperNet-update.pdf
- NETAFIM. (n.d.). Control Valves. Retrieved June 27, 2014, from http://www.netafim.com/product/control-valves
- NETAFIM. (n.d.). SUPERNET LR & LRD. Retrieved June 18, 2014, from http://www.netafim.com/Data/Uploads/130318 SuperNet LR and LRD.pdf
- NETAFIM. (n.d.). SUPERNET TECHNICAL. Retrieved June 18, 2014, from http://www.netafimusa.com/agriculture/products/supernet-tech
- SENSORES. (n.d.). Retrieved June 22, 2014, from http://www.unet.edu.ve/~ielectro/sensores.pdf
- Seyed Y. S. Lisar, Rouhollah Motafakkerazad, M. M. H. and I. M. M. R. (2002). Introductory Chapter Water Stress in Plants : Causes , Effects and Responses. University of Chittagong; University of Tabriz, 1–14.
- Shahidian, S., Serralheiro, R. P., Teixeira, J. L., Santos, F. L., Oliveira, M. R. G., Costa, J. L., … Machado, R. M. (2009). Drip irrigation using a PLC based adaptive irrigation system. WSEAS Transactions on Environment and Development, 5(2), 209–218.
- Starry, O. (2013). The Comparative Effects of Three Sedum Species on Green Roof Stormwater Retention. Dissertation Submitted to the Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, College Park.

- TEXAS INSTRUMENT. (2013). Datasheet: Voltage Regulator tl720m05. Retrieved January 27, 2015, from http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl720m05-q1.pdf
- TEXAS INSTRUMENT. (2013). Engineer It - When to use an analog temp sensor vs. a thermistor. Retrieved June 21, 2014, from http://focus.ti.com/general/docs/video/Portal.tsp?lang=en&entryid=0_l5gvb38i&DCMP=analog-engineerit&HQS=analog-engineerit-mcs-watchtolearn-hpa-mhr-sen-sensetherm-em-engit-v-en&sp_rid_pod4=Nzg3NDA4NTU3MTIS1&sp_mid_pod4=45984440
- TEXAS INSTRUMENT. (2014). Datasheet: Voltage Regulator TLV1117-33. Retrieved January 27, 2015, from http://www.ti.com/lit/ds/slvs561l/slvs561l.pdf
- Universidad Industrial de Santander. (2010). PROYECTO ARQUITECTONICO INGENIERIAS ELECTRICA - ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES: Planta Quinto Piso. Retrieved May 10, 2014, from https://www.uis.edu.co/procesos_contratacion/contratacion/documentos/Licitaciones/Licitaciones2011/Licitaciones16/Definitivos/06. PLANTA QUINTO PISO.pdf
- Universidad Industrial de Santander. (2010). PROYECTO ARQUITECTONICO INGENIERIAS ELECTRICA - ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES: Planta Terraza. Retrieved May 10, 2014, from https://www.uis.edu.co/procesos_contratacion/contratacion/documentos/Licitaciones/Licitaciones2011/Licitaciones16/Definitivos/07. PLANTA SEXTO PISO.pdf
- Valbuena, M. de R. (2012). IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO DE TECHO VERDE Y SU BENEFICIO TÉRMICO EN UN HOGAR DE HONDA, TOLIMA (COLOMBIA). PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE ESTUDIOS AMBIENTALES Y RURALES.
- VEGETRONIX. (2008). VH400 Piecewise Curve. Retrieved June 15, 2014, from http://vegetronix.com/Products/VH400/VH400-Piecewise-Curve.phtml

- VEGETRONIX. (2008). VH400 Rev A to Rev G: VWC to Voltage Curves. Retrieved June 15, 2014, from http://www.vegetronix.com/Curves/VH400-RevA/VG400-RevA-Curves.phtml
- Weathermatic. (n.d.). Advanced Irrigation Management Technology. Retrieved June 15, 2014, from http://www.weathermatic.com
- Woolf, P. (n.d.). P&IDs Notation, Construction, & Interpretation. University of Michigan.
- Zielinski, Seweryn. García Collante, Mario Alberto. Vega Paternina, J. C. (2013). Techos Verdes: ¿Una herramienta viable para la gestión ambiental en el sector hotelero del Rodadero, Santa Marta? Garden Design Journal, 35–37.

ANEXOS

ANEXO A. TABLAS

Tabla A. 1 Coeficientes de polinomios NIST

	Tipo de termocupla ($T = a_0 + a_1v + a_2v^2 + \ldots + a_nv^n$)					
	E	**J**	**K**	**R**	**S**	**T**
Rango	0° a 1000°C	0° a 760°C	0° a 500°C	-50° a 250°C	-50° a 250°C	0° a 400°C
a_0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
a_1	1,70503E-2	1,97842E-2	2,50835E-2	1,88913E-1	1,84949E-1	2,59280E-2
a_2	-2,33017E-7	-2,00120E-7	7,86010E-8	-9,38352E-5	-8,00504E-5	-7,60296E-7
a_3	6,54355E12	1,03696E-11	-2,50313E-10	1,30686E-7	1,02237E-7	4,63779E-11
a_4	-7,35627E-17	-2,54968E-16	8,31527E-14	-2,27035E-10	-1,52248E-10	-2,16539E-15
a_5	1,78960E-21	3,58515E-21	-1,22803E-17	3,51456E-13	1,88821E-13	6,04814E-20
a_6	8,40361E-26	-5,34428E-26	9,80403E-22	-3,89539E-16	-1,59085E-16	-7,29342E-25
a_7	-1,37358E-30	5,09989E-31	-4,41303E-26	2,82394E-19	8,23027E-20	
a_8	1,06298E-35		1,05773E-30	-1,26072E-22	-2,34181E-23	
a_9	-3,24470E-41		-1,05275E-35	3,13536E-26	2,79786E-27	
A_1				-3,31877E-30		
Error	±0,02°C	±0,05°C	±0,05°C	±0,02°C	±0,02°C	±0,03°C

Tabla A. 2 Datos técnicos aspersor Netafim SuperNet LR

MODE-LO	**VELO-CIDAD DE FLU-JO (L/h)**	**TAMAÑO DE LA BOQUILLA ()mm)**	**RANGO PRE-SIÓN DE TRABAJO (BAR)**	**CONS-TANTE K**	**EXPO-NENTE X**	**DIÁMETRO DE RIEGO (m)**	
						MODELO LR 20 (cm) Encima del suelo	**MODELO LR 20 (cm) Encima del suelo**
020	20	0,89	1,5 - 4,0	20	0	4,5	1,5
030	30	1,14	1,5 - 4,0	30	0	6	1,5
035	35	1,2	1,5 - 4,0	35	0	6	1,5
040	40	1,28	1,5 - 4,0	40	0	6	1,5
050	50	1,43	1,5 - 4,0	50	0	7	1,5
058	58	1,55	1,5 - 4,0	58	0	7	1,5
070	70	1,73	1,5 - 4,0	70	0	7	2
090	90	1,74	1,5 - 4,0	90	0	7	2
110	110	1,7	2,0 - 4,0	110	0	8	2

Tabla A. 3 Galones por minutos (GPM) máximo en un valor seguro de acuerdo al diámetro de la tubería

	GPM Máximo Disponible (GPM Máximo Seguro)				
Tamaño de la Tubería	**Tubería de Acero**	**Tubería de Cobre**	**Tubería PVC**	**Tubería PE (Polietileno**	**Tubería PEX (CTS)**
1/2"	6 GPM (7 ft/s)	6 GPM (7 ft/s)	6 GPM (7 ft/s)	6 GPM (7 ft/s)	6 GPM (7 ft/s)
3/4"	11 GPM (7 ft/s)	11 GPM (7 ft/s)	11 GPM (7 ft/s)	11 GPM (7 ft/s)	11 GPM (7 ft/s)
1"	18 GPM (7 ft/s)	18 GPM (7 ft/s)	18 GPM (7 ft/s)	18 GPM (7 ft/s)	18 GPM (7 ft/s)
1 1/4"	23 GPM (7 ft/s)	23 GPM (7 ft/s)	23 GPM (7 ft/s)	23 GPM (7 ft/s)	/
1 1/2"	32 GPM (7 ft/s)	32 GPM (7 ft/s)	32 GPM (7 ft/s)	32 GPM (7 ft/s)	/
2"	52 GPM (7 ft/s)	52 GPM (7 ft/s)	52 GPM (7 ft/s)	52 GPM (7 ft/s)	/

