

Tecnológico de Costa Rica
Carrera de Ingeniería Mecatrónica



**Diseño de un sistema de irrigación automático para Caballos Árabes de la
Bajura**

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

Gonzalo Madrigal Bejarano

Cartago, 21 de noviembre de 2023



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

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

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

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

Cartago, 21 de noviembre, 2023

Gonzalo Madrigal Bejarano

Céd: 1-1702-0656

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'GMB', written in a cursive style.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
PROGRAMA DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA
PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN
ACTA DE APROBACIÓN

El profesor asesor del presente trabajo final de graduación, indica que el documento presentado por el estudiante cumple con las normas establecidas por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica para ser defendido ante el jurado evaluador, como requisito final para aprobar el curso Proyecto Final de Graduación y optar así por el título de Ingeniero(a) en Mecatrónica, con el grado académico de Licenciatura.

Estudiante: Gonzalo Madrigal Bejarano

Proyecto: Diseño de un sistema de irrigación automático para Caballos Árabes de la Bajura



Dr. -Ing. Carlos Adrián Salazar
García
Asesor

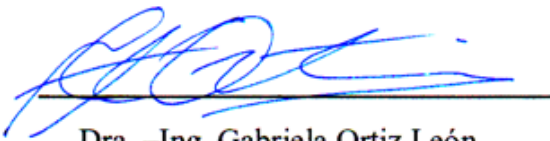
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
PROGRAMA DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA
PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN
ACTA DE APROBACIÓN

Proyecto final de graduación defendido ante el presente jurado evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero(a) en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura, según lo establecido por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Estudiante: Gonzalo Madrigal Bejarano

Proyecto: Diseño de un sistema de irrigación automático para Caballos Árabes de la Bajura

Miembros del jurado evaluador



Dra. -Ing. Gabriela Ortiz León

Jurado



Dr. -Ing. Carlos Adrián Salazar García

Jurado

Los miembros de este jurado dan fe de que el presente proyecto final de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica.

Instituto Tecnológico de Costa Rica, 21 de noviembre de 2023

Resumen

Se presenta una propuesta de diseño para un sistema de irrigación automático para una empresa en la zona de Aranjuez, Puntarenas. La propuesta consiste en el sistema de irrigación autónomo, así como un sistema de control del terreno de riego para permitir al cliente administrar el uso de la tierra de acuerdo con sus necesidades puntuales. El objetivo es proponer una solución para que la empresa pueda obtener alimento para sus animales utilizando su propio terreno durante la época seca. Al finalizar el proyecto se logra una propuesta de diseño para este fin, mediante la aplicación de un sistema automatizado de aspersores arreglados de manera que se riegue el terreno de la manera más uniforme posible, con una interfaz de usuario que permite el control del terreno de riego. La propuesta se valida mediante la simulación del fluido a través de las tuberías y varias pruebas realizadas sobre el software de automatización, y posteriormente se llega a varias conclusiones pertinentes, así como recomendaciones sobre la continuación y mejora del diseño propuesto.

Palabras clave: automatización, control, escalabilidad, irrigación

Abstract

An automatic irrigation system design is proposed for a business in Aranjuez, Puntarenas. The proposal consists of an automated irrigation system, as well as a control system for the irrigation area, so the client can control the use of the terrain according to their particular needs. The design is done with the objective of proposing a way for the business to produce food for the livestock using the property's own terrain during the dry season. A design proposal is made, using an automated sprinkler system to water the terrain as uniformly as possible, as well as a user interface that allows the user to control how the terrain is used. The design proposal is validated through the simulation of the water flowing through the pipes, as well as various tests performed on the automation software. The results are discussed and various pertinent conclusions are drawn from this process, as well as recommendations on the continuation and improvement of the proposed design.

Keywords: automation, control, irrigation, scalability

Contenido

Lista de Figuras	v
Lista de Tablas.....	x
Lista de Abreviaciones	xiv
1. Introducción.....	1
1.1. Contexto	1
1.2. Descripción del problema	1
1.3. Enfoque de la solución	2
1.4. Objetivos.....	3
1.4.1. Objetivo general	3
1.4.2. Objetivos específicos	3
1.5. Estructura del documento.....	3
2. Marco teórico	5
2.1. Eficiencia de riego	5
2.1.1. Concepto y valores comunes dependiendo de sistema de riego ..	5
2.1.2. Factores influyentes en la eficiencia del riego.....	5
2.2. Sistemas de riego	6
2.2.1. Riego por aspersión	6
2.2.2. Riego por goteo.....	8
2.2.3. Riego por gravedad.....	9
2.2.4. Riego por inundación	11
2.3. Bombas para la irrigación	12
2.3.1. Definición	12
2.3.2. NPSH	12
2.3.3. Selección de bomba.....	13

2.3.4.	Elementos de una bomba centrífuga	16
2.3.5.	Curva característica de una bomba centrífuga.....	17
2.4.	Agricultura en zonas de baja precipitación	18
2.5.	Capacidad de campo.....	19
2.6.	Punto de marchitación permanente	20
2.7.	Densidad aparente	20
2.8.	Uso consuntivo	21
2.9.	Conductividad hidráulica.....	21
2.10.	Tasa de infiltración	22
2.11.	Pérdidas por fricción en tuberías.....	23
2.11.1.	Definición.....	23
2.11.2.	Tipos de pérdidas	24
2.11.3.	Criterio de pérdidas aceptables	26
2.12.	Potencia requerida para sistema de bomba y motor con base en la carga de presión	27
3.	Metodología	28
3.1.	Definición de problema y recolección de información.....	28
3.1.1.	Descripción de terreno	30
3.1.2.	Identificación de necesidades	31
3.1.3.	Obtención de métricas	33
3.2.	Generación de soluciones	36
3.2.1.	Descomposición funcional.....	36
3.2.2.	Descomposición funcional realizada	36
3.2.3.	Alternativas de solución para cada aspecto del proyecto	37
3.3.	Selección de solución	43

3.3.1.	Elección de solución para escalabilidad.....	44
3.3.2.	Elección de controlador.....	46
3.3.3.	Elección de solución para sistema de irrigación.....	49
3.3.4.	Elección de solución para sistema de distribución	52
3.3.5.	Elección de solución para sistema de obtención de agua.....	53
3.4.	Validación	56
4.	Propuesta de diseño	57
4.1.	Diseño de soluciones.....	57
4.1.1.	Escalabilidad	57
4.1.2.	Sistema de control	59
4.1.3.	Irrigación	60
4.1.4.	Distribución	79
4.1.5.	Obtención de agua.....	106
5.	Resultados y análisis.....	108
5.1.	Análisis económico	108
5.1.1.	Análisis de sistema con aspersores <i>Big Gun</i>	108
5.1.2.	Análisis de sistema con aspersores <i>Rotator R33</i>	110
5.2.	Simulación de flujo de agua por las tuberías	111
5.2.1.	Simulación de sistema con aspersores <i>Big Gun</i>	111
5.2.2.	Simulación de sistema con aspersores <i>Rotator R33</i>	126
5.2.3.	Conclusión	134
5.3.	Pruebas del software automático.....	135
6.	Conclusiones y recomendaciones.....	139
6.1.	Conclusiones	139
6.2.	Recomendaciones	140

7. Bibliografía	142
A. Anexo A.....	146
B. Anexo B.....	162
C. Anexo C	163
D. Anexo D	164
E. Anexo E.....	169
F. Anexo F.....	170
G. Anexo G	171

Lista de Figuras

Figura 2.1. Ejemplo de un sistema de aspersión de cobertura total de terreno. Fuente: [4].	7
Figura 2.2. Tubería de goteo, con agujero visible. Fuente: [6].	9
Figura 2.3. Ejemplo de terreno irrigado por gravedad. Fuente: [7].	10
Figura 2.4. Terreno irrigado por inundación. Fuente: [10].	11
Figura 2.5. Ilustración de plano de referencia de NPSH. Fuente: [12].	13
Figura 2.6. Diagrama de flujo de selección de bomba. Realización propia, con base en: [14].	15
Figura 2.7. Ilustración de componentes de una bomba centrífuga. Fuente: [14].	16
Figura 2.8. Impulsor de una bomba. Fuente: [16].	17
Figura 2.9. Ejemplo de una curva característica de una bomba. Fuente: [14].	18
Figura 2.10. Tasas de infiltración según estado del suelo. Fuente: [23].	22
Figura 2.11. Ejemplo de velocidad de infiltración vs tiempo. Fuente: [23].	23
Figura 2.12. Ilustración de presión en un tubo con un fluido. Fuente: [25].	24
Figura 2.13. Factor F por cantidad de aspersores. Fuente: [26].	25
Figura 2.14. Pérdidas por fricción cada 100 pies para tubería PVC de 16 pulgadas. Fuente: [27].	26
Figura 3.1. Diagrama simple de localización de áreas importantes para el proyecto. No a escala. Realización propia.	31
Figura 3.2. Pirámide de automatización. Fuente: [30].	34
Figura 3.3. Representación caja negra de un sistema. Realización propia.	36
Figura 3.4. Solución en modo caja negra. Realización propia.	36
Figura 3.5. Descomposición funcional de la solución. Realización propia.	37
Figura 3.6. Árbol de clasificación para la fuente de agua de la solución. Realización propia.	38
Figura 3.7. Árbol de clasificación para sistema de control. Realización propia.	39

Figura 3.8. Árbol de clasificación del método de distribución. Realización propia.	41
Figura 3.9. Árbol de clasificación para método de irrigación. Realización propia.	41
Figura 3.10. Árbol de clasificación para control del área de riego.....	42
Figura 3.11. Diagrama básico de funcionamiento de interfaz propuesta. Realización propia.....	43
Figura 3.12. Especificaciones de modelo elegido de Raspberry Pi. Fuente: [31].	49
Figura 4.1. Vista simplificada de concepto de interfaz. Realización propia.....	58
Figura 4.2. Captura de pantalla de la interfaz. Realización propia en Python...	58
Figura 4.3. Captura de pantalla de botón de emergencia. Realización propia mediante Python.	59
Figura 4.4. Diagrama de flujo de programa. Realización propia.	60
Figura 4.5. Datos históricos de precipitación en Aranjuez. Realizado en Excel con fuente: [32].....	61
Figura 4.6. Cobertura de área propuesta. Realización propia en AutoCAD.....	70
Figura 4.7. Datos relevantes de Serie 100 <i>Big Gun</i> de Nelson Irrigation. Fuente: [41].	71
Figura 4.8. Cobertura de riego con rango real de aspersores. Realización propia en AutoCAD.	71
Figura 4.9. Área resultante de remover aspersores de esquinas. Realización propia en AutoCAD.	72
Figura 4.10. Datos de serie 75 <i>Big Gun</i> . Fuente: [41].....	73
Figura 4.11. Área de riego resultante. Realización propia en AutoCAD.	74
Figura 4.12. Plan de aplicación de los aspersores. Realización propia.	75
Figura 4.13. Tipos de zonas de riego. Realización propia en AutoCAD.	76
Figura 4.14. Diagrama de arreglo físico de alternativa con aspersores <i>Rotator R33</i> . Realización propia en AutoCAD.	78
Figura 4.15. Posición física de los aspersores. Realización propia en AutoCAD.	79

Figura 4.16. Diagrama simplificado de arreglo físico de las tuberías.	
Realización propia en AutoCAD.....	81
Figura 4.17. Diagrama de tubería para aspersores de círculo completo.	
Realización propia en AutoCAD.....	82
Figura 4.18. Dimensiones de tubería de círculo completo, parte 1. Dimensiones en metros. Realización propia con AutoCAD.	83
Figura 4.19. Dimensiones de tubería de círculo completo, parte 2. Dimensiones en metros. Realización propia con AutoCAD	83
Figura 4.20. Diagrama de tubería para aspersores de medio círculo.	
Realización propia en AutoCAD.....	87
Figura 4.21. Dimensiones de tubería de 7,4 m ³ /h. Dimensiones en metros.	
Realización propia en AutoCAD	88
Figura 4.22. Dimensiones de tubería de 22,2 m ³ /h. Dimensiones en metros.	
Realización propia en AutoCAD.....	89
Figura 4.23. Dimensiones de tubería de 44,4 m ³ /h. Dimensiones en metros.	
Realización propia en AutoCAD	90
Figura 4.24 Diagrama de segmentos para tubería de cuarto de círculo.	
Dimensiones en metros. Realización propia en AutoCAD.	93
Figura 4.25. Diagrama de tubería principal. Dimensiones en metros.	
Realización propia en AutoCAD.....	96
Figura 4.26. Arreglo físico propuesto de tubería.....	100
Figura 4.27. Arreglo alternativo propuesto. Realización propia mediante AutoCAD.	101
Figura 4.28. Dimensiones y espaciado de tuberías de distribución. Realización propia en AutoCAD.	102
Figura 4.29. Distancia entre pozo y primer lateral. Realización propia en AutoCAD.	103
Figura 5.1. Configuración de material de fluido.....	112
Figura 5.2. Condición de presión en entrada.	113
Figura 5.3. Condición de velocidad en entrada en m/h.....	113
Figura 5.4. Tubería de entrada con las condiciones iniciales aplicadas.	114

Figura 5.5. Condición de presión de salidas.	114
Figura 5.6. Salidas con condiciones iniciales.....	115
Figura 5.7. Configuración de simulación.....	115
Figura 5.8. Simulación de flujo por tubería.....	116
Figura 5.9. Escala de velocidades.	116
Figura 5.10. Numeración de aspersores de círculo completo.....	117
Figura 5.11. Estado inicial de velocidad para la entrada.....	119
Figura 5.12. Presión en entrada.....	119
Figura 5.13. Salida con presión de aspersor.....	119
Figura 5.14. Escala de velocidades.	120
Figura 5.15. Vista del flujo del agua por la tubería.	120
Figura 5.16. Numeración de aspersores.....	121
Figura 5.17. Velocidad inicial para aspersores de cuarto de círculo.	123
Figura 5.18. Escala de velocidades encontradas en la simulación.....	124
Figura 5.19. Vista de tubería simulada.....	124
Figura 5.20. Numeración de aspersores.....	125
Figura 5.21. Condición de velocidad de entrada.....	127
Figura 5.22. Condición de presión de entrada.	127
Figura 5.23. Condición de presión de salida.	128
Figura 5.24. Entrada bajo condiciones de velocidad y presión.	128
Figura 5.25. Una de las salidas bajo la condición presión de salida.....	129
Figura 5.26. Interfaz de software mostrando condiciones de entrada y salida aplicadas a diferentes superficies.	130
Figura 5.27. Numeración de aspersores.....	131
Figura 5.28. Configuración de simulación.....	131
Figura 5.29. Escala de velocidades encontradas por la simulación.....	132
Figura 5.30. Captura de pantalla de tubería en simulación.....	132
Figura 5.31. Captura de pantalla de interfaz con zonas 1, 3 y 5 activadas en medio de ciclo de riego. Realización propia.	137
Figura 5.32. Captura de pantalla de interfaz con zonas 2, 4 y 5 activadas fuera de ciclo de riego. Realización propia.....	137

Figura 5.33. Captura de pantalla de interfaz con zonas 2, 4 y 5 activadas dentro de ciclo de riego. Realización propia.....	137
Figura 5.34. Captura de pantalla con zonas 2 y 4 activadas en medio ciclo de riego, antes de presionar el botón de emergencia. Realización propia.	138
Figura 5.35. Captura de pantalla inmediatamente después de presionar el botón de emergencia.....	138
Figura B.1. Diagrama de flujo software de automatización modificado para una zona de riego individual. Realización propia.	162
Figura C.1. Datos de CNFL sobre cargo por consumo de energía.	163
Figura C.2. Datos de consumo de energía de Raspberry Pi.....	163
Figura D.1. Datos para tubería de 0,5".	164
Figura D.2. Datos para tubería de 0,75".	164
Figura D.3. Datos para tubería de 1"	165
Figura D.4. Datos para tubería de 1,25".	165
Figura D.5. Datos para tubería de 1,5".	166
Figura D.6. Datos para tubería de 2".	167
Figura D.7. Datos para tubería de 2,5".	168
Figura E.1. Datos para serie 75.	169
Figura E.2. Datos para serie 100.	169
Figura F.1. Datos de <i>Rotator R33</i>	170

Lista de Tablas

Tabla 2.1. Eficiencia para sistemas de riego comunes. Fuente: [1]	5
Tabla 2.2. Capacidad de campo para diversos tipos de suelos. Fuente: [19]. .	20
Tabla 2.3. Punto de marchitación permanente para diversos tipos de suelo. Fuente: [19].	20
Tabla 2.4. Valores de densidad aparente comunes para varios tipos de suelos. Fuente: [20].	21
Tabla 3.1. Valores de importancia y su interpretación.	29
Tabla 3.2. Ejemplo de necesidades interpretadas. Realización propia.	29
Tabla 3.3. Ejemplo de métricas obtenidas para las necesidades. Realización propia.	29
Tabla 3.4. Lista de necesidades interpretadas del cliente.	32
Tabla 3.5. Prioridad dada por el cliente a cada necesidad identificada.	33
Tabla 3.6. Métricas determinadas para las necesidades.	33
Tabla 3.7. Puntaje para desempeño de los conceptos.	44
Tabla 3.8. Comparación preliminar de conceptos de solución de escalabilidad. Realización propia.	45
Tabla 3.9. Comparación de conceptos de escalabilidad con peso de criterios tomado en cuenta. Realización propia.	45
Tabla 3.10. Comparación preliminar de alternativas para controlador. Realización propia.	47
Tabla 3.11. Comparación de alternativas para controlador tomando en cuenta el peso de los criterios. Realización propia.	47
Tabla 3.12. Comparación preliminar de opciones para método de irrigación. Realización propia.	50
Tabla 3.13. Comparación de métodos de irrigación con pesos de criterios tomados en cuenta. Realización propia.	51
Tabla 3.14. Comparación preliminar de las opciones de sistema de distribución. Realización propia.	52

Tabla 3.15. Comparación de las opciones para sistema de distribución con el peso de los criterios tomado en cuenta. Realización propia.	53
Tabla 3.16. Comparación de conceptos de solución para obtención de agua. Realización propia.....	54
Tabla 3.17. Comparación de conceptos de solución para obtención de agua con peso de los criterios. Realización propia.	55
Tabla 4.1. Datos históricos de precipitación mensual en Aranjuez. Fuente: [32].	61
Tabla 4.2. Características del suelo de la propiedad en área de interés. Realización propia.....	63
Tabla 4.3. Parámetros de elección de sistema de aspersores.....	65
Tabla 4.4. Características de <i>Rotator® R2000WF</i> . Fuente: [39].....	66
Tabla 4.5. Características de <i>Rotator® R33/R33LP</i> . Fuente: [40].	66
Tabla 4.6. Cálculos con <i>Rotator® R2000WF/LP</i> . Realizados en Excel.	67
Tabla 4.7. Cálculos con <i>Rotator® R33/R33LP</i> . Realizados en Excel.	68
Tabla 4.8. Valores de pérdidas de fricción por tamaño de tubo. Fuente: [27]. .	84
Tabla 4.9. Cálculo de pérdidas para los diferentes tamaños de tubería PVC. Cálculo en Excel.....	84
Tabla 4.10. Valores de pérdidas por 100 m dependiendo del diámetro del tubo. Fuente: [27].	85
Tabla 4.11. Cálculo de pérdidas para los diferentes tamaños de tubería PVC. Cálculo en Excel.....	85
Tabla 4.12. Carga de presión necesaria para tubería de aspersores de círculo completo.....	86
Tabla 4.13. Caudales y longitudes para aspersores de círculo medio.	91
Tabla 4.14. Valores de pérdidas de fricción por 100 m para tubería PVC dependiendo de su tamaño. Fuente: [27].	91
Tabla 4.15. Cálculos realizados para tubería de medio círculo. Realización en Excel.	92
Tabla 4.16. Carga de presión necesaria para tubería de aspersores de medio círculo.....	92

Tabla 4.17. Longitudes y caudales para tubería de cuarto de círculo.	94
Tabla 4.18. Valores de pérdidas de fricción cada 100 m dependiendo del tamaño de la tubería para tuberías PVC. Fuente: [27].	94
Tabla 4.19. Cálculo de pérdidas por tamaño de tubería.	94
Tabla 4.20. Carga de presión necesaria para tuberías de aspersores de cuarto de círculo.	95
Tabla 4.21. Valores de pérdidas por fricción dependiendo del tamaño del tubo.	97
Tabla 4.22. Cálculos para pérdidas por fricción de tubería principal. Realización propia en Excel.	97
Tabla 4.23. Carga total de presión del sistema.	98
Tabla 4.24. Valores de pérdidas por fricción para tuberías dependiendo del diámetro. Fuente: [27].	98
Tabla 4.25. Cálculos de pérdidas realizados para tubería principal. Realización en Excel.	98
Tabla 4.26. Carga total de presión del sistema con aspersores de círculo completo.	99
Tabla 4.27. Carga total de presión del sistema con aspersores de medio círculo.	99
Tabla 4.28. Datos de caudal, factor F y longitud para los diferentes segmentos	104
Tabla 4.29. Datos de pérdidas por fricción cada 100 m para tubería a 5,68 l/s. Fuente: [27].	104
Tabla 4.30. Cálculos para pérdidas en principal. Realización en Excel.	104
Tabla 4.31. Valores de pérdidas por fricción cada 100 m para tubería a 0,63 l/s. Fuente: [27].	105
Tabla 4.32. Cálculos para pérdidas. Realización en Excel.	105
Tabla 4.33. Valores de pérdidas por fricción cada 100 m para tubería a 0,95 l/s. Fuente: [27].	105
Tabla 4.34. Cálculos para pérdidas. Realización en Excel.	106
Tabla 4.35. Pérdidas totales para sistema de tuberías.	106

Tabla 5.1. Desglose de costo de alternativa de solución con aspersores <i>Big Gun</i> . Costos en colones. Realización propia.....	109
Tabla 5.2. Ahorros esperados anuales, en colones. Calculados en Excel.....	110
Tabla 5.3. Desglose de costos de alternativa de solución con aspersores <i>Rotator R33</i> . Costos en colones. Realización propia con Excel.....	110
Tabla 5.4. Ahorros esperados anuales, en colones. Realización en Excel....	111
Tabla 5.5. Valores de caudal para cada aspersor. Calculado en Excel con datos de simulación.....	117
Tabla 5.6. Valores de caudal en cada aspersor. Calculado en Excel con datos de simulación.	122
Tabla 5.7. Caudales obtenidos. Calculados en Excel con datos de simulación.	125
Tabla 5.8. Resultados de simulación. Calculados en Excel.....	133
Tabla 5.9. Pruebas realizadas sobre el software. Realización propia.....	136
Tabla 5.10. Resultados de pruebas sobre software de automatización.....	137
Tabla C.1. Estimación de consumo de electricidad para propuesta de solución con aspersores <i>Rotator R33</i> . Realización propia. Datos de consumo de CNFL.	163

Lista de Abreviaciones

CC: capacidad de campo

CFD: del inglés *Computational Fluid Dynamics*, significa el análisis de fluidos mediante métodos numéricos

DA: densidad aparente

ETP: uso consuntivo máximo diario

Fr: frecuencia de riego

H: referente a presiones en términos de metros de agua

I: intensidad de riego

LAA: lámina de agua aprovechable

LARA: lámina de agua rápidamente aprovechable

NPSH: del inglés *Net Positive Suction Head*

NPSHA: NPSH disponible

NPSHAR: NPSH requerido

Lb: lámina bruta

PMP: punto de marchitación permanente

Capítulo 1

1. Introducción

1.1. Contexto

El proyecto presente se desarrolla en una finca de 16 hectáreas encargada de criar caballos árabes y ganado de carne ubicada en Aranjuez, Puntarenas, bajo el nombre Caballos Árabes de la Bajura. El negocio principal de la empresa es la cría de los caballos árabes, mientras que la cría de ganado de carne es algo que se comenzó a llevar a cabo posteriormente como suplemento económico y para aprovechar el amplio espacio de la propiedad.

Durante los meses secos, los cuales representan la mayoría del año para la región en que se ubica la propiedad, la empresa se ha enfrentado a una problemática desde que comenzó su negocio. Durante la época lluviosa, tanto los caballos como el ganado de carne pueden ser alimentados mayoritariamente por pasto que crece en la propiedad, ya que la lluvia permite que este crezca.

1.2. Descripción del problema

Por contraste, durante los meses secos, este no ha sido el caso. Se da una reducción importante en el nivel de lluvia que la propiedad recibe, lo que resulta en que el pasto que se utiliza para alimentar todos los animales durante la época lluviosa no crezca. Esto fuerza la compra de alimento adicional, lo resulta en mayores costos para el negocio, así como una pérdida de valor del lado del ganado de carne, ya que incluso con el alimento complementario estos animales pierden

peso durante los meses secos del año, lo cual resulta en una pérdida de valor para este producto de la finca.

El proyecto entonces trata el interés de la empresa en reducir sus costos operativos al tener una manera de producir su propio alimento para los caballos y el ganado de carne durante la época seca, y tener control sobre la producción de este alimento, para administrar su uso de recursos como el agua, así como el terreno en sí, y adaptarse a sus necesidades del momento.

En este documento se busca proponer una solución para la problemática de la empresa, que pudiera ayudar a la misma con estos costos que debe incurrir durante la mayoría del año, así como una manera de controlar el terreno que se riega para darle a la empresa mayor control sobre el uso del agua y la producción de alimento. El problema abordado por este proyecto es por lo tanto la falta de un método para obtener alimento autóctonamente por parte de la empresa durante los meses secos.

Con una solución a esta problemática, la finca podría ver sus finanzas mejoradas debido a que no depende completamente de alimento exterior para alimentar los animales durante los meses secos. Podría además tener la habilidad de gestionar el terreno que se utiliza para riego y adaptar el nivel de riego a sus necesidades actuales, logrando así control sobre su uso del agua y del terreno y evitando el uso excesivo de recursos.

1.3. Enfoque de la solución

En el desarrollo del proyecto se encuentran varios desafíos, como la obtención del agua para el riego, así como la escalabilidad de la solución diseñada, dado el tamaño del terreno involucrado. Para resolver estos problemas, así como otros aspectos a considerar de la solución, se utiliza una metodología sistemática en la que se investiga la problemática a la que se enfrenta la empresa; de este proceso se derivan diferentes necesidades que tiene el cliente, así como la importancia que cada una tiene para el mismo. Posteriormente, se proponen diferentes conceptos de solución, los cuales son comparados de manera sistemática para obtener un concepto final. Este concepto final se desarrolla en su totalidad para obtener un

diseño de una propuesta de solución para la problemática planteada al principio del proceso. Finalmente, el diseño desarrollado se valida para así dar una propuesta de solución para la empresa.

Este informe detalla la búsqueda de una solución mecatrónica a la problemática a la que se enfrenta la empresa. Detalla los objetivos del proyecto, la metodología seguida en la búsqueda de una solución, así como todo el proceso en sí de la búsqueda de la solución, además de un análisis económico de la solución propuesta y comparación de los costos de la misma con los costos actuales que incurre la empresa por la compra de alimento exterior.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

1. Diseñar un sistema de irrigación automática para pasto en una finca criadora de caballos árabes y ganado de carne.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Diseñar el sistema de distribución del agua hacia las áreas que lo necesiten.
2. Diseñar el software de automatización y control de área de riego para el sistema.
3. Validar el diseño mediante una prueba de concepto o simulación.
4. Analizar la viabilidad económica de la solución.

1.5. Estructura del documento

En el Capítulo 2 se presenta el marco teórico, el cual incluye varios conceptos relacionados con la irrigación, así como la agricultura en zonas de baja precipitación. Los conceptos dan una idea para mejor comprender la temática del proyecto.

En el Capítulo 3 se detalla el proceso seguido paso a paso para resolver la problemática expuesta, basado en el método de diseño ingenieril.

Basado en el método explicado en el Capítulo 3, en el Capítulo 4 se explica cómo se sigue la metodología expuesta para diseñar la solución a la problemática.

En el Capítulo 5 se analizan los resultados obtenidos a partir de la realización del proceso, desde un punto de vista científico y tecnológico así como económico, para analizar el cumplimiento de los objetivos.

Finalmente, en el Capítulo 6, se exponen diferentes conclusiones a las que se llegó a lo largo del desarrollo del proyecto y con base en los resultados obtenidos, así como recomendaciones para el seguimiento y mejora del mismo.

Capítulo 2

2. Marco teórico

2.1. Eficiencia de riego

2.1.1. Concepto y valores comunes dependiendo de sistema de riego

Como en cualquier sistema real, el riego no es 100% eficiente. No toda el agua llega a la zona radicular del suelo; puede haber pérdidas de agua por los siguientes factores: evaporación, escorrentía (agua de lluvia que circula sobre la superficie de un terreno, debido a saturación del suelo [2]), así como filtración profunda [1]. Para el cálculo de la demanda de agua necesaria para un sistema de riego, es importante tomar en cuenta este valor. Como ejemplo, en la Tabla 2.1, se exponen valores de eficiencia de riego convencionales para algunos sistemas de riego comunes [1].

Tabla 2.1. Eficiencia para sistemas de riego comunes. Fuente: [1]

Sistema	Eficiencia
Riego por inundación	0,60 - 0,80
Riego por aspersión	0,65 - 0,85
Riego por goteo	0,75 - 0,90

2.1.2. Factores influyentes en la eficiencia del riego

Según G. Ipurre [3], la eficiencia de riego depende de dos factores principales: el manejo de agua durante el riego y las características hídricas del suelo que se está regando. Sobre el manejo de agua durante el riego, se tienen los siguientes aspectos que influyen en la eficiencia del riego [3]:

- El diseño del sistema de riego (dimensiones y orientación del campo regado, pendiente, infraestructura de abastecimiento de agua, control de caudales, recepción de derrames, etc.).
- Los caudales utilizados y dirección del flujo del agua sobre la superficie del suelo durante el riego.
- La frecuencia de riego, al determinar el contenido de agua del suelo antes de ser regado.
- El tiempo de riego utilizado durante el cual el agua está en contacto con la superficie del suelo.

2.2. Sistemas de riego

A continuación, se presentan varios tipos de riego comúnmente utilizados, así como sus ventajas y desventajas.

2.2.1. Riego por aspersión

2.2.1.2. Definición

En un sistema de riego por aspersión, el agua se transporta mediante tubería a los puntos en que se necesita. El agua se asperja, de una manera simulando la caída de lluvia [1]. Dependiendo del tipo específico de aspersor utilizado, la zona que se riega varía.



Figura 2.1. Ejemplo de un sistema de aspersión de cobertura total de terreno.
Fuente: [4].

Para asegurar cobertura apropiada del terreno, este se estudia anteriormente y se utilizan varios aspersores, espaciados de manera que se eviten zonas muertas y se minimice la superposición de las áreas de riego de estos [5]. Los sistemas de aspersión se pueden aplicar en la mayoría de los cultivos y a casi todo tipo de suelos [1]. Las presiones a las que trabajan los aspersores son las siguientes [5]:

- Baja presión: tiene un alcance de unos 12 metros y trabaja hasta con 1,5 kg por centímetro cuadrado.
- Presión media: en este caso la presión oscila entre 1,5 y 4,5. La distancia aumenta hasta 25 metros.
- Presión alta: este tipo de aspersor puede llegar hasta los 60 metros de distancia; para ello se necesita aplicar una presión superior a 4,5 kg por centímetro cuadrado.

2.2.1.3. Ventajas y desventajas

Entre las ventajas de los sistemas de aspersión, se encuentran las siguientes [1][5]:

- Alta eficiencia en el uso y control del agua.
- Se adapta a la mayoría de los cultivos.

- Se puede aplicar o completamente automatizado.
- Se pueden aplicar dosis ligeras de riego.

Entre las desventajas, se encuentran las siguientes [5]:

- Si bien el consumo de agua es menor que tipos como el riego por surcos, es mayor que en el riego por goteo.
- La humedad que provoca no solo en las raíces sino también en el resto de la planta, unido a altas temperaturas, podría provocar la aparición de hongos o enfermedades.
- Requiere de una importante evaluación sobre la colocación de los aspersores, ya que una ubicación incorrecta puede generar exceso o defecto de riego en algunas zonas.

2.2.2. Riego por goteo

2.2.2.1. Definición

Según la fundación Aquae [5], “el riego por goteo también se le denomina riego gota a gota. Esta clase de riego es utilizada en zonas en las que el agua escasea y optimiza ese recurso de una manera considerable. La idea de funcionamiento es distribuir el agua a través de goteros, que humedecerán la zona de las raíces de cada una de las plantas”.



Figura 2.2. Tubería de goteo, con agujero visible. Fuente: [6].

2.2.2.2. Ventajas y desventajas

Entre las ventajas de los sistemas de los sistemas de riego por goteo, se encuentran las siguientes [5]:

- Automatización del sistema, lo que permite un mayor control y mayor libertad.
- Supone un menor consumo de agua que el resto de tipos de riego.
- Reduce la proliferación de malas hierbas y de plagas.

Entre las desventajas, se encuentran las siguientes [5]:

- Implica una importante inversión inicial.
- Pueden producirse obstrucciones en los canales de riego y en los orificios de salida.
- Requiere una mayor preparación técnica, y no se puede labrar el terreno una vez instalado el sistema.

2.2.3. Riego por gravedad

2.2.3.1. Definición

En un sistema de riego por gravedad, el agua se capta y distribuye, utilizando la energía dada por la diferencia de altura entre el punto de captura del agua y el punto

de riego [1]. Según el ministerio de agricultura de España [7], “al avanzar el agua sobre la superficie del suelo se produce simultáneamente la distribución del agua en la parcela y la infiltración de la misma en el perfil del suelo”.



Foto Tragsatec

Figura 2.3. Ejemplo de terreno irrigado por gravedad. Fuente: [7].

2.2.3.2. Ventajas y desventajas

Entre las ventajas del riego por gravedad, se encuentran las siguientes [7]:

- Simplicidad de instalaciones e infraestructura
- Fácil mantenimiento
- El empleo de energía gravitatoria, conlleva necesidades energéticas escasas o nulas.

Por otro lado, también se encuentran los siguientes inconvenientes que se deben tener en cuenta [7]:

- Generalmente, menor eficiencia de aplicación que los riegos por aspersión y goteo (mayor consumo de agua).
- Tienden a estar afectados por inundación y salinidad si no se ha previsto un adecuado drenaje.
- Pueden provocar pérdidas de nutrientes por lixiviación y pérdidas de suelo por erosión.
- Dificultad de aplicar dosis bajas.
- Requerimientos elevados de mano de obra.

- Dificultades para la automatización y el telecontrol.

2.2.4. Riego por inundación

2.2.4.1. Definición

En el riego por inundación, el agua se aplica de manera directa al suelo a través de canales o surcos [8]. El agua se aplica en suficientes cantidades para formar una capa de agua en el suelo, la cual se absorbe lentamente. La parcela está nivelada a cero pendiente y no hay desagüe [9]. Como el terreno se nivela completamente, el avance del agua depende totalmente de la pendiente de la lámina de agua.



Figura 2.4. Terreno irrigado por inundación. Fuente: [10].

2.2.4.2. Ventajas y desventajas

Entre las ventajas del riego por inundación, se encuentran las siguientes [8][9]:

- Por avances de tecnología de nivelación, es posible aplanar muy precisamente los terrenos y cubrir áreas grandes.
- Instalación y mantenimiento más sencillos en comparación con sistemas de riego más complicados.
- Falta de necesidad de herramientas o equipos complejos.
- No hay consumo energético.

Por otro lado, entre las desventajas se encuentran las siguientes [8][10]:

- Puede resultar ineficiente para cultivos que no necesitan tanta agua.
- Propenso a problemas de salinidad del suelo.
- Gran cantidad de agua utilizada.
- Requiere una parcela perfectamente nivelada; de lo contrario, el riego no es apropiado.
- Todo el terreno debe tener las mismas características.
- Dificultad en controlar la dosis de agua entregada.