Tabla A. 4 Flujo máximo a 10 [ft/s]

Tipo de Tubería	Tamaño	[GPM]
Cobre (Tipo L CTS)	1/2"	7
Cobre (Tipo L CTS)	5/8"	10
Cobre (Tipo L CTS)	3/4"	15
Cobre (Tipo L CTS)	1"	25
Acero (galv. IPS)	1/2"	9
Acero (galv. IPS)	3/4"	16
Acero (galv. IPS)	1"	26
PE "polietileno" (SDR - 7)	1/2"	5
PE "polietileno" (SDR - 7)	3/4"	16
PE "polietileno" (SDR - 7)	1"	26
SCH 40 PVC/CPVC (IPS)	1/2"	9
SCH 40 PVC/CPVC (IPS)	3/4"	16
SCH 40 PVC/CPVC (IPS)	1"	26
PEX (CTS SDR - 9)	3/8"	3
PEX (CTS SDR - 9)	1/2"	5
PEX (CTS SDR - 9)	3/4"	11
PEX (CTS SDR - 9)	1"	18
CPVC (CTS SDR - 11)	1/2"	5

CPVC (CTS SDR - 11)	3/4"	10
CPVC (CTS SDR - 11)	1"	20

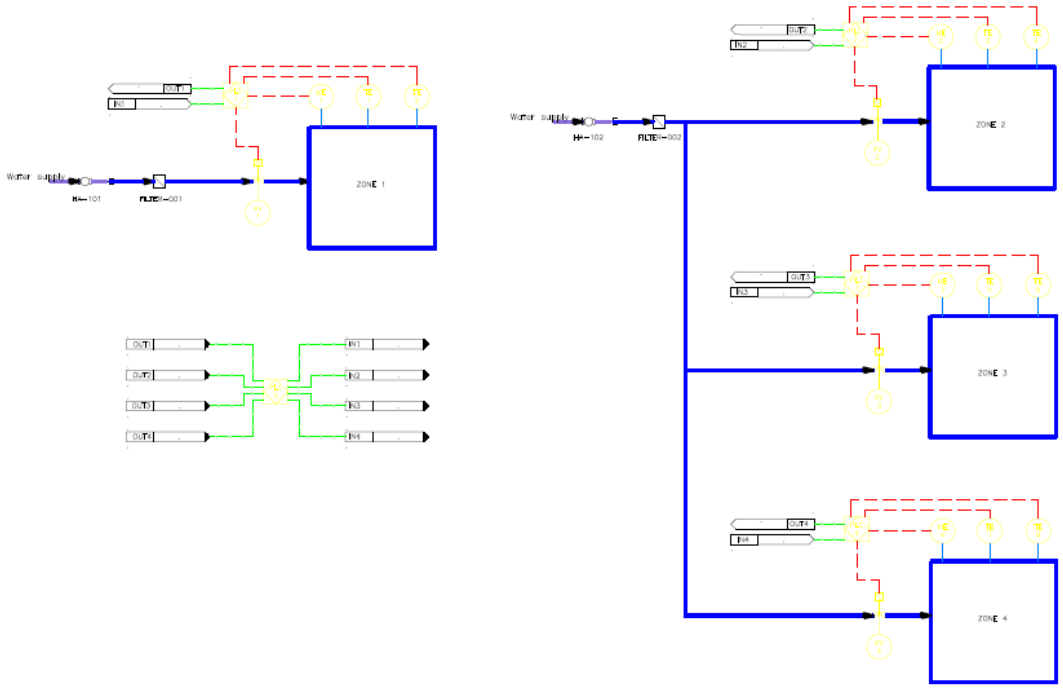
Tabla A. 5 Tamaño de la tubería o Chart

PSI/100										
0,2	**0,5**	**0,8**	**1**	**1,5**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**SIZE**
2,2	3,3	4,4	5	6,2	7,1	8,5	10	11	13	**3/4"**
3,8	6,3	8,1	9,2	11	13	17	20	22	24	**1"**
7,1	12	15	18	22	25	31	36	37	37	**1 1/4"**
11	16	22	24	31	35	44	48	49	49	**1 1/2"**
18	30	40	44	57	65	76	76	76	76	**2"**
28	46	60	67	83	96	114	114	114	114	**2 1/2"**
46	75	100	112	140	162	165	170	170	170	**3"**
87	140	185	208	250	280	280	280	280	280	**4"**
255	410	540	600	600	600	600	600	600	600	**5"**

ANEXO B. P&ID

En el P&ID se puede observar la distribución de las boards de riego en cada zona respectivamente y el envío y recepción de datos por parte de estas hacia el módulo de control, como se muestra a continuación en la Figura 34.

Figura 34. Distribución de las zonas



ANEXO C. MANUAL DE MONTAJE CONTROL PARA LAS ZONAS

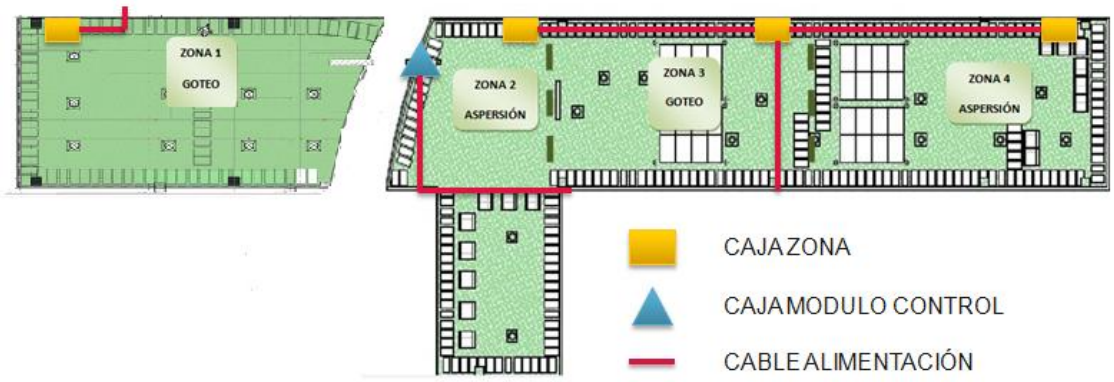
Tabla C. 1 Materiales para control de las zonas

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
Caja Dexson DXN501DG (Caja Derivación Gris 18148)	2
Caja Dexson DXN502DG (Caja Derivación Gris 22179)	1
Caja Dexson DXN500DG (Caja Derivación Gris 10105)	2
Board riego	4
Arduino Nano	4
Arduino Uno	1
XBee® S2	5
Wireless Shield	1
XBee® explorer	1
Tarjeta SD 2gb	1
Sensor humedad del suelo VEGETRONIX	4
Sensor temperatura del suelo VEGETRONIX	4
Termistor con cobertura en acero	8
Jumper cap 2 pines	5
Jumper cap 3 pines	12
Cargador de pared 9V para Arduino Uno	1
Regleta 1 x 3 pines hembra	8
regleta 1 x 2 pines hembra	8
Transformador 120v entrada, salida bidevanada de 5 y 24V respectivamente con devanado aislado entre sí, es decir no comparten la misma tierra.	2
Broca madera 1/4''	1
Broca madera 3/32''	1
Broca de 5/32''	1
Broca 5/64''	1
Broca 3/16'' aluminio	1
Bornera plástica	2
Tornillos 3/32''	7
Tornillos 3/16" x ½" largo con arandela y tuerca	4
Tornillos 5/32'' por 1 9/16'' (39,6mm)	4
Tornillos y base de sujeción para PCB de 5/64''	20
Tornillos ¼''	16
Chazos1/4''	16
Taladro	1
Cable encauchetado 2x18 AWG x 1m	35
Cable encauchetado 4x18 AWG x 1m	33
Conector macho a enchufe	2
Velcro x 1m	1
Cautín	1
Soldadura x 1m	3

Plástico termoencogible en forma de cable x 50cm	1
Base pared enchufe sencillo para sobreponer	1
Platina aluminio 1” ancho por 1/16” grosor x 1m	1
Segueta	1

En la Figura 35 se muestra la ubicación de las cajas de control en el quinto y sexto piso, para cada una de las zonas, respectivamente, brindando la mejor intensidad de la señal posible.

Figura 35. Distribución cajas de control

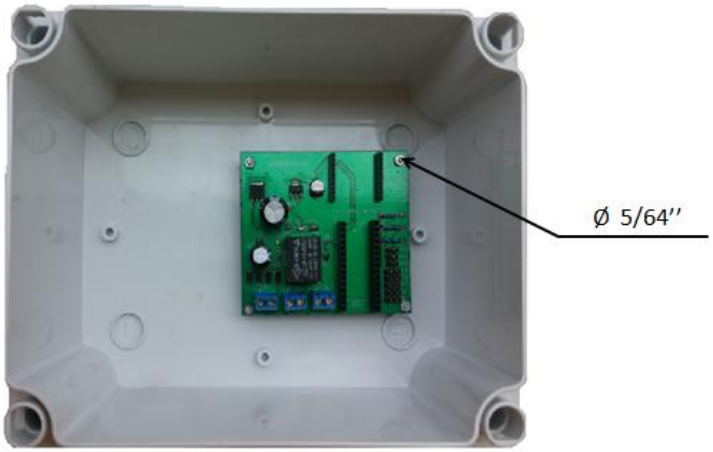


MANUAL DE MONTAJE PARA LA ZONA 1

1. Se introduce en la caja Dexson 18148 la board de riego y se marcan las perforaciones de esta en la cara E (Figura 36 y 37).

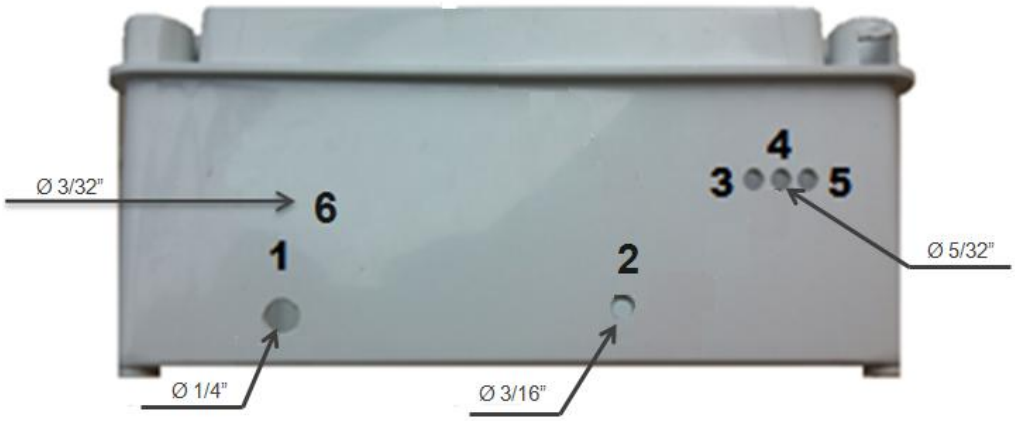
Figura 36. Caja Dexson DXN501DG (Caja Derivación Gris 18148)

Figura 37. Montaje board de riego en Caja Dexson DXN501DG



2. Con la broca de 5/64'' se taladra en las marcas realizadas en el punto anterior.
3. Realizar con el taladro las perforaciones en la cara B con las brocas de 1/4'', 5/32'' y 3/16'' (Figura 38).

Figura 38. Perforación del taladro en la cara B



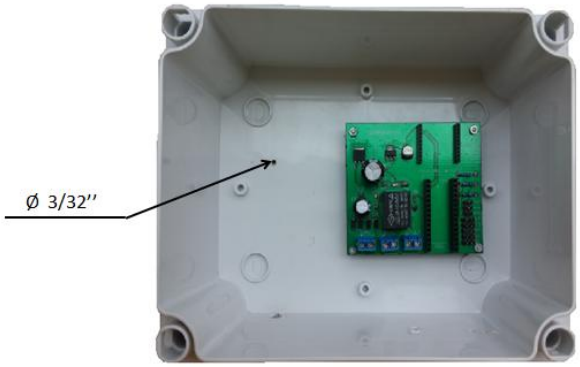
NOTA: el número de orificios para los sensores es proporcional de acuerdo al número de sensores a implementar, en este caso 4 aunque pueden ser más o menos.

4. Introducir dos pines de la bornera y realizar la marcación para su posterior perforación con la broca de 3/32 en la cara E de la caja (Figura 39).
5. Para sujetar el transformador en la caja con el fin de evitar que este se pueda desplazar por un movimiento, se debe realizar una perforación en la posición 6 con una broca de 3/32” e insertar el tornillo de 3/32” de

adentro hacia afuera sobre el velcro de forma que este fijo en la base del transformador.

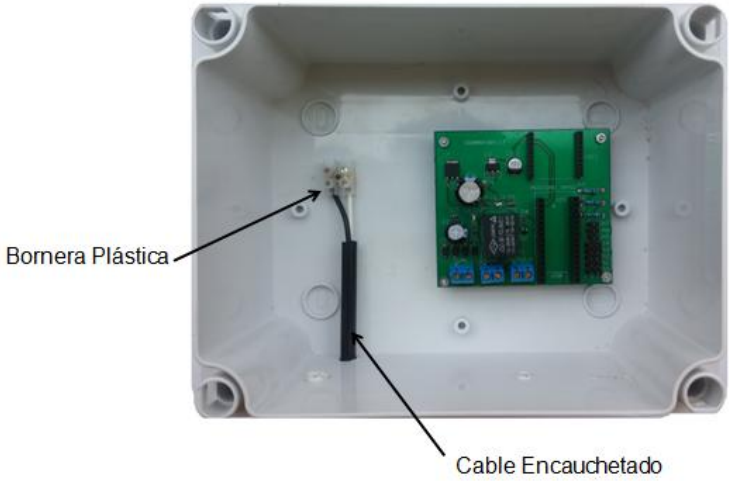
6. Envolver el transformador con el velcro.

Figura 39. Perforación de la cara E para el tornillo de sujeción de la regleta



7. Introducir el cable encauchetado listo para realizar conexiones eléctricas (conexión con conector macho para enchufe, anteriormente se debe medir la distancia desde la alimentación eléctrica para saber la longitud del cable) en el orificio 1, y posteriormente realizar las conexiones del cable encauchetado a la bornera en un extremo y en el otro extremo las conexiones de entrada a el transformador (Figura 40).

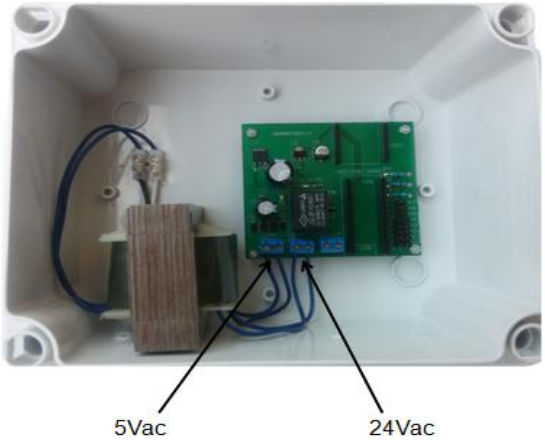
Figura 40. Montaje cable encauchetado con bornera



8. Posicionar la bornera de dos pines en la cara E de la caja y realizar la sujeción con un tornillo de 3/32.

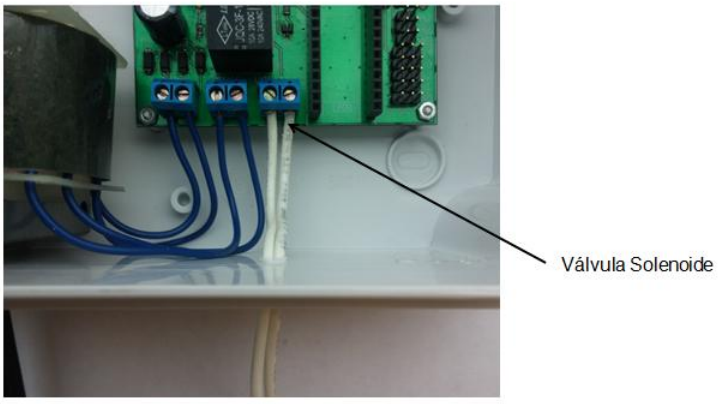
9. Realizar las conexiones entre las salidas del transformador y la board de riego de acuerdo a la Figura 41.

Figura 41. Conexión entre salidas del transformador y board de riego



10. Insertar las conexiones de la válvula solenoide por el orificio 2 y realizar la conexión en la board. (Figura 42).

Figura 42. Montaje de la válvula solenoide



NOTA: si la conexión entre la válvula y la board es muy corta se puede extender con más cable.

11. Insertar los sensores por los orificios para estos y realizar las conexiones de acuerdo al tipo de sensor y posición. (Figura 43).