2.3. Bombas para la irrigación

2.3.1. Definición

Según C. Garcia et al [11], “las bombas hidráulicas son máquinas, que reciben el trabajo mecánico dado por una fuente de accionamiento (motor) y lo transforma en energía de presión y velocidad, permitiendo la captación y elevación del agua desde una fuente de abastecimiento (tajamar, río, etc.) y su conducción hasta el punto de descarga de acuerdo con las necesidades (caudal) y las características topográficas (desnivel geométrico y distancia desde la bomba) del área a ser regada”. Puede decirse entonces que una bomba funciona como la fuente que hace que el agua se mueva a lo largo de un sistema de irrigación, por lo cual la selección de la bomba para el sistema es algo de gran importancia.

2.3.2. NPSH

El NPSH (de las iniciales del inglés *Net Positive Suction Head*) se divide en dos conceptos, el NPSHA (NPSH disponible del sistema) y el NPSHR (NPSH requerido por la bomba).

2.3.2.1. Cavitación

Cada líquido tiene una diferente *presión de vapor*, presión a la cual un fluido comienza a evaporarse para cierta temperatura. Como resultado de la evaporación parcial del líquido que fluye, pueden formarse burbujas, las cuales viajan a zonas de la bomba donde la presión es más alta que la presión de vapor, donde se produce

la condensación del vapor en las burbujas [12]. Como resultado, las burbujas pueden implosionar violentamente y producir una serie de ondas de presión con efectos dañinos sobre la bomba. Este fenómeno se llama *cavitación* [12]. Esto es algo que se debe evitar y es un concepto relacionado con el concepto de NPSH.

2.3.2.2. NPSH disponible (NPSHA)

Se define como la *altura total de succión absoluta* (H_{ats}), por encima de la *altura de presión de vapor* (H_{vp}) del líquido. Esta altura se mide desde un punto de referencia como *plano de referencia de NPSH*. Este plano es coincidente con el plano radial que une los puntos externos de la entrada de álabes del impulsor de la bomba [12].

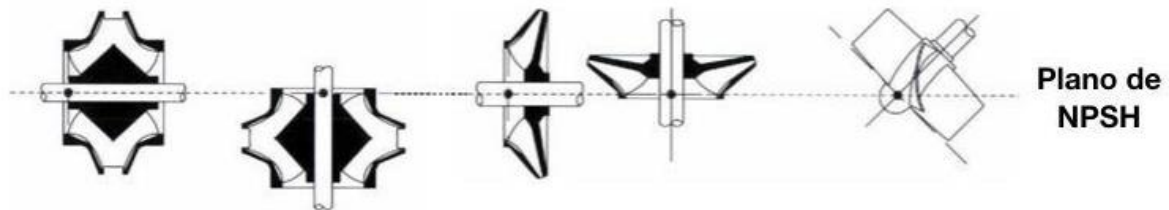


Figura 2.5. Ilustración de plano de referencia de NPSH. Fuente: [12].

2.3.2.3. NPSH requerido (NPSHR)

Este es un valor propio de la bomba y es dado por un fabricante para alcanzar determinado comportamiento de la bomba dados el caudal, la velocidad de giro y el líquido bombeado [12]. Es el NPSH requerido para que la bomba funcione propiamente, sin cavitación. Para evitar que ocurran daños por el fenómeno de cavitación, se debe cumplir siempre que $NPSHA > NPSHR$.

2.3.3. Selección de bomba

Como se dijo anteriormente, la selección de la bomba para el sistema es de alta importancia, ya que una bomba inadecuada puede resultar en un sistema que no funciona propiamente de acuerdo con las necesidades de suministro de agua. Una de las primeras reglas en la selección de la bomba es por lo tanto el conocimiento total del sistema [13].

Para la selección adecuada de una bomba, se deben conocer los siguientes datos [14]:

- Caudal
- Altura manométrica a vencer por la bomba o pérdida de presión del circuito
- Valor de NPSHA

Se puede observar el siguiente diagrama de flujo como una guía para la selección de una bomba.

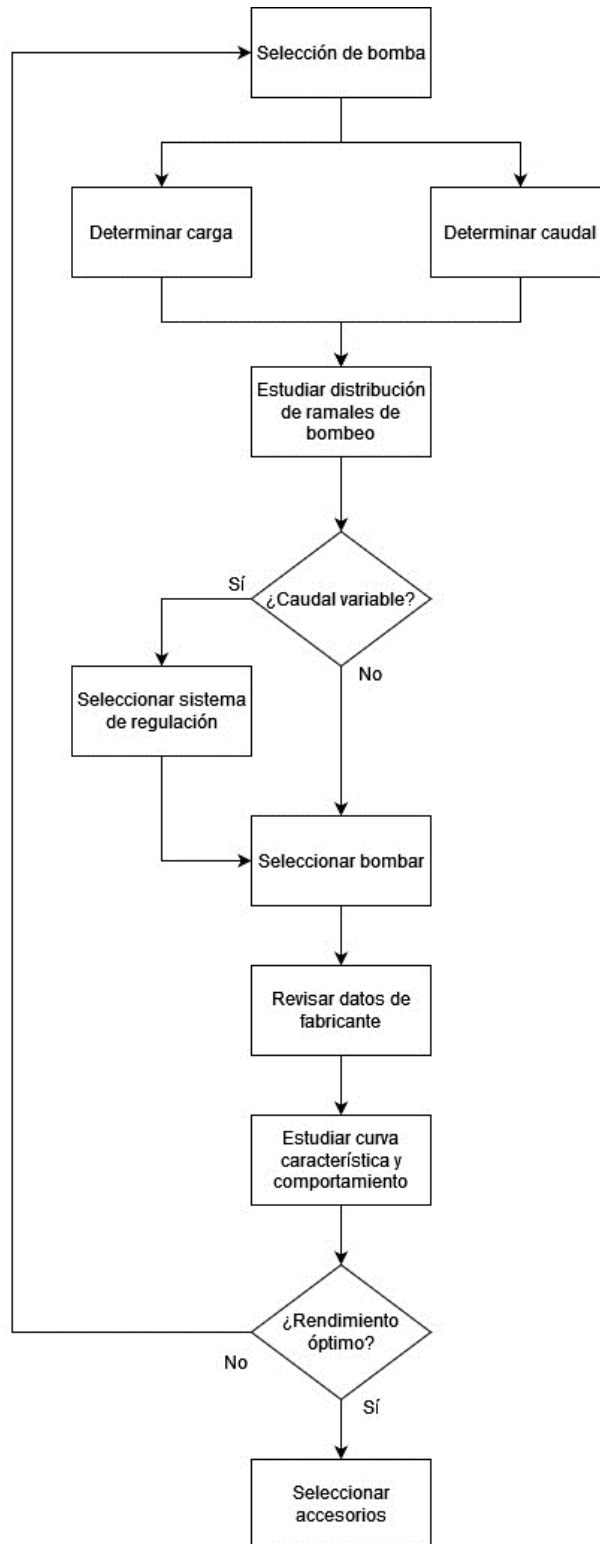


Figura 2.6. Diagrama de flujo de selección de bomba. Realización propia, con base en: [14].

2.3.4. Elementos de una bomba centrífuga

Al ser de los tipos de bombas hidráulicas más utilizadas, vale la pena hacer una breve descripción de los componentes de una bomba centrífuga. Estos se pueden observar en la Figura 2.7.

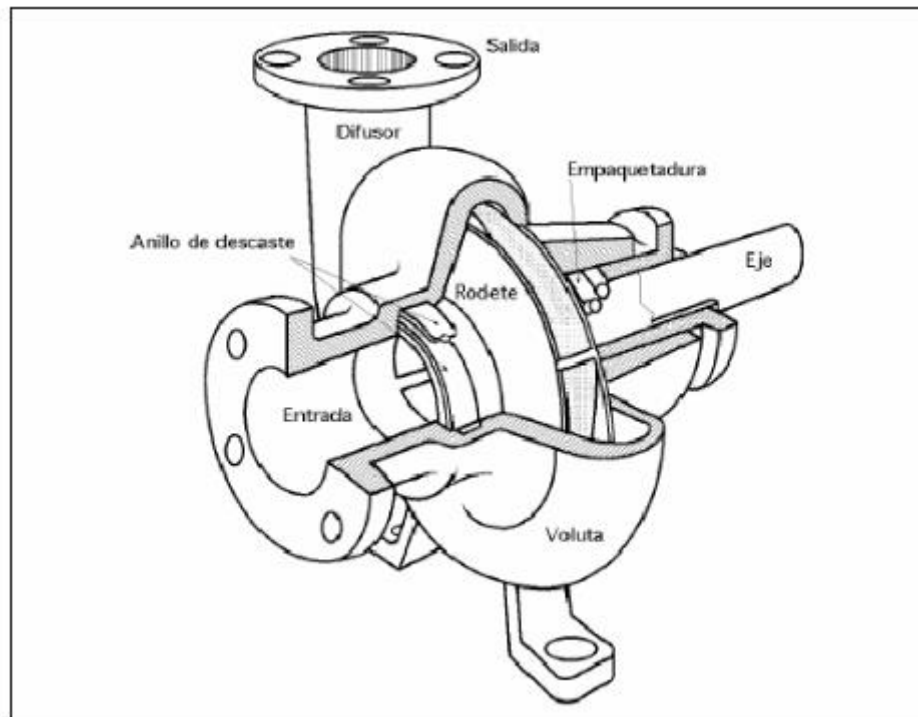


Figura 2.7. Ilustración de componentes de una bomba centrífuga. Fuente: [14].

2.3.4.1. Tubería de aspiración

Es la tubería y demás accesorios que se instalan entre la fuente de agua y la conexión para succión de la bomba [15].

2.3.4.2. Impulsor (rodete)

Es formado por una serie de álabes de diversas formas que giran dentro de una carcasa circular. Se une solidariamente al eje y es la parte móvil de la bomba [14]. La fuerza producida por el impulsor es la que permite el movimiento del fluido siendo transportado [16]. Una imagen de un impulsor se puede observar en la Figura 2.8.



Figura 2.8. Impulsor de una bomba. Fuente: [16].

2.3.4.3. Difusor

El difusor se encuentra encerrado dentro de una cámara junto con el impulsor; la cámara recibe del nombre de carcasa o cuerpo de bomba. Está compuesto por álabes fijos divergentes. Conforme se incrementa la sección de la carcasa, la velocidad del agua disminuye, contribuyendo a la transformación de energía cinética en energía de presión; esto resulta en una mejora del rendimiento de la bomba [14].

2.3.4.4. Eje

El eje consiste en una pieza con forma de barra de sección circular no uniforme, la cual se fija de manera rígida al impulsor y transmite la fuerza del elemento motor hacia el mismo [14].

2.3.5. Curva característica de una bomba centrífuga

La curva característica de una bomba describe la relación que hay para la bomba específica entre la caída de presión (también conocida como altura manométrica, medida con unidades de longitud, aunque también puede ser dada como presión) y el caudal. La altura manométrica representa la caída de presión que se debe vencer para que el fluido circule [14]. La curva característica de una bomba varía de acuerdo con la velocidad n a la que opera la bomba; un ejemplo de cómo se ve una curva característica, así como cómo varía de acuerdo con la velocidad, se puede ver en la Figura 2.9.

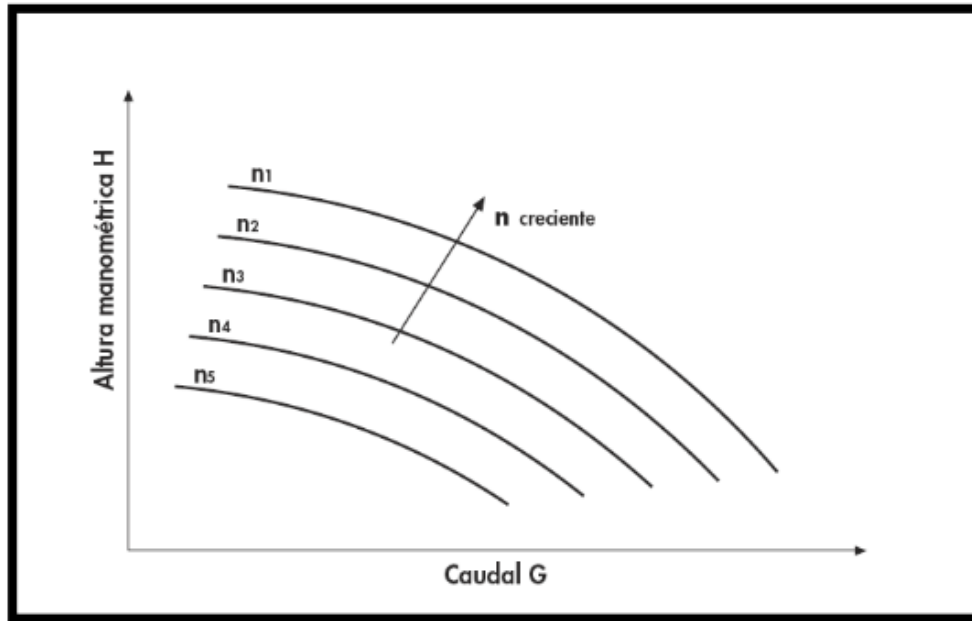


Figura 2.9. Ejemplo de una curva característica de una bomba. Fuente: [14].

2.4. Agricultura en zonas de baja precipitación

Cuando hay baja o nula precipitación, como en muchos lugares en el Medio Oriente, los desafíos para el desarrollo de la agricultura se vuelven mucho mayores que bajo condiciones climáticas normales [17]. Esto ha llevado al desarrollo de varias tecnologías y métodos de agricultura más apropiados para estas condiciones, algunos de los cuales se exponen en esta sección.

En áreas en que recursos naturales de agua como la lluvia o reservorios son escasos, la irrigación eficiente de las plantas se vuelve el factor más importante en la productividad agrícola; esto a pesar del uso de semillas resistentes a altas temperaturas y organismos genéticamente modificados [17]. Hay varias tecnologías de irrigación que se utilizan modernamente. Según el Instituto Nacional de Propiedad Industrial de Chile [18], las formas de aporte de agua a cultivos se dividen de la siguiente forma:

- Riego superficial: Hacer correr o acumular agua sobre la superficie y permitir que sature el suelo a cierta profundidad.

- Riego por aspersión: Rociar agua en el aire y dejar que caiga sobre las plantas y el suelo como lluvia simulada.
- Riego por goteo: Goteo de agua sobre una fracción de la superficie del suelo para infiltrarla en la zona de las raíces.
- Exudadores subsuperficiales: Introducir el agua directamente en la zona radicular mediante receptáculos porosos.
- Subirrigación: Elevar el nivel freático desde abajo (en lugares donde el agua subterránea es poco profunda y controlable) para humedecer la zona de las raíces por capilaridad.

Otras soluciones que se utilizan para zonas áridas son sistemas de retención de agua, materiales aplicados a los suelos para mejorar sus calidades nutritivas hacia las plantas, así como agentes de retención de agua aplicados al suelo, entre otros [18].

Para el manejo eficiente del agua, se pueden utilizar sistemas de irrigación inteligente. Estos sistemas miden las condiciones del suelo en tiempo real, y utilizan las mismas en combinación con pronósticos climáticos y otros datos para regular el agua dada a los cultivos [17]. Agri [17] menciona las siguientes ventajas:

- Completo control sobre la dosis de agua entregada y monitoreo de la salud de los cultivos.
- Ahorro de agua de 30%-50%.
- Mejoras en la producción de cultivos del 11%-30% en comparación con campos que no utilizan sistemas de gestión de la irrigación.

2.5. Capacidad de campo

Se define como “el contenido de agua de un suelo, después que ha sido mojado abundantemente y se ha dejado drenar libremente, evitando las pérdidas por evapotranspiración” [19]. Generalmente se toma alrededor de 24 a 48 horas después riego o lluvia abundante, aunque se debe cubrir el suelo para evitar la evaporación [19]. Los suelos arcillosos tienden a tener mayor capacidad de campo

en comparación con los suelos arenosos. Rangos de valores de diversos tipos de suelos se pueden observar en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Capacidad de campo para diversos tipos de suelos. Fuente: [19].

Tipo de suelo	Capacidad de campo (%)
Arcilloso	23-46
Franco arcilloso	18-23
Franco	12-18
Franco arenoso	8-13
Arenoso	5-7

2.6. Punto de marchitación permanente

Se define como “el contenido de agua de un suelo al cual la planta se marchita y ya no recobra su turgencia al colocarla en una atmósfera saturada durante 12 horas” [19]. Corresponde, por convención, al contenido de agua a una tensión de -15 bar. Se puede estimar a partir de la capacidad de campo utilizando la ecuación 1 [19]:

$$PMP = \frac{CC}{1,85} \quad (1)$$

Valores comunes para el punto de marchitación dependiendo del tipo de suelo se pueden encontrar en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Punto de marchitación permanente para diversos tipos de suelo. Fuente: [19].

Tipo de suelo	Punto de marchitación permanente (%)
Arcilloso	13-29
Franco arcilloso	9-10
Franco	4-11
Franco arenoso	4-6
Arenoso	1-3

2.7. Densidad aparente

La densidad aparente “representa un índice de la masa seca de partículas en un volumen total de suelo, que incluye partículas y poros” [20]. Este es un valor que se

da en unidades de masa entre volumen. Valores comunes para suelos no compactados se pueden visualizar en la siguiente tabla.

Tabla 2.4. Valores de densidad aparente comunes para varios tipos de suelos.
Fuente: [20].

Tipo de suelo	Densidad aparente (g/cm ³)
Arenoso	1,65
Franco arenoso	1,5
Textura franca	1,4
Franco arcilloso	1,33
Arcillo arenoso	1,3
Arcilloso	1,25

2.8. Uso consuntivo

Se define como “la cantidad de agua que es necesario suministrar para que sea utilizada en la construcción de los tejidos de las plantas, en la transpiración de las mismas y en la evaporación realizada por el suelo” [21].

Los factores principales que lo influyen son los siguientes [21]:

- El clima: temperatura, humedad relativa, vientos, latitud luminosidad y precipitación.
- El cultivo: especie, variedad, ciclo vegetativo, hábitos radiculares.
- El agua de riego: calidad y disponibilidad, prácticas de riego.

Un concepto relacionado es el de **uso consuntivo máximo diario**, que se refiere a la lámina de agua máxima que puede ser aplicada sobre un cultivo diariamente sin que este reciba daño.

2.9. Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica del suelo es la capacidad del mismo para transportar el agua hacia los perfiles interiores [22]. La conductividad del suelo depende del tamaño y distribución de los poros en el suelo, y por lo tanto de la textura, la densidad aparente y de la estructura del mismo [1]. La conductividad hidráulica permite conocer la capacidad de infiltración del agua de un suelo para determinar lo

que se debe hacer al regar el mismo [1]. Una baja conductividad hidráulica puede ser originada por un bajo contenido de materia orgánica, así como un alto contenido de sodio [22]. Esta se mide en unidades de distancia entre tiempo. Para dar un ejemplo de cómo este valor puede ser un factor que afecta el método de riego utilizado, no se recomienda utilizar riego por aspersión en suelo que no puedan absorber 0,38 cm/h [1].

2.10. Tasa de infiltración

Se define como la velocidad con la que el agua penetra en el suelo a través de la superficie [23]. Se expresa en mm/h y el valor máximo de este valor coincide con la conductividad hidráulica del suelo, como se puede observar en la Figura 2.10.

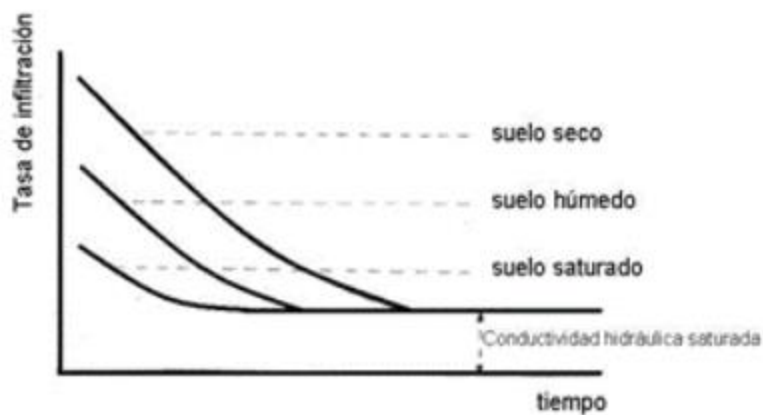


Figura 2.10. Tasas de infiltración según estado del suelo. Fuente: [23].

Este valor tiende a hacerse constante en el tiempo a largo plazo, como se puede observar en la Figura 2.11. A este valor constante se le llama **tasa de infiltración básica** y es importante para métodos de riego como el riego por goteo, por microaspersión o por aspersión, entre otros, debido a que estos se caracterizan por largos tiempos de riego [23]. Es importante que la intensidad de riego que se le aplica al suelo no exceda el valor de la infiltración básica, para evitar encharcamiento y escorrentía [24].

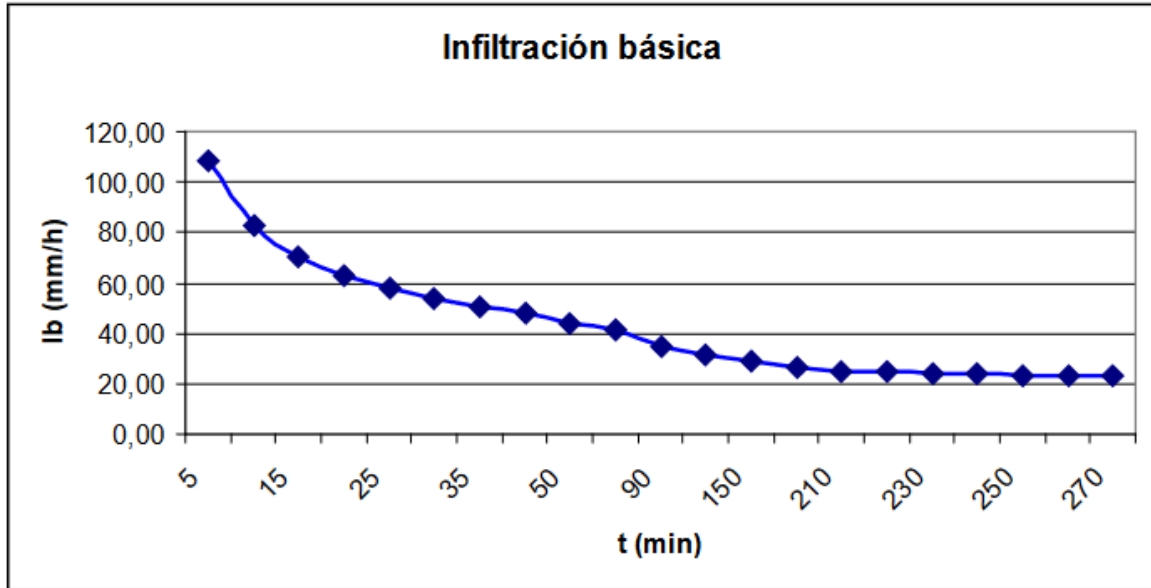


Figura 2.11. Ejemplo de velocidad de infiltración vs tiempo. Fuente: [23].

2.11. Pérdidas por fricción en tuberías

2.11.1. Definición

Como cualquier proceso real, el flujo de agua en tuberías no es 100% eficiente y presenta pérdidas. Estas pérdidas se deben tomar en cuenta al diseñar sistemas de distribución de agua y dimensionar componentes del mismo.

Al pasar por una tubería, un líquido ejerce una presión perpendicular a la superficie del mismo. Esta presión se puede describir utilizando la siguiente ecuación:

$$P = \frac{F}{A} \quad (2)$$

Donde:

- P: presión (Pa)
- F: fuerza (N)
- A: área (m²)



Figura 2.12. Ilustración de presión en un tubo con un fluido. Fuente: [25].

Comúnmente, también se define la presión de agua en términos de metros, relacionando las presiones a las creadas por una columna de agua equivalente [25]. Esto se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$H = \frac{P}{\rho g} \quad (3)$$

Donde:

- H: presión de agua en metros
- P: presión (Pa)
- ρ : densidad de agua (kg/m^3)
- g: aceleración por gravedad (m/s^2)

2.11.2. Tipos de pérdidas

Las pérdidas por fricción se pueden dividir en dos grandes categorías: pérdidas por el material de la tubería y pérdidas locales.

El primer tipo se trata de pérdidas causadas por la fricción del agua contra el material de la tubería. Como lo dice el nombre, estas dependen del material específico de la tubería y de la velocidad por la cual el agua pasa por el tubo [25]. Una ecuación comúnmente utilizada para el cálculo de estas pérdidas es la siguiente:

$$H = L * \frac{P_L}{100} \quad (4)$$

Donde:

- L: longitud del tubo (m)
- P_L : pérdidas por fricción cada 100 metros

El factor P_L es un número comúnmente dado por fabricantes para diámetros y velocidades específicos [25]. Adicionalmente, para los laterales con varias salidas, como aspersores, se utiliza un factor F , conocido como el coeficiente de reducción de Christiansen, que modifica las pérdidas; este valor depende de la cantidad de salidas. Su valor exacto depende del coeficiente Q de las 3 principales ecuaciones de pérdida de fricción: Hazen Williams, Scobey y Darcy Weisbach [26]. Estos valores varían además con la razón entre la distancia de la primera salida a la lateral y el espaciamiento entre salidas, entre otros factores, sin embargo, los valores F no tienden a variar mucho entre sí [26]. En la Figura 2.13 se pueden observar varios valores F según la ecuación de Darcy Weisbach.

Number of outlets	F value (m = 2.0)	Number of outlets	F value (m = 2.0)
1	1.0	12	0.376
2	0.62	15	0.367
3	0.52	20	0.360
4	0.47	24	0.355
5	0.44	28	0.351
6	0.42	30	0.350
7	0.41	40	0.345
8	0.40	50	0.343
9	0.39	100	0.338
10	0.385	>	0.333

Figura 2.13. Factor F por cantidad de aspersores. Fuente: [26].

La ecuación corregida es la siguiente:

$$H = L * F * \frac{P_L}{100} \quad (5)$$

En la Figura 2.14 se pueden observar valores de pérdidas de fricción cada 100 pies para tuberías PVC de 16 pulgadas de diámetro.

PVC Pipes Schedule 40 - Friction Loss - 16"				
Volume Flow (gal/min)	Volume Flow (gal/hr)	Velocity (ft/sec)	Friction Head (ft/100 ft)	Friction Loss (psi/100 ft)
500	30000	0.9	0.02	0.01
750	45000	1.4	0.04	0.02
1000	60000	1.8	0.07	0.03
1250	75000	2.3	0.1	0.04
1500	90000	2.7	0.1	0.06
2000	120000	3.6	0.2	0.1
2500	150000	4.5	0.4	0.2
3000	180000	5.5	0.5	0.2
3500	210000	6.4	0.7	0.3
4000	240000	7.3	0.9	0.4
4500	270000	8.2	1.1	0.5
5000	300000	9.1	1.3	0.6
5500	330000	10.0	1.6	0.7
6000	360000	10.9	1.9	0.8
6500	390000	11.8	2.2	0.9
7000	420000	12.7	2.5	1.1
7500	450000	13.6	2.8	1.2
8000	480000	14.5	3.2	1.4
8500	510000	14.4	3.5	1.5
9000	540000	16.5	3.9	1.7
9500	570000	17.3	4.3	1.9
10000	600000	18.2	4.8	2.1

Figura 2.14. Pérdidas por fricción cada 100 pies para tubería PVC de 16 pulgadas.
Fuente: [27].

Las pérdidas locales, por su parte, son causadas por disturbios locales en el flujo de agua a lo largo de un tubo, son un valor proporcional a la velocidad del agua [25]. Se conocen también como pérdidas por accesorios. Para un dispositivo particular se calculan con la siguiente ecuación:

$$\Delta h = K * \frac{V^2}{2g} \quad (6)$$

Donde:

- K: constante dependiente de cómo está hecho el accesorio
- V: velocidad del fluido (m/s)
- g: aceleración por la gravedad

2.11.3. Criterio de pérdidas aceptables

De acuerdo con R. Valencia et al [24], el máximo de pérdidas aceptables es el 20% de la presión de trabajo del aspersor. Adicionalmente, las pérdidas en

accesorios se pueden considerar un 10% de las pérdidas en tubería laterales [24]. Las pérdidas máximas en la principal también pueden ser tomadas como el 20% de la presión de trabajo de los aspersores [26].

2.12. Potencia requerida para sistema de bomba y motor con base en la carga de presión

Una vez que se determina la carga de presión requerida por el sistema, según R. Valencia et al [24], se puede utilizar la siguiente ecuación para determinar la potencia requerida del motor.

$$HP = \frac{Q * C_p}{76 * e} \quad (7)$$

Donde:

- HP: potencia requerida en caballos de fuerza
- Q: caudal total del sistema (l/s)
- C_p : carga de presión (m)
- 76: constante de proporcionalidad
- e: eficiencia

La eficiencia de bombas eléctricas de medio y gran tamaño varía entre el 75% y 93%, y para las pequeñas este valor fluctúa entre 50% y 70% [28].

Capítulo 3

3. Metodología

Para el desarrollo del diseño del proyecto, se utilizó la metodología expuesta por Khandani [29] para el diseño ingenieril. Se tienen cinco pasos: definir el problema, recoger información pertinente, generar múltiples conceptos de solución, analizar y seleccionar un concepto, y finalmente validar el diseño.

3.1. Definición de problema y recolección de información

Para esta etapa, se buscó encontrar la mayor información posible sobre la situación actual de la problemática, mediante visitas al sitio, así como entrevista con el cliente e investigación propia. De este proceso, se determinan las necesidades y especificaciones del proyecto. Las necesidades muestran un deseo del cliente, mientras que las especificaciones se usan para medir su cumplimiento. A las necesidades se les asigna un valor de importancia para determinar la prioridad que se les debe dar; esto es de acuerdo con las prioridades del cliente, para lo cual se le pide su opinión sobre las mismas, una vez que han sido obtenidas. Los valores de importancia, así como lo que representan, se pueden ver en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Valores de importancia y su interpretación.

Valor	Interpretación
1	Indeseable
2	No es importante
3	Deseable pero no necesaria
4	Altamente deseable
5	Indispensable

Posteriormente, se busca una manera de medir el cumplimiento de las necesidades mediante una métrica. Las métricas se obtienen mediante criterio propio e investigación. En las siguientes se pueden ver ejemplos de necesidades interpretadas a partir de frases del cliente, así como métricas correspondientes. Las necesidades completas, la importancia dada por el cliente, así como las métricas y valores objetivo, se puede visualizar en la Tabla 3.4, Tabla 3.5 y Tabla 3.6, en la Sección 3.1.2 y la Sección 3.1.3.

Tabla 3.2. Ejemplo de necesidades interpretadas. Realización propia.

Pregunta/Contexto	Frase del cliente	Necesidad interpretada
¿Ha considerado irrigar manualmente este terreno?	“... preferiría idealmente no tener que pagar mano de obra...”	La solución funciona sin necesidad de intervención humana.
¿Tiene algún presupuesto en mente para esto?	“No estoy buscando algo excesivamente caro.”	La solución es de bajo costo.

Tabla 3.3. Ejemplo de métricas obtenidas para las necesidades. Realización propia.

Necesidad	Métrica	Unidad
La solución funciona sin necesidad de intervención humana.	Nivel de automatización según pirámide de automatización	Puntaje
La solución es de bajo costo.	Costo	₡

3.1.1. Descripción de terreno

El terreno donde crece el pasto durante la época lluviosa se trata un terreno con una pendiente de aproximadamente 1-2% de unas 10 hectáreas. La propiedad cuenta con electricidad y tiene un pozo ya instalado del cual se obtiene agua para de tomar para los animales entre otros usos. El área donde se concentra el diseño del proyecto es una parte relativamente plana de aproximadamente hectárea y media, localizada a más o menos 150 metros de distancia del pozo, además de unos 200 m de una naciente que se encuentra dentro de la propiedad. Sí debe de hacerse notar que la naciente y el terreno tienen una diferencia de altura de aproximadamente 10 metros, la naciente estando más abajo que el terreno de interés. Del área mencionada se toma una hectárea en forma de un cuadrado de 100 x 100 m. El cliente indicó que deseaba comenzar con un área menor de prueba para recibir una propuesta de diseño, y se eligió esta área por ser relativamente cercana tanto al pozo y la naciente, así como por ser relativamente plana, lo cual se espera que simplifique la distribución del agua.

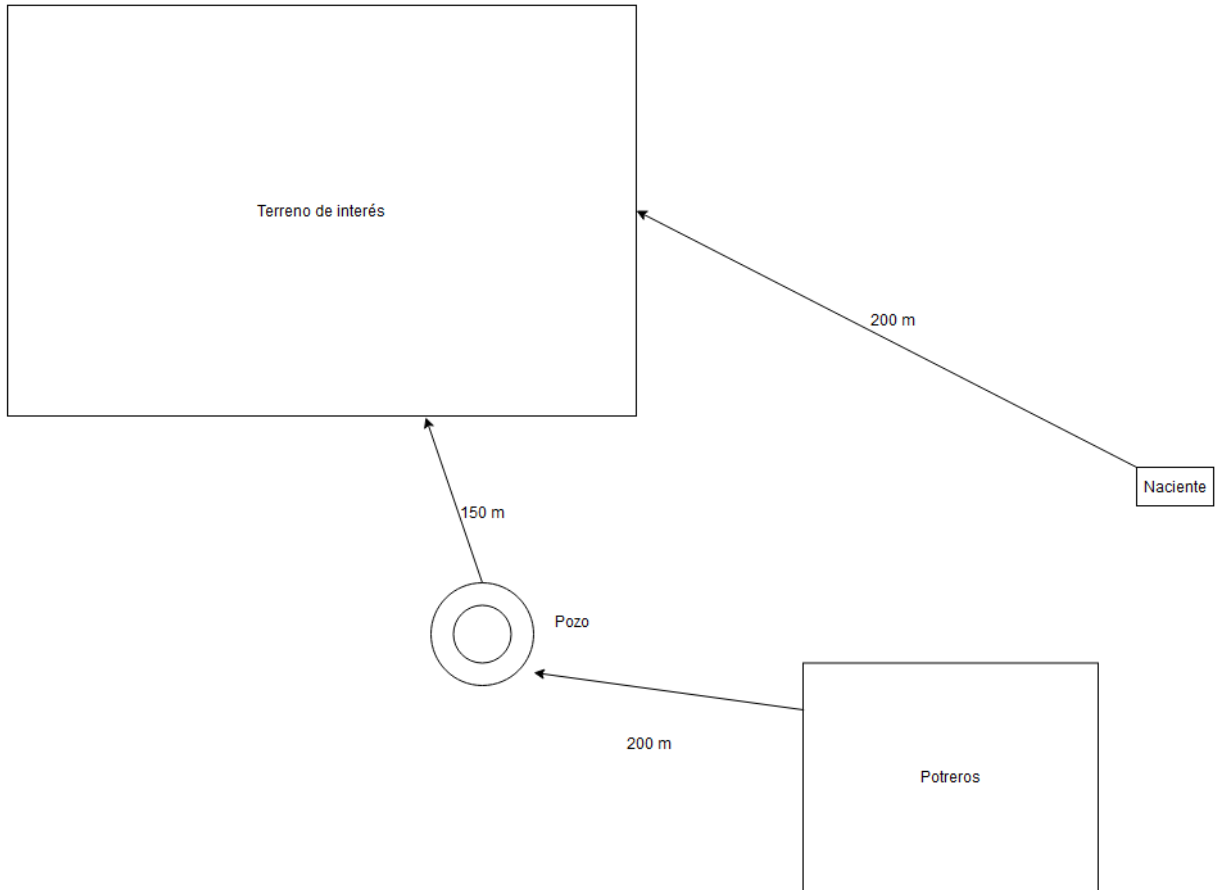


Figura 3.1. Diagrama simple de localización de áreas importantes para el proyecto. No a escala. Realización propia.