    NOTA: se introduce el sensor sin conector y posteriormente se solda cada pin del sensor a la regleta de 1x3 pines o 1x2 pines respectivamen-

te (Figura 44), ya sea para el sensor de humedad o temperatura. Para el sensor de humedad y temperatura del suelo, el cable negro, es decir la salida del sensor debe ir en el medio de la regleta, es decir en el pin 2; en cambio para el termistor no afecta ya que este al ser un sensor resistivo no influye el orden de su conexión. El termoencogible se puede recortar por el medio y posteriormente rodear la parte soldada con este aunque hay que calentarlo con el cautín para que se adhiera a la conexión.

Figura 43. Soldadura del sensor a la regleta

Figura 44. Soldadura del sensor a la regleta

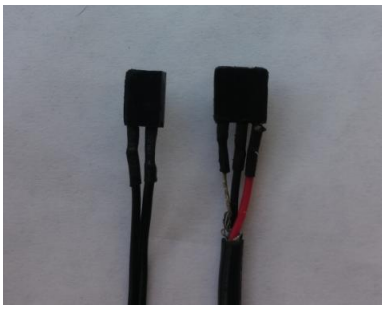


Tabla C. 2 Posición del sensor en la board

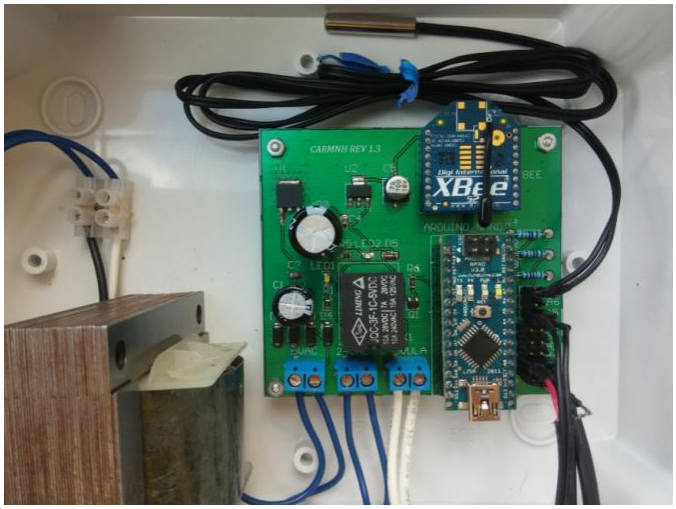
Sensor	Posición
Sensor de humedad del suelo	A0
Sensor de temperatura del suelo	A1
Termistor 1	A5
Termistor 2	A7

NOTA: el cable rojo del sensor es el voltaje de 5V el cual debe ir a la conexión positiva del sensor en la board marcada con un (+) en la parte inferior derecha de esta.

NOTA: Utilizar jumper caps en los pines de los sensores de la board que no sean utilizados

12. Insertar los chazos en los orificios de la pared hechos con una broca de ¼'' y posteriormente realizar la sujeción con tornillos a la pared.
13. Por último realizar el montaje del arduino y la XBee® de acuerdo a como se encuentra marcado en la board (Figura 45).

Figura 45. Montaje arduino y XBee® s2



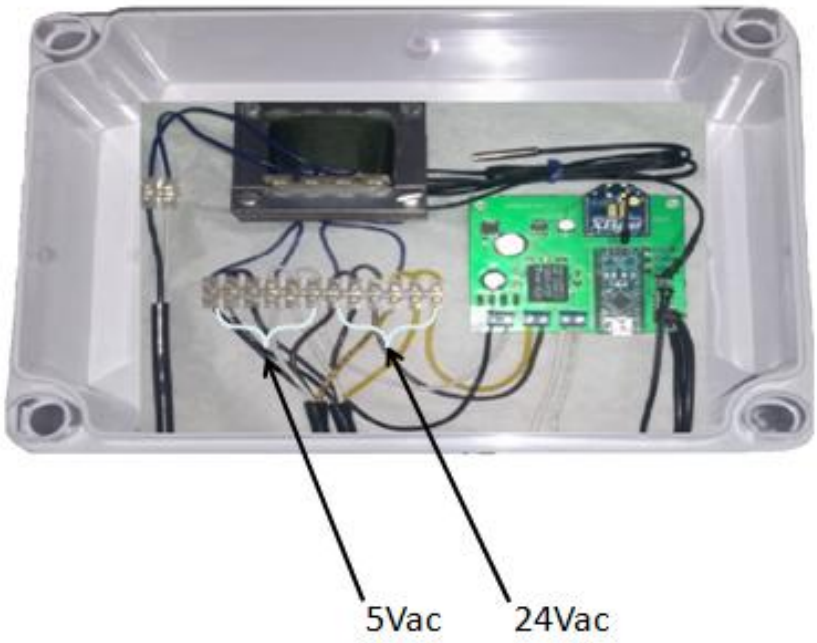
MANUAL DE MONTAJE PARA LA ZONA 3

1. Para cada zona se implementará una caja de control (PCB de riego con sensores y válvula respectiva).

   NOTA: ya que se derivará la alimentación del transformador para las zonas 2, 3 y 4, se debe utilizará la caja Dexson 22179 en la zona 3.

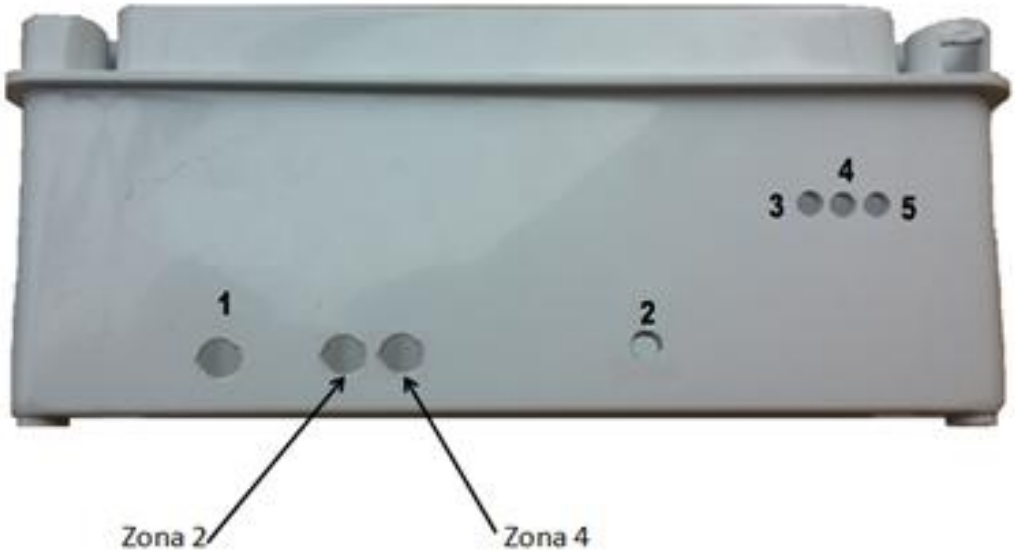
2. Se realizan los mismos pasos del montaje en la zona uno hasta el 3 punto, con la adición de otra bornera con 12 pines para poder derivar las tensiones de salida del transformador (Figura 46) y añadir dos orificios más de 1/4'' para las derivaciones del transformador en la zona 3 hacia las zonas 2 y 4 (Figura 47).

Figura 46. Montaje bornera derivación transformador



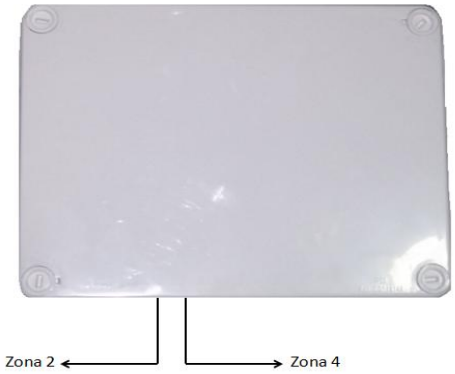
NOTA: para los orificios del transformador utilizar broca de 5/32'' y 4 tornillos de 5/32'' por 1 9/16'' (39,6mm) de largo para la sujeción de este.

Figura 47. Perforaciones cara B caja Dexson 221714



3. Repetir los puntos 4 a 13 del montaje en la zona 1 con la adición de la conexión de cable encauchetado 4x18 AWG para la alimentación de las zonas 2 y 4 (Figura 48).