3.1.2. Identificación de necesidades

Para identificar las necesidades que el cliente tiene para este proyecto, se realizó una entrevista con el dueño de la finca en que se le hicieron varias preguntas relacionadas a la situación actual de la finca, para así tener la idea más completa posible de la problemática. En la siguiente tabla, se pueden observar las preguntas que se le hicieron al dueño de la finca, la parte de la respuesta que dio que se vio como relevante, así como la necesidad del cliente que fue interpretada a partir de la frase.

Tabla 3.4. Lista de necesidades interpretadas del cliente.

Pregunta/Contexto	Frase del cliente	Necesidad interpretada
¿Ha considerado irrigar manualmente este terreno?	“... preferiría idealmente no tener que pagar mano de obra...”	La solución funciona sin necesidad de intervención humana.
Conversación de la situación actual	“Durante el día generalmente no se puede regar nada porque el sol evapora el agua muy rápido.”	La solución funciona a horas óptimas para la irrigación del pasto.
¿Tiene algún presupuesto en mente para esto?	“No estoy buscando algo excesivamente caro.”	La solución es de bajo costo.
¿Hay alguna consideración que se debe tener sobre el espacio?	“Bueno, los animales se pueden mover por casi todo el terreno libremente y no quisiera que eso cambiara”	La solución permite el movimiento libre a lo largo del terreno
Conversación sobre la cantidad de terreno disponible	“Para comenzar, podemos concentrarnos en un área reducida, pero idealmente quisiéramos expandirlo eventualmente para aprovechar el terreno”	La solución es escalable
Conversación sobre el control de varios aspectos de la solución	“Cualquier aspecto que podamos controlar, la idea sería que fuera lo más fácil de hacerlo..”	La solución es sencilla de controlar
Pregunta sobre consumo de agua de la solución	“No queremos gastar un exceso de agua, entre menos mejor la verdad”	La solución consume poca agua

Posteriormente, al cliente se le envió la lista de necesidades obtenidas para que las clasificara de acuerdo con el criterio establecido en la Tabla 3.1. Los resultados se pueden observar en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Prioridad dada por el cliente a cada necesidad identificada.

Número	Necesidad	Prioridad dada por el cliente
1	La solución funciona sin necesidad de intervención humana.	5
2	La solución funciona a horas óptimas para la irrigación del pasto.	5
3	La solución es de bajo costo.	4
4	La solución permite el movimiento libre a lo largo del terreno	5
5	La solución es escalable	5
6	La solución es fácil de controlar	4
7	La solución consume poca agua	5

3.1.3. Obtención de métricas

Para medir el grado en que la solución cumple con las necesidades del cliente, se desarrollaron diferentes métricas, las cuales se pueden ver en la siguiente tabla.

Tabla 3.6. Métricas determinadas para las necesidades.

Número	Métrica	Unidad	Importancia	Valor marginal	Valor ideal
1	Nivel de automatización según pirámide de automatización	Puntuación	5	2	3
2	Medición de hora del día	Binario	5	Sí cumple	Sí cumple
3	Costo total de solución	€	4	€6.000.000,00	€5.000.000,00
4	Altura de elementos instalados frágiles	M	5	20 cm > h h > 2,1 m	20 cm > h h > 2,1 m
5	Escalabilidad	Puntaje	5	3	4
6	Facilidad de control	Puntaje	4	4	5
7	Eficiencia de riego	Porcentaje	5	60%	>70%

Para la necesidad identificada de que la solución funcione sin intervención humana, esto naturalmente se trata del tema de automatización. Mientras que no

hay una manera objetiva de medir el nivel de automatización, un concepto comúnmente utilizado es el de la pirámide de automatización [30]. Esta se puede ver en la siguiente imagen.

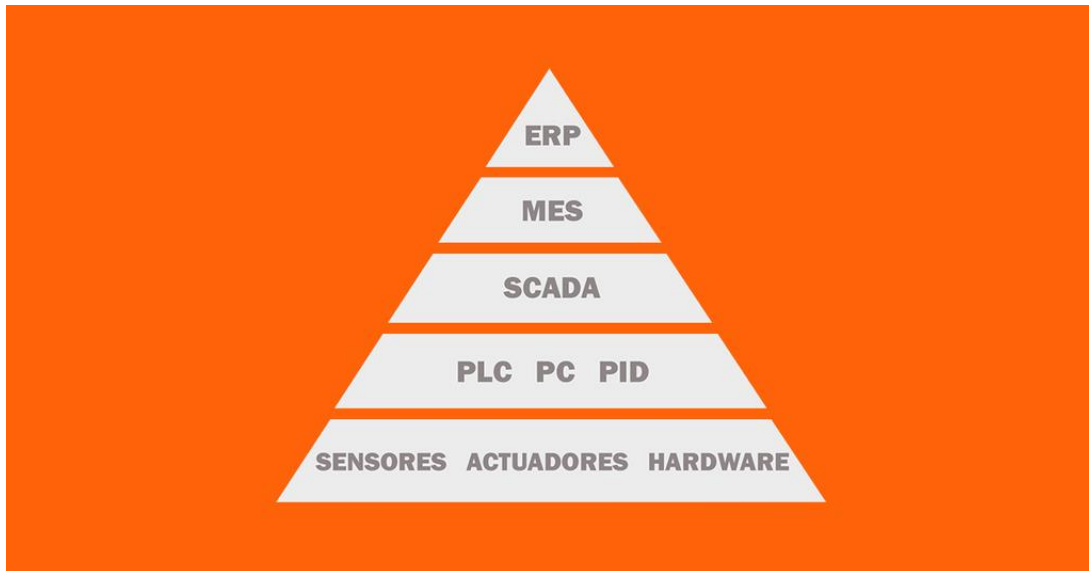


Figura 3.2. Pirámide de automatización. Fuente: [30].

La pirámide de automatización jerarquiza la automatización industrial dependiendo del nivel tecnológico que una empresa haya alcanzado. De particular interés es el nivel 2, el cual es comúnmente llamado nivel de control y puede decirse que este nivel “tiene por objeto controlar procesos secuenciales por medio de ordenadores especializados como el caso de los Controladores Lógicos Programables (PLC) que reciben señales de entrada y salida, cuentan con un CPU y memoria que procesa la información cargada o software” [30]. También se puede destacar el nivel 3, que se puede llamar nivel de supervisión y “se encarga de crear una interfaz intuitiva entre la máquina, el proceso y el operario facilitando la interacción y supervisión del proceso en tiempo real o histórico” [30]. Para este requerimiento, puede definirse como que como mínimo el sistema final debería llegar al nivel 2 e idealmente también llegar al nivel 3 para poder ser supervisado en caso de que requiera intervención humana.

Para la necesidad identificada de permitir el movimiento a lo largo del terreno, se pidió clarificación al cliente y este explicó que, en el caso de utilizar cables o

tuberías o cualquier otra cosa, no deben restringir el movimiento ni de los animales o de personas a lo largo del terreno, o sea, no debe crear divisiones en el terreno más de las que ya ahí por límites como cercas. Esto puede ser logrado de varias maneras, como pasar todo por el suelo con adecuada protección para evitar daño de que se le pase por encima, o hacer que todo pase sobre la altura de una persona promedio, por lo cual se decidió establecer un “área de seguridad”, a cuya altura no puede haber ningún elemento como un cable; de esta manera tanto el paso de las personas, así como el de los animales. Esta restricción es para elementos como tubería que podrían ser pisados por los animales, no aplica para elementos como aspersores que normalmente se conectan verticalmente a la tubería a altura que los hacen visibles y por lo tanto no corren el riesgo de ser pisados accidentalmente.

La eficiencia de riego aceptable es una función del método de riego que se utilice, sin embargo, inicialmente se plantea que una eficiencia de agua menor al 60% es completamente inaceptable y una de mínimo 70% sería preferible. Para la necesidad de facilidad de control, se plantea el uso de una encuesta de con puntaje de 1 a 5 sobre la facilidad de controlar y hacer uso del sistema. Para la escalabilidad, se busca que cumpla con los siguientes criterios para asegurar la aplicación de la solución a áreas de diferente tamaño:

- Método de riego: el método de riego elegido se puede aplicar a áreas grandes y no presenta mayor complicación en comparación con irrigar área de menor tamaño.
- Control de terreno: presencia de método para controlar el área de riego sobre el que trabaja el sistema.
- Método de distribución: el método de distribución no presenta complicaciones al intentar aplicarse a áreas más grandes.
- Sistema de control: el sistema de control debe tener la capacidad de tratar terrenos más grandes que el inicialmente planteado.

El puntaje en esta categoría por lo tanto va de 0 a 4 (en función de la cantidad de características de escalabilidad con las cuales la propuesta de solución cumple). 4 se toma como el valor ideal y 3 como el valor marginal.

3.2. Generación de soluciones

3.2.1. Descomposición funcional

Esta etapa busca encontrar diferentes alternativas que puedan servir para solucionar la problemática del cliente, mediante un proceso sistemático. La solución se visualiza como una caja negra que puede tomar energía, material, así como señales, y puede entregar también estos, como se puede ver en la Figura 3.3.

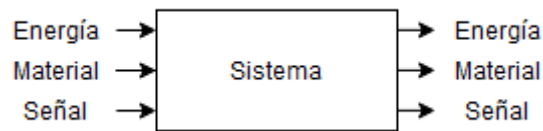


Figura 3.3. Representación caja negra de un sistema. Realización propia.

La representación caja negra para el sistema específico se puede ver en la Figura 3.4. Se considera que el material o recurso que el sistema utiliza de entrada es el agua; el sistema adicionalmente recibe una señal de control para hacer su funcionamiento. La salida del sistema es el agua que se le entrega al terreno. Se añade adicionalmente como entrada *input* por parte del usuario, para tomar en cuenta el requerimiento de que la solución sea escalable, lo cual es algo por decisión del usuario del sistema.

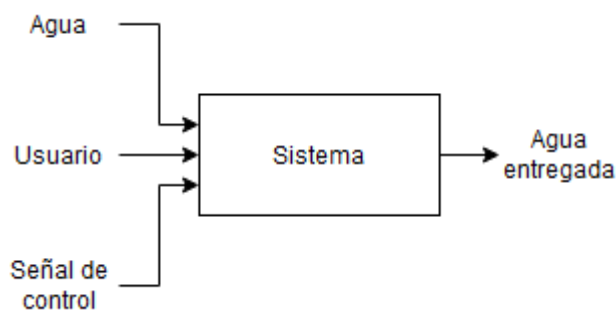


Figura 3.4. Solución en modo caja negra. Realización propia.

3.2.2. Descomposición funcional realizada

Posteriormente se realiza una descomposición funcional del proyecto en sus aspectos individuales. Para cada aspecto de la solución, se buscan diferentes

alternativas, tanto mediante búsqueda de manera externa como procesos internos como lluvias de ideas. La descomposición funcional realizada para este proyecto se puede ver en la Figura 3.5.

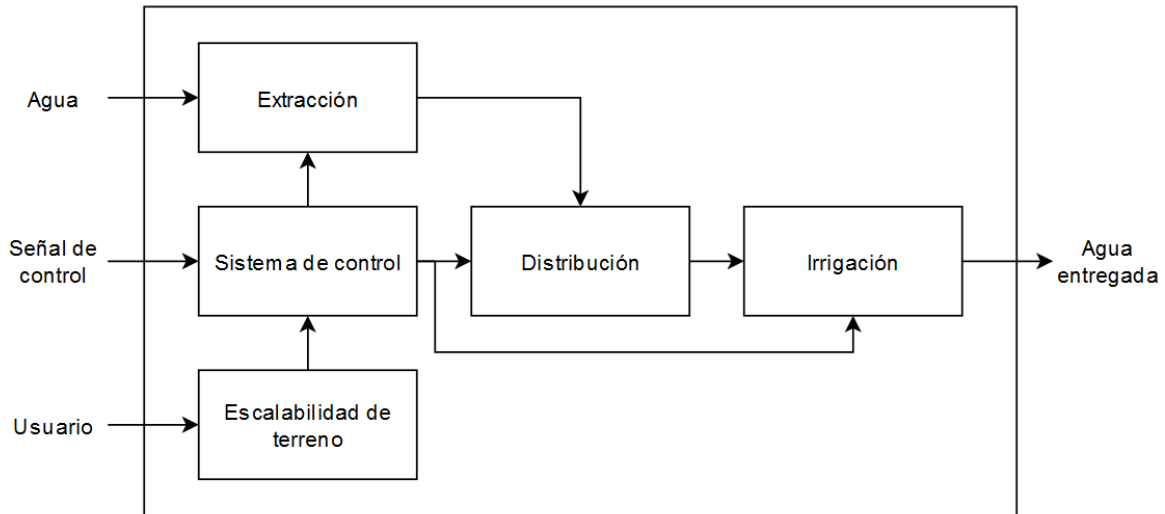


Figura 3.5. Descomposición funcional de la solución. Realización propia.

La solución se divide entonces en los siguientes aspectos:

- Extracción: se refiere a la fuente de la cual se obtendrá el agua.
- Sistema de control: es el sistema que controla los diferentes aspectos de la solución, por lo cual determina si es la hora correcta para irrigar y controla la activación de la distribución e irrigación del agua.
- Distribución: sistema que lleva el agua del punto en que se obtiene a los puntos de riego.
- Irrigación: dispositivo o sistema que riega el terreno.
- Escalabilidad: se refiere a la parte de la solución del control del uso del terreno de acuerdo con las necesidades actuales del cliente, de acuerdo con una de las necesidades planteada en la Tabla 3.4.

3.2.3. Alternativas de solución para cada aspecto del proyecto

En esta sección se exponen las diferentes opciones de solución para cada uno de los aspectos en la descomposición funcional. Estas alternativas fueron

planteadas de acuerdo con investigación de fuentes como artículos, videos, así como criterio propio y estudio del área en la que se desarrolla el proyecto.

3.2.3.1. Extracción

Para la obtención de agua, se plantean tres alternativas. Inicialmente se descarta el uso de agua de lluvia para cualquier propósito dado que el objetivo del proyecto en sí es ayudar a la empresa en una época en que esta es escasa. Las tres alternativas son entonces el uso de agua externa, o sea comprada de una fuente externa a la empresa, y su almacenamiento en algún contenedor antes de ser transportada a las áreas de necesidad, además del uso de las dos fuentes de agua actuales con las que la empresa cuenta. Estas son un pozo ya instalado, el cual se utiliza para el agua de los animales. Este pozo cuenta con agua durante todo el año, lo cual significa que es apropiado para el uso en época seca, además de una naciente de río que se encuentra dentro de la propiedad. La parte del terreno por la cual esta naciente pasa es verde durante todo el año, lo cual indica presencia significativa de agua subterránea.

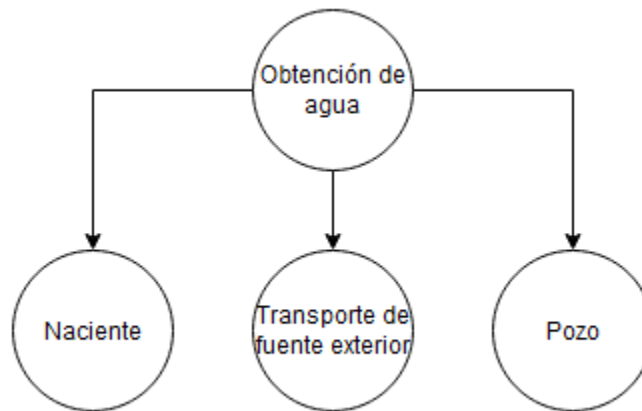


Figura 3.6. Árbol de clasificación para la fuente de agua de la solución.
Realización propia.

3.2.3.2. Sistema de control

En esta sección se discuten las alternativas para implementar la lógica de control de la solución. Se proponen las siguientes alternativas:

- Microcontrolador: un microcontrolador tiene la ventaja de ser altamente apto para tareas puntuales, así como de poder ser programado en plataformas populares como Arduino. Tiene además costo bajo en comparación con alternativas como PLCs.
- PLC: Dispositivos ampliamente utilizados en la industria y con la ventaja de que muchos pueden ser programados visualmente, eliminando la necesidad de código. Sin embargo, el costo puede ser prohibitivo.
- FPGA: se podría configurar una FPGA para realizar la lógica del sistema de control. Sin embargo, en este caso, muchas de las ventajas de una FPGA, como su flexibilidad, no son tan necesarias ya que se busca realizar un trabajo puntual, y no de alto costo computacional, con lo cual otra ventaja como la facilidad de procesamiento paralelo también se volvería importante.
- Microprocesador: apto para aplicaciones más complicadas, al ser básicamente una computadora. Posible incorporación de elementos de interacción humana como una interfaz gráfica. Costo más elevado que uso de microcontrolador y programación más complicada que un PLC.

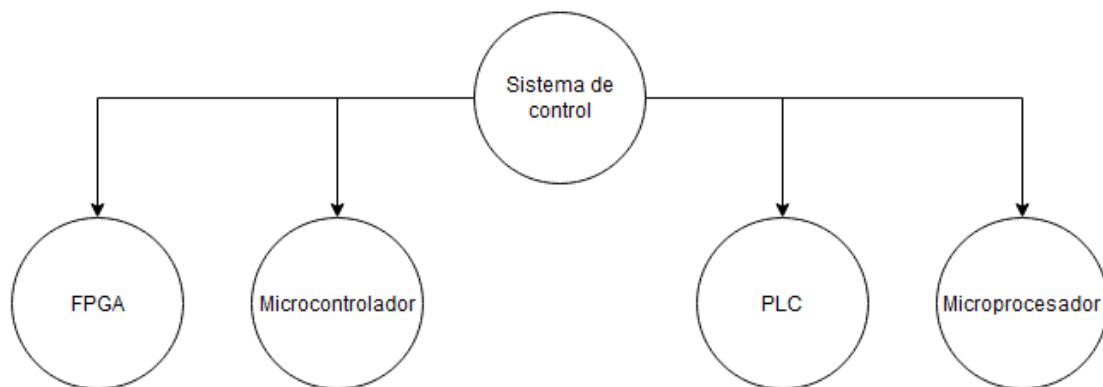


Figura 3.7. Árbol de clasificación para sistema de control. Realización propia.

3.2.3.3. Distribución

Para distribuir el agua a los diferentes puntos en que se necesita irrigar, se proponen las siguientes alternativas.

- Mangueras: al ser material flexible, permite su uso sin mucha consideración sobre el espacio, ya que se pueden manipular y doblar según sea necesario. Esto puede sin embargo causar puntos de alta presión que pueden comprometer el sistema. Es también posible que estas sean dañadas por el paso de los animales, dependiendo de dónde se ubiquen.
- Tubería subterránea: cumple con el requerimiento de no interferir con el paso de los animales, además de evitar ser dañada por los mismos. Sin embargo, requiere trabajo adicional en su instalación al tener que cavar la tierra para instalarla.
- Tubería suspendida: Se refiere con esto a tubería suspendida sobre el suelo, para así no interferir con el paso de los animales, además de evitar el trabajo adicional de la instalación de tubería subterránea. Abre además el sistema de distribución a mover el agua por gravedad en lugar de mediante una bomba, si se utiliza una diferencia de altura entre los diferentes puntos de instalación lo suficientemente pronunciada. Sin embargo, dependiendo del tamaño final del sistema el peso de los tubos se vuelve una carga mecánica importante a considerar, y puede requerir la instalación de soportes adicionales.
- Red de canales: se puede emplear para ahorrar en costo de distribución de agua al poder circular el agua mediante gravedad, si el punto central de agua es bien elegido. Sin embargo, requiere mucho trabajo adicional para hacer los canales, es menos compatible con sistemas de riego con el uso de aspersores o goteo que el uso de tuberías, y el control del uso del agua se dificulta, así como la aplicación de dosis pequeñas. En términos de control del terreno regado, se necesitaría encontrar una solución diferente al uso de válvulas para controlar el flujo de agua a diferentes áreas. Finalmente, también dificulta el paso de animales.

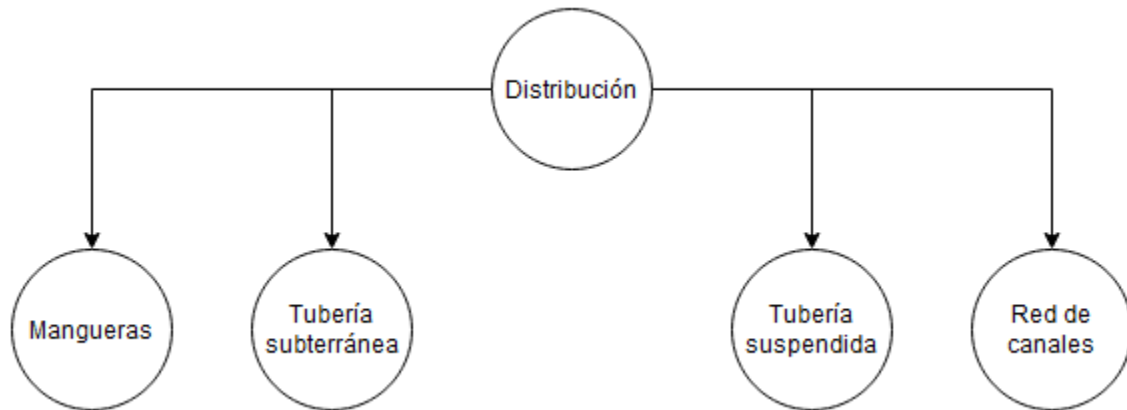


Figura 3.8. Árbol de clasificación del método de distribución. Realización propia.

3.2.3.4. Irrigación

Para el sistema de irrigación, se proponen los cuatro sistemas de irrigación expuestos en el Capítulo 2, que corresponden a irrigación por aspersores, irrigación por goteo, así como irrigación por gravedad. Resúmenes de sus ventajas y desventajas se pueden ver en sus secciones respectivas.

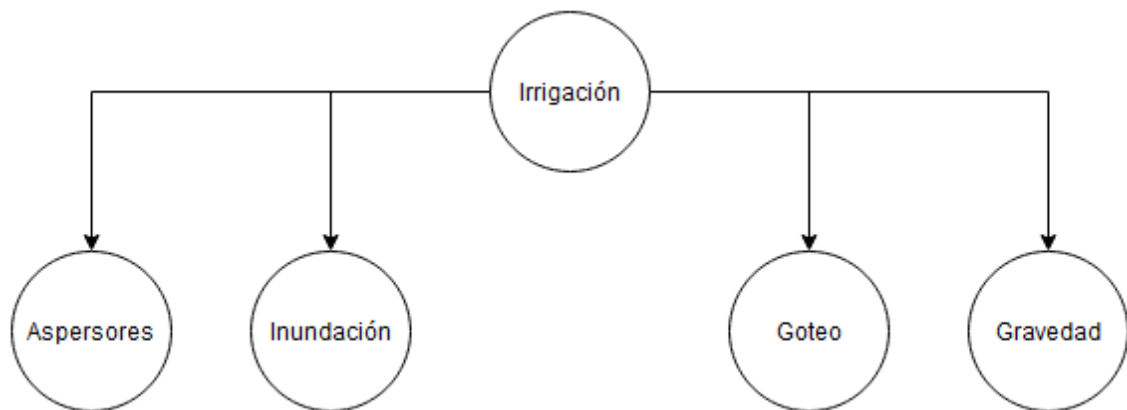


Figura 3.9. Árbol de clasificación para método de irrigación. Realización propia.

3.2.3.5. Escalabilidad

Como se dijo anteriormente, esta sección se refiere al método para controlar el área de riego, ya que el cliente le dio alta importancia a la escalabilidad de la solución, ya que desea que en el caso de que se implementara exitosamente la solución, le gustaría poder incrementar el área de riego en un futuro más allá de la

inicial planteada, que es de media hectárea. Indicó además que quisiera poder controlar el área de riego de acuerdo con sus necesidades. Por lo tanto, se añadió un bloque de escalabilidad a la descomposición funcional, el cual también puede ser llamado control de área de riego. Para esto se proponen dos alternativas, el control del terreno mediante una interfaz digital o el accionamiento manual de los dispositivos que controlen riego a un área específico; esta segunda alternativa podría realizarse tanto a corta distancia mediante el uso de dispositivos como válvulas manuales para redirigir o bloquear el paso del agua, así como a larga distancia mediante la instalación de interruptores conectados a los dispositivos de riego o a las válvulas correspondientes a cierta área de riego.

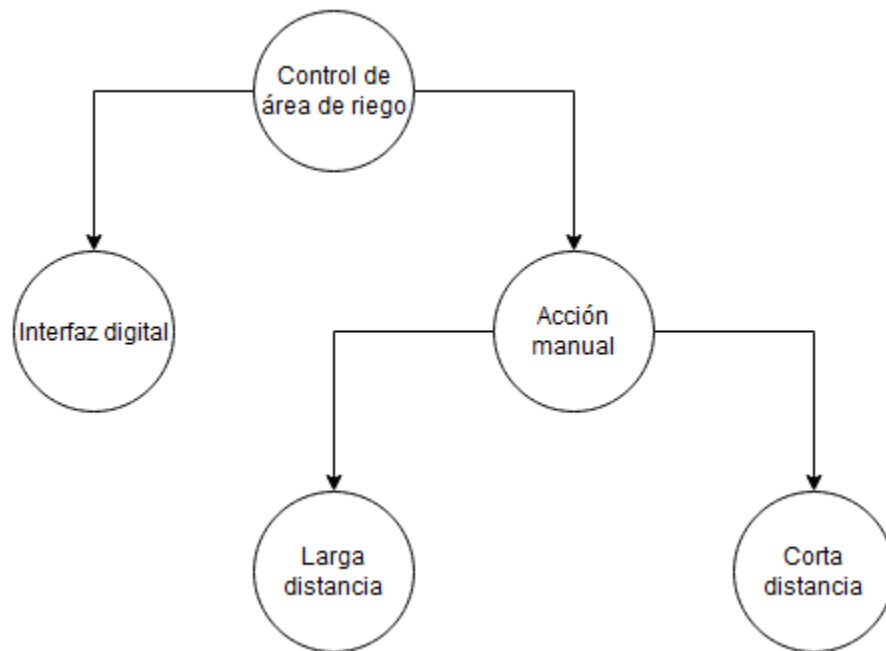


Figura 3.10. Árbol de clasificación para control del área de riego.

Por otro lado, también se plantea el uso de una interfaz digital para el control del área de riego. Una propuesta de cómo esta alternativa podría funcionar es que el terreno se podría dividir en varias sub-áreas, como por ejemplo diez sub-terrenos de aproximadamente media hectárea cada uno. Mediante una interfaz en una computadora, las diferentes sub-áreas se podrían activar y desactivar. Para facilitar la experiencia del usuario, las conexiones eléctricas al sistema de control se harían inmediatamente y la programación de la interfaz se haría tomando en cuenta toda

el área, por lo cual el sistema sería capaz de funcionar correctamente al hacer las conexiones. Un diagrama simplificado de cómo el sistema podría funcionar se puede ver en la Figura 3.11.

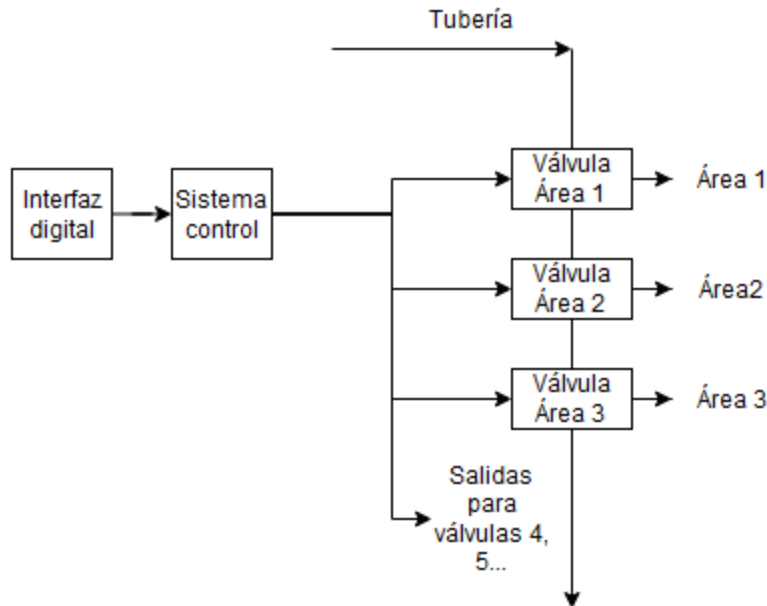


Figura 3.11. Diagrama básico de funcionamiento de interfaz propuesta.

Realización propia.

3.3. Selección de solución

Las diferentes propuestas de solución para los aspectos del proyecto se comparan de manera sistemática, utilizando criterios basados en las necesidades identificadas, así como otros específicos al aspecto de la solución tratado según sea el caso. Para comparar las alternativas, se toma una de estas como referencia, y se utiliza un sistema de puntaje de 5 puntos para calificar el desempeño del concepto en los diferentes criterios; los valores de este sistema se pueden ver en la Tabla 3.7.

Para tomar en cuenta la importancia dada por el cliente a cada criterio, este puntaje se multiplica posteriormente por la importancia dada por el cliente al criterio correspondiente; de esta manera se llega a un concepto final. Para criterios no basados en necesidades del cliente, se les da un valor basado en criterio;

adicionalmente se consultó al cliente para algunos de estos. Se utiliza el cero en lugar del 3 como el punto medio de la escala para visualizar más fácilmente los resultados y obtener números más pequeños. Significa además que opciones que obtienen peor puntuación que la referencia tendrán puntuaciones negativas. Estos dos factores llevan a puntuaciones más intuitivas de comprender, pero las cuales funcionan igual que una escala de 1 a 5.

Tabla 3.7. Puntaje para desempeño de los conceptos.

Valor	Significado
-2	Significativamente peor que referencia
-1	Peor que referencia
0	Mismo desempeño que referencia
1	Mejor que referencia
2	Significativamente mejor que referencia

3.3.1. Elección de solución para escalabilidad

Para la escalabilidad del sistema, para poder solucionar el control del área de riego para poder adaptar se habían propuesto las opciones expuestas en la Sección 3.2.3.5, las cuales se dividen básicamente en el uso de una interfaz digital para controlar diferentes áreas o el control manual de estos mediante un medio físico, como el uso de interruptores para poder hacerlo a larga distancia, o la adición de controles manuales en el sistema de distribución en sí para controlar el flujo de agua, lo cual se puede dividir en dos categorías: acción manual a larga distancia y acción manual a corta distancia. Se utiliza como referencia la acción manual a larga distancia. Se utilizan los siguientes criterios para comparar las opciones:

- Granularidad: qué tan preciso es el método elegido para adaptarse a diferentes áreas, o sea, qué tanto se puede controlar el tamaño del área de riego.
- Costo: el costo de implementación del método elegido.
- Facilidad de expansión: qué tan fácil es expandir el área de riego inicial planteada usando el método seleccionado.

- Facilidad de uso: qué tan fácil es usar el método seleccionado por un usuario no especializado.
- Conveniencia: la conveniencia que el método presenta al usuario.
- Retroalimentación: si el sistema ofrece retroalimentación fácil de detectar y clara del área controlada.

Tabla 3.8. Comparación preliminar de conceptos de solución de escalabilidad. Realización propia.

		Concepto		
		Interfaz digital	Acción manual larga distancia	Acción manual corta distancia
Criterio	Peso	Puntaje		
Granularidad	3	-2	0	2
Costo	4	1	0	1
Expansión	5	-1	0	2
Facilidad de uso	5	2	0	-1
Conveniencia	5	2	0	0
Retroalimentación	5	1	0	-2

Tabla 3.9. Comparación de conceptos de escalabilidad con peso de criterios tomado en cuenta. Realización propia.

		Concepto		
		Interfaz digital	Acción manual larga distancia	Acción manual corta distancia
Criterio	Peso	Puntaje		
Granularidad	3	-6	0	6
Costo	4	4	0	4
Expansión	5	-5	0	10
Facilidad de uso	5	10	0	-5
Conveniencia	5	10	0	-5
Retroalimentación	5	5	0	-10
Suma		21	0	5

Observando las puntuaciones en la Tabla 3.8 y la Tabla 3.9, se puede ver que el uso de una interfaz parece surgir como el candidato preferido para el manejo de la escalabilidad. Sufre bastante en granularidad, debido a que una limitación

potencial importante es la cantidad de salidas electrónicas del dispositivo mediante el cual se esté controlando el riego. También sufre en el área de expansión, debido a que requiere más trabajo en términos de programación, en comparación con simplemente añadir más válvulas con control manual u otro dispositivo, sin necesidad de ligarlo a un sistema de control central. Sin embargo, en las otras áreas, se ve la superioridad del uso de una interfaz digital, tanto en facilidad de uso como conveniencia, debido a poder controlar todo desde un dispositivo.

Un área en que resulta ser muy ventajoso el uso de la interfaz es además el área de retroalimentación, ya que qué área se está regando se puede representar en una pantalla. Mientras que existen alternativas para dar esta señalización con los otros métodos de control, resultan menos convenientes que el uso de una interfaz. Por lo tanto, tomando en cuenta la puntuación final, así como la justificación dada, se elige el uso de una interfaz digital para controlar el área de riego.

3.3.2. Elección de controlador

Para la selección del controlador a utilizar para realizar el sistema de control, se tomaron en cuenta las opciones expuestas en la Sección 3.2.3.2. El PLC se utiliza como referencia. Para comparar las opciones, se utilizaron los siguientes criterios:

- Facilidad de programar: nivel de conocimiento, así como herramientas necesarias para programar el dispositivo.
- Costo: costo monetario del dispositivo.
- Mantenimiento: facilidad de mantenimiento y *troubleshooting* del dispositivo. Especialmente por gente no experta, en caso de que se necesite realizar mantenimiento o *troubleshooting* de manera rápida.
- Consumo de energía: el consumo de energía del dispositivo.
- Flexibilidad: facilidad para ser configurado para incorporar tareas adicionales a la lógica de control.

Los puntajes de las alternativas de solución para este aspecto del proyecto se pueden ver en la Tabla 3.10. Los puntajes ajustados con el peso de los criterios se pueden ver en la Tabla 3.11.

Tabla 3.10. Comparación preliminar de alternativas para controlador. Realización propia.

		Concepto			
		Microcontrolador	PLC	FPGA	Microprocesador
Criterio	Peso	Puntaje			
Mantenimiento	4	1	0	-2	1
Facilidad de programar	5	-1	0	-1	-1
Costo	4	1	0	-1	1
Consumo de energía	5	0	0	0	0
Flexibilidad	3	0	0	2	2

Tabla 3.11. Comparación de alternativas para controlador tomando en cuenta el peso de los criterios. Realización propia.

		Concepto			
		Microcontrolador	PLC	FPGA	Microprocesador
Criterio	Peso	Puntaje			
Mantenimiento	4	4	0	-8	4
Facilidad de programar	5	-5	0	-5	-5
Costo	4	4	0	-4	4
Consumo de energía	5	5	0	0	5
Flexibilidad	3	0	0	6	6
Suma		8	0	-11	14

Al comparar los conceptos, resulta evidente que las características ventajosas de la FPGA no ofrecen ventajas en este caso, ya que se requiere el uso de un sistema para una tarea específica. En particular, el criterio de mantenimiento y *troubleshooting* resulta muy problemático para esta opción, ya que requiere software especializado y conocimiento de circuitos digitales, lo cual puede resultar especialmente desafiante para alguien que no conoce el tema del todo. El microcontrolador, al tener interfaces más amigables al usuario promedio, reciben mejor puntuación en este aspecto, aunque sufren en la facilidad de programar en comparación con el PLC, dado que un PLC se puede programar de manera gráfica, lo cual puede resultar más sencillo y es más intuitivo. Las dos mejores alternativas en este caso son el microprocesador y el microcontrolador. Sin embargo, un factor

adicional a favor del microprocesador es la capacidad de actuar como una computadora, por lo cual se puede utilizar para implementar la interfaz planteada en la Sección 4.1.1. Por esta razón, considerando también que el microprocesador recibió una puntuación mayor, se elige un microprocesador para este aspecto de la solución.

3.3.2.1. Elección de microprocesador

Inicialmente, la familia de computadoras de Raspberry Pi resulta altamente atractiva como microprocesador para esta parte del proceso. Se debe a varios factores:

- Bajo costo para las capacidades
- Programación con Python, lenguaje sencillo de usar y flexible para varias aplicaciones, como la creación de una interfaz, lo cual se estableció en la Sección 3.3.1.
- Conocimiento previo por haber ya trabajado con esta plataforma.
- Capacidad de hacer interfaz fácilmente con dispositivos como pantallas y otros periféricos.
- Gran cantidad de entradas y salidas, lo cual ayuda en la granularidad del sistema de control del área de riego, como se estableció en la Sección 3.3.1.
- Disponibilidad.

En particular, el criterio de disponibilidad es el que diferencia en gran medida a la familia Raspberry Pi, ya que, mientras que existen tarjetas alternativas de precios similares, como las *Tinker Board* de ASUS, las tarjetas de la familia PINE64, entre otras, son considerablemente más difíciles de encontrar en Costa Rica que las tarjetas de la familia Raspberry Pi, por lo cual resultan menos convenientes en caso de que se tenga que realizar un replazo o mantenimiento de la tarjeta en algún momento, por lo cual también sufre la facilidad de mantenimiento del sistema final en caso de que alguna de estas alternativas sea elegida.

Uno de los criterios más importantes que se había tomado en cuenta para la elección de dispositivo controlador era el número de entradas y salidas, para poder controlar las diferentes divisiones del terreno, entre otras funciones, se decide optar por la Raspberry Pi 4 de 8GB de RAM, las especificaciones de la cual se pueden ver en la Figura 3.12.

Descripción

PROCESADOR	ARM Cortex-A72
FRECUENCIA DE RELOJ	1,5 GHz
GPU	VideoCore VI (con soporte para OpenGL ES 3.x)
MEMORIA	1 GB / 2 GB / 4 GB LPDDR4 SDRAM
CONECTIVIDAD	Bluetooth 5.0, Wi-Fi 802.11ac, Gigabit Ethernet
PUERTOS	GPIO 40 pines 2 x micro HDMI 2 x USB 2.0 2 x USB 3.0 CSI (cámara Raspberry Pi) DSI (pantalla tácil) Micro SD Conector de audio jack USB-C (alimentación)

Figura 3.12. Especificaciones de modelo elegido de Raspberry Pi. Fuente: [31].

3.3.3. Elección de solución para sistema de irrigación

Para la selección del sistema de irrigación, se tomaron en cuenta las opciones expuestas en la Sección 3.2.3.4. Se utiliza el riego por gravedad como referencia. Los criterios utilizados para comparar las opciones son los siguientes:

- Costo: costo de implementación de la opción de solución. Opciones más baratas reciben mejor puntuación.
- Eficiencia de riego: eficiencia que el método de riego presenta.
- Consumo de energía: consumo energético por el método de riego. Una alta calificación denota un menor costo.
- Facilidad de automatización: la facilidad con la que el método se puede implementar de manera automatizada.
- Facilidad de mantenimiento: el nivel de complicaciones que presenta el método para que se le realice mantenimiento.
- Escalabilidad: aplicabilidad que el método de riego presenta para ser utilizado en áreas mayores a la planteada inicialmente.
- Obstrucción de área: la obstrucción al paso y movimiento tanto de animales como personas que el método de riego puede presentar.

Las comparaciones entre las diferentes opciones de concepto se pueden ver en la Tabla 3.12 y la Tabla 3.13.

Tabla 3.12. Comparación preliminar de opciones para método de irrigación. Realización propia.

Criterio	Peso	Concepto			
		Aspersión	Goteo	Gravedad	Inundación
		Puntaje			
Costo	4	-1	-2	0	0
Eficiencia	5	2	2	0	0
Consumo de energía	4	-1	-1	0	0
Automatización	5	2	2	0	0
Mantenimiento	4	-1	-1	0	0
Escalabilidad	5	0	-1	0	-2
Obstrucción	5	2	1	0	-1

Tabla 3.13. Comparación de métodos de irrigación con pesos de criterios tomados en cuenta. Realización propia.

Criterio	Peso	Concepto			
		Aspersión	Goteo	Gravedad	Inundación
		Puntaje			
Costo	4	-4	-8	0	0
Eficiencia	5	10	10	0	0
Consumo de energía	4	-4	-4	0	0
Automatización	5	10	10	0	0
Mantenimiento	4	-4	-4	0	0
Escalabilidad	5	0	-5	0	-10
Obstrucción	5	10	5	0	-5
Suma		18	4	0	-15

De la comparación de las opciones, parece que el uso de aspersores es el que más se adecua a las necesidades del proyecto. Mientras que el costo es mayor que el de la gravedad y la inundación y es más complejo, además de requerir más equipo, lo cual implica más mayor costo de mantenimiento, un aspecto que resulta de gran importancia es el de la facilidad de automatización, ya que el uso de aspersores, así como goteo se puede controlar de manera mucho más sencilla que este método. Otro aspecto importante en que la aspersión gana es la eficiencia, lo cual implica un menor uso de agua. Otro factor que hace que la irrigación por la inundación, así como por gravedad, no sean prácticas, es el hecho de que ambas requieren condiciones específicas del terreno (una pendiente constante en el caso de la irrigación por gravedad y un terreno perfectamente plano y de características similares en el caso de la irrigación por inundación). Esto afecta la factibilidad de la implementación de estos métodos de riego en gran medida.

Lo que termina distinguiendo el riego por goteo y el riego por aspersión es la escalabilidad y el criterio de obstrucción de espacio. El goteo requiere la instalación de mucha más tubería que el uso de aspersores ya que cubre mucha menos área que aspersores, lo cual resultará en un mayor costo de material. Esto además significa que hay mucho más material presente en el terreno; esto implica mucha más obstrucción de paso que los aspersores y buena posibilidad de que un animal

pueda dañarlo, sobre todo considerando que esta tubería se encuentra por debajo del campo de visión de los animales.

Tomando en cuenta los criterios elegidos y la justificación anterior, la opción para el método de irrigación es el uso de aspersores.

3.3.4. Elección de solución para sistema de distribución

Para la elección de una solución para la distribución de agua, se tomaron en cuenta las opciones expuestas en la Sección 3.2.3.3. Se usa la tubería subterránea como la referencia. Para comparar los conceptos, se utilizaron los siguientes criterios:

- Obstrucción de paso: obstrucción del espacio que el método de distribución puede generar para personas y animales.
- Costo: costo de implementar el método de distribución de agua.
- Compatibilidad: facilidad con la que se puede unir a un sistema de irrigación. Una puntuación alta implica que se necesita hacer menor trabajo para unir la distribución con el sistema de irrigación.
- Mantenimiento: qué tanto mantenimiento se le debe hacer al sistema de distribución.
- Robustez: robustez física del sistema de distribución. Importante debido a que se ubicará en áreas por donde es posible que haya paso de personas y animales.

Tabla 3.14. Comparación preliminar de las opciones de sistema de distribución. Realización propia.

Criterio	Peso	Concepto			
		Mangueras	Tubería subterránea	Tubería suspendida	Red de canales
		Puntaje			
Obstrucción	5	-1	0	0	-2
Costo	4	2	0	1	1
Compatibilidad	5	0	0	0	-2
Mantenimiento	3	-1	0	-1	1
Robustez	5	-2	0	0	0

Tabla 3.15. Comparación de las opciones para sistema de distribución con el peso de los criterios tomado en cuenta. Realización propia.

		Concepto			
		Mangueras	Tubería subterránea	Tubería suspendida	Red de canales
Criterio	Peso	Puntaje			
Obstrucción	5	-5	0	0	-10
Costo	4	8	0	4	4
Compatibilidad	5	0	0	0	-10
Mantenimiento	3	-3	0	-3	3
Robustez	5	-10	0	0	0
Suma		-10	0	1	-13

Como se puede ver en la Tabla 3.14 y la Tabla 3.15, los dos candidatos principales que surgen de este proceso son el uso de tubería subterránea y tubería suspendida. El uso de mangueras implica un sistema con un material más frágil; además, hay mayor obstrucción de paso que con la tubería subterránea y la tubería suspendida a una altura apropiada. Por otro lado, la red de canales implica mayor trabajo para unirla con un sistema de irrigación como el goteo o aspersión. Otro factor que dificulta su uso es que los canales en sí son una obstrucción de paso, por lo que recibe una puntuación negativa en este criterio.

Como se puede ver, los dos tipos de tubería se diferencian por apenas un punto en el puntaje con pesos, lo cual, tomando en cuenta los pesos de los criterios, los hace básicamente equivalentes, dado que el peso mínimo dado hasta ahora es de 3. Por esta razón, se decide utilizar la tubería subterránea, ya que no presenta la complicación de requerir soportes adicionales al estar suspendida en el aire, además de la justificación anteriormente dada.

3.3.5. Elección de solución para sistema de obtención de agua

Para abordar el problema de la extracción del agua, se tomaron en cuenta los conceptos expuestos en la Sección 3.2.3.1, los cuales son el uso del pozo con ya instalado, la instalación de un pozo en la naciente de la propiedad, o el uso de agua externa. Se toma como referencia el uso del pozo.

Se utilizan los siguientes criterios:

- Mantenimiento: la necesidad y complejidad de mantenimiento que pueda tener el método seleccionado.
- Complejidad: qué tan compleja es la propuesta de solución.
- Costo: el costo en que se incurriría al implementar el método.
- Facilidad de automatización: la sencillez con la que el uso del método se puede automatizar.
- Uso de energía: uso de energía proyectado para el método.
- Factibilidad: facilidad con la que se podría implementar el método en caso de ser seleccionado.

Los puntajes de las alternativas de solución para este aspecto del proyecto se pueden ver en la Tabla 3.16. Los puntajes ajustados con el peso de los criterios se pueden ver en la Tabla 3.17.

Tabla 3.16. Comparación de conceptos de solución para obtención de agua.
Realización propia

Criterio	Peso	Concepto		
		Pozo (referencia)	Naciente	Agua externa
Mantenimiento	4	0	-2	-1
Complejidad	5	0	0	0
Costo	4	0	-1	-1
Facilidad de automatización	5	0	0	-1
Uso de energía	5	0	0	0
Factibilidad	5	0	-2	-1

Tabla 3.17. Comparación de conceptos de solución para obtención de agua con peso de los criterios. Realización propia.

Criterio	Peso	Concepto		
		Pozo (referencia)	Naciente	Agua externa
		Puntaje		
Mantenimiento	4	0	-8	-4
Complejidad	5	0	0	0
Costo	4	0	-4	-4
Facilidad de automatización	5	0	0	-5
Uso de energía	5	0	0	0
Factibilidad	5	0	-10	-5
Suma		0	-22	-18

En términos de mantenimiento, tanto la naciente como el uso de agua externa añaden mantenimiento adicional en comparación con el pozo, al necesitar la instalación de más elementos que este método. En complejidad, el uso de agua externa recibe una puntuación negativa, por el hecho de requerir un elemento externo, el cual es la obtención de agua de la fuente externa. Por costo, el uso de la naciente, así como el agua externa, implican costos adicionales en comparación con el uso del pozo, debido a la necesidad de instalación de un pozo o algo similar y de un método de almacenar el agua, respectivamente. Por otro lado, tanto el uso del pozo como el de la naciente son significativamente más fáciles de automatizar en comparación con el uso de agua de fuente externa, ya que esta va a requerir una manera de traerla de la fuente y entregarla al resto del sistema. Se encuentra que las tres propuestas de solución tienen comportamiento similar en lo que se trata de uso de energía.

Para la parte de factibilidad, las opciones además del uso del pozo reciben calificaciones negativas. En particular, el uso de la naciente tiene consideraciones legales sobre el aprovechamiento de recursos acuíferos, las cuales, mientras que no están dentro del alcance de este proyecto, complican su uso y por lo tanto son un factor que se considera al tomarlo en cuenta como opción, por lo cual recibe una puntuación fuertemente negativa.

La puntuación en las tablas anteriores, tomando en cuenta la justificación dada, resulta en la elección del pozo como fuente de agua.

3.4. Validación

Para comprobar la viabilidad económica del diseño, se realizará un análisis económico.

Consiste en validar el funcionamiento del diseño propuesto. Dada la gran escala que implicaría la implementación de un sistema de riego, no se busca validar el funcionamiento del sistema en sí, sino del diseño. El sistema de distribución e irrigación se planea validar mediante simulación de fluidos.

Para validar el funcionamiento del software de automatización, se plantea el uso de pruebas para el programa. De esta manera, se comprueba que puede realizar el trabajo de controlar el sistema y producir las señales de salida correctas al recibir entradas que corresponderían a condiciones del sistema real. Los resultados, así como análisis de los mismos, se pueden ver en el Capítulo 5.

Capítulo 4

4. Propuesta de diseño

4.1. Diseño de soluciones

4.1.1. Escalabilidad

4.1.1.1. Interfaz propuesta

Como se había dicho anteriormente en la Sección 3.2.3.5, la interfaz digital propuesta para el control del terreno del área se basa en la división del terreno de riego en varias sub-áreas de riego. Como inicialmente se plantea un área de riego de una hectárea, de un área total de aproximadamente 10 hectáreas, se puede plantear entonces 10 sub-áreas de irrigación, cada una de una hectárea. Una idea simple de cómo se podría visualizar en pantalla se puede ver en la Figura 4.1, dando con el ejemplo el control de tres zonas de riego. La idea que el usuario pueda fácilmente mediante un *click* seleccionar las sub-áreas que quiere que sean irrigadas. En la ilustración, la luz roja significaría que el área se ha seleccionado para ser irrigada (el color por supuesto puede ser otro, debido al significado prohibitivo que el rojo generalmente tiene). La luz verde, por su parte, significa que el área actualmente está siendo regada. De esta manera al usuario se le comunica rápidamente qué partes del sistema están trabajando y si este mismo está funcionando actualmente. Se le desea comunicar al usuario también el tiempo que falta para que el riego de cierta área termine.

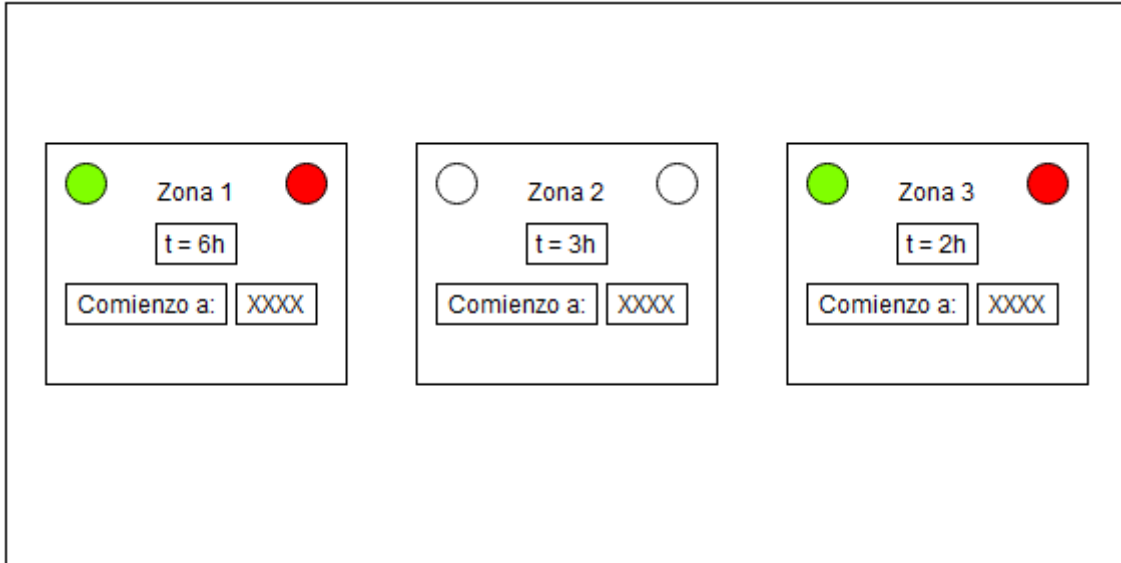


Figura 4.1. Vista simplificada de concepto de interfaz. Realización propia.

4.1.1.2. Interfaz programada

A continuación, se muestra una captura de pantalla de la interfaz que se programó y se explica su funcionalidad. Detalles de la validación de la interfaz pueden verse en la Sección 5.3.



Figura 4.2. Captura de pantalla de la interfaz. Realización propia en Python.

Se muestra el control de cinco zonas. Cada zona posee un botón titulado *Enable*, el cual al ser presionado vuelve la luz roja a su lado en verde, esto significa que el área correspondiente se regará en el siguiente ciclo de riego. La luz roja al lado de la etiqueta *Estado* indica si actualmente se está regando la zona correspondiente o no; rojo significa que no hay riego, verde significa que sí hay riego. El estado de la zona, y por lo tanto el color de la luz a su lado, solo cambiará de rojo a verde a la hora predeterminada de riego (8 pm) y solo cambiará de verde a rojo a la hora predeterminada en que termina el riego (4 am). La única excepción es un botón de

emergencia, el cual hace un *reset* de todo el sistema; la idea de este botón sería, claramente, que fuera usado en caso de una emergencia o en caso de que se haya de parar el funcionamiento del sistema por alguna razón como mantenimiento. El botón de emergencia se encuentra apartado de los botones de control de riego para evitar en la medida de lo posible interrumpir el riego accidentalmente por algún error de usuario.

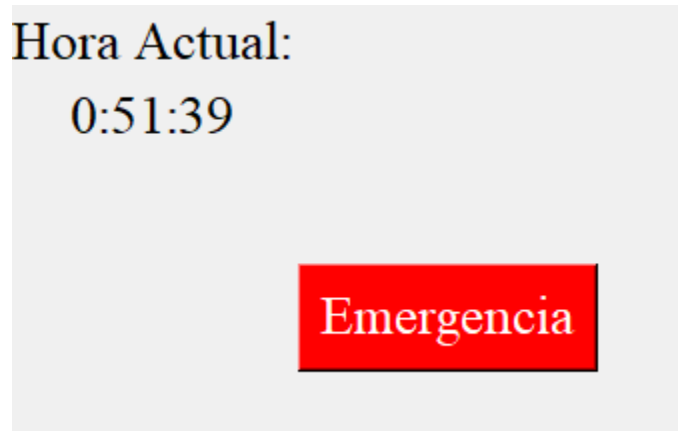


Figura 4.3. Captura de pantalla de botón de emergencia. Realización propia mediante Python.

4.1.2. Sistema de control

4.1.2.1. Lógica de control

La lógica planteada para el controlador se puede ver en la Figura 4.4, en la cual la variable t_0 se refiere al tiempo objetivo que debe durar la irrigación para proveer suficiente agua para el crecimiento del pasto, valor de la cual se determinará más adelante. La señal de control se activa cuando es la hora correcta para la irrigación; de esta manera, se asegura que solo se riegue a las horas en que no hay sol que pueda evaporar el agua rápidamente. Debe notarse que esta es la lógica planteada antes de cualquier consideración que haya que tomarse por el diseño de aspectos posteriores de la solución.

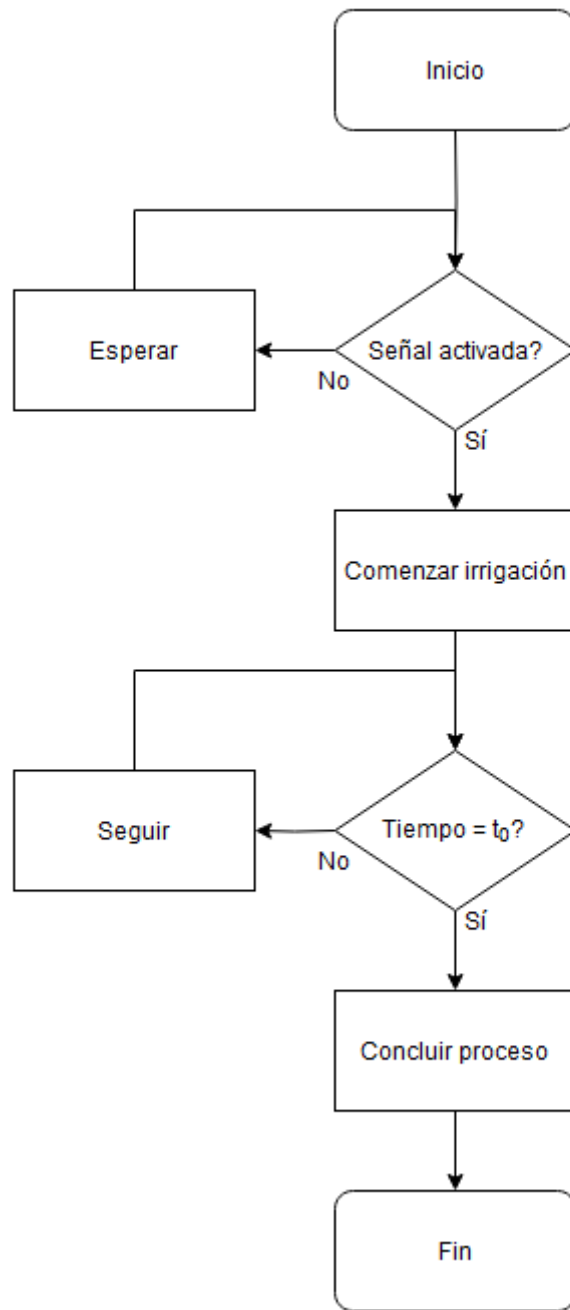


Figura 4.4. Diagrama de flujo de programa. Realización propia.

4.1.3. Irrigación

4.1.3.1. Estimación de agua necesaria mediante datos climatológicos.

Los datos históricos meteorológicos de Aranjuez se pueden observar en la Figura 4.5:

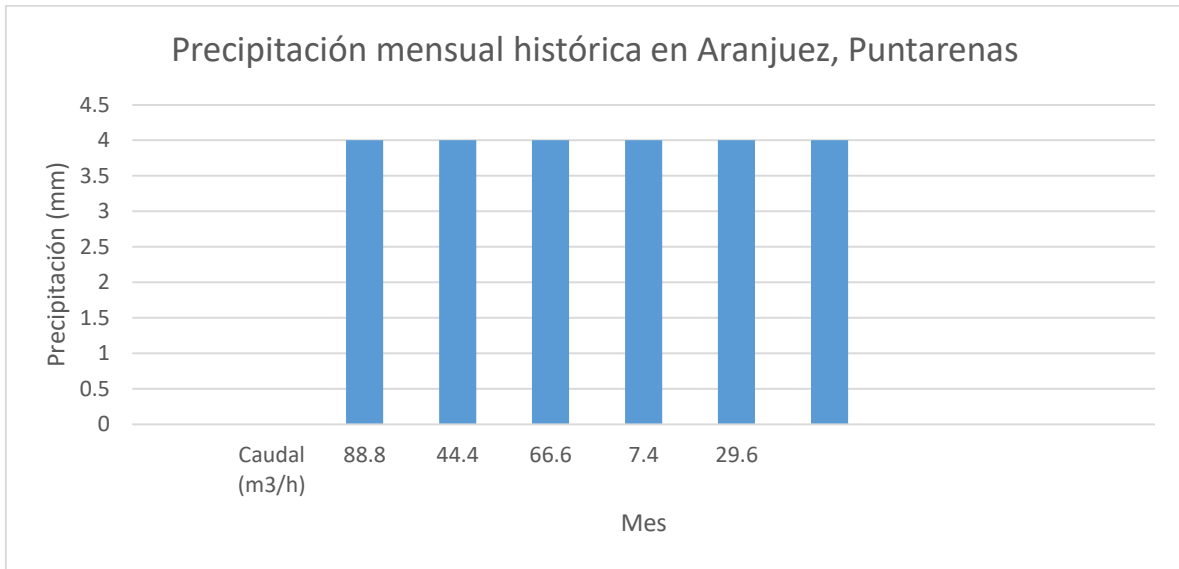


Figura 4.5. Datos históricos de precipitación en Aranjuez. Realizado en Excel con fuente: [32].

Tabla 4.1. Datos históricos de precipitación mensual en Aranjuez. Fuente: [32].

Mes	Precipitación (mm)
Enero	8
Febrero	19
Marzo	25
Abril	97
Mayo	315
Junio	434
Agosto	418
Septiembre	362
Octubre	394
Noviembre	451
Diciembre	181

Mientras que estos datos representan tendencias históricas a largo plazo y por lo tanto es posible que no sean una representación completamente precisa de la

situación actual, sirven para dar una idea de los niveles de precipitación de la época lluviosa, que se pueden utilizar como una guía para la precipitación necesaria para el crecimiento del pasto. Tomando los 6 meses con más precipitación (de mayo a noviembre), se tiene un promedio de 11,15 mm/día de precipitación en la época lluviosa. Por lo tanto, por cada metro cuadrado de terreno, se necesitaría 11,15 L de agua diariamente. Esto es equivalente a $1,29 * 10^{-7} \frac{m^3}{s}$. Utilizando el valor mínimo de eficiencia para el riego por aspersion en la Tabla 2.1, el cual es de 75%, se obtiene un valor objetivo para el sistema de irrigación de $1,72 * 10^{-7} \frac{m^3}{s}$, o 14,87 mm/día. Esto significa que una hectárea requeriría:

$$V = 10000 m^2 * 14,87 \frac{mm}{día} * \frac{0,001 m}{1 mm} = 148,7 \frac{m^3}{día} = 0.00172 \frac{m^3}{s}$$

Como la irrigación solo puede darse a ciertas horas y no durante todo el día, el volumen de 148,7 metros cúbicos diarios debe ser entregado en un período reducido. Para asegurar que sea un período de mínima luz solar, se puede establecer un período de riego de las 12:00 pm hasta las 4:00 am, lo cual es un período de 4 horas. 148,7 metros cúbicos en 4 horas es equivalente a $10,33 * 10^{-3} \frac{m^3}{s}$.

Un valor de caudal como este, así como las relativamente largas distancias involucradas, indicarían posiblemente el uso de aspersores tipo pistola [33]. Para respaldar este cálculo, se utiliza un método alternativo que se detalla en la siguiente sección.

4.1.3.2. Estimación mediante datos del terreno

R. Valencia et al [24] utilizan un método basado en la caracterización del suelo del terreno. Las características del suelo de la propiedad se pueden ver resumidas en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Características del suelo de la propiedad en área de interés.
Realización propia.

Suelo franco-arcilloso
Tasa básica de infiltración = 12,62 mm/h

El método comienza calculado la lámina de agua aprovechable (LAA), utilizando la ecuación 8 [24]:

$$LAA = \frac{CC - PM}{100} * Da * p \quad (8)$$

Donde:

CC: capacidad de campo (%)

PM: punto de marchitamiento (%)

Da: densidad aparente (g/cm³)

p: Profundidad radicular efectiva (cm)

Para pasto, p = 50 cm [24]. Para los otros datos, se utilizan valores de la Tabla 2.2, la Tabla 2.3, y la Tabla 2.4 (tomando los valores menores en los rangos para representar el peor caso).

$$\frac{18 - 9}{100} * 1,33 * 50 = 5,985 \text{ cm} = 59,85 \text{ mm}$$

Asumiendo un valor de agotamiento de agua del suelo de un 75% (valor utilizado por Valencia et al. [24] para terreno de pasto), se puede obtener la lámina rápidamente aprovechable, o sea, la lámina que debe aplicarse en cada riego.

$$59,85 * 0,75 = 44,89 \text{ mm}$$

Después de determinar este valor, se debe determinar la lámina bruta que se debe aplicar, la cual se obtiene utilizando la eficiencia de aplicación. Utilizando los valores de la Tabla 2.1 para los sistemas de riego por aspersión, se toma el valor menor para hacer un cálculo conservador.

$$Lb = \frac{44,89 \text{ mm}}{0,65} = 69,06 \text{ mm} = 690,6 \frac{\text{m}^3}{\text{ha}}$$

La frecuencia de riego se obtiene con la ecuación 9 [24]:

$$Fr = \frac{LARA}{ETP} \quad (9)$$

En la cual *ETP*: uso máximo consuntivo diario. Generalmente para pasto, se recomienda hasta dos pulgadas de agua por semana, con un mínimo de 1 pulgada [34] [35]. 1 pulgada por semana equivale a 3,63 mm/día.

$$Fr = \frac{44,89}{3,63} = 12,37$$

Esto significa que se debe regar el terreno aproximadamente cada 12 días.

Para obtener el caudal de diseño se utiliza la ecuación 10 [24]:

$$Q = 2,78 * \frac{A * Lb}{H * Fr} \quad (10)$$

Donde:

A: área de riego (ha), 1 para una sub-área

Lb: lámina bruta (mm)

H: horas diarias de operación, tomado como 4 en la Sección 4.1.3.1

Fr: frecuencia de riego (días)

Por lo tanto:

$$Q = 2,78 * \frac{1 * 69,06}{4 * 12} = 3,9997 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 0,004 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Por comparación, mediante la estimación del agua necesaria para el riego utilizando datos climatológicos, se obtuvo que se necesitaba 10,33 l/s. La primera estimación puede tomarse como un valor máximo, por decirse así, ya que simula la caída de lluvia durante el período más lluvioso de la región, la cual igual permite el

crecimiento de cultivos. El valor obtenido mediante la ecuación 10 se utilizará como límite menor para la búsqueda de un aspersor.

4.1.3.3. Elección de aspersor

4.1.3.3.1. Elección mediante cálculo matemático

Utilizando el resultado de caudal necesario obtenido en la Sección 4.1.3.2, se puede proceder a elegir el aspersor a utilizar y adicionalmente la cantidad de aspersores necesarios para regar el área. Estos son los parámetros importantes para la elección del aspersor:

Tabla 4.3. Parámetros de elección de sistema de aspersores.

Parámetro	Valor
Caudal (l/s) (l/h)	4 (14400)
Área (ha)	1

El parámetro principal influyente en esta búsqueda es el área de riego, debido a que el requerimiento de caudal se puede cumplir mediante el uso de múltiples aspersores, pero, por razones de costo, también sería óptimo minimizar el número de estos mismos. Se debe notar que también se pueden utilizar aspersores de menor caudal al calculado y simplemente aumentar el tiempo de aplicación, siempre tomando en cuenta no excederse de un período en que no haya exceso de luz solar.

Se puede utilizar la ecuación 11 para calcular la intensidad de riego [24][36][37][38]:

$$I = \frac{q}{A} \quad (11)$$

Donde:

q: gasto del aspersor (m³/s)

A: área de riego (m²)

En este caso, el área de riego es una hectárea (10000 m²). La intensidad de riego no debe exceder la tasa básica de precipitación [24][36][37][38] (10,84 mm/h

según la Tabla 4.2). Si se despeja el valor de q de la ecuación 11, se obtiene el caudal crítico para el sistema de aspersores.

$$q = 12,62 \frac{mm}{h} * \frac{1 m}{1000 mm} * \frac{1 h}{3600 s} * 10000 m^2 = 0,035 \frac{m^3}{s} = 35,01 \frac{l}{s}$$

Como el caudal calculado para el sistema de aspersores es menor que el caudal crítico, se evita encharcamiento y escorrentía.

Buscando en el catálogo de la empresa Nelson Irrigation, se encuentran varias opciones, entre las cuales destacan el *Rotator® R2000WF*, y el *Rotator® R33/R33LP* con las siguientes características:

Tabla 4.4. Características de *Rotator® R2000WF*. Fuente: [39].

Parámetro	Valor
Presión (psi)	40-65
Caudal (l/h)	204-1295
Radio	9,1-13,7
Tamaño de boquilla	#10-20 2TN

Tabla 4.5. Características de *Rotator® R33/R33LP*. Fuente: [40].

Parámetro	Valor
Presión (psi)	25-65
Caudal (l/h)	660-2574
Radio	11.3-15.5
Tamaño de boquilla	9/64"-7/32", 4.0-5.0 33FC

Utilizando valores de la hoja de datos, se calculó la combinación de presión, boquilla, y alcance que mejor se ajusta al área de riego de 1 hectárea, así como el número de aspersores requeridos. Para el cálculo de las áreas con el R2000, se utilizó el alcance mínimo en la hoja de datos. Esto se hizo utilizando Excel, así como las ecuaciones 12 y 13:

$$n = \frac{Q}{q} \quad (12)$$

$$A = n * \pi * r^2 \quad (13)$$

Donde:

Q: caudal requerido por el sistema (2 l/s o 14400l/h)

q: caudal del aspersor

n: número de aspersores

r: radio de irrigación del aspersor

Como se puede ver, se toma el área de riego cubierta por un aspersor individual como un círculo perfecto.

Los resultados se pueden observar en las siguientes tablas (para el aspersor R33-LP, en el caso en que ambos modelos trabajan a la misma presión, se utilizó el de alcance más alto).

Tabla 4.6. Cálculos con *Rotator® R2000WF/LP*. Realizados en Excel.

R2000				Presión (bar)						
Boquilla	Modelo	Alcance (m)	Parámetros	1.75	2	2.75	3	3.5	4	4.5
Azul	LP	9.1	q (l/h)	201	217	254	266	286		
			n	71.64	66.36	56.69	54.14	50.35		
			A (m ²)	18637.99	17263.76	14748.96	14083.59	13098.73		
	WF	10.1	q (l/h)	0	0	254	266	286	306	328
			n			28.35	27.07	25.17	23.53	21.95
			A (m ²)			9084.30	8674.48	8067.87	7540.56	7034.79
Naranja	LP	9.8	q (l/h)	245	261	308	323	350		
			n	58.78	55.17	46.75	44.58	41.14		
			A (m ²)	17733.66	16646.54	14106.32	13451.23	12413.56		
	WF	10.7	q (l/h)			308	323	350	375	401
			n			23.38	22.29	20.57	19.20	17.96
			A			8408.13	8017.66	7399.15	6905.87	6458.11
Púrpura	LP	10.1	q (l/h)	290	311	365	380	412		
			n	49.66	46.30	39.45	37.89	34.95		
			A (m ²)	15913.19	14838.66	12643.35	12144.27	11201.03		
	WF	11.3	q (l/h)			365	380	412	442	469
			n			39.45	37.89	34.95	32.58	30.70
			A (m ²)			15826.19	15201.47	14020.78	13069.14	12316.76

Tabla 4.7. Cálculos con *Rotator® R33/R33LP*. Realizados en Excel.

R33			Presión (bar)						
Boquilla (mm)	Modelo	Parámetros	1.75	2	2.25	2.5	2.75	3	3.25
3.6	LP	q (l/h)	659	703	745	786	825	862	897
		n	21.85	20.48	19.33	18.32	17.45	16.71	16.05
		Alcance (m)	11	11.5	11.9	12.3	13.4	13.6	13.7
		A (m ²)	8306.39	8510.45	8599.04	8707.63	9846.19	9706.95	9465.88
4	LP	q (l/h)	805	859	911	961	1009	1054	1099
		n	17.89	16.76	15.81	14.98	14.27	13.66	13.10
		Alcance (m)	11.6	12.1	12.5	12.9	14	14.2	14.5
		A (m ²)	7561.93	7710.63	7759.15	7833.73	8787.74	8654.63	8654.67

Se puede ver que con el uso de R33 a 2,75 bar, con una boquilla de 3,6 mm, se llega a una cobertura de 9846,19 m². Redondeando el número de aspersores a 18, se logra un área de cobertura de 10153,88 m², cumpliendo el requerimiento de la cobertura de área. Debe tomarse en cuenta, sin embargo, que, al ser el área considerada para el riego aproximadamente cuadrada, mientras que el área cubierta por un aspersor individual es aproximadamente circular, el ajuste no es perfecto, por lo cual es posible que se necesiten más aspersores al planear el arreglo físico de los mismos.