Figura 48. Alimentación para zonas 2 y 4 a partir de la zona 3



NOTA: tener presente el color de cada conexión, es decir si la salida de 5V es roja, conectar el otro extremo del cable rojo a la entrada de 5v en las demás cajas y así respectivamente. NO combinar colores ya que puede causar un corto.

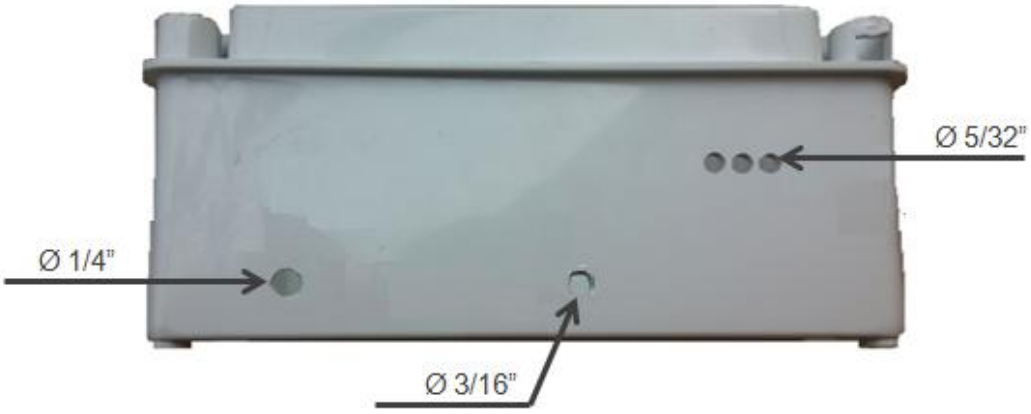
MANUAL DE MONTAJE PARA LAS ZONAS 2 Y 4.

1. Para las zonas 2 y 4 se utilizará la caja Dexson 10105 que es la más pequeña la cual es suficiente para el montaje de la board de riego. Al igual que en la zona 1, se realizan las perforaciones para la board de riego (Figura 49).

Figura 49. Montaje caja Dexson pequeña cara E

2. En la cara B se realiza la perforación de ¼'' que quede perfectamente horizontal con el centro de los conectores de tornillo de la board para la alimentación de 5 y 24V respectivamente y a su vez se debe realizar el orificio de la válvula solenoide con la broca de 3/16'' y 5/16'' para los sensores (Figura 50).

Figura 50. Perforaciones caja Dexson pequeña cara B



3. Realizar las conexiones de la válvula y sensores de acuerdo al manual de montaje de la zona 1.

MANUAL DE MONTAJE PARA EL MÓDULO CENTRAL

En la Figura 51 y 52 se puede observar las perforaciones en la cara B y E respectivamente para los orificios de los huecos de sujeción del arduino Uno y el conector de enchufe respectivamente.

Figura 51. Perforaciones caja Dexson cara B zona de control

Figura 52. Perforaciones caja Dexson cara E zona de control

Se monta la XBee® sobre la *Wireless Shield* la cual va montada sobre el arduino Uno, el cual se alimenta con el cargador de 9 V, y posteriormente se inserta la SD en la Wireless Shield, realizando el montaje de estos componentes en la caja de control Figura 53.

Figura 53. Montaje caja control

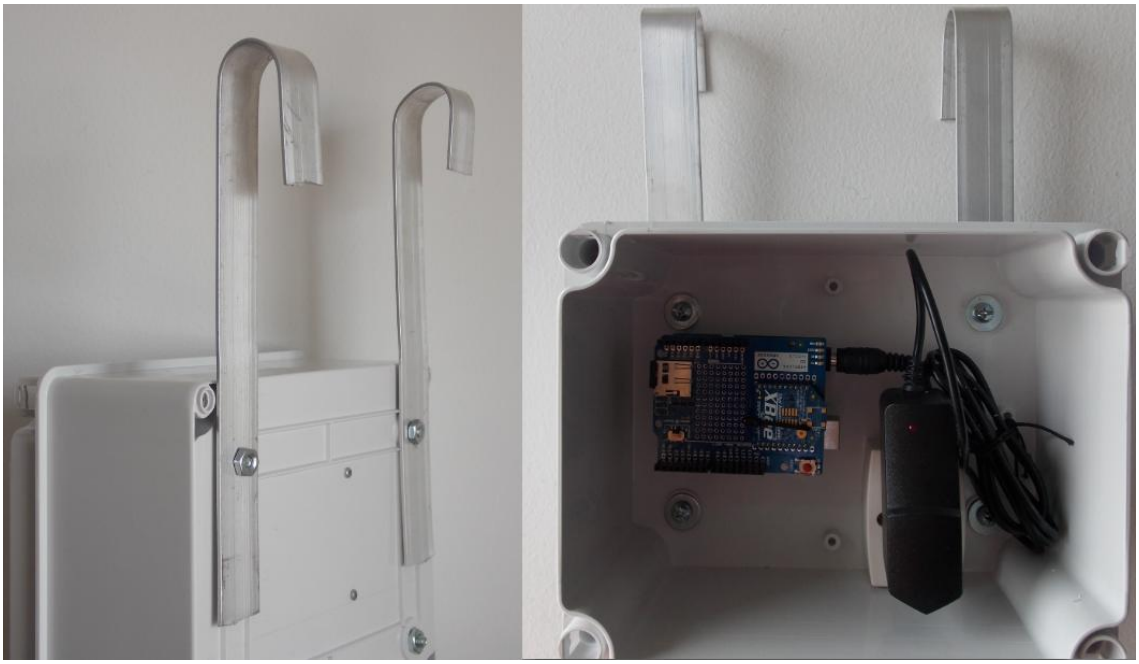
NOTA: la SD se debe formatear en formato FAT16 o FAT32, para poder guardar información en ella.

El código se debe cargar en el arduino Uno con la SD insertada ya que la escritura sobre este inicia cuando se ejecuta el código por primera vez.

Cada vez que se retire la SD para extraer los datos de esta, se debe reiniciar el código en el arduino por medio del botón reset, o desconectando y reconectando la alimentación en este.

Para montar la caja de control sobre las barandas en el sexto piso se debe cortar la platina de aluminio en 2 piezas de 25cm, para posteriormente doblar las puntas a una longitud de 7 cm con la forma del tubo sobre el cual se apoya la caja de control. Se debe taladrar un hueco de 3/16” a 4 cm del borde de la platina y centrado el cual sirve como soporte de sujeción para la caja de control Figura 54.

Figura 54. Platinas montaje caja control



NOTA: si se desea mayor soporte en la caja de control se pueden poner dos platinas más en los huecos de sujeción inferiores, al igual que en el parte superior.

ANEXO D. MONTAJE ESTRUCTURA DE RIEGO

Tabla D. 1 Materiales para estructura de riego

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
Filtro malla 1''	2
Manguera 1'' rollo x100m	1
Manguera 16mm rollo x 100m	1
Tubería con gotero incorporado cada 50cm de16mm 2 L/H	434
Tapón roscado 1'' P.V.C	4
Acople macho polietileno 1''	14
Codo 90° polietileno 1'' roscado	2
Niple 1" roscado	4
Niple 3/4" roscado	2
Unión hembra 1'' roscada	2
T polietileno 1''	2
Tubo 1'' P.V.C x 1m	1
Soldadura P.V.C	1
Unión universal roscada P.V.C 3/4'' PMV	2
Unión universal roscada P.V.C 1'' PMV	4
Unión reducción copa roscada P.V.C 1''x3/4'' PMV	2
Conector polietileno con silleta 16mm	59
Abrazadera 1"	20
T polietileno 16mm	6
Codo polietileno 16mm	4
Conector tapón obturador 16mm	66
Cinta teflón	2
Válvula solenoide 1'' WEATHER MATIC	4
Microaspersores netafim SuperNet LR 30 L/H + microtubo + estaca	27
Broca estaca para madera 5/8 titanio	1
Pinza para abrir hueco microconector	1
Segueta	1

Todas las tuberías de alimentación (1'') se montarán paralelamente a la pared Norte del edificio.