Se calcula la intensidad de precipitación para el aspersor (ecuación 11):

$$I = \frac{0,825 \frac{m^3}{h}}{\pi * 13,4^2 m^2} = 0,00146 \frac{m}{h} = 1,46 \frac{mm}{h}$$

Calculando el tiempo de operación con la ecuación 14:

$$t = \frac{Lb}{I} \tag{14}$$

Donde:

- Lb: lámina bruta
- I: intensidad de precipitación

$$t = \frac{69,06 \text{ mm}}{1,46 \frac{\text{mm}}{\text{h}}} = 47 \text{ h}$$

Esto resulta en un tiempo de riego el cual es trabajable mediante la división de los riegos entre varios días, sin embargo, por ejemplo, 6 días de aplicación de 8 horas cada uno. Sin embargo, se busca otra solución para comparar con esta.

4.1.3.3.2. Elección mediante planeamiento de territorio

Esta siguiente sección intentará encontrar aspersores apropiados para el trabajo de irrigación viendo un terreno de 100 m x 100 m como sub-área inicial, y tomando en cuenta el caudal requerido de 2 l/s (7200 l/h), con un valor máximo de 10,33 l/s (37180 l/h), obtenidos por los dos métodos anteriormente expuestos.

Una segmentación del área de riego en 4 zonas iguales, con un radio de riego de los aspersores de aproximadamente 50 m, logra cobertura completa y uniforme del área de riego utilizando solo nueve aspersores, como se puede ver en la Figura 4.6, en la que el azul representa aspersores que riegan un cuarto de círculo, púrpura representa medio círculo, y rojo representa un radio completo. Como se puede ver, se forman figuras idénticas en cada zona, por lo cual se logra riego uniforme de toda el área.

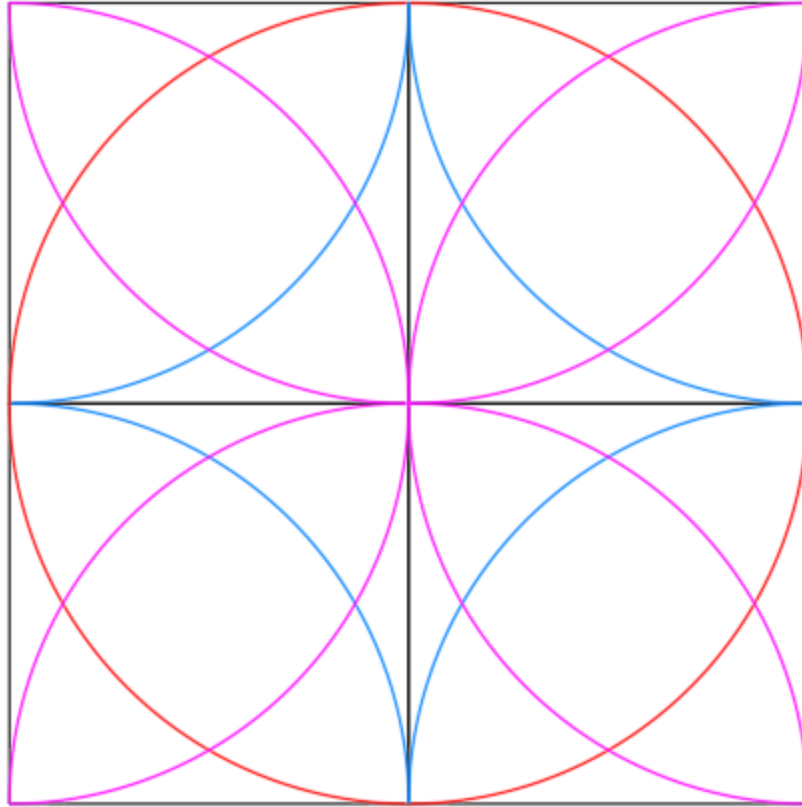


Figura 4.6. Cobertura de área propuesta. Realización propia en AutoCAD.

Para esta distribución de aspersores, se necesitan aspersores de largo alcance, y destacan los aspersores de la serie *Big Gun* de Nelson Irrigation. En particular, la serie 100, con una boquilla de 19,1 mm, a 6,5 bar, tiene un caudal de 36 m³/h (36000 l/h) y un alcance de 47,5 m de radio [41], como se puede apreciar en la Figura 4.7.

SERIE 100

■ BOQUILLA DE ORIFICIO CÓNICO: Trayectoria de 24°

Presión BAR	0,50 in 12,7 mm		0,55 in 14,0 mm		0,60 in 15,2 mm		0,65 in 16,5 mm		0,70 in 17,8 mm		0,75 in 19,1 mm	
	m ³ /h	Radio (m)	m ³ /h	Radio (m)	m ³ /h	Radio (m)	m ³ /h	Radio (m)	m ³ /h	Radio (m)	m ³ /h	Radio (m)
2,75	10,4	29,5	13,0	31,0	14,9	32,5	17,7	34,0	20,5	35,0	23,3	36,5
3,0	10,8	30,0	13,5	31,5	15,6	33,0	18,5	34,5	21,4	36,0	24,4	37,5
3,5	11,7	31,0	14,5	33,0	16,9	34,5	20,0	36,0	23,1	37,5	26,3	39,0
4,0	12,5	32,5	15,5	34,0	18,1	36,0	21,3	37,5	24,7	39,0	28,2	40,5
4,5	13,2	33,5	16,3	35,5	19,3	37,0	22,6	39,0	26,2	40,5	29,9	42,0
5,0	13,9	34,5	17,1	36,5	20,3	38,5	23,8	40,5	27,6	42,0	31,5	43,5
5,5	14,6	36,0	17,9	38,0	21,4	39,5	25,0	41,5	29,0	43,5	33,1	45,0
6,0	15,2	37,0	18,7	39,0	22,3	41,0	26,1	43,0	30,3	44,5	34,5	46,0
6,5	15,8	38,0	19,4	40,0	23,3	42,0	27,2	44,0	31,5	46,0	36,0	47,5
7,0	16,4	39,0	20,0	41,0	24,2	43,0	28,2	45,0	32,7	47,0	37,3	48,5
7,5	17,0	40,0	20,7	42,0	25,1	44,0	29,2	46,0	33,8	47,5	38,6	49,5

Figura 4.7. Datos relevantes de Serie 100 *Big Gun* de Nelson Irrigation. Fuente: [41].

Se llega en entonces a la figura de cobertura de terreno que se puede apreciar en la Figura 4.8.

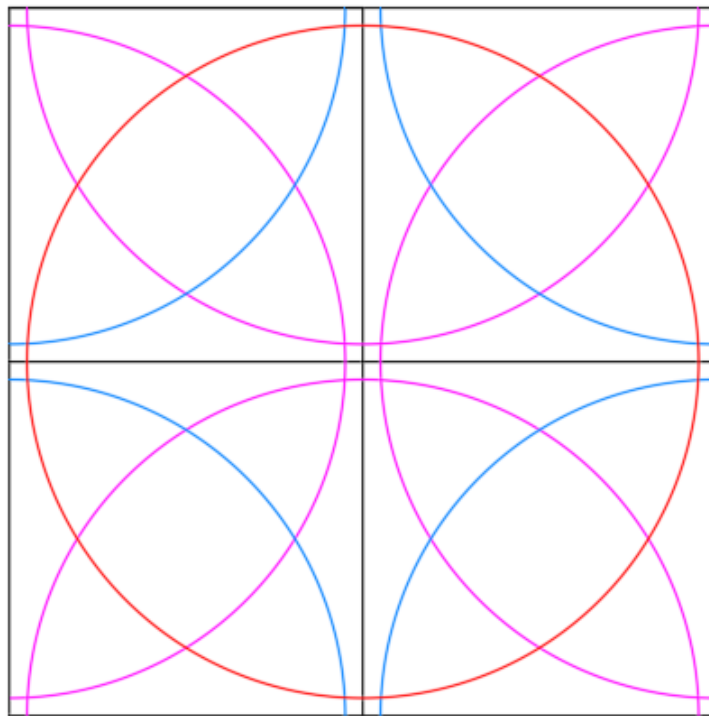


Figura 4.8. Cobertura de riego con rango real de aspersores. Realización propia en AutoCAD.

En comparación con el primer método utilizado, de esta manera se utilizan la mitad de aspersores, y se tiene inmediatamente el arreglo físico del área de riego, sin necesidad de tratar esto en un apartado separado. Tomando en cuenta el desarrollo anterior, para el riego, por lo tanto, se eligen aspersores *Big Gun* de la serie 100 de Nelson Irrigation, utilizando una boquilla de 19,1 mm, a una presión de 6,5 bar.

Finalmente, solo falta calcular el tiempo de aplicación, para lo cual se comienza calculando la intensidad de riego, con la ecuación 11, utilizando el área de las subzonas debido a que todas reciben 36 m³/h aproximadamente:

$$I = \frac{36 \frac{m^3}{h}}{2500 m^2} = 0,0144 \frac{m}{h} = 14,4 \frac{mm}{h}$$

Se puede ver que este valor excede la tasa de precipitación básica expuesta en la, lo cual resultaría en encharcamiento del suelo. Mientras que es posible remover los aspersores de las esquinas para obtener como máximo 27 m³/h (27000 l/h) en las áreas que reciben la mayor cantidad de agua, esto resulta en zonas de riego no uniformes, como se puede ver en la Figura 4.9.

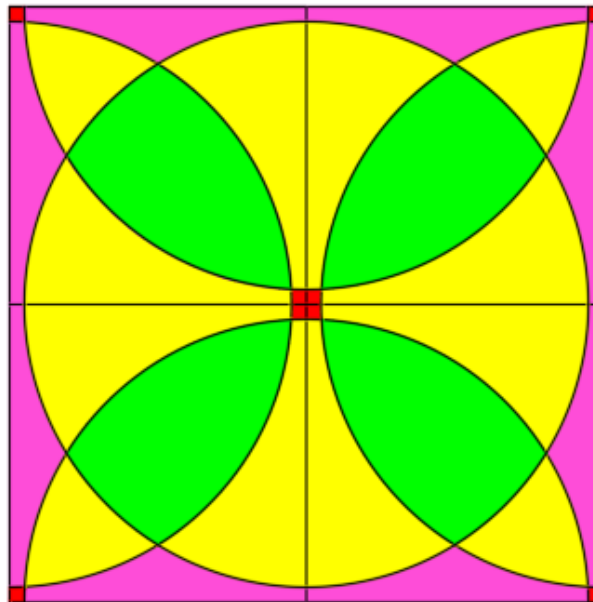


Figura 4.9. Área resultante de remover aspersores de esquinas. Realización propia en AutoCAD.

En esta figura, se utilizan los siguientes colores para denotar el caudal recibido por cada zona:

- Verde: regado por tres aspersores, 27 m³/h.
- Amarillo: regado por dos aspersores, 18 m³/h.
- Fucsia: regado por un aspersor, 9 m³/h.
- Rojo: no regado por ningún aspersor.

Se puede ver entonces que hay varias zonas que reciben menos del caudal requerido; mientras que es posible ajustar los tiempos de riego para asegurar que las áreas reciban la misma intensidad de precipitación, esto resulta en una elevación significativa de la complejidad del control. Otra alternativa es disminuir el caudal requerido inicialmente mediante la aplicación de riego uniforme por más tiempo. En la ecuación 10, si se utiliza un tiempo de riego de 8 horas, se obtiene un caudal requerido de aproximadamente 2 l/s (7,2 m³/h). Viendo la misma hoja de datos de la serie *Big Gun*, en la serie 75, con una boquilla de 10,2 mm a 4 bar, se obtiene un caudal de 7,4 m³/h y un alcance de 25,5 m. Se puede observar en la Figura 4.10. Se elige este modelo en lugar de la boquilla de 11,4 mm a 3 bar, con un radio de exactamente 25 m, por el menor caudal (7,4 m³/h en lugar de 8,2 m³/h, como se puede ver también en la Figura 4.10), ya que, al ver el proceso anterior, es importante mantener el caudal relativamente bajo para que la intensidad de irrigación no supere la tasa básica de infiltración.

Pressure BAR	0.40 in 10.2 mm		0.45 in 11.4 mm		0.50 in 12.7 mm		0.55 in 14.0 mm		0.60 in 15.2 mm		0.65 in 16.5 mm	
	m ³ /hr	Rad. (m)	m ³ /hr	Rad. (m)	m ³ /hr	Rad. (m)	m ³ /hr	Rad. (m)	m ³ /hr	Rad. (m)	m ³ /hr	Rad. (m)
1.75	-	-	-	-	-	-	9.5	22.5	11.5	24.0	13.4	25.0
2.0	-	-	-	-	8.3	24.0	10.2	24.0	12.2	25.0	14.4	26.5
2.5	-	-	7.5	24.0	9.3	25.5	11.4	26.0	13.7	27.5	16.0	28.5
3.0	6.4	23.5	8.2	25.0	10.2	27.0	12.4	28.0	14.9	29.5	17.6	31.0
3.5	6.9	24.5	8.9	26.5	11.0	28.5	13.4	30.0	16.1	31.5	19.0	33.0
4.0	7.4	25.5	9.5	27.5	11.8	30.0	14.3	31.5	17.2	33.0	20.3	34.5
4.5	7.9	26.5	10.0	29.0	12.5	31.5	15.2	33.0	18.2	34.5	21.5	36.0
5.0	8.3	27.0	10.5	30.0	13.2	32.5	16.0	34.5	19.2	36.0	22.7	37.5
5.5	8.8	27.5	11.0	31.5	13.8	34.0	16.8	35.5	20.1	37.0	23.8	39.0

Figura 4.10. Datos de serie 75 *Big Gun*. Fuente: [41].

Esto requeriría la división del terreno en 16 sub-zonas y significativamente más aspersores, sin embargo, se cumple que todo el terreno reciba irrigación uniforme; el resultado se puede ver en la Figura 4.11.

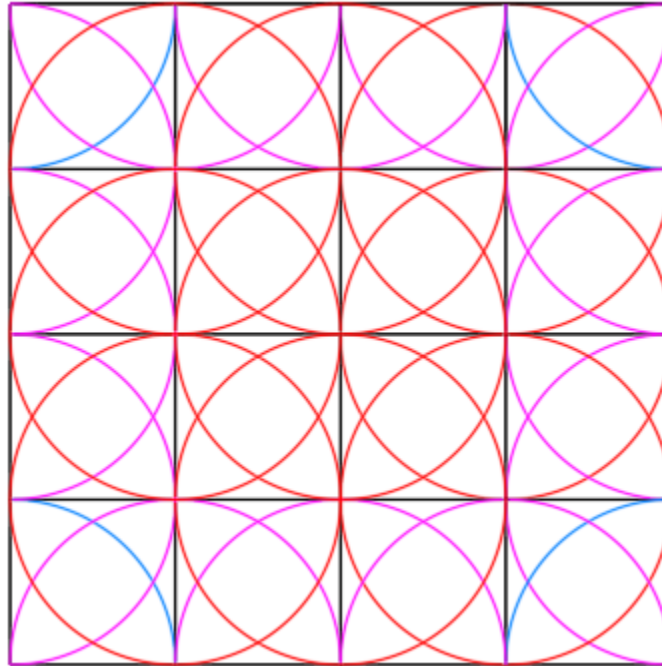


Figura 4.11. Área de riego resultante. Realización propia en AutoCAD.

Calculando la intensidad de precipitación sobre cada sub-zona:

$$I = \frac{7,4 \frac{m^3}{h}}{625 m^2} = 0,01152 \frac{m}{h} = 11,52 \frac{mm}{h}$$

Es menor que la tasa de precipitación básica de la Tabla 4.2.

Finalmente, se calcula el tiempo de aplicación utilizando la ecuación 14:

$$t = \frac{69,06 mm}{11,52 \frac{mm}{h}} = 5,99 h$$

Por lo tanto, se determina un tiempo de riego de aproximadamente 6 horas. Un factor importante que debe tomarse en cuenta es que un aspersor a medio círculo funcionará al doble de la tasa de aplicación normal y uno a cuarto de círculo funcionará a cuatro veces este valor. En este caso, mientras que los 7,4 m³/h para

los aspersores en círculo se dividen en 4 zonas, para 1,85 m³/h por zona, y 3,7 m³/h, los de cuarto círculo aplican directamente su caudal al área afectada. Para compensar esto, se divide el tiempo de aplicación de los aspersores con área de cobertura menores a círculo completo, lo que da un total de tres horas para los aspersores de medio círculo y un tiempo de aplicación de hora y media para los de cuarto de círculo. Se dividirá la aplicación de los caudales de la siguiente manera, como se ve en la Figura 4.9.

Aspersor	15 min	15 min	15 min	15 min
Círculo				
Medio círculo				
Cuarto de círculo				

Figura 4.12. Plan de aplicación de los aspersores. Realización propia.

Para comprobar que esta división funciona, se puede calcular el agua entregada a las diferentes zonas. Como se puede ver en la Figura 4.13, hay tres zonas diferentes de riego, marcadas por diferentes colores:

- Verde: irrigada por 4 aspersores de círculo completo.
- Amarilla: irrigada por 2 aspersores de círculo completo y 2 aspersores de medio círculo.
- Roja: irrigada por un aspersor de círculo completo, 2 aspersores de medio círculo y un aspersor de cuarto de círculo.

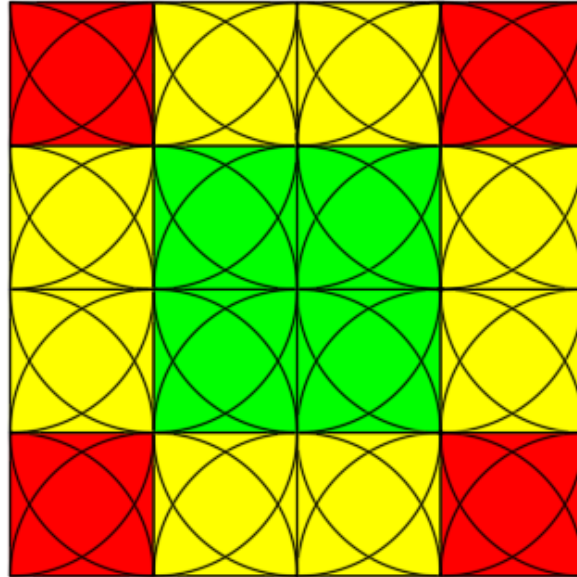


Figura 4.13. Tipos de zonas de riego. Realización propia en AutoCAD.

Se calcula el agua entregada (H) durante una hora para tipo de zona:

Verde:

$$H = 4 * \frac{7,4 \text{ m}^3}{4} \frac{1}{h} * 1 \text{ h} = 7,4 \text{ m}^3$$

Amarilla:

$$H = 2 * \frac{7,4 \text{ m}^3}{4} \frac{1}{h} * 1 \text{ h} + 2 * \frac{7,4 \text{ m}^3}{2} \frac{1}{h} * 0,5 \text{ h} = 7,4 \text{ m}^3$$

Roja:

$$H = 7,4 \frac{\text{m}^3}{h} * 0,25 \text{ h} + 2 * \frac{7,4 \text{ m}^3}{2} \frac{1}{h} * 0,5 \text{ h} + \frac{7,4 \text{ m}^3}{4} \frac{1}{h} * 1 \text{ h} = 7,4 \text{ m}^3$$

Por lo tanto, se elige el uso de aspersores de la serie *Big Gun 75* de Nelson Irrigation, operando a 4 bar con una boquilla de 10,2 mm. Se necesitará un total de 25 aspersores para operar el diseño de la Figura 4.11.

Adicionalmente, se toma la decisión de activar los grupos de aspersores en diferentes días, para no sobrecargar la bomba. Por lo tanto, primero se activarían los aspersores de círculo completo, y al día siguiente se activarían los aspersores

de medio círculo y de cuarto de círculo, de manera secuencial. De esta manera se limita significativamente la carga máxima de la bomba que alimente el sistema ya que el caudal máximo que tendrá que ser capaz de proveer será el del sistema de aspersores que demande más caudal, en lugar de la suma de los caudales de los tres sistemas.

4.1.3.3.3. Arreglo físico de tuberías con aspersores *Rotator R33*

Una consideración que se debe tomar sobre este diseño, sin embargo, es que el caudal es bastante elevado incluso dividiendo el riego en días, con un máximo de 88,8 m²/s los días que se activan los aspersores de medio círculo. Es conveniente, entonces, desarrollar la alternativa con los *Rotator R33*, ya que cada aspersor de estos es de mucho menor caudal. Una alternativa con el uso de estos aspersores se puede observar en la Figura 4.14, en que los puntos marcan las posiciones de los aspersores. Se puede ver que se sacrifica la uniformidad de riego (y la velocidad, al ver los cálculos previamente realizados), sin embargo, utilizando el resultado del cálculo realizado para estos aspersores de intensidad de riego, recibir el doble de riego en ciertas áreas no resulta en que esta sobrepase la tasa básica de infiltración. Sí se da por supuesto, que en ciertas áreas no hay riego del todo, para lo cual se pueden colocar más aspersores, sin embargo, al considerar que este terreno puede llegar a ser solo una parte de un terreno continuo mayor de riego, esto dejar de ser un problema, ya que, al igual que el segundo arreglo propuesto riega fuera de su área designada, un sistema de riego instalado posteriormente puede llegar a regar sobre este terreno tratado actualmente, resultando en mayor cobertura. La ventaja principal que tiene este arreglo sobre el uso de los aspersores *Big Gun* es el hecho de que los aspersores involucrados son menos poderosos, lo cual puede llevar a una necesidad de tubería más pequeña y más barata, así como menos complejos, lo cual tiene implicaciones de costo, por lo cual se mantiene como una alternativa de solución para analizar. Para ver la ventaja del uso de estos aspersores, se calcula el caudal máximo llevado por la tubería, al encender los 25 aspersores necesarios.

$$Q = 25 * 825 \frac{l}{h} * \frac{m^3}{1000 l} = 20,63 \frac{m^3}{h}$$

Se compara con el máximo total de la tubería con los aspersores *Big Gun*, que es 88,8 m³/h, un valor más de cuatro veces mayor.

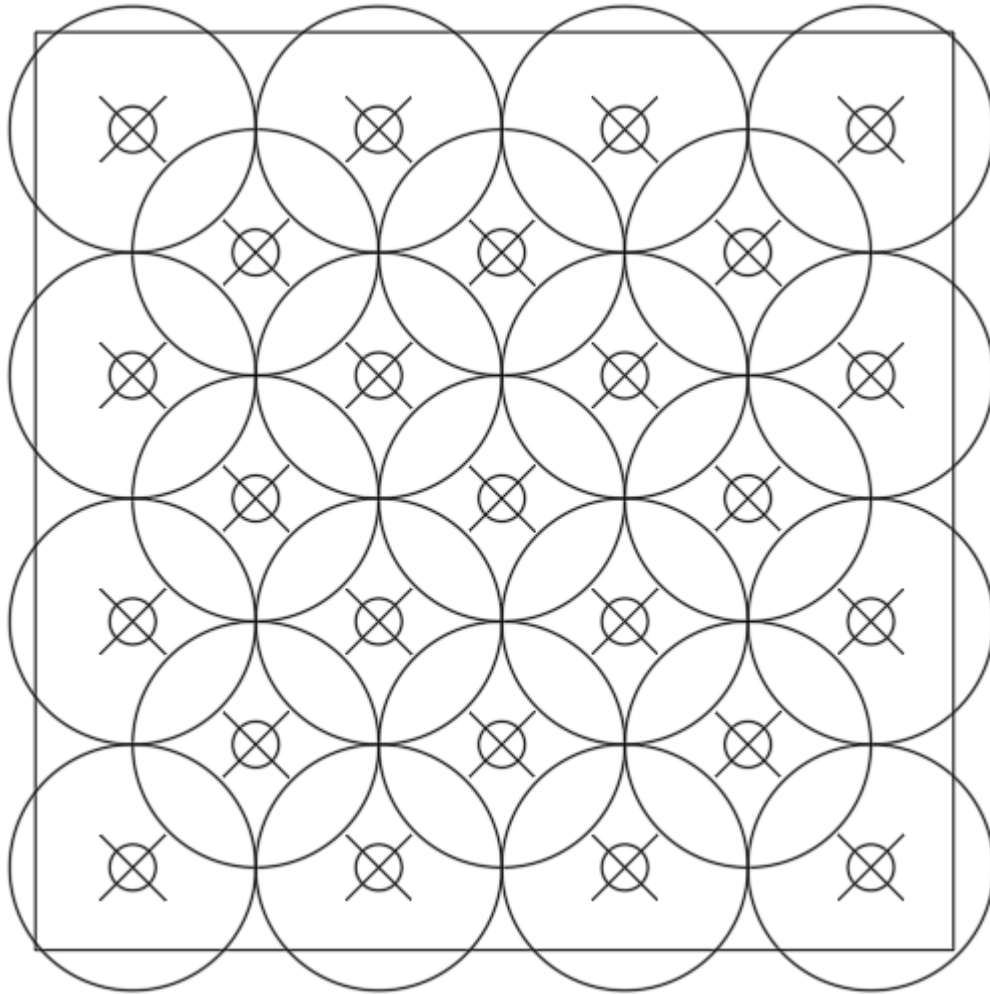


Figura 4.14. Diagrama de arreglo físico de alternativa con aspersores *Rotator R33*.
Realización propia en AutoCAD.

Dado que estas alternativas ofrecen distintas ventajas y desventajas, se compararán de lado a lado a través del informe en las secciones a continuación.

4.1.4. Distribución

4.1.4.1. Posicionamiento de tuberías para alternativa con aspersores *Big Gun*

Para el diseño del sistema de distribución, es necesario conocer el arreglo físico del sistema, por lo cual se utiliza el arreglo físico obtenido en la Sección 4.1.3.3.2, el cual se puede observar en la Figura 4.11. Para observar más fácilmente el posicionamiento de los aspersores, se borran los círculos y se dibujan puntos donde deben ser instalados, como se puede ver en la Figura 4.15.

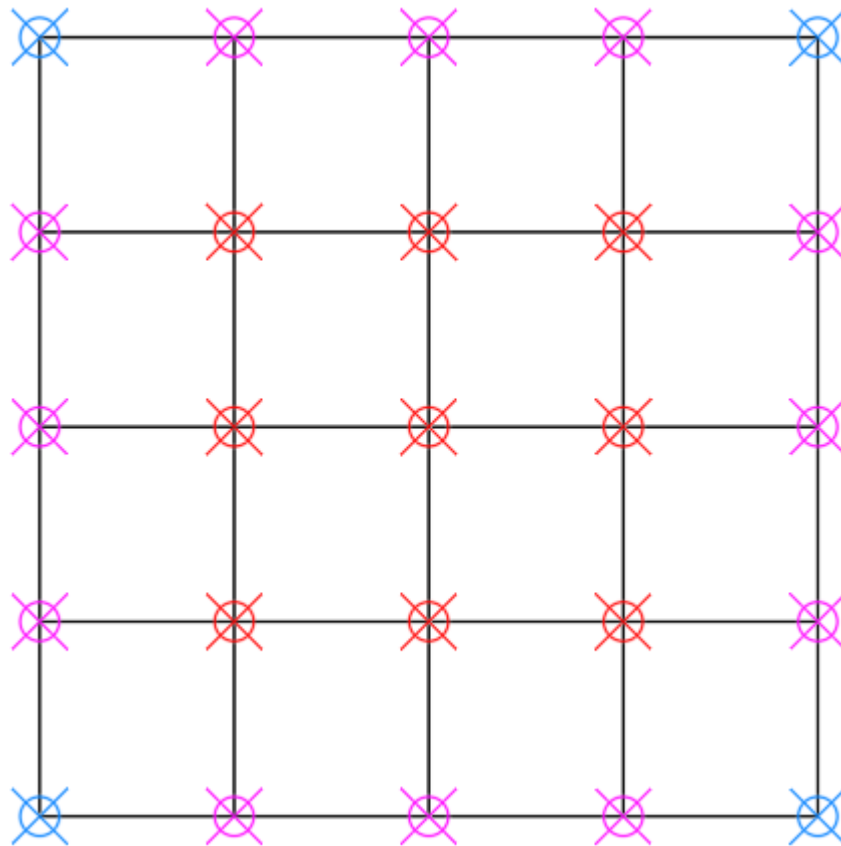


Figura 4.15. Posición física de los aspersores. Realización propia en AutoCAD.

Al haber decidido activar los aspersores de medio y cuarto de círculo solo por fracciones del tiempo del que los aspersores de círculo completo se activan, se tiene que encontrar una manera de controlarlos por separado. Se proponen dos alternativas:

- Control de los aspersores individuales: en este método, se controlaría cada aspersor individualmente. Ofrece la ventaja de poder controlar precisamente el riego en cada área, sin embargo, significa más complejidad para el sistema de control. Adicionalmente, la granularidad adicional ofrecida por esta opción no es necesaria para la aplicación específica, ya que se requieren tres comportamientos diferentes de los aspersores.
- Separación de tuberías: esta opción consiste en la utilización de tres tuberías separadas para cada tipo de aspersor. El flujo de agua se controlaría entonces por tubería. Esto ofrece menos control sobre el comportamiento del sistema en comparación con la primera opción, sin embargo, este nivel de control, como se dijo anteriormente, no es útil en este caso ya que solo se requieren tres comportamientos diferentes que corresponden al tiempo de activación para cada aspersor. La desventaja de este arreglo es que requiere más material de tubería y requiere cuidado con el arreglo físico de la misma, para que no haya contacto entre las diferentes tuberías y se logre llevar agua adecuadamente a cada una.

Un ejemplo altamente simplificado de cómo se vería el sistema de tuberías resultante se puede observar en la Figura 4.16, donde se utiliza el color negro para denotar la tubería principal y otros colores para marcar las diferentes tuberías, siendo celeste tubería para los aspersores de círculo completo, verde para los aspersores de medio círculo, y azul para los aspersores de cuarto de círculo.

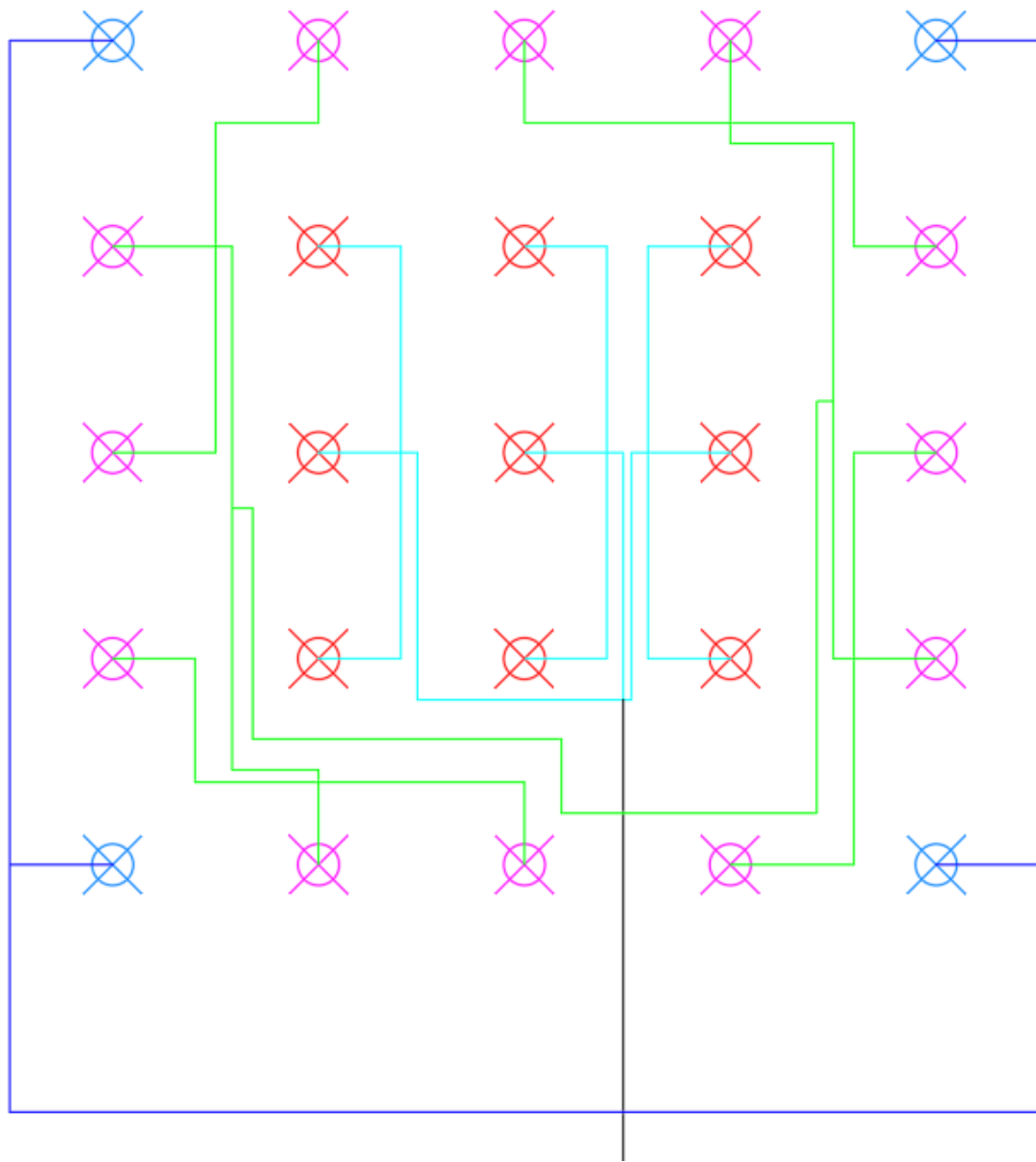


Figura 4.16. Diagrama simplificado de arreglo físico de las tuberías.
Realización propia en AutoCAD.

Este arreglo específico se hizo para que los tres tipos de tuberías pudieran dividirse simétricamente. Las tuberías se arreglan de manera que se dividan uniformemente en la cantidad de aspersores. Por ejemplo, la tubería de círculo completo se divide en tres tubos que en sí llevan a tres aspersores, las tuberías de los cuales están conectadas al mismo punto. De esta manera, el flujo de agua se divide más uniformemente y el dimensionamiento de los tubos se simplifica en gran

medida. Se puede ver que lo mismo ocurre para las tuberías de medio círculo y para las de cuarto de círculo.

4.1.4.2. Dimensionamiento de tuberías para alternativa con aspersores *Big Gun*

4.1.4.2.1. Dimensionamiento de tuberías para aspersores de círculo completo

Comenzando por la tubería para alimentar los aspersores de círculo completo, se tienen tres aspersores por línea, los cuales todos necesitan $7,4 \text{ m}^3/\text{h}$, por lo cual las líneas se dividen en segmentos de diferentes caudales dependiendo de cuántos aspersores tienen en frente, de la siguiente manera:

- Verde: $7,4 \text{ m}^3/\text{h}$
- Amarillo: $14,8 \text{ m}^3/\text{h}$
- Naranja: $22,2 \text{ m}^3/\text{h}$
- Rojo: $66,6 \text{ m}^3/\text{h}$

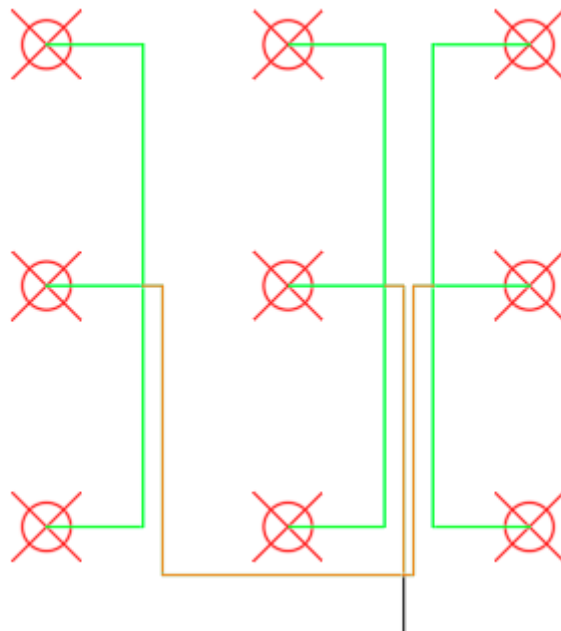


Figura 4.17. Diagrama de tubería para aspersores de círculo completo.
Realización propia en AutoCAD.