ZONA 1

Conectar los componentes en el siguiente orden a la llave de suministro de agua:

NOTA: **se debe utilizar teflón alrededor de todas las uniones roscadas macho para evitar fugas y antes de aplicar la soldadura para P.V.C. se debe limpiar las uniones.**

1. Unión universal roscada P.V.C 3/4'' PMV
2. Niple macho 3/4'' P.V.C
3. Unión reducción copa roscada P.V.C 1''x3/4'' PMV
4. Filtro malla 1''
5. Codo 90° polietileno 1'' roscado
6. Acople macho polietileno manguera 1"
7. Cortar unos 40 cm de manguera aproximadamente hasta que llegue al borde de la baldosa e introducir un codo de polietileno de 1"
8. Cortar unos 30 cm de manguera y unir un acople de polietileno en el otro extremo, y unir la manguera con el codo de polietileno
9. Unión universal roscada P.V.C 1'' PMV
10. Niple macho 1'' P.V.C
11. Válvula solenoide 1"
12. Acople polietileno 1" manguera
13. Manguera 1'' hasta que finalice la pared norte en el extremo contrario (la parte plana de la manguera debe quedar hacia el sur del edificio), introducir las abrazadera antes de ajustar la manguera.
14. Introducir el acople macho polietileno 1'' en el extremo de la manguera
15. Tapón roscado 1'' P.V.C con el acople macho

NOTA: se recomienda calentar la manguera en los extremos con fuego para poder realizar de manera más fácil las conexiones

Utilizar abrazaderas en cada conexión para evitar fugas en estas

Ahora se realizarán las líneas laterales:

16. Con la broca de 5/8 para madera se realizarán 24 orificios en la parte plana de la manguera, cada 50cms
17. Introducir la silleta en la manguera de 1'' con la parte redonda hacia el interior de la manguera
18. Insertar el conector de 16mm dentro de la silleta
19. Medir la manguera de 16mm con gotero incorporado desde el conector con silleta, hasta el borde opuesto del techo (parte sur del edificio) donde empiezan las baldosas de concreto. La manguera debe ir dentro de la separación de cada baldosa desde la pared para tener un acabado pulcro.

NOTA: el gotero debe ser ubicado de forma lateral al suelo, no con el gotero hacia abajo ni arriba.

Al finalizar cada línea se debe cerrar con un obturador; se introduce el obturador, luego se dobla la punta y se introduce en el otro extremo del obturador. Se realiza el mismo procedimiento con las demás líneas hasta terminar.

En los puntos donde las baldosas interfieran con el goteo, se utilizara una T y codo de 16mm para extender la línea hacia ese punto (Figura 55). Utilizar codos y T's en los puntos donde se observan ángulos de 90° en la manguera de 16mm con gotero incorporado.

Figura 55. Distribución del riego en la zona 1

ZONAS 2, 3 Y 4

Conectar los componentes en el siguiente orden a la llave de suministro de agua:

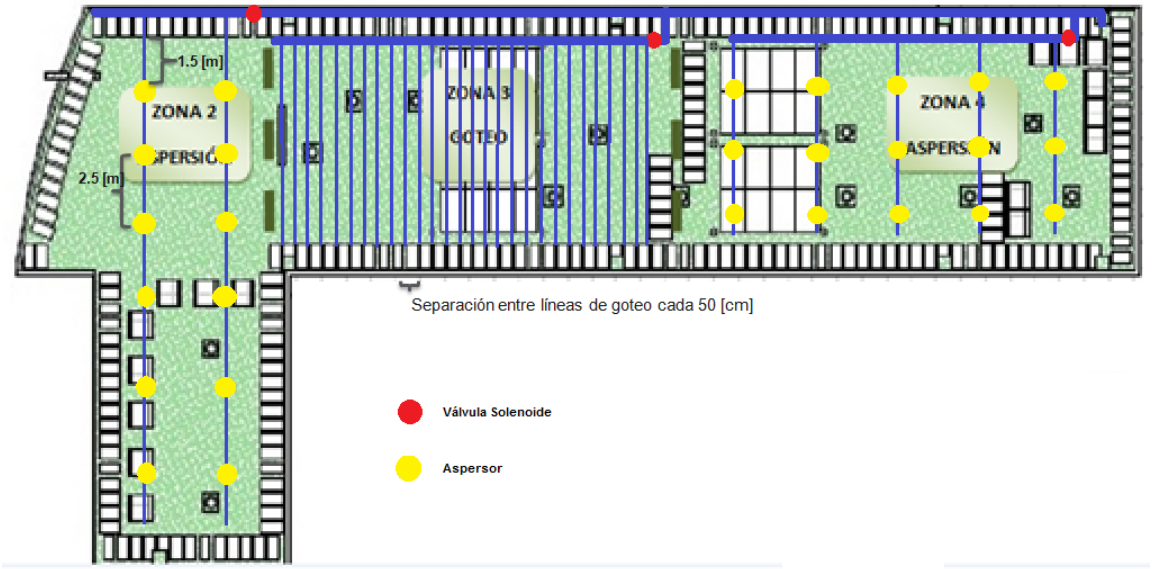
NOTA: se debe utilizar teflón alrededor de todas las uniones roscadas macho para evitar fugas y antes de aplicar la soldadura para P.V.C. se debe limpiar las uniones.

1. Unión universal roscada P.V.C 3/4'' PMV
2. Niple macho 3/4'' P.V.C
3. Unión reducción copa roscada P.V.C 1''x3/4'' PMV
4. Filtro malla 1''
5. Codo 90° polietileno 1'' roscado
6. Acople macho polietileno manguera 1"
7. Cortar unos 40 cm de manguera aproximadamente hasta que llegue al borde de la baldosa e introducir un codo de polietileno de 1"

A partir de este punto se montará la tubería principal para las zonas 2, 3 y 4 y la distribución será como se presenta en la Figura 56:

1. Usar un tramo de 20cm de manguera de 1’’
2. Conectar una T de 1’’ al tramo de 20cm proveniente del codo de 90° y en él la punta central de la T se conectara la zona 4.
3. Del otro extremo de la T se conectará manguera de 1’’ hasta donde inicia la zona 3 y se realizará un corte para insertar una T de 1’’ en polietileno al igual que en el punto anterior.
4. A partir de este punto se extenderá el siguiente tramo de manguera de 1’’ para la zona 2 hasta donde empieza la zona dos, en este punto se insertara un Acople macho polietileno 1’’.
5. Se extiende la manguera hasta finalizar el muro norte, luego se insertará un Acople macho polietileno de 1’’ y posteriormente el tapón roscado 1’’ P.V.C con el acople macho.

Figura 56. Distribución del riego en el sexto piso



ZONA 2

La válvula solenoide de 1’’ se inserta con un niple de 1”, luego una válvula universal de 1” y posteriormente a un acople polietileno de 1’’, y en su otro extremo se inserta otro acople macho polietileno de 1’’ para continuar con la conexión a 1’’ en manguera.

En el punto donde inicia la zona 2 después de la válvula solenoide se utilizará la broca de 5/8 para madera se realizarán 2 orificios en la parte plana de la

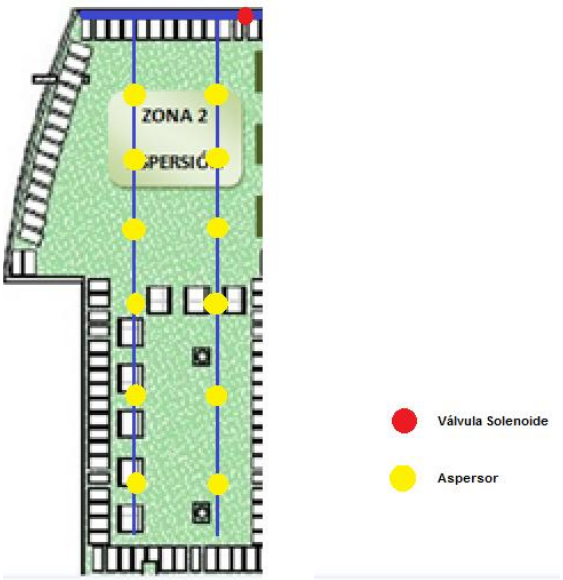
manguera cada 3 metros de acuerdo a la imagen, con un total de 2 líneas laterales.

Se insertan las silletas y conectores en la manguera de 1'' con la parte redonda hacia el interior de la manguera.

Insertar el conector de 16mm dentro de la silleta.

Medir la manguera de 16mm con desde el conector con silleta, hasta el borde opuesto del techo (parte sur del edificio) donde empiezan las baldosas de concreto. La manguera debe ir dentro de la separación de las baldosas desde la pared para tener un acabado pulcro (Figura 57).

Figura 57. Distribución del riego en la zona 2



Al finalizar cada línea se debe cerrar con un obturador; se introduce el obturador, luego se dobla la punta y se introduce en el otro extremo del obturador. Se realiza el mismo procedimiento con las demás líneas hasta terminar.

Para la distribución de las dos líneas de aspersión observar la imagen, en la cual los aspersores tienen una separación de 3m entre sí, el orificio de este se realiza con la pinza para abrir el hueco del microconector.

ZONA 3

En el punto donde inicia la zona 3, usar un tramo de longitud igual a la baldosa con manguera de 1'' y conectar un codo de 90° en polietileno de 1''

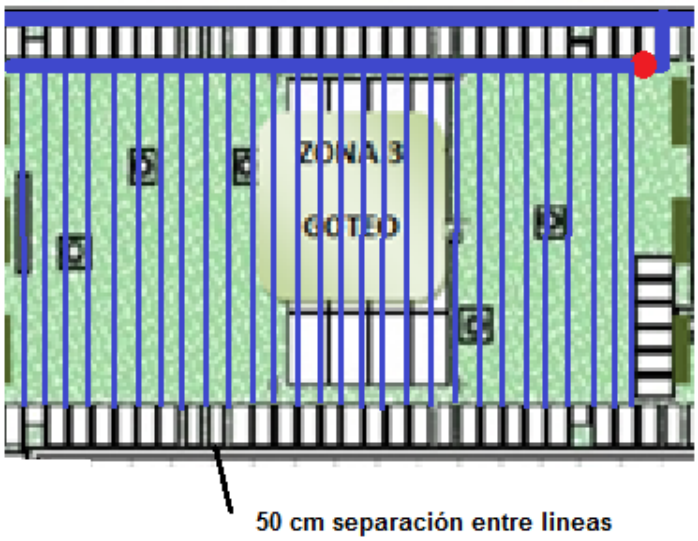
Se conecta un tramo de 20 cm de manguera de 1'' al codo

La válvula solenoide de 1'' se inserta con un niple de 1", luego una válvula universal de 1" y posteriormente a un acople polietileno de 1'', y en su otro extremo se inserta otro acople macho polietileno de 1'' para continuar con la conexión a 1'' en manguera.

A partir de este punto se extenderá el siguiente tramo de manguera de 1'' para la zona 3 hasta donde empieza la zona dos, en este punto se insertará un Acople macho polietileno 1'' y posteriormente el tapón roscado 1'' P.V.C.

Después de la válvula solenoide se utilizará la broca de 5/8 para madera se realizaran 28 orificios en la parte plana de la manguera cada 50cm de acuerdo a la (Figura 58).

Figura 58. Distribución del riego en la zona 3



Se insertan las silletas y conectores en la manguera de 1'' con la parte redonda hacia el interior de la manguera.

Insertar el conector de 16mm dentro de la silleta.

Medir la manguera de 16mm con gotero incorporado desde el conector con silleta, hasta el borde opuesto del techo (parte sur del edificio) donde empiezan las baldosas de concreto.

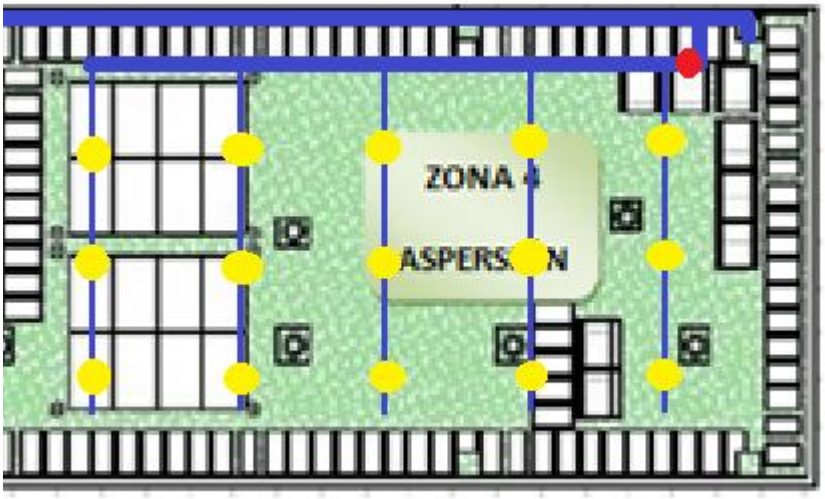
ZONA 4

En el punto donde inicia la zona 3, usar un tramo de longitud igual a la baldosa con manguera de 1'' y conectar un codo de 90° en polietileno de 1''

Conectar un tramo de 20cm después del codo e inserta el acople de 1'' luego la válvula universal de 1", posteriormente el niple de 1" y la válvula solenoide de 1'' se inserta en este y en su otro extremo otro acople macho polietileno de 1'' para continuar con la conexión a 1'' en manguera.

Después de la válvula solenoide se utilizará la broca de 5/8 para madera y se realizarán 2 orificios en la parte plana de la manguera cada 3 metros (Figura 59), con un total de 5 líneas laterales.

Figura 59. Distribución del riego en la zona 4



Se insertan las silletas y conectores en la manguera de 1'' con la parte redonda hacia el interior de la manguera.

Insertar el conector de 16mm dentro de la silleta.

Medir la manguera de 16mm desde el conector con silleta, hasta el borde opuesto del techo (parte sur del edificio) donde empiezan las baldosas de concreto. El orificio de este se realiza con la pinza para abrir el hueco del microconector.

ANEXO E. UBICACIÓN DE LOS SENSORES

SENSOR DE HUMEDAD DEL SUELO

El sensor se debe ubicar de forma paralela al suelo realizando un hueco en el sustrato de 10 (cm) aproximadamente, y posteriormente cubrirlo completamente con el sustrato, ya que si entra en contacto con el aire puede afectar la medición de este.

Se debe ubicar en el medio del sistema de distribución de agua, es decir si el sistema es por aspersión se ubicará en el medio de los dos aspersores, ya que este será el punto que reciba menor irrigación en el sistema, y si es en un sistema por goteo se posicionara en el medio de dos goteros que se encuentren próximos, permitiendo que los goteros irriguen todo el sustrato.

Advertencia: nunca se debe tirar del sensor por medio del cable ya que esto puede dañarlo, siempre se debe tirar de la cobertura plástica que este tiene.

SENSOR DE TEMPERATURA DEL SUELO

El sensor de temperatura del suelo se puede ubicar en cualquier parte del sustrato de modo que este quede enterrado lo más cerca posible al fondo del sustrato, con el fin de demostrar la eficiencia en la aislación de temperatura por parte del techo verde.

Advertencia: nunca se debe tirar del sensor por medio del cable ya que esto puede dañarlo, siempre se debe tirar de la cobertura plástica que este tiene.

TERMISTOR

Un termistor se ubica internamente en la caja para medir la temperatura interna de esta.

El segundo termistor se ubica en el exterior de la caja para medir la temperatura ambiente, tratar que el termistor no entre en contacto directo con el sol ya que variara la medición. Se puede adherir a la pared donde esta soportada la caja de control por medio del cable, sin que entre en contacto con ningún objeto y a la vez no tenga radiación solar directa.

ANEXO F. MANUAL DE MANTENIMIENTO

BOARD DE RIEGO

Si la board se encuentra apagada verifique si las conexiones de alimentación se encuentran correctamente conectadas, entre ellas el cable de conexión, empalme en la bornera y conexión del transformador.

En dado caso que lo anterior no resuelva el problema verifique posibles cortos o partes dañadas en la board, en este caso es posible que se requiera el cambio de algún capacitor o circuito integrado. Una posible causa de esto es el exceso de humedad en el interior de la caja o sobrepicos de tensión.

Verificar que el led L del arduino nano parpadee 1 vez constante y posteriormente 3 veces de forma más rápida pero continua entre estas, ya que esto certifica que existe transmisión y recepción de datos entre los módulos inalámbricos, en caso contrario si el led parpadea de forma constante sin variación en la secuencia de este, se debe verificar que las XBee® estén conectadas correctamente a la board y que las cajas de cada zona y de control estén en la posición correcta de acuerdo a las Figuras 33 y 35 respectivamente.

SENSOR DE HUMEDAD DEL SUELO

Verificar que el sensor se encuentre completamente enterrado

Verificar la correcta conexión del sensor a la board de riego

Verificar con un multímetro que la tensión de alimentación para el sensor sea de 5V, en caso contrario es posible que el IC regulador de voltaje este dañado, lo que requiere un cambio inmediato y por consiguiente apagar la board hasta su reparación ya que puede causar daños a los demás componentes.

Con el sensor en mano verificar con un multímetro entre la salida (s) y tierra (-) que la tensión de salida sea 0 al aire y al cubrir con la mano la tensión de salida debe incrementar, en dado caso que no suceda esto el sensor puede estar dañado.