Las dimensiones de las tuberías se pueden apreciar en las siguientes figuras.

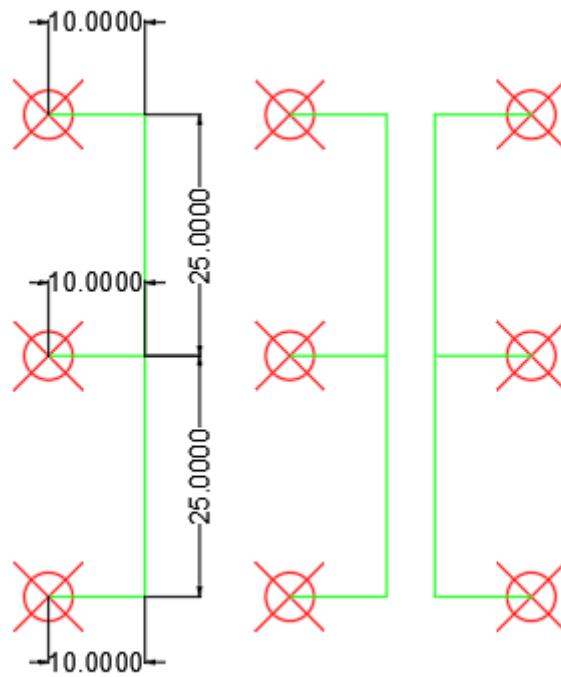


Figura 4.18. Dimensiones de tubería de círculo completo, parte 1. Dimensiones en metros. Realización propia con AutoCAD.

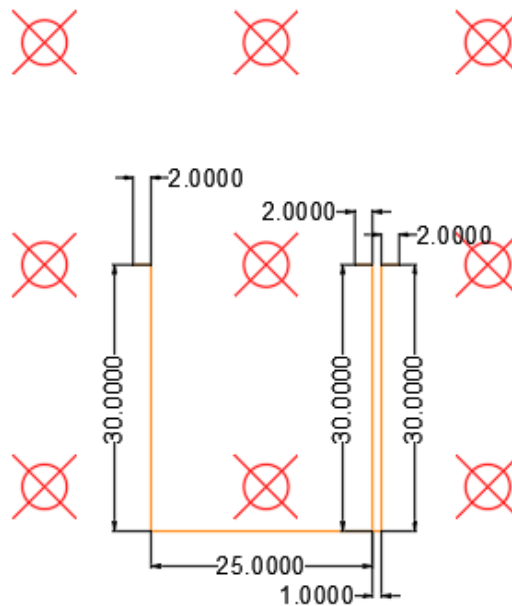


Figura 4.19. Dimensiones de tubería de círculo completo, parte 2. Dimensiones en metros. Realización propia con AutoCAD

Para calcular las pérdidas de la tubería, se toma en cuenta lo siguiente:

- Hay un total de 9 aspersores
- Longitud total por la que pasan $7,4 \text{ m}^3/\text{h} = 240 \text{ m}$
- Longitud total por la que pasan $22,2 \text{ m}^3/\text{h} = 122 \text{ m}$
- Accesorios:
 - Once conexiones de 90 grados
 - Cuatro conectores de cuatro sentidos (cruz).

Para un caudal de $22,2 \text{ m}^3/\text{h}$ ($6,17 \text{ l/s}$) en tubería PVC, se tienen los siguientes valores de pérdida de fricción por cada 100 m, visualizados en la Tabla 4.8. Se redondea a 100 galones por minuto ($6,31 \text{ l/s}$) debido a este ser el valor más cercano encontrado en las tablas.

Tabla 4.8. Valores de pérdidas de fricción por tamaño de tubo. Fuente: [27].

Diámetro (pulgadas)	Pérdida de fricción (kPa/100 m)	Pérdida de fricción (m agua/100 m)
2	147	14,99
2,5	61,7	6,29
3	21,5	2,19
4	5,88	0,60

Se calcula entonces el valor de pérdidas por lateral utilizando la ecuación 5. Para 3 aspersores por lateral, $F = 0,522$ [26].

Tabla 4.9. Cálculo de pérdidas para los diferentes tamaños de tubería PVC. Cálculo en Excel.

Diámetro (pulg)	L (m)	F	Pérdidas por 100 m	Pérdida total (m)
2	240	0.522	14.99	18.779472
2.5	240	0.522	6.29	7.880112
3	240	0.522	2.19	2.743632
4	240	0.522	0.6	0.75168

Pérdidas permitidas:

$$4 \text{ bar} * 20\% = 0,8 \text{ bar} = 8.16 \text{ m}$$

Se puede ver que un tubo PVC de diámetro de 2,5 pulgadas resulta apropiado para los laterales. Posteriormente, para las líneas distribuidoras de este sistema, corre un máximo de 66,6 m³/h (18,5 l/s), con una longitud de 122 m. Volviendo a las tablas de tubería PVC, se tienen los siguientes valores de pérdidas por 100 m para este caudal. Se usa el valor de 18,9 (300 galones por minuto) al ser el más cercano que se encuentra en las tablas.

Tabla 4.10. Valores de pérdidas por 100 m dependiendo del diámetro del tubo.
Fuente: [27].

Diámetro (pulgadas)	Pérdida de fricción (kPa/100 m)	Pérdida de fricción (m agua/100 m)
4	43,1	4,4
5	14,7	1,50
6	5,88	0,6
8	0,2	0,02

Se realizan los cálculos, tomando F=0,522 de nuevo al tratarse de 3 salidas por línea:

Tabla 4.11. Cálculo de pérdidas para los diferentes tamaños de tubería PVC.
Cálculo en Excel.

Diámetro (pulg)	L (m)	F	Pérdidas por 100 m	Pérdida total (m)
4	122	0.522	4.4	2.802096
5	122	0.522	1.5	0.95526
6	122	0.522	0.6	0.382104
8	122	0.522	0.02	0.0127368

Las pérdidas permisibles son las mismas que en las laterales, por lo cual un tubo de 4 pulgadas de diámetro resulta apropiado para estos casos. Finalmente, se calculan las pérdidas en accesorios, tomadas como el 10% de las pérdidas:

$$H_{acc} = 0.1 * (7,88 + 2,80) = 1,068 \text{ m}$$

Para esta tubería, por lo tanto, se tiene el siguiente requerimiento de presión:

Sabiendo que una tubería de 4 pulgadas es apropiada para el área que recibe más flujo, lo siguiente que se busca es cómo dividir el flujo de manera correcta a lo largo del sistema. La tubería inicialmente se divide en tres caminos que reciben el mismo caudal, por lo cual estos tres caminos pueden tener el mismo diámetro. Posteriormente, el caudal se divide entre 7,4 m³/h (hacia el primer aspersor) y 14,8 m³/h (hacia el resto de la tubería).

Tabla 4.12. Carga de presión necesaria para tubería de aspersores de círculo completo.

Ítem	Presión (m)
Pérdidas en laterales	7,88
Pérdidas en principal	2,80
Accesorios	1,068
Total	11,75

4.1.4.2.2. Dimensionamiento de tubería para aspersores de medio círculo

Haciendo algo parecido a lo que se había hecho con los aspersores de círculo completo, se hace un diagrama solamente con las tuberías de medio círculo, como se puede ver en la Figura 4.20. Esta vez no se utilizan colores debido a los diferentes niveles de caudal en la tubería.

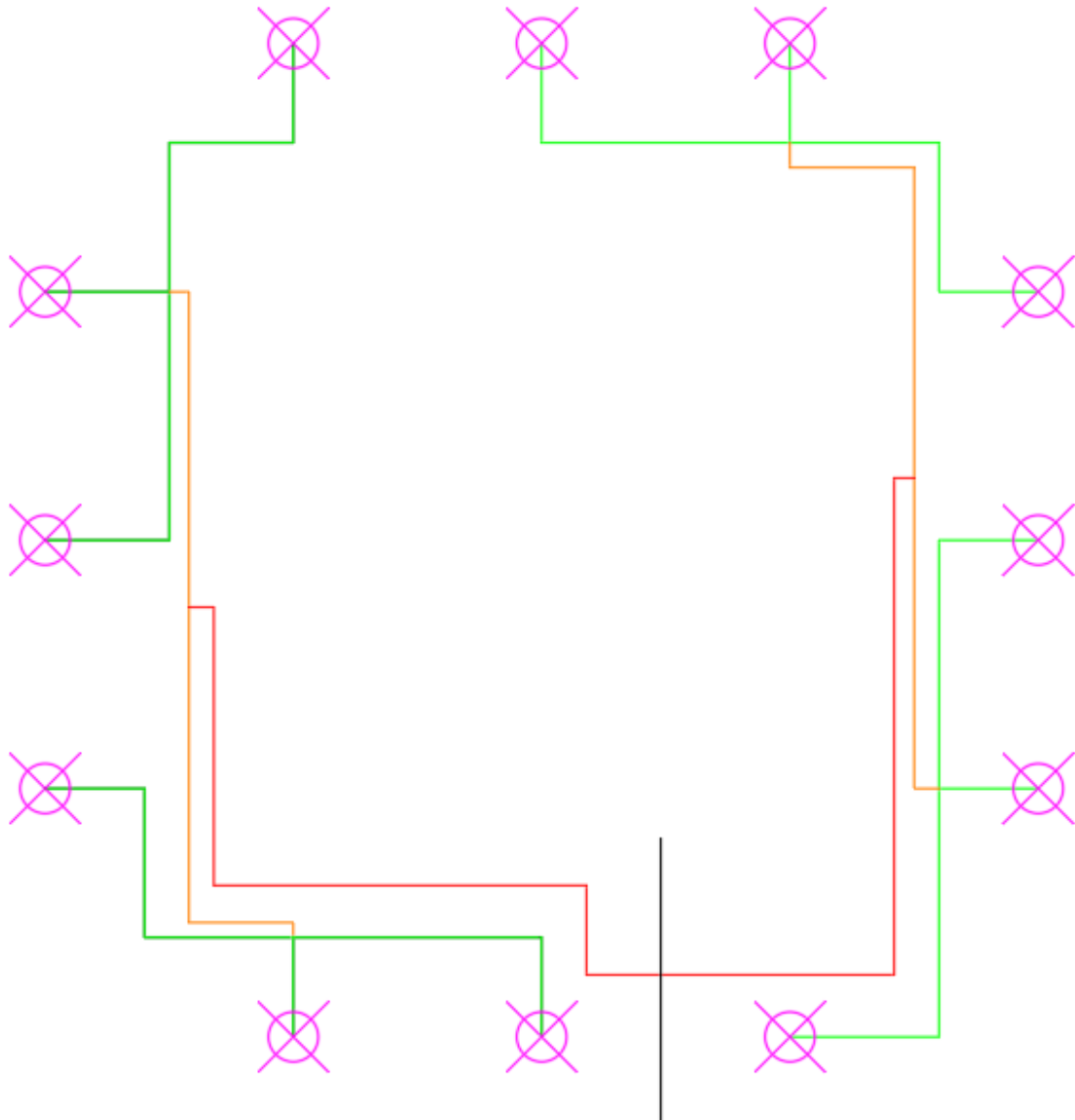


Figura 4.20. Diagrama de tubería para aspersores de medio círculo. Realización propia en AutoCAD.

Al igual que con la tubería de los aspersores de círculo completo, el arreglo físico de los tubos está hecho para que el flujo se divida de manera uniforme. El esquema de colores es el siguiente:

- Verde: 7,4 m³/h
- Naranja: 22,2 m³/h
- Rojo: 44,4 m³/h

Las dimensiones se encuentran en las siguientes figuras:

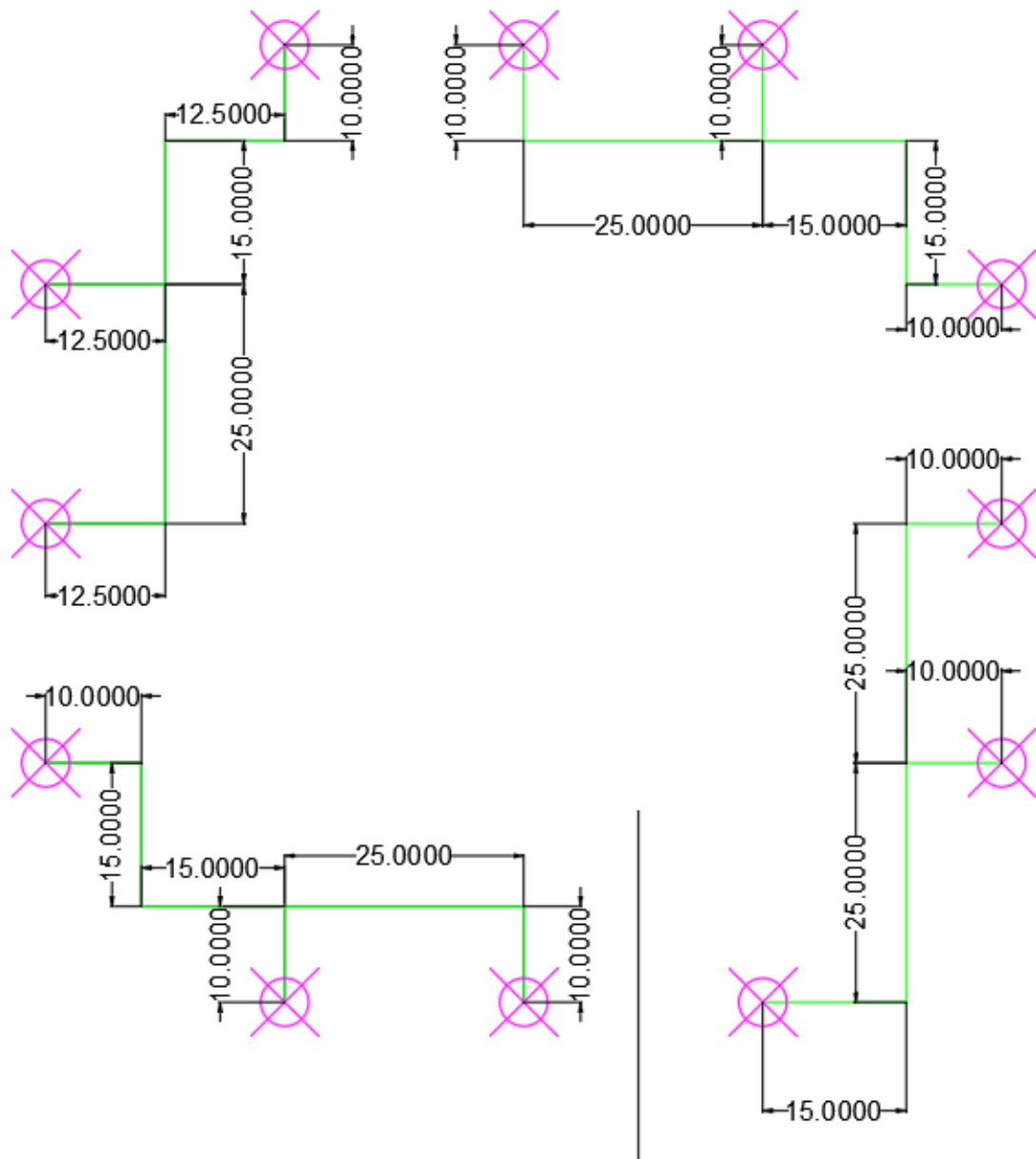


Figura 4.21. Dimensiones de tubería de 7,4 m³/h. Dimensiones en metros.
Realización propia en AutoCAD

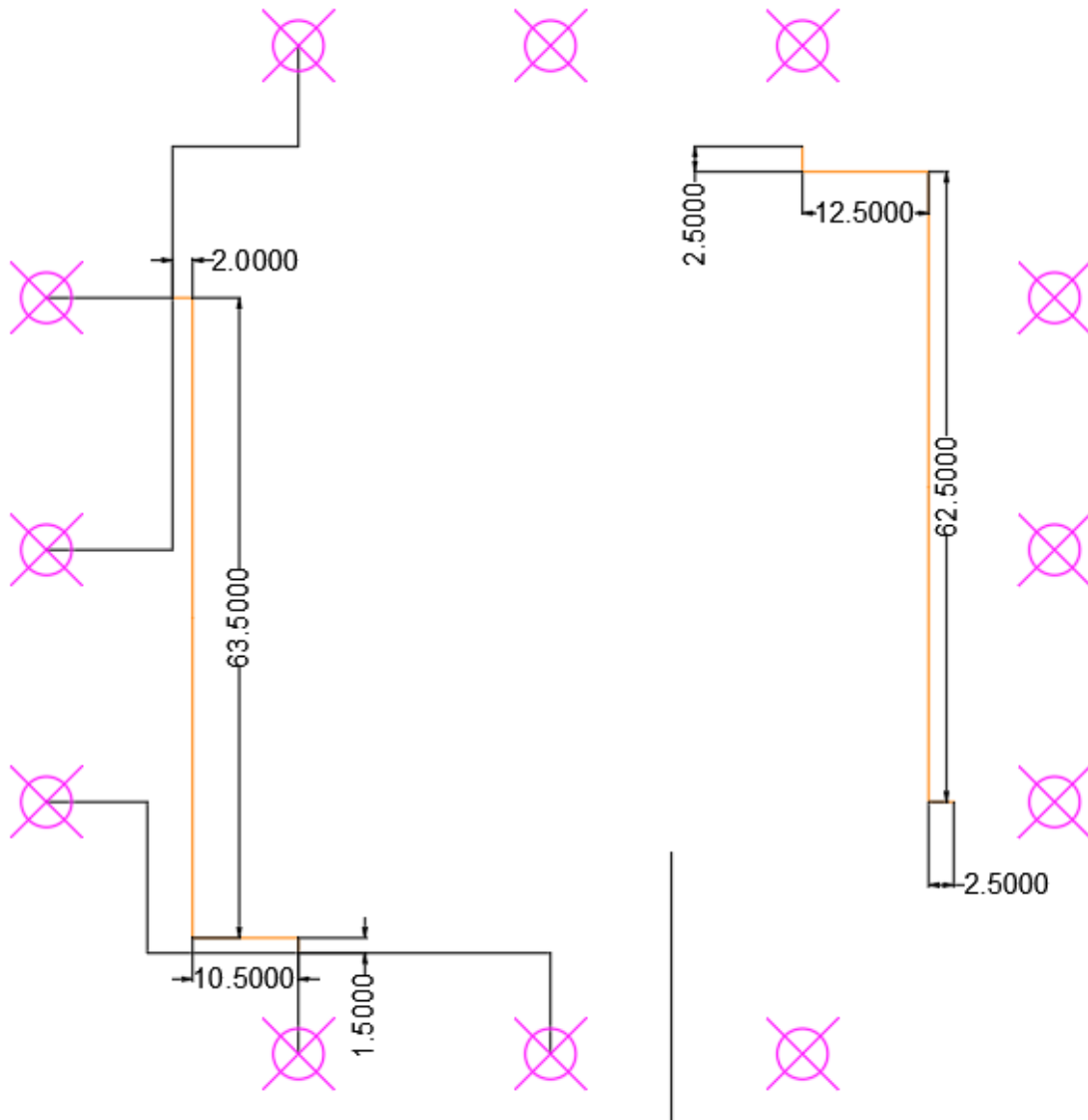


Figura 4.22. Dimensiones de tubería de 22,2 m³/h. Dimensiones en metros.
Realización propia en AutoCAD.

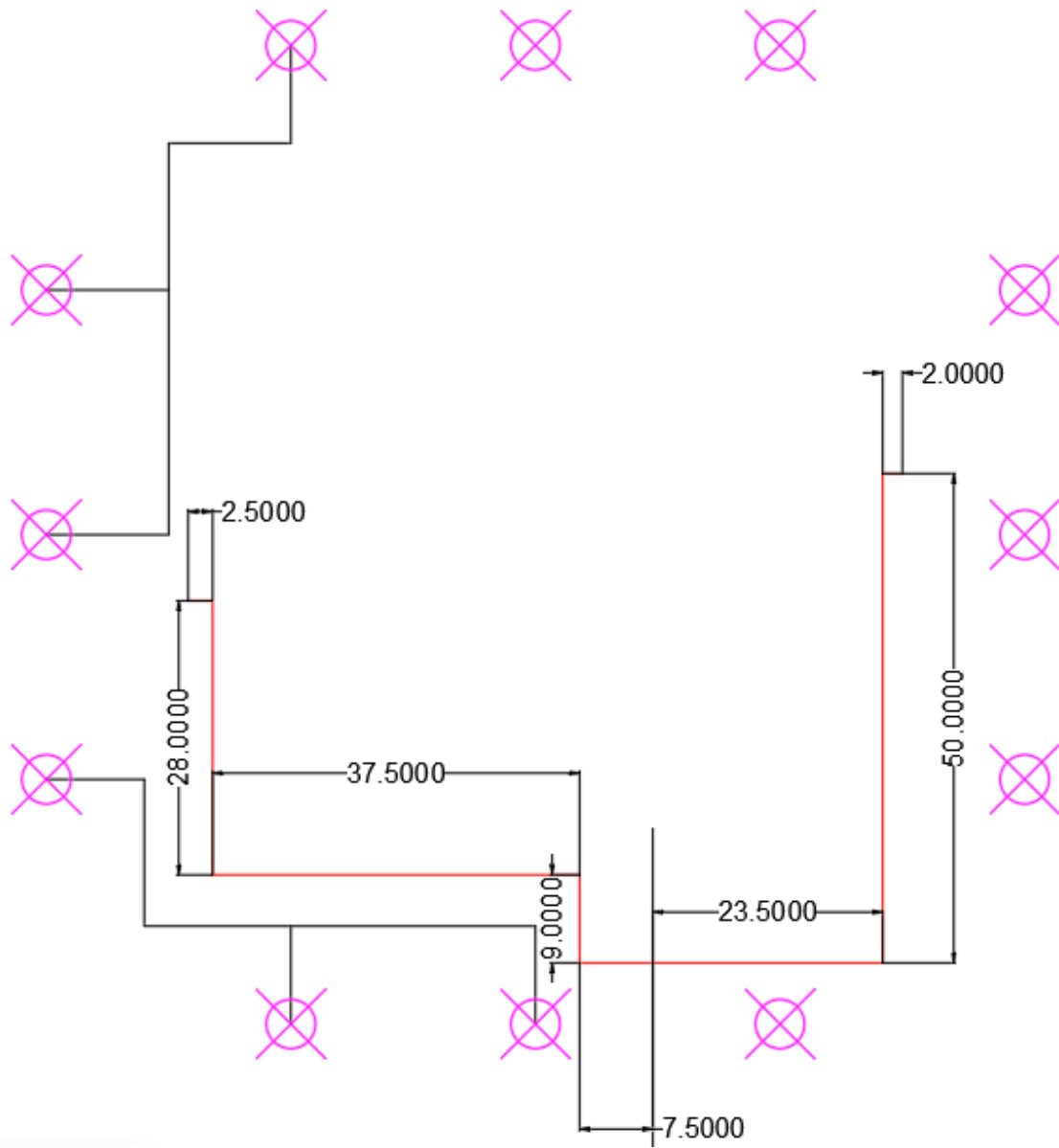


Figura 4.23. Dimensiones de tubería de 44,4 m³/h. Dimensiones en metros.
Realización propia en AutoCAD

Los caudales son los siguientes:

Tabla 4.13. Caudales y longitudes para aspersores de círculo medio.

Caudal (m ³ /h)	Longitud (m)
7,4	367,5
22,2	157,5
44,4	160

Se tienen los siguientes accesorios:

- 22 conexiones a 90 grados
- Cinco conexiones de 4 direcciones
- Dos válvulas solenoides para controlar el flujo del agua hacia la tubería.

El caudal máximo que se encuentra en la tubería es de 44,4 m³/h (12,33 l/s). En la Tabla 4.14 se pueden encontrar valores de pérdidas por cada 100 metros de fricción para tubería PVC, con un valor de caudal de 200 galones por minuto (12,6 l/s), el cual es el valor más cercano al caudal real que se encuentra en la tabla.

Tabla 4.14. Valores de pérdidas de fricción por 100 m para tubería PVC dependiendo de su tamaño. Fuente: [27].

Diámetro (pulgadas)	Pérdida de fricción (kPa/100 m)	Pérdida de fricción (m agua/100 m)
3	77,4	7,90
4	20,6	2,10
5	6,86	0,70
6	2,94	0,30

Se calculan las pérdidas para diferentes tuberías utilizando la ecuación 5, con $F=0,42$ al haber 6 aspersores por lado [27]. Hay una longitud total de 415 m por la que pasa agua.

Tabla 4.15. Cálculos realizados para tubería de medio círculo. Realización en Excel.

Diámetro (pulg)	L (m)	F	Pérdidas por 100 m	Pérdida total
3	685	0.42	7.9	22.7283
4	685	0.42	2.1	6.0417
5	685	0.42	0.7	2.0139
6	685	0.42	0.3	0.8631

El criterio de pérdida aceptable es el mismo, 20% de la presión de operación de los aspersores, por lo cual tubería de 4 pulgadas resulta apropiada para los aspersores de medio círculo.

Calculando las pérdidas en accesorios:

$$H_{acc} = 0.1 * 6,04 m = 0,604 m$$

Por lo tanto, se tiene la siguiente carga de presión para la tubería de medio círculo:

Tabla 4.16. Carga de presión necesaria para tubería de aspersores de medio círculo.

Ítem	Presión (m)
Pérdidas en laterales	6,04
Accesorios	0,604
Total	6,644

4.1.4.2.3. Dimensionamiento de tubería de aspersores de cuarto de círculo

Se repite el mismo procedimiento para la tubería de los aspersores de cuarto de círculo. Para este diagrama se sigue el mismo esquema de colores que en la Figura 4.17.

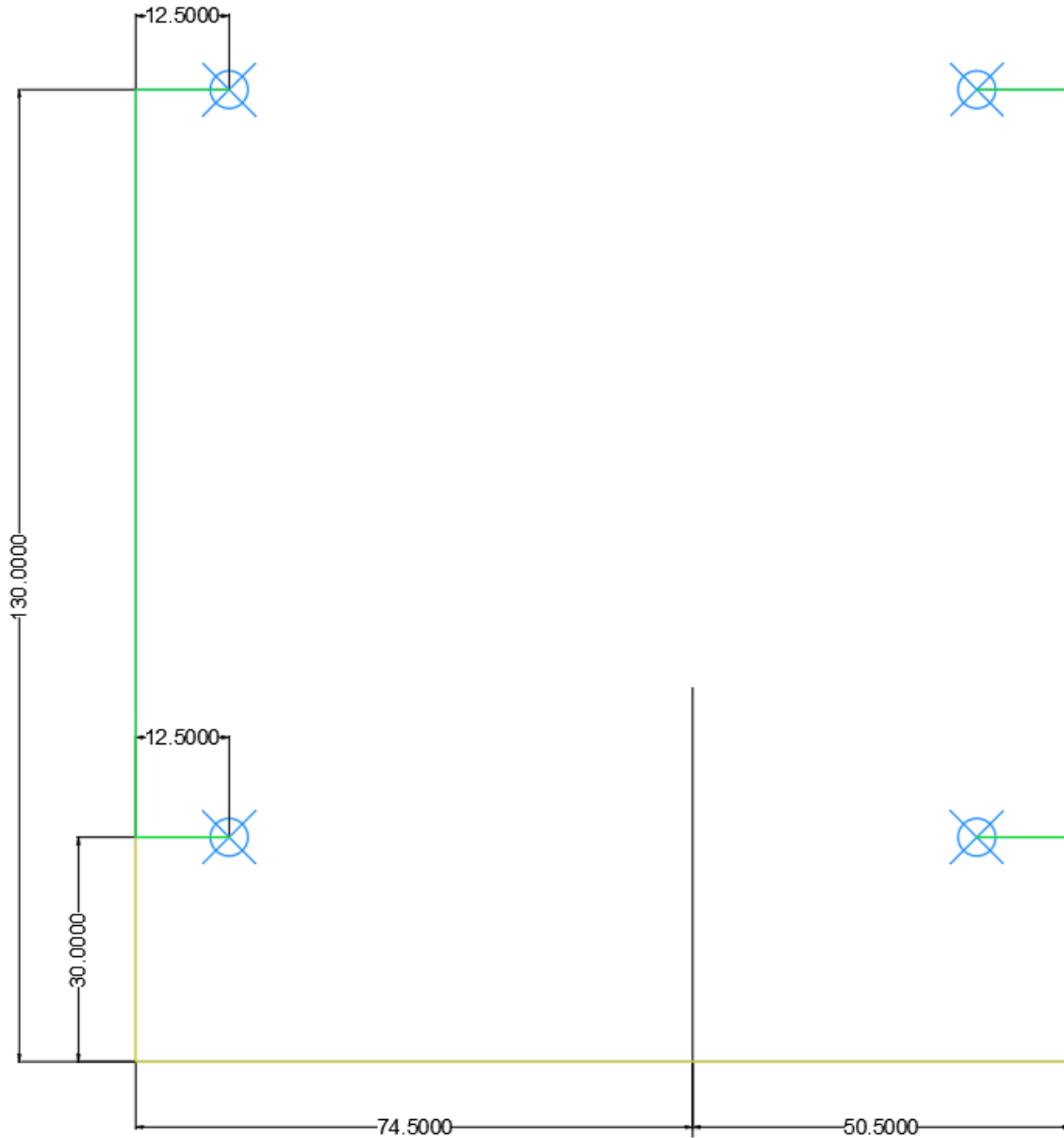


Figura 4.24 Diagrama de segmentos para tubería de cuarto de círculo.
Dimensiones en metros. Realización propia en AutoCAD.

Se tienen los siguientes accesorios:

- Una conexión de cuatro direcciones
- Cuatro conexiones de 90 grados
- Dos conexiones de T
- Dos válvulas solenoides que controlan el flujo del agua hacia las tuberías.

Se tienen las siguientes longitudes con sus respectivos caudales:

Tabla 4.17. Longitudes y caudales para tubería de cuarto de círculo.

Caudal (m ³ /h)	Longitud (m)
7,4	250
14,8	185

Igual que en los casos anteriores, se busca en las tablas los valores de pérdida por fricción para cada 100 m a 14,8 m³/h (4,11 l/s). El valor más cercano que se encuentra es 4,42 l/s, por lo cual los valores de pérdidas corresponden a este caudal.

Tabla 4.18. Valores de pérdidas de fricción cada 100 m dependiendo del tamaño de la tubería para tuberías PVC. Fuente: [27].

Diámetro (pulgadas)	Pérdida de fricción (kPa/100 m)	Pérdida de fricción (m agua/100 m)
2	76,4	7,79
2,5	32,3	3,29
3	10,8	1,10
4	2,94	0,30

Se calculan las pérdidas con la ecuación 5 (con F=0,62 por haber dos aspersores por tubería).

Tabla 4.19. Cálculo de pérdidas por tamaño de tubería.

Diámetro (pulg)	L (m)	F	Pérdidas por 100 m (m)	Pérdida total (m)
2	435	0.62	7.79	21.00963
2.5	435	0.62	3.29	8.87313
3	435	0.62	1.1	2.9667
4	435	0.62	0.3	0.8091

El criterio de pérdida aceptable sigue siendo 20% de la presión de operación, por lo que una tubería de 3 pulgadas resulta aceptable para este caso. Se podría utilizar la opción de 2,5 pulgadas de diámetro, considerando que los cálculos se realizaron con un caudal mayor al que realmente se espera que pase por la tubería, sin embargo, se decide por la de 3 pulgadas para asegurarse completamente de que la pérdida es aceptable. Posteriormente, se calculan las pérdidas por accesorios:

$$H_{acc} = 0,1 * 2,97 m = 0,3 m$$

Por lo tanto, se tiene el siguiente requerimiento de presión para esta tubería.

Tabla 4.20. Carga de presión necesaria para tuberías de aspersores de cuarto de círculo.

Ítem	Presión (m)
Pérdidas en laterales	2,97
Accesorios	0,3
Total	3,27

4.1.4.2.4. Dimensionamiento de línea principal

La línea principal es de 120 m, el caudal máximo que pasa por la tubería es 88,8 m³/h (los días que funcionan los aspersores de medio círculo). Un diagrama se puede ver en la Figura 4.25.

Cuenta con dos válvulas solenoides que controlan el paso del agua, las dos se abren al funcionar los aspersores de círculo completo, una se cierra cuando funcionan los de medio círculo, las dos se cierran cuando funcionan los de cuarto de círculo.

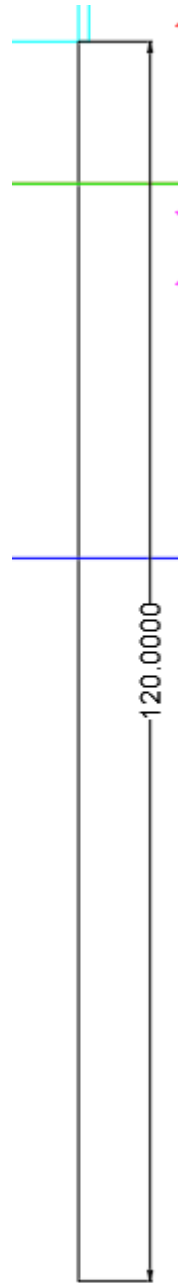


Figura 4.25. Diagrama de tubería principal. Dimensiones en metros. Realización propia en AutoCAD.

Buscando en las tablas, se busca el valor más cercano a $88,8 \text{ m}^3/\text{h}$ ($24,7 \text{ l/s}$), el cual es 400 galones por minuto ($25,2 \text{ l/s}$). Se tienen los siguientes valores de pérdidas por fricción.

Tabla 4.21. Valores de pérdidas por fricción dependiendo del tamaño del tubo.

Diámetro (pulgadas)	Pérdida de fricción (kPa/100 m)	Pérdida de fricción (m agua/100 m)
4	73,5	7,5
5	24,5	2,51
6	9,79	1
8	2,94	0,30

Se calculan las pérdidas:

Tabla 4.22. Cálculos para pérdidas por fricción de tubería principal. Realización propia en Excel.

Diámetro (pulg)	L (m)	F	Pérdidas por 100 m	Pérdida total (m)
4	120	0.41	7.5	3.69
5	120	0.41	2.51	1.23492
6	120	0.41	1	0.492
8	120	0.41	0.3	0.1476

Utilizando el criterio del 20% de la presión de operación de los aspersores, el tubo de 4 pulgadas presenta pérdidas aceptables, por lo cual es elegido para este propósito.

4.1.4.2.5. Carga de presión del sistema

Comparando los datos de la Tabla 4.12, la Tabla 4.16 y la Tabla 4.20, se puede ver cuando se utilizan los aspersores de círculo completo es cuando hay más pérdidas en la tubería de distribución en el sistema, significativamente más pérdidas que con los aspersores de medio círculo. Por esta razón, se vuelve a hacer el cálculo con 66,6 m³/h (el caudal máximo que pasa por la tubería cuando están activados los aspersores de círculo completo).

Tabla 4.23. Carga total de presión del sistema.

Ítem	Presión (m)
Presión de aspersor	40,79
Pérdidas tubería principal	3,69
Pérdidas tubería distribución	6,644
Total	51,124

Se realiza el mismo procedimiento con las tablas. Se busca el caudal más cercano a 66,6 m³/h (18,5 l/s) en las tablas. El más cercano corresponde a 300 galones por minuto (18,9 l/s), por lo cual se utiliza este valor.

Tabla 4.24. Valores de pérdidas por fricción para tuberías dependiendo del diámetro. Fuente: [27].

Diámetro (pulgadas)	Pérdida de fricción (kPa/100 m)	Pérdida de fricción (m agua/100 m)
4	43,1	4,40
5	14,7	1,50
6	5,88	0,60
8	1,96	0,20

Se realizan los cálculos de nuevo con la ecuación 5:

Tabla 4.25. Cálculos de pérdidas realizados para tubería principal. Realización en Excel.

Diámetro (pulg)	L (m)	F	Pérdidas por 100 m	Pérdida total (m)
4	120	0.41	4.4	2.1648
5	120	0.41	1.5	0.738
6	120	0.41	0.6	0.2952
8	120	0.41	0.2	0.0984

Utilizando el criterio del 20% de la presión de operación de los aspersores, el tubo de 4 pulgadas presenta pérdidas aceptables, lo que significa que también es

apto para cuando se activan los aspersores de círculo completo. Se puede ver que la pérdida en la principal es menor que con los aspersores de medio círculo, sin embargo. En la Tabla 4.26 se puede observar la carga total de presión del sistema al activar los aspersores de círculo completo.

Tabla 4.26. Carga total de presión del sistema con aspersores de círculo completo.

Ítem	Presión (m)
Presión de aspersor	40,79
Pérdidas en principal	2,16
Pérdidas en distribución	11,75
Total	54,7

Se comparan con la carga de presión con los aspersores de medio círculo.

Tabla 4.27. Carga total de presión del sistema con aspersores de medio círculo.

Ítem	Presión (m)
Presión de aspersor	40,79
Pérdidas tubería principal	3,69
Pérdidas tubería distribución	6,644
Total	51,124

Estos dos valores se compararán al obtener la potencia necesaria para la bomba.

4.1.4.3. Posicionamiento de tuberías para alternativa con aspersores *Rotator R33*.

Al igual que con la alternativa pasada, se busca hacer la tubería que el flujo de agua se divida de la manera más uniforme posible. Un arreglo se puede ver en la Figura 4.26.

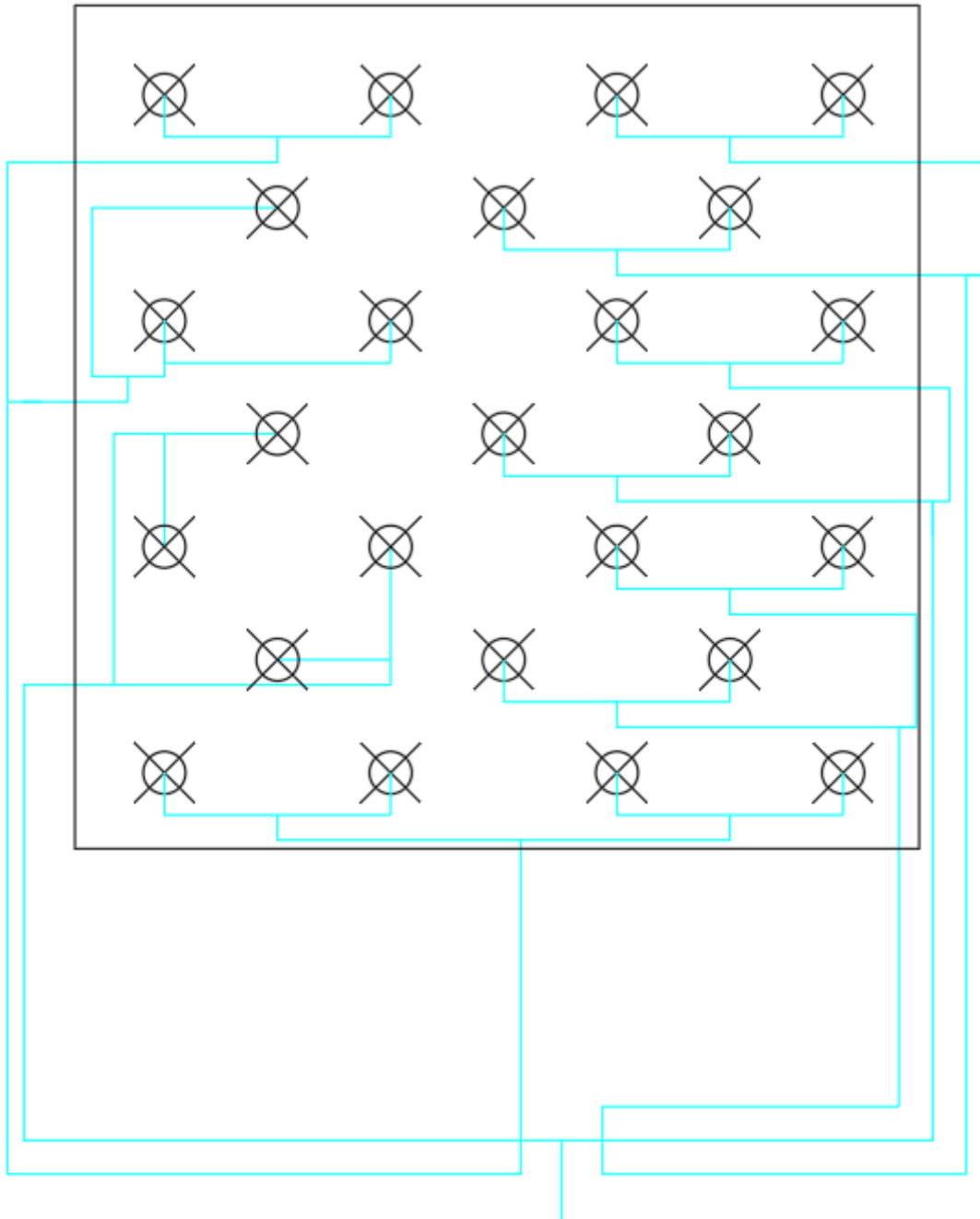


Figura 4.26. Arreglo físico propuesto de tubería.

Se puede apreciar el hecho de que, al ser 25, aspersores, la división de flujo no será exactamente igual, y es probable que un aspersor del lado izquierdo de la Figura 4.26. Sin embargo, se procuró dividir el sistema de distribución de la manera más simétrica posible.

Se tienen los siguientes elementos:

- Caudal máximo por los laterales = 10, 725 m³/h
- Longitud de tubería total = 1552,7 m.
- Caudal máximo = 5, 72 l/s (20,625 m³/h)
- Accesorios:
 - 19 conexiones T (tres direcciones)
 - 48 codos de 90 grados
 - 2 conexiones de cuatro direcciones

Inmediatamente salta el hecho de que hay un kilómetro y medio de tubería. Esto resultará en pérdidas significativas por fricción que harán necesaria una tubería de gran diámetro, posiblemente aún mayor que los calculados en la Sección 4.1.4.2. Por lo tanto, se propone otro arreglo. Este sacrifica uniformidad de riego por una reducción drástica del material utilizado.

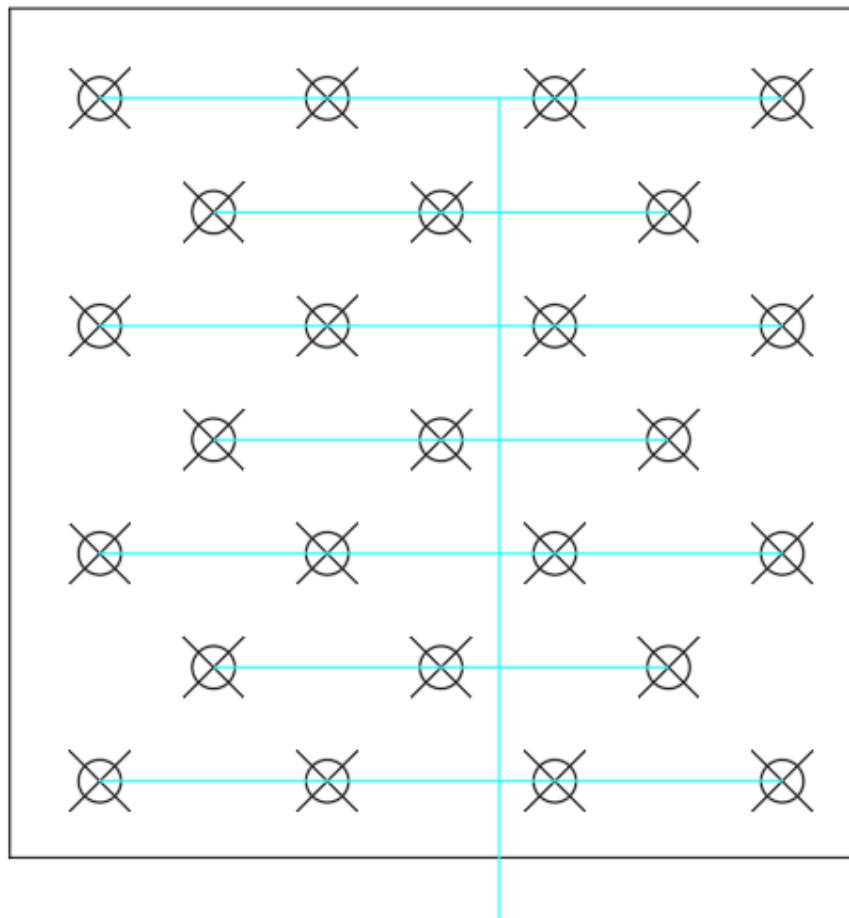


Figura 4.27. Arreglo alternativo propuesto. Realización propia mediante AutoCAD.

Se tienen las siguientes dimensiones en las tuberías (el espaciado entre los laterales de 13,4 m es constante, la distancia entre el pozo y el primer lateral es de 120 m).

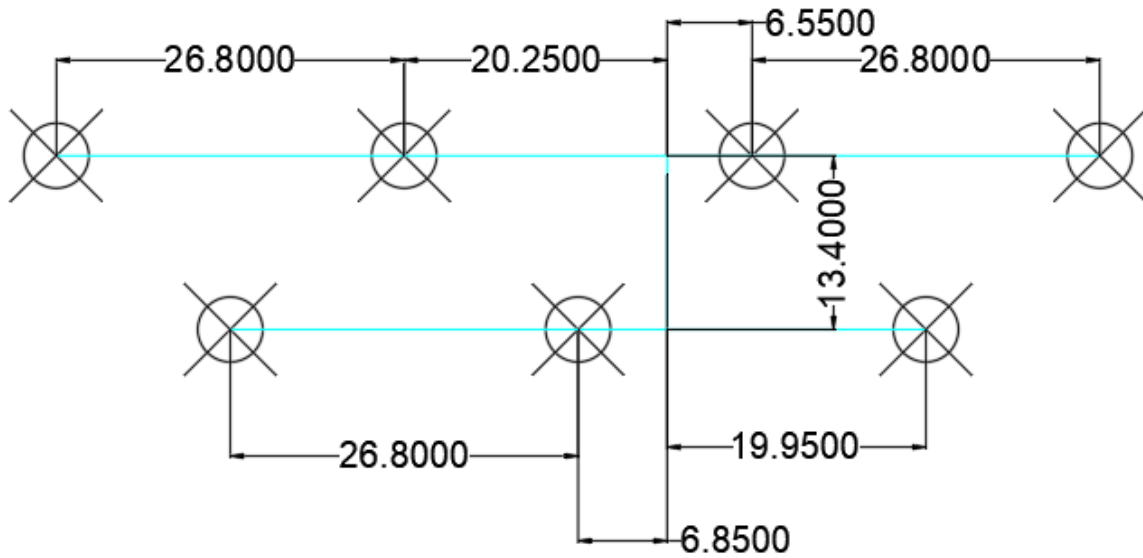


Figura 4.28. Dimensiones y espaciado de tuberías de distribución. Realización propia en AutoCAD.

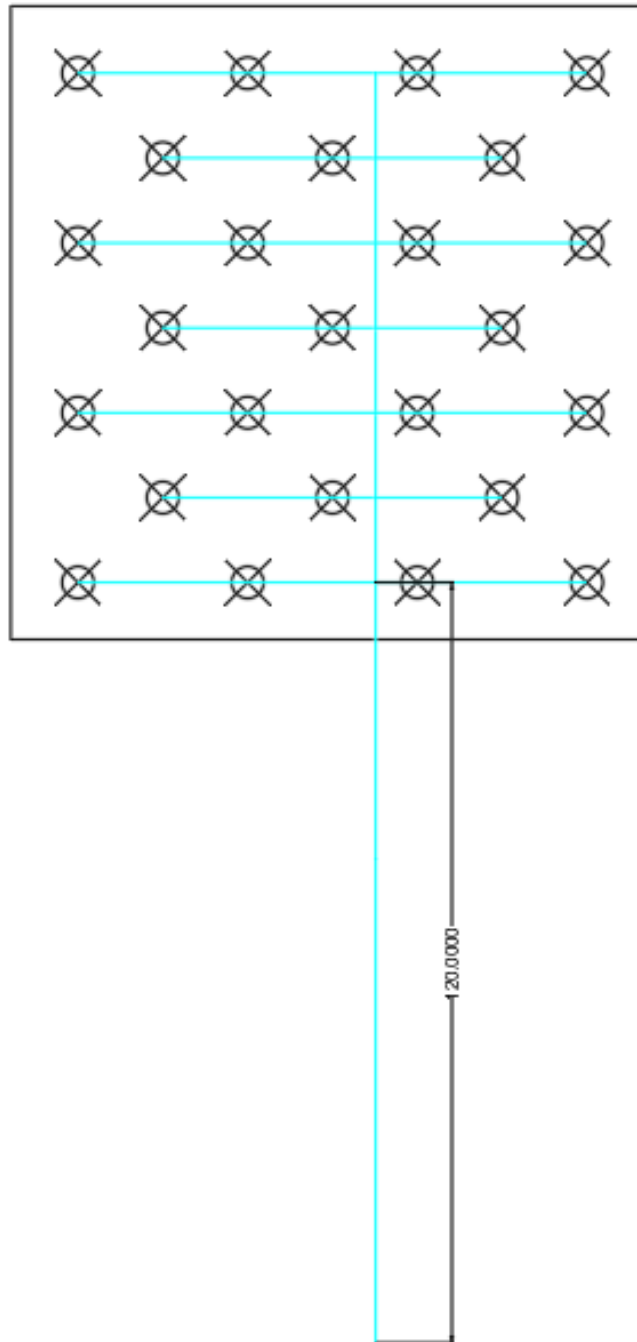


Figura 4.29. Distancia entre pozo y primer lateral. Realización propia en AutoCAD.

El tubo principal tiene una longitud de 200,4 m. Los tubos con cuatro aspersores miden 80,4 m y son cuatro, los tubos de tres aspersores miden 53,6 m y son tres. Se tienen los siguientes accesorios:

- 6 conexiones de cuatro sentidos

- 1 conexión T

4.1.4.4. Dimensionamiento de tubería para segunda alternativa

Se tienen los siguientes datos.

Tabla 4.28. Datos de caudal, factor F y longitud para los diferentes segmentos

Caudal (l/s)	Longitud (m)	Cantidad de salidas	F
0,92	321,6	4	0,47
0,69	160,8	3	0,52
5,73	200,4	14	0,367

Las pérdidas aceptables son las siguientes (20% de la presión de trabajo del aspersor):

$$20\% * 2,75 \text{ bar} = 0,55 \text{ bar} = 5,6 \text{ m}$$

4.1.4.4.1. Dimensionamiento de tuberías principal

Se buscan los datos de pérdidas en las tablas, el valor más cercano encontrado de caudal es 5,68 l/s.

Tabla 4.29. Datos de pérdidas por fricción cada 100 m para tubería a 5,68 l/s.

Fuente: [27].

Diámetro (pulg)	Pérdidas cada 100 m (kPa)	Pérdidas cada 100 m (m de agua)
2	121	12,33
2,5	50,9	5,19
3	17,6	1,79
4	4,9	0,5

Tabla 4.30. Cálculos para pérdidas en principal. Realización en Excel.

Diámetro (pulg)	L (m)	Pérdidas por 100 m	F	Pérdida total (m)
2	200.4	12.33	0.367	9.06832044
2.5	200.4	5.19	0.367	3.81707892
3	200.4	1.79	0.367	1.31648772
4	200.4	0.5	0.367	0.367734

Utilizando el criterio de pérdidas aceptables, se determina que se puede utilizar tubería de 2,5 pulgadas de diámetro.

4.1.4.4.2. Dimensionamiento de laterales

Para los tubos de 3 aspersores:

Tabla 4.31. Valores de pérdidas por fricción cada 100 m para tubería a 0,63 l/s.
Fuente: [27].

Diámetro (pulg)	Pérdidas cada 100 m (kPa)	Pérdidas cada 100 m (m de agua)
0,5	803	82
0,75	196	20
1	58,8	6
1,25	15,7	1,6

Tabla 4.32. Cálculos para pérdidas. Realización en Excel.

Diámetro (pulg)	L (m)	Pérdidas por 100 m (m)	F	Pérdida total (m)
0.5	160.8	82	0.52	68.56512
0.75	160.8	20	0.52	16.7232
1	160.8	6	0.52	5.01696
1.25	160.8	1.6	0.52	1.337856

Para esta tubería, viendo los números, resulta evidente que tubería de 1 pulgada es adecuada. Se buscan los valores en las tablas para tubería al valor más cercano de 0,92 l/s.

Tabla 4.33. Valores de pérdidas por fricción cada 100 m para tubería a 0,95 l/s.
Fuente: [27].

Diámetro (pulg)	Pérdidas cada 100 m (kPa)	Pérdidas cada 100 m (m de agua)
0,75	416	42,5
1	125	12,8
1,25	32,3	3,3
1,5	14,7	1,5

Tabla 4.34. Cálculos para pérdidas. Realización en Excel.

Diámetro (pulg)	L (m)	Pérdidas por 100 m	F	Pérdida total (m)
0.75	321.6	42.5	0.52	71.0736
1	321.6	12.8	0.52	21.405696
1.25	321.6	3.3	0.52	5.518656
1.5	321.6	1.5	0.52	2.50848

Viendo los resultados obtenidos, resulta evidente que la tubería de 1,25 pulgadas de diámetro resulta adecuada para esta tubería.

4.1.4.4.3. Carga de presión en el sistema

Se calcula la pérdida total por accesorios, utilizando el mismo criterio de 10%:

$$H_{acc} = 0,1 * (3,82 + 5,01 + 5,52) = 1,44 \text{ m}$$

Se tiene entonces el siguiente desglose de pérdidas.

Tabla 4.35. Pérdidas totales para sistema de tuberías.

Ítem	Pérdida (m)
Pérdida en principal	3,82
Pérdida en tubería de cuatro aspersores	5,01
Pérdida en tubería de tres aspersores	5,52
Pérdida en accesorios	1,44
Total	15,79

Sumando el valor total obtenido a la presión de trabajo de los aspersores (28 m), la carga total de presión del sistema es de 43,79 m.

4.1.5. Obtención de agua

4.1.5.1. Primera alternativa de tubería

El pozo con el que la propiedad cuenta es de menos de 25 pies (7,62 metros) de profundidad, siendo de aproximadamente 7 metros. Esto permite que se clasifique como un pozo de poca profundidad [42]. Esto significa que una bomba centrífuga es apropiada para el pozo de la propiedad. Por lo tanto, tomando en cuenta las

necesidades de presión dadas por el sistema de distribución, se procede a buscar una bomba apropiada para estos requerimientos.

Utilizando la ecuación 7, se obtiene la potencia requerida de la bomba, asumiendo que es de tamaño mediano-grande y con una eficiencia de 80%. Se utiliza la mayor presión y el mayor caudal obtenidos de la Sección 4.1.4.2.5.

$$HP = \frac{24,7 \frac{l}{s} * 54,7 m}{76 * 0,8} = 22,22 hp$$

Se tiene un requerimiento de 24.7 l/s de caudal, 54,7 m de presión y aproximadamente 22 hp de potencia.

4.1.5.2. Segunda alternativa de tubería

Utilizando la ecuación 7 nuevamente con los datos requeridos de la segunda alternativa de tubería propuesta, obtenidos en la Sección 4.1.4.4.3:

$$HP = \frac{5,73 \frac{l}{s} * 43,79 m}{76 * 0,8} = 4,13 hp$$

Se tiene un requerimiento para la bomba de 5,73 l/s de caudal, 43,79 m de presión y 4,13 hp de potencia.

Capítulo 5

5. Resultados y análisis

5.1. Análisis económico

5.1.1. Análisis de sistema con aspersores *Big Gun*

Con el objetivo de determinar la viabilidad económica de la alternativa con los aspersores *Big Gun*, se realiza un análisis del costo de implementación de la misma. A continuación, se presenta un desglose de costos de la propuesta de solución presentada.

Tabla 5.1. Desglose de costo de alternativa de solución con aspersores *Big Gun*. Costos en colones. Realización propia.

Ítem	Costo Unitario (₡)	Cantidad	Costo Total (₡)
Raspberry Pi 4	99000	1	99000
Válvula solenoide	4900	4	19600
Cable	29000	2	58000
Monitor	50000	1	50000
Aspersores	390000	25	9750000
Tubería PVC 4 pulgadas	18700	267	4992900
Conexión 90 grados	7395	37	273615
Conexión cuatro direcciones	9350	10	93500
Conexión T	5000	2	10000
Bomba	265000	1	265000
Piezas de sujeción (tornillos, etc)	600	150	90000
Total			15.701.615

Inmediatamente es evidente que se trata de un costo bastante elevado. En particular, los costos de los aspersores y la tubería representan más del 90% del costo de la solución propuesta, por no mencionar que es más de tres veces el valor ideal del presupuesto. Por comparación, a continuación, se presenta el desglose de la alternativa con aspersores *Rotator R33*.

El cliente dio la información de que, en términos de alimento, durante la época seca, por día se gastan aproximadamente 1200 colones por animal en la finca, contando con 25 animales actualmente. Esto resulta en un costo diario de 30.000 colones, para un costo anual de aproximadamente 7.300.000 colones (tomando en cuenta que no todo el año es seco pero que durante los meses lluviosos también se les da alimento a los animales. Se espera que una hectárea cubra un 20% de estos costos, para un ahorro de 1.460.000 colones en comparación con los costos actuales, basado en información del cliente. Según los datos de la Tabla 5.2, para su sexto año de uso, aún no se ha recuperado la inversión inicial en términos del

valor generado por el alimento que crece en el terreno. Siguiendo esta tendencia, hasta el año 12 de utilizar el sistema este recuperaría la inversión inicial.

Tabla 5.2. Ahorros esperados anuales, en colones. Calculados en Excel.

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6
Inversión inicial	-15701615	0	0	0	0	0
Costos operativos	-120000	-120000	-120000	-120000	-120000	-120000
Valor generado	1460000	1460000	1460000	1460000	1460000	1460000
Ganancia	-14361615	-13021615	-11681615	-10341615	-9001615	-7661615

5.1.2. Análisis de sistema con aspersores *Rotator R33*

Se presenta el siguiente desglose de costos para la alternativa del sistema realizado con los aspersores *Rotator R33*.

Tabla 5.3. Desglose de costos de alternativa de solución con aspersores *Rotator R33*. Costos en colones. Realización propia con Excel.

Ítem	Costo Unitario (₡)	Cantidad	Costo total (₡)
Raspberry Pi 4	99000	1	99000
Válvula solenoide	4900	1	4900
Cable 1m	3000	30	90000
Monitor	50000	1	50000
Conexión 90 grados	7395	14	103530
Conexión cuatro direcciones	9350	6	56100
Conexión T	5000	12	60000
Bomba	200000	1	200000
Aspersores R33	17000	25	425000
Tubería PVC 6 m 1"	17900	26	465400
Tubería PVC 6 m 1,25"	10900	53	577700
Tubería PVC 6 m 2,5"	25600	50	1280000
Mano de obra	300000	-	300000
Total			3.711.630

Inmediatamente al comparar el precio se nota una gran diferencia, al ser casi 5 veces menor al precio de la alternativa con aspersores *Big Gun*. Los aspersores y la tubería, así como los accesorios relacionados con la tubería, siguen siendo los mayores factores en el costo, sin embargo, se ven dramáticamente reducidos debido la diferencia importante de precio en la tubería por los diámetros más pequeños que se utilizan en esta alternativa, así como los aspersores significativamente más baratos.

Utilizando los mismos datos que en el análisis de la otra alternativa planteada, el valor generado por la solución anualmente sería aproximadamente 1.460.000 (ajustando el valor tomando en cuenta la menor área de riego cubierta). Se estiman los mismos costos operativos de 120000 colones. Según la Tabla 5.4, para el tercer año de uso se recuperaría la inversión inicial. Adicionalmente, el costo de la propuesta de solución cae dentro del presupuesto establecido como meta en la Tabla 3.6.

Tabla 5.4. Ahorros esperados anuales, en colones. Realización en Excel.

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6
Inversión inicial	3711630	0	0	0	0	0
Costos operativos	120000	120000	120000	120000	120000	120000
Valor generado	1460000	1460000	1460000	1460000	1460000	1460000
Ganancia	-2371630	-1031630	308370	1648370	2988370	4328370

5.2. Simulación de flujo de agua por las tuberías

Para simular el flujo de agua, se utilizó el software *CFD* de Autodesk. Este ofrece la posibilidad de simular el flujo de varios fluidos a través de diferentes materiales. Las posibilidades de simulación son altamente variadas, e incluyen la posibilidad de tomar un sólido y simular el paso del fluido por el mismo, o de tomar la forma del fluido a través de un sólido. Se utiliza este software para simular el fluido del agua a través de los tubos en los diferentes días.

5.2.1. Simulación de sistema con aspersores *Big Gun*

5.2.1.1. Simulación de tubería de aspersores de círculo completo

Como primera instancia, se simula el fluido del agua al funcionar los aspersores de círculo completo. A la tubería de distribución de estos aspersores les entran 66,6 m³/h con una presión de 54,7 m, para terminar en aspersores de 40,79 m de presión. Estas son las condiciones iniciales que se introducen como parámetros para esta simulación, lo que se puede observar en las siguientes figuras. Se debe notar que el software no toma caudales como entradas, por lo cual se utilizó la siguiente ecuación (donde Q es caudal, V es velocidad y A es área, calculada con valores de diámetro obtenidos PVC Pipe Supplies [43]):

$$V = \frac{Q}{A} \quad (15)$$

Se utilizó un diámetro de 4 pulgadas para todas las simulaciones debido a que se encontró que este tamaño es apropiado para todos los casos en la sección de dimensionamiento.

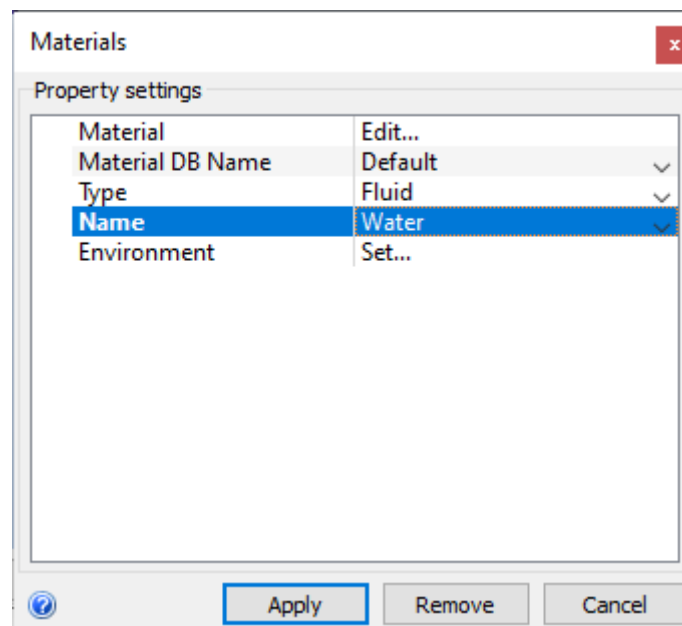


Figura 5.1. Configuración de material de fluido.

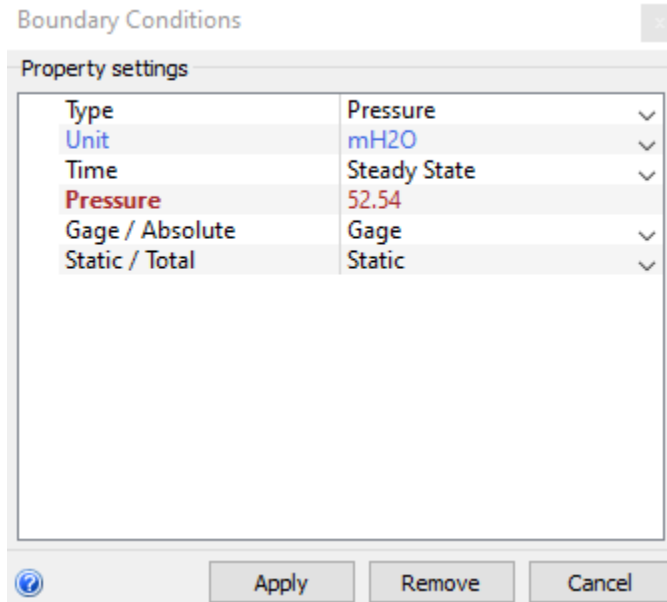


Figura 5.2. Condición de presión en entrada.

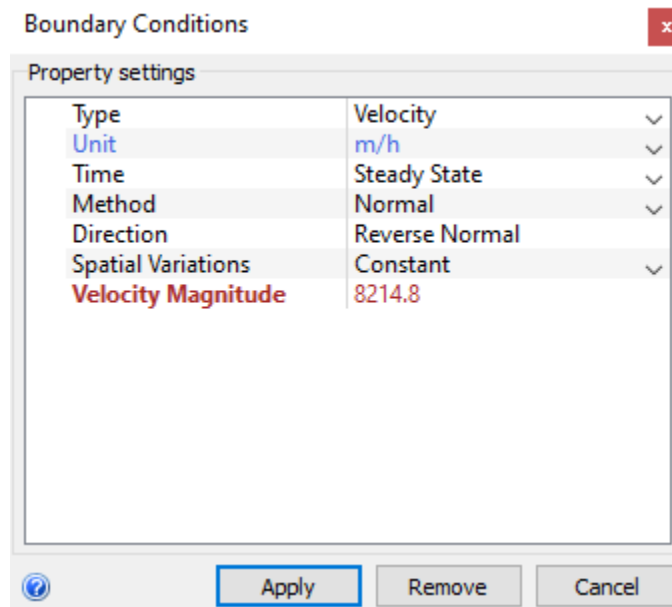


Figura 5.3. Condición de velocidad en entrada en m/h.

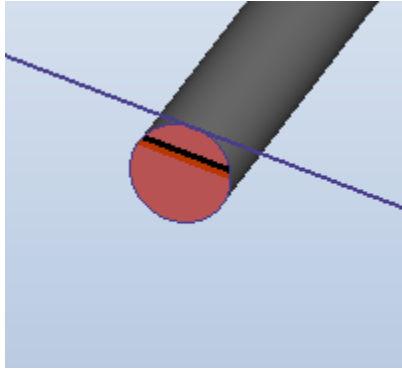


Figura 5.4. Tubería de entrada con las condiciones iniciales aplicadas.

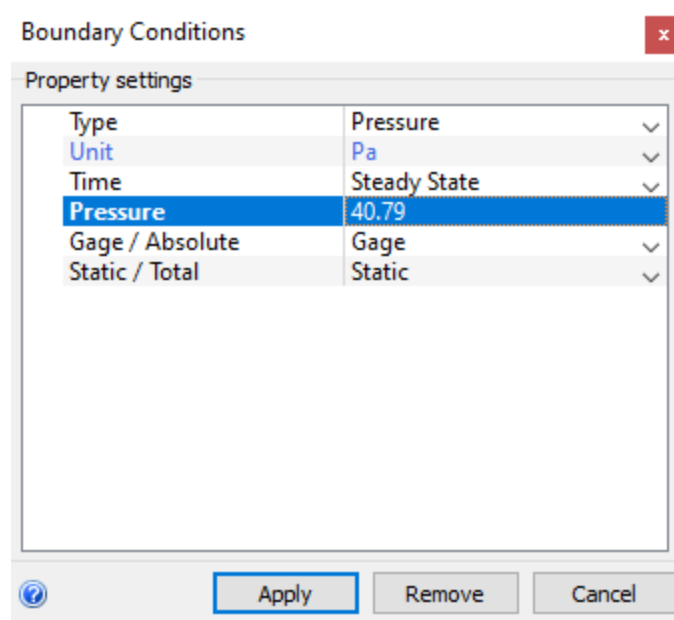


Figura 5.5. Condición de presión de salidas.

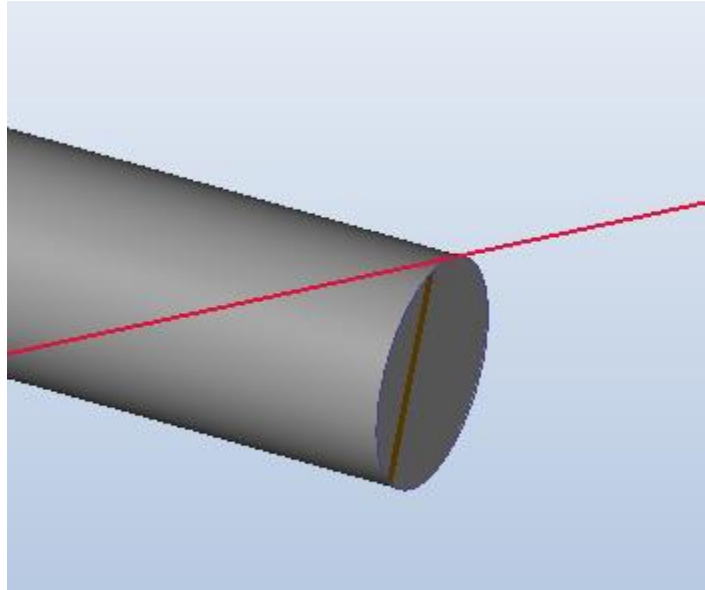


Figura 5.6. Salidas con condiciones iniciales.

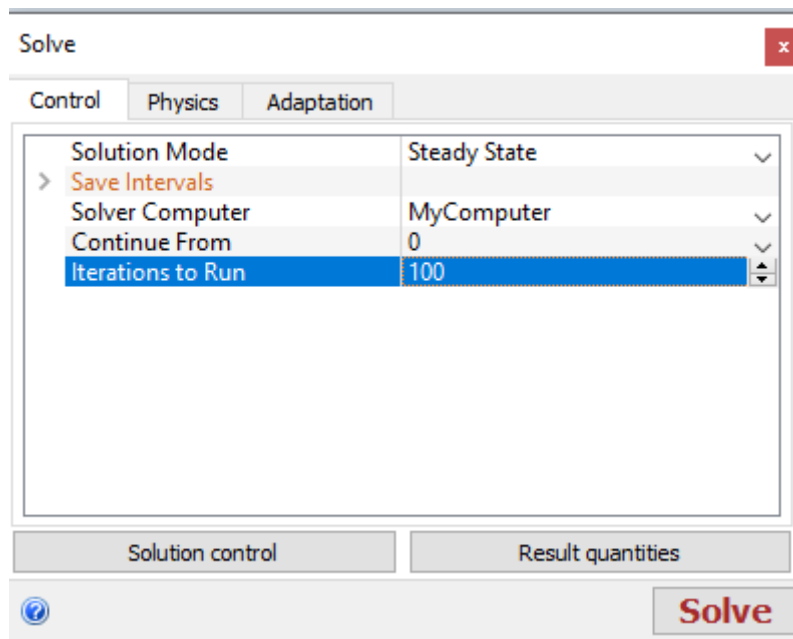


Figura 5.7. Configuración de simulación.

La tubería simulada se ve de la siguiente manera.

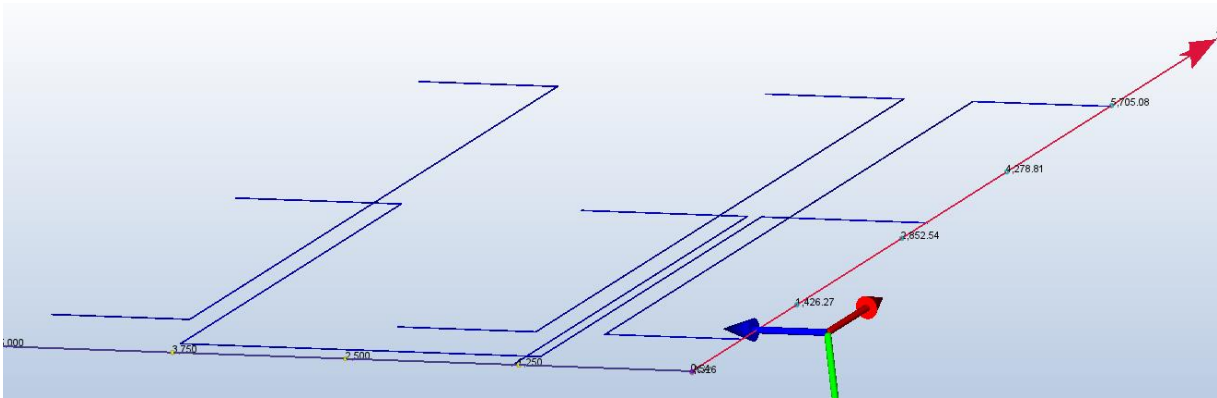


Figura 5.8. Simulación de flujo por tubería.