NOTA: Para visualizar este valor se conecta el Arduino Nano por medio de un cable al computador sin la board conectada a la alimentación. La conexión entre el arduino y el computador será suficiente para alimentar la tarjeta.

Advertencia: nunca se debe tirar del sensor por medio del cable ya que esto puede dañarlo, siempre se debe tirar de la cobertura plástica que este tiene.

SENSOR DE TEMPERATURA DEL SUELO

Verificar que el sensor se encuentre completamente enterrado

Verificar la correcta conexión del sensor a la board de riego

Verificar con un multímetro que la tensión de alimentación para el sensor sea de 5V, en caso contrario es posible que el IC regulador de voltaje este dañado, lo que requiere un cambio inmediato y por consiguiente apagar la board hasta su reparación ya que puede causar daños a los demás componentes.

Con el sensor en mano verificar con un multímetro entre la salida (s) y tierra (-) que la tensión de salida tenga un voltaje y posteriormente cubrir el sensor con la mano lo que debe incrementar la tensión de salida, esto con el fin de medir la variación de temperatura gracias al cuerpo, en dado caso que no suceda esto el sensor puede estar dañado.

NOTA: Para visualizar este valor se conecta el Arduino Nano por medio de un cable al computador sin la board conectada a la alimentación. La conexión entre el arduino y el computador será suficiente para alimentar la tarjeta.

Advertencia: nunca se debe tirar del sensor por medio del cable ya que esto puede dañarlo, siempre se debe tirar de la cobertura plástica que este tiene.

TERMISTOR

Con un multímetro los pines del termistor sin esté conectado deben medir 5v, en caso contrario el sensor puede estar dañado.

Verificar la correcta soldadura entre el termistor y el conector.

Con el termistor conectado y alimentado a la board de riego, cubrirlo con la mano y verificar que la temperatura incremente.

NOTA: Para visualizar este valor se conecta el Arduino Nano por medio de un cable al computador sin la board conectada a la alimentación. La conexión entre el arduino y el computador será suficiente para alimentar la tarjeta.

Advertencia: nunca se debe tirar del sensor por medio del cable ya que esto puede dañarlo, siempre se debe tirar de la cobertura metálica que este tiene.

VÁLVULA SOLENOIDE

Con el sistema en funcionamiento verificar con el sensor de humedad del suelo en mano si la válvula se abre, ya que al estar en contacto el sensor con la mano mide la humedad la cual es mayor que la configurada en el sistema, por lo que se debería abrir la válvula.

La válvula tiene un sistema de apertura manual el cual se abre con la rueda negra en la parte superior de esta, Figuras 60 y 61 la cual se gira para abrirla manualmente, en dado caso que no funcione es necesario reparar la válvula. **No olvidar cerrar la válvula manualmente en caso que este en buen funcionamiento.**

Si la válvula permite el paso del agua manualmente, se debe verificar con el multímetro que la tensión de alimentación de esta sea de 24Vac cuando se encuentra en funcionamiento con la tarjeta de riego. En caso contrario el solenoide se encuentra dañado y es necesario cambiarlo.

Figura 60. Estado de la válvula abierta

Figura 61. Estado de la válvula cerrada

ESTRUCTURA DE RIEGO

Destapar el filtro del sistema mensualmente y limpiarlo con agua hasta que esté limpio para su correcto funcionamiento.

Verificar que el sistema no tenga filtraciones en las conexiones, aspersores, goteros y obturadores, en dado caso ajustar las conexiones si esto no soluciona el problema se utilizarán abrazaderas para reforzar las conexiones y en dado caso que sea el obturador se debe cambiar por uno nuevo.

Con el sistema de riego en funcionamiento verificar la correcta rotación y riego de los aspersores, en caso contrario verificar si no existe algún objeto que obstruya el sistema o aspersores afectando su funcionamiento; si este no es el caso es posible que el aspersor se encuentre dañado y sea necesario cambiarlo.

ASPERSORES

Si los aspersores no dan el radio de riego de 6 [m], se debe verificar que el deflector de este no esté presente, el cual es una pequeña pestaña presente en la boquilla del aspersor, en dado caso que lo tenga se debe retirar de este para permitir que el diámetro de riego completo.

Verificar que no existan obstrucciones en las boquillas de los aspersores por posibles sólidos, se pueden limpiar destapándolos y soplando en sentido contrario al flujo de agua para destaparlos.

ANEXO G. PRESUPUESTO

A continuación se mostrará el presupuesto del costo de implementación del sistema para las terrazas verdes en 5to y 6to piso del Edificio de Ingeniería Eléctrica.

Tabla G. 1 Presupuesto del proyecto

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO
Caja Dexson DXN501DG (Caja Derivación Gris 18148)	2	36 000
Caja Dexson DXN502DG (Caja Derivación Gris 22179)	1	27 000
Caja Dexson DXN500DG (Caja Derivación Gris 10105)	2	24 000
Board riego	4	500 000
Arduino Nano	4	140 000
Arduino Uno	1	65 000
XBee® S2	5	400 000
Wireless Shield	1	76 000
XBee® explorer	1	50 000
Tarjeta SD	1	22 000
Sensor humedad del suelo VEGETRONIX	4	600 000
Sensor temperatura del suelo VEGETRONIX	4	620 000
Termistor NTC 10KΩ 1% B(3380) con cobertura en acero	8	160 000
Jumper cap 2 pines	5	10 000
Jumper cap 3 pines	12	10 000
Cargador de pared 9V para Arduino Uno	1	12 000
Regleta 1 x 3 pines hembra	8	16 000
regleta 1 x 2 pines hembra	8	16 000
Transformador 120v entrada, salida bidevanada de 5 y 24V respectivamente con devanado aislado entre sí, es decir no comparten la misma tierra.	2	90 000
Broca madera 1/4''	1	5 000
Broca madera 3/32''	1	3 000
Broca de 5/32''	1	2 000
Broca 5/64''	1	2 000
Broca 3/16'' aluminio	1	2 500
Bornera plástica	2	1 500
Tornillos 3/32''	7	1 000
Tornillos 3/16" x ½" largo con arandela y tuerca	4	1000
Tornillos 5/32'' por 1 9/16'' (39,6mm)	4	1 000
Tornillos y base de sujeción para PCB de 5/64''	20	24 000
Tornillos ¼''	16	4 000

Chazos1/4''	16	5 200
Taladro	1	50 000
Cable encauchetado 2x18 AWG x 1m	35	70 000
Cable encauchetado 4x18 AWG x 1m	33	112 000
Conector macho a enchufe	2	5 000
Cautín	1	20 000
Soldadura x 1m	3	6 000
Plástico termoencogible en forma de cable x 50cm	1	500
Base pared enchufe sencillo para sobreponer	1	3 000
Platina aluminio 1" ancho por 1/16" grosor x 1m	1	5 000
Segueta	1	10 000
Filtro malla 1''	2	70 000
Manguera 1'' rollo x100m	1	48 000
Manguera 16mm rollo x 100m	1	32 000
Tubería con gotero incorporado cada 50cm de16mm 2 L/H	434	412 300
Tapón roscado 1'' P.V.C	4	6 000
Acople macho polietileno 1''	14	33 600
Codo 90° polietileno 1'' roscado	2	5 000
Niple 1" roscado	4	6 000
Niple 3/4" roscado	2	3 000
Unión hembra 1'' roscada	2	5 000
T polietileno 1''	2	5 000
Tubo 1'' P.V.C x 1m	1	4 000
Soldadura P.V.C	1	6 000
Unión universal roscada P.V.C 3/4'' PMV	2	5 500
Unión universal roscada P.V.C 1'' PMV	4	6 000
Unión reducción copa roscada P.V.C 1''x3/4'' PMV	2	2 600
Conector polietileno con silleta 16mm	59	53 100
Abrazadera 1"	20	20 000
T polietileno 16mm	6	1 900
Codo polietileno 16mm	4	1 900
Conector tapón obturador 16mm	66	33 000
Cinta teflón	2	10 000
Válvula solenoide 1'' WEATHER MATIC	4	340 000
Microaspersores netafim SuperNet LR 30 L/H + microtubo + estaca	27	121 500
Broca estaca para madera 5/8 titanio	1	7 000
Pinza para abrir hueco microconector	1	30 000
Segueta	1	15 000
Mano de obra (Día)	4	500 000
TOTAL		**4 991 100**