Las velocidades encontradas por la simulación tienen las siguientes escalas.

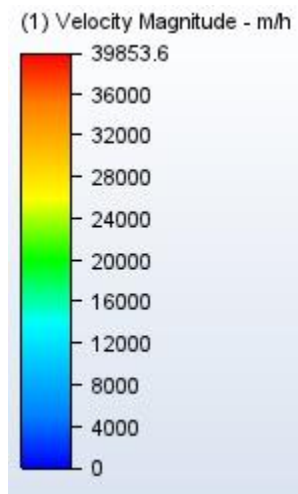


Figura 5.9. Escala de velocidades.

Para referirse a las diferentes salidas, se utiliza la siguiente numeración.

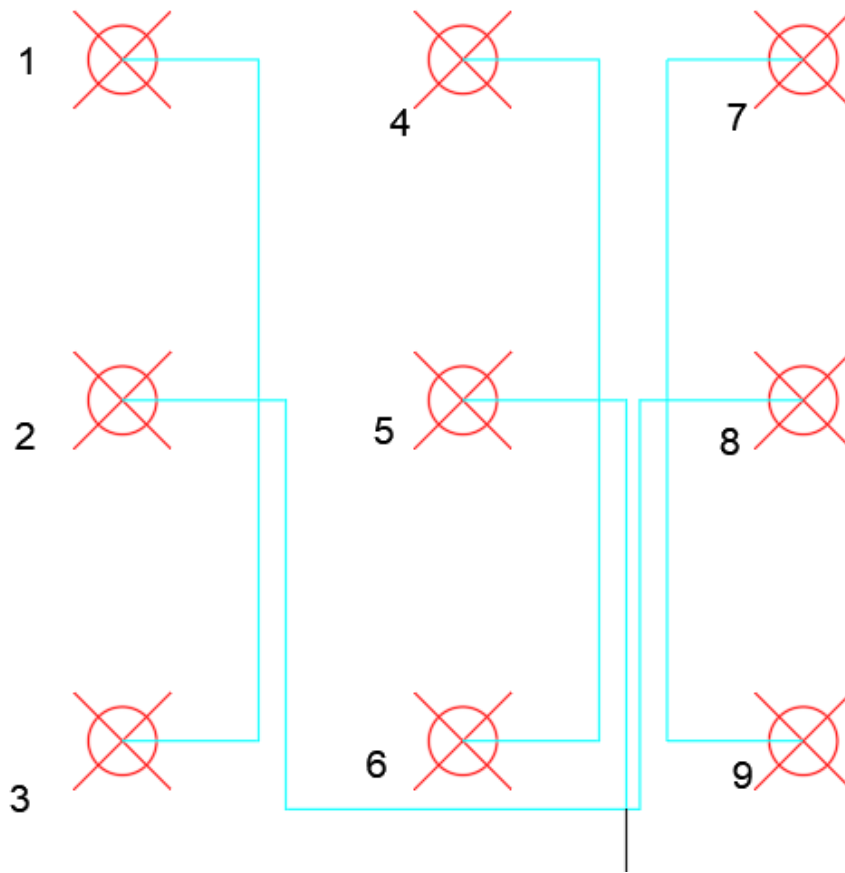


Figura 5.10. Numeración de aspersores de círculo completo.

Se obtienen los siguientes valores de caudal para cada aspersor (ya convertidos a partir del valor de velocidad en m/h).

Tabla 5.5. Valores de caudal para cada aspersor. Calculado en Excel con datos de simulación.

Aspersor	Q (m ³ /h)
1	9.13
2	20.16
3	9.58
4	9.27
5	25.87
6	10.09
7	8.12
8	25.48
9	8.77

5.2.1.1.1. Discusión

Lo que se puede notar inicialmente es que los caudales obtenidos son mayores a los caudales calculados, estos no se dividen de manera uniforme en las tuberías y en el caso de los aspersores centrales, estos reciben significativamente más caudal que los más a los extremos, los cuales reciben caudales bastantes parecidos. Observando la Figura 5.10, resulta evidente que los aspersores que reciben el mayor caudal son los que se encuentran más lejanos al punto de entrada del agua, mientras que los aspersores laterales son equidistantes con respecto a sus respectivos puntos de entrada.

El hecho de que los caudales sean mayores a los esperados es explicable por el hecho de que la simulación es más precisa y posee un modelo más completo del comportamiento del fluido, a diferencia de los cálculos realizados para dimensionar los tubos, los cuales asumen flujo lineal. Es evidente que el flujo no es lineal, y en particular la distancia del aspersor al punto de entrada del líquido tiene una influencia sobre el valor del caudal que recibe. Es posible reducir la potencia de la bomba para llegar a números más cercanos a los calculados, aunque también debe tomarse en cuenta que es posible que el uso real presente aún más pérdidas por fricción de lo que la simulación muestra, lo cual llevaría a caudales más bajos. Otra alternativa para los aspersores laterales es la reducción del tiempo de riego, para aun así proporcionar la intensidad de precipitación apropiada.

Para los aspersores centrales, el uso de reductores de caudal puede resultar apropiado para obtener valores más aceptables de caudal. Mientras que sería posible añadir más material de tubería, esto aumentaría aún más el costo de la solución propuesta y no se considera necesario al haber alternativas que implican menos gasto de material.

5.2.1.2. Simulación de tubería de aspersores de medio círculo

A continuación, se simuló el flujo del agua a través de la tubería de los aspersores de medio círculo. Al igual que en el caso anterior, se convirtió el valor

de caudal en uno de velocidad lineal mediante la ecuación 15. Las siguientes figuras muestran la configuración inicial para esta simulación.

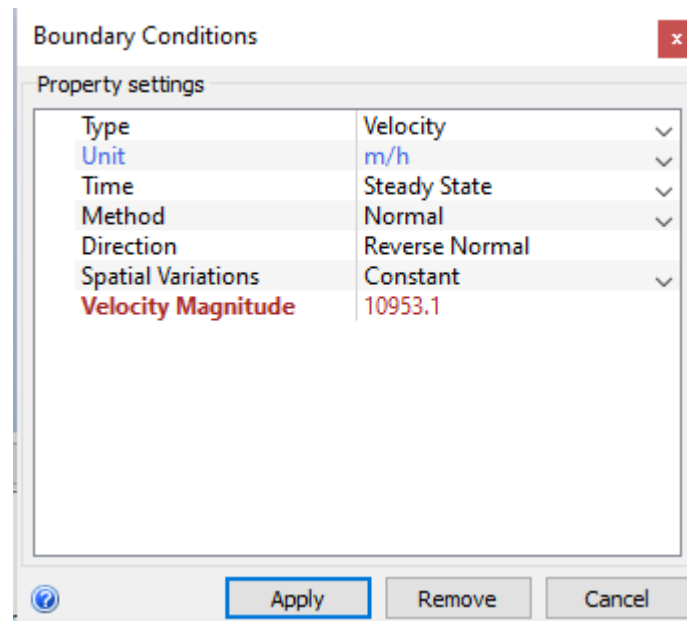


Figura 5.11. Estado inicial de velocidad para la entrada.

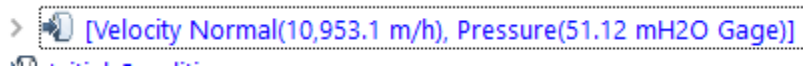


Figura 5.12. Presión en entrada.

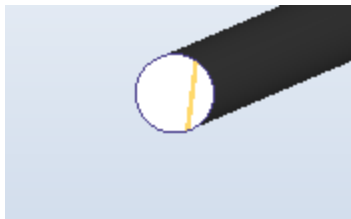


Figura 5.13. Salida con presión de aspersor.

Escala de velocidades encontradas en la simulación.

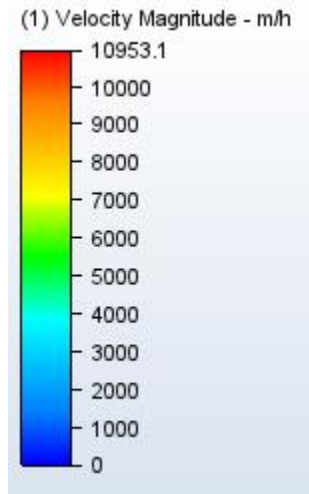


Figura 5.14. Escala de velocidades.

Vista de la tubería simulada.



Figura 5.15. Vista del flujo del agua por la tubería.

Los aspersores reciben la siguiente numeración.

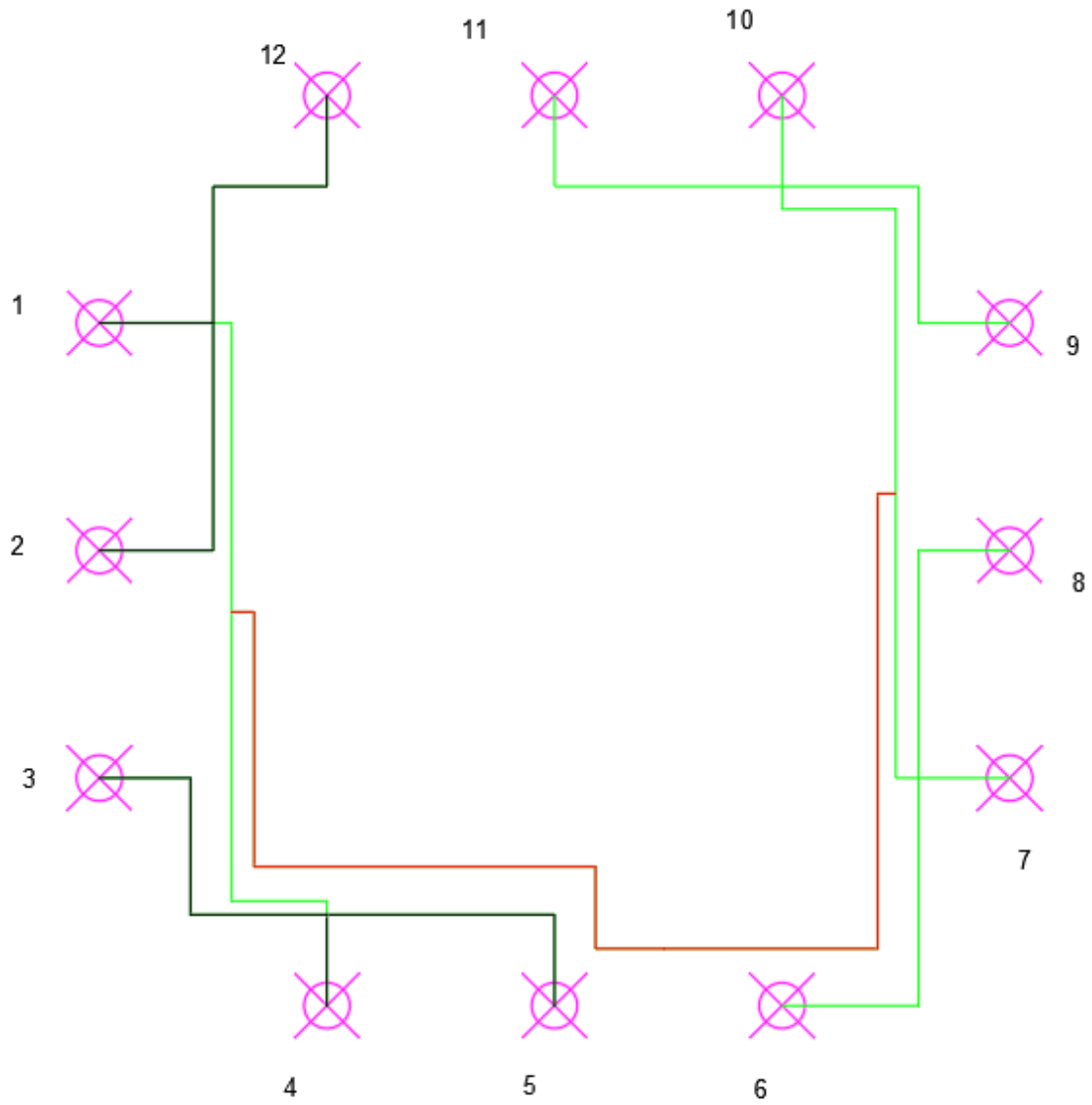


Figura 5.16. Numeración de aspersores.

Se obtienen los siguientes valores de caudal, una vez más, ya convertidos con base en los valores de velocidad obtenidos en la simulación.

Tabla 5.6. Valores de caudal en cada aspersor. Calculado en Excel con datos de simulación.

Aspersor	Q (m ³ /h)
1	7.80
2	3.95
3	3.11
4	7.28
5	3.36
6	3.75
7	8.89
8	4.04
9	3.20
10	7.60
11	3.48
12	3.94

Para mejor entender cómo se divide el caudal, se listan las agrupaciones (como se puede ver en la Figura 5.16, hay grupos de tres aspersores).

- Grupo 1: 12, 1, 2
- Grupo 2: 3, 4, 5
- Grupo 3: 6, 7, 8
- Grupo 4: 9, 10, 11

5.2.1.2.1. Discusión

En contraste con el caso anterior, esta vez se obtienen caudales significativamente menores en comparación. En particular, los aspersores centrales de cada grupo (1, 4, 7 y 10) reciben un caudal significativamente cerca del valor calculado de caudal, mientras que los laterales de cada grupo reciben aproximadamente la mitad. Al igual que en el caso anterior, resulta evidente que la distancia del punto de entrada es un factor importante al determinar el caudal recibido por cada aspersor.

Aunque no se obtienen los caudales calculados, resulta evidente que en este caso se logran resultados mucho más cercanos a los cálculos en comparación con el caso de la tubería de aspersores de círculo completo. Dado que hay una razón

de más o menos 2 entre los caudales centrales de cada grupo y los caudales laterales, una compensación que se le podría realizar a este sistema es la adición de reductores de flujo a los aspersores centrales y hacer doble el tiempo de riego de este sistema de aspersores, así logrando un riego uniforme por parte de este sistema.

A diferencia del sistema de los aspersores de círculo completo, no hay magnitudes de velocidad mayor a la velocidad inicial planteada, como se puede observar en la Figura 5.14, lo cual, además de los resultados ya discutidos, indican que se llega a resultados más cercanos al comportamiento teórico del líquido, lo cual podría deberse a la menor cantidad de fluido en las tuberías individuales (un máximo de 44,4 m³/h en comparación con 66,6 m³/h).

5.2.1.3. Simulación de tubería de aspersores de cuarto de círculo

Posteriormente, se simula la tubería de distribución de aspersores de cuarto de círculo.

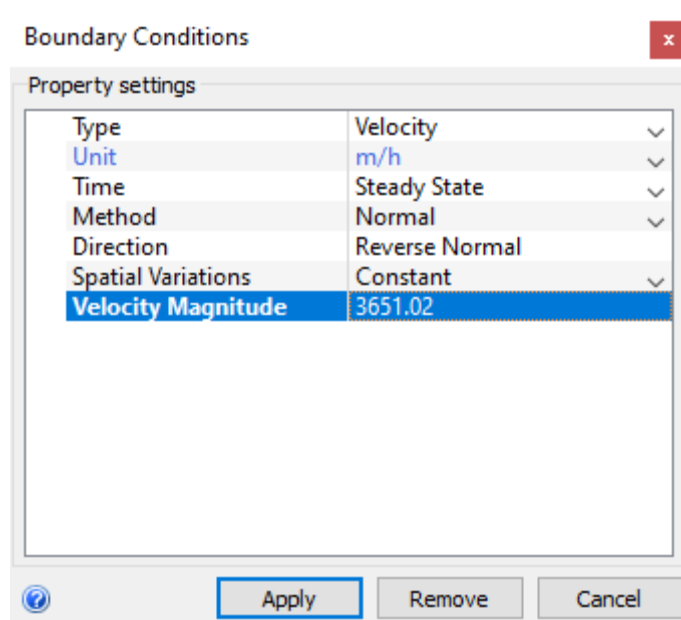


Figura 5.17. Velocidad inicial para aspersores de cuarto de círculo.

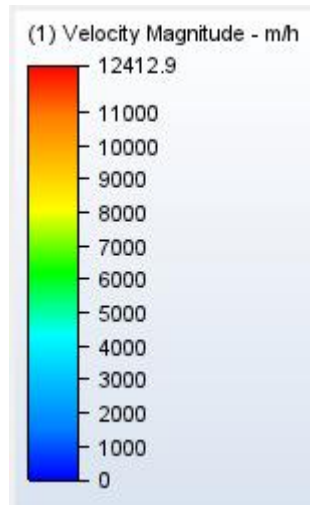


Figura 5.18. Escala de velocidades encontradas en la simulación.

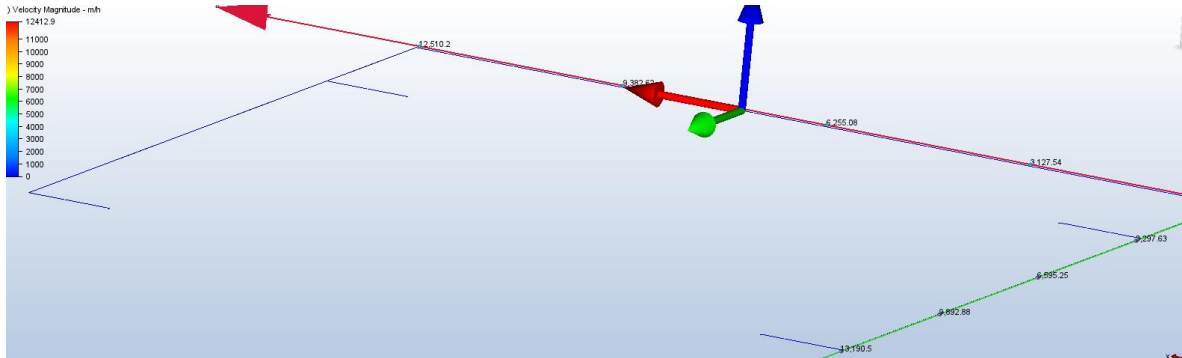


Figura 5.19. Vista de tubería simulada.

Se utiliza la siguiente numeración de aspersores.

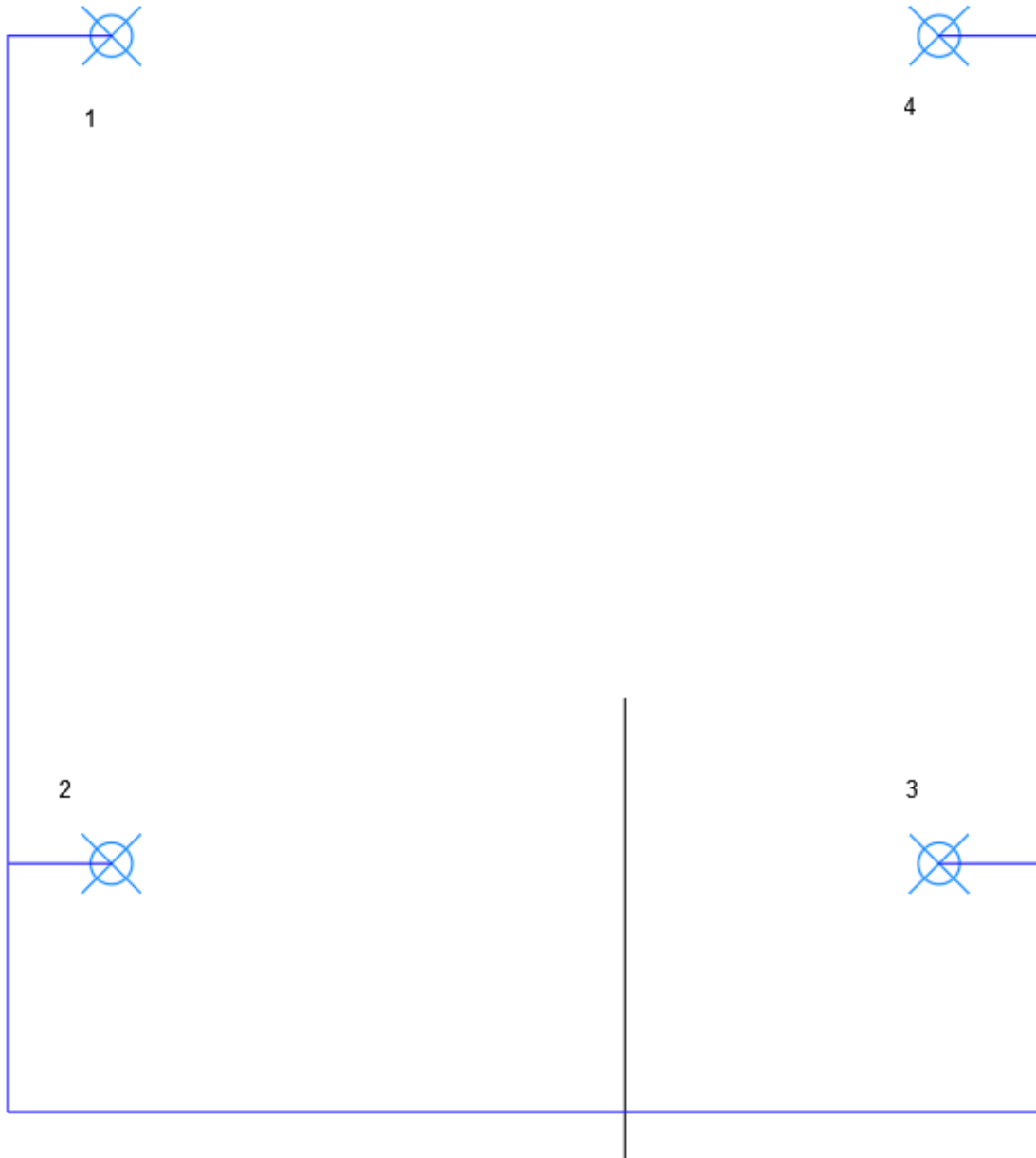


Figura 5.20. Numeración de aspersores.

Se obtienen los siguientes caudales.

Tabla 5.7. Caudales obtenidos. Calculados en Excel con datos de simulación.

Aspersor	Q (m ³ /h)
1	8.43
2	26.11
3	29.40
4	9.33

5.2.1.3.1. Discusión

Inmediatamente resulta evidente que este es un caso similar al de la tubería de aspersores de círculo completo, ya que se obtienen valores muy cercanos a los calculados en algunos aspersores y valores significativamente más altos en otros, y el factor común es la distancia que el aspersor en particular tiene con el punto de entrada del agua. Hay aún más evidencia en este caso, al ver que los aspersores 3 y 4 presentan un mayor caudal que el 1 y el 2, los cuales están más lejos de la entrada del agua, como se puede notar al observar las dimensiones en la Figura 4.24.

Al igual que en el caso de la tubería de los aspersores de círculo completo, se puede utilizar más material de tubería en el caso de los aspersores 2 y 3 para disminuir el caudal que estos reciben, sin embargo, el espacio es limitado y por lo tanto se puede considerar más práctico el uso de reductores de flujo para obtener caudales más apropiados según los valores calculados durante la fase de diseño.

5.2.2. Simulación de sistema con aspersores *Rotator R33*

Utilizando la ecuación 15, se obtiene una velocidad de entrada para las condiciones iniciales de 6677,2 m/h. La presión de entrada es de 43,79 m y la presión en las salidas es de 28 m. A continuación, se muestran capturas de pantalla de varios aspectos de la simulación, como en las secciones pasadas.

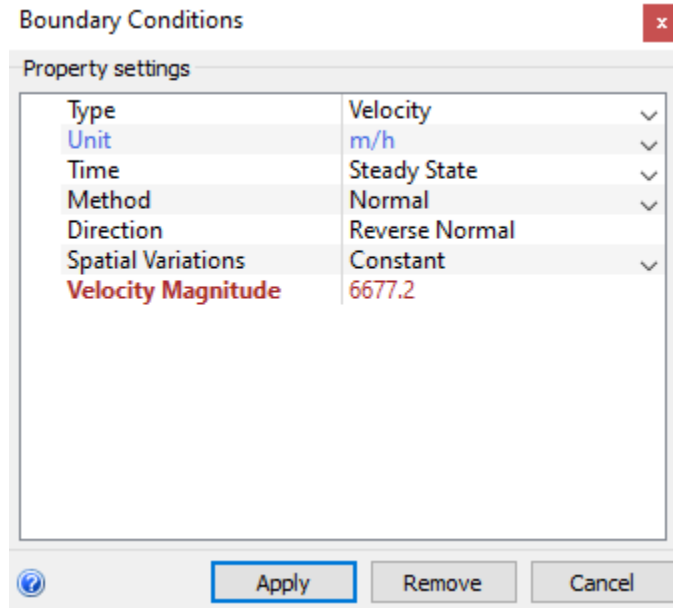


Figura 5.21. Condición de velocidad de entrada.

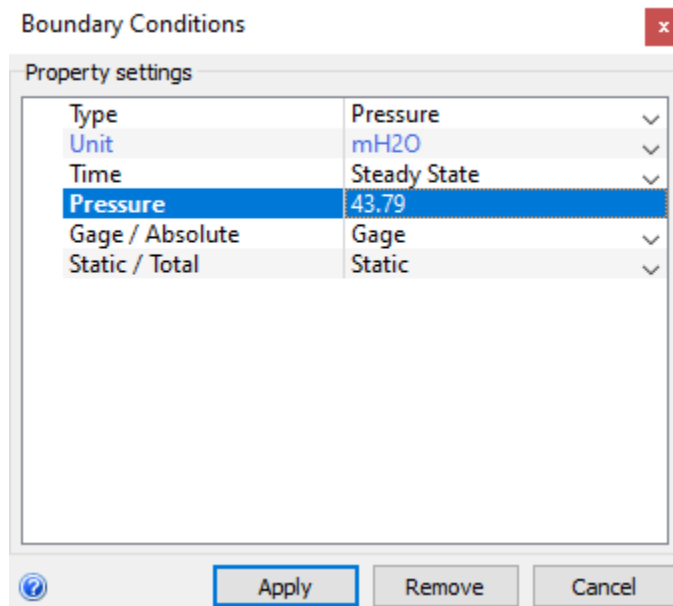


Figura 5.22. Condición de presión de entrada.

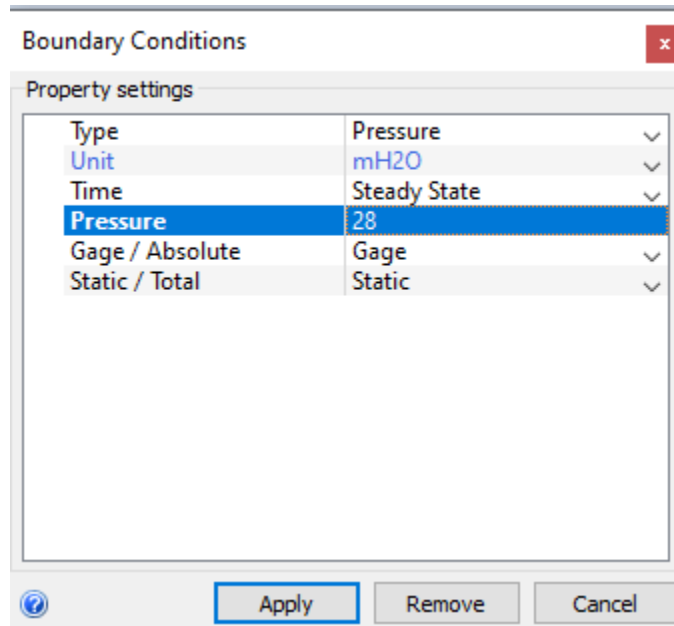


Figura 5.23. Condición de presión de salida.

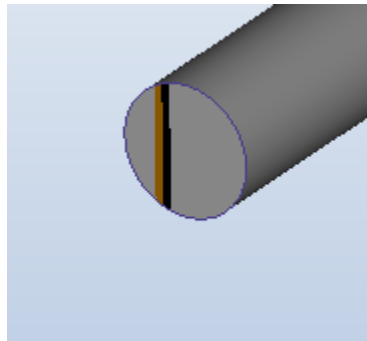


Figura 5.24. Entrada bajo condiciones de velocidad y presión.

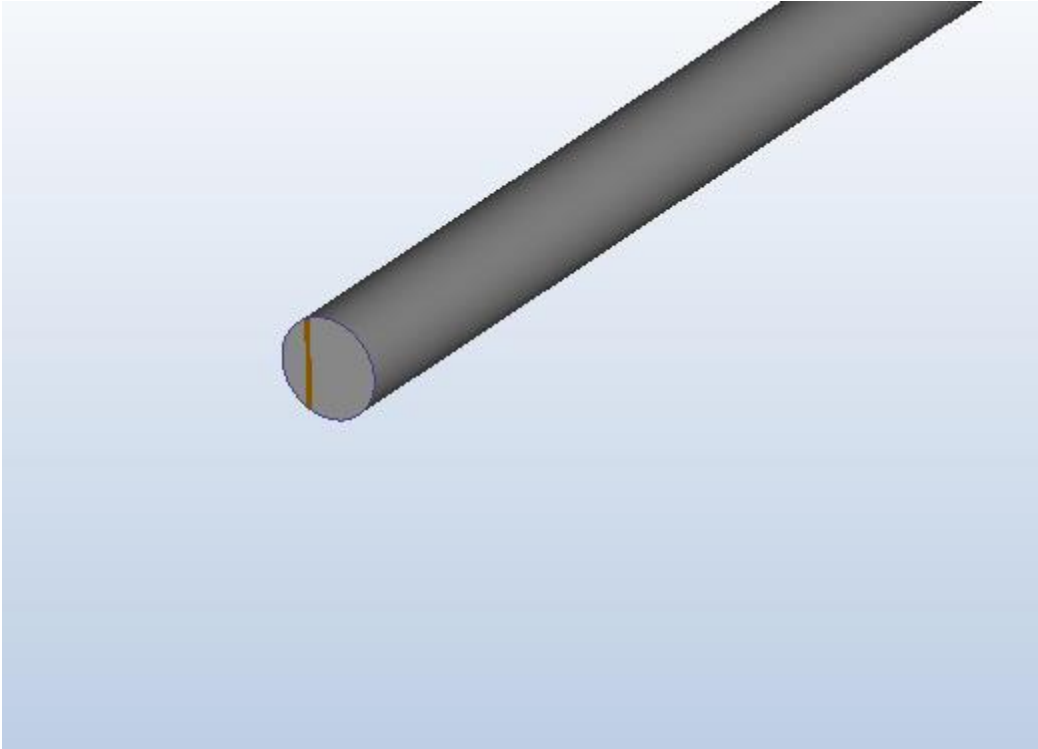


Figura 5.25. Una de las salidas bajo la condición presión de salida.

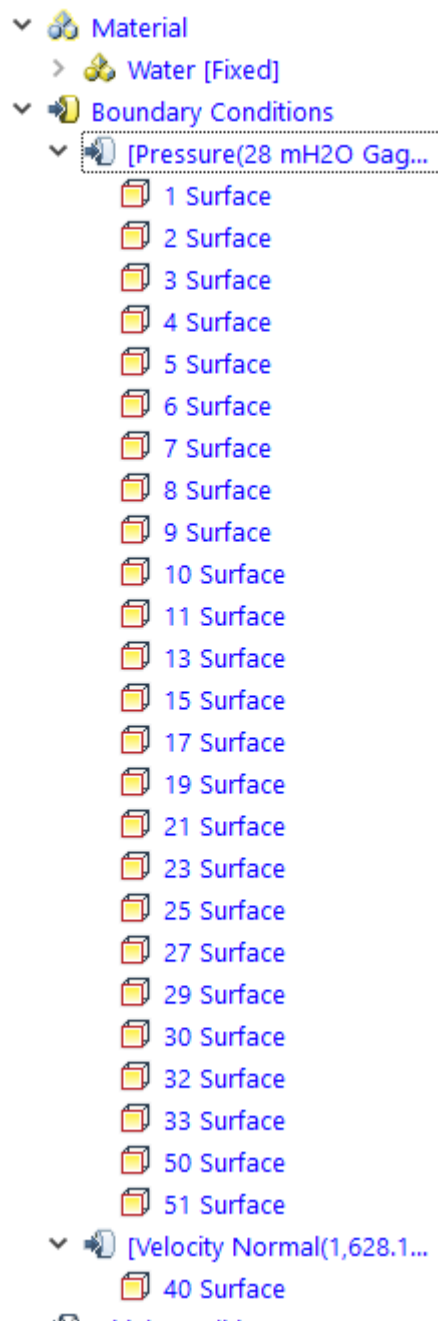


Figura 5.26. Interfaz de software mostrando condiciones de entrada y salida aplicadas a diferentes superficies.

Se usa la siguiente numeración para los aspersores.

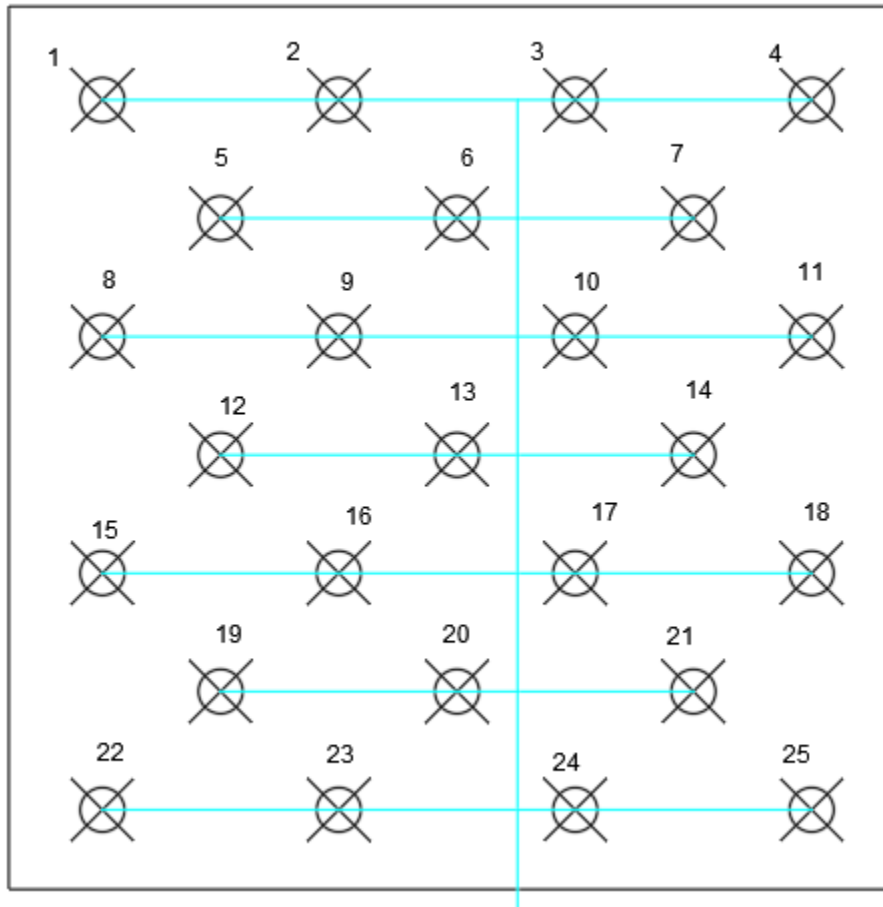


Figura 5.27. Numeración de aspersores.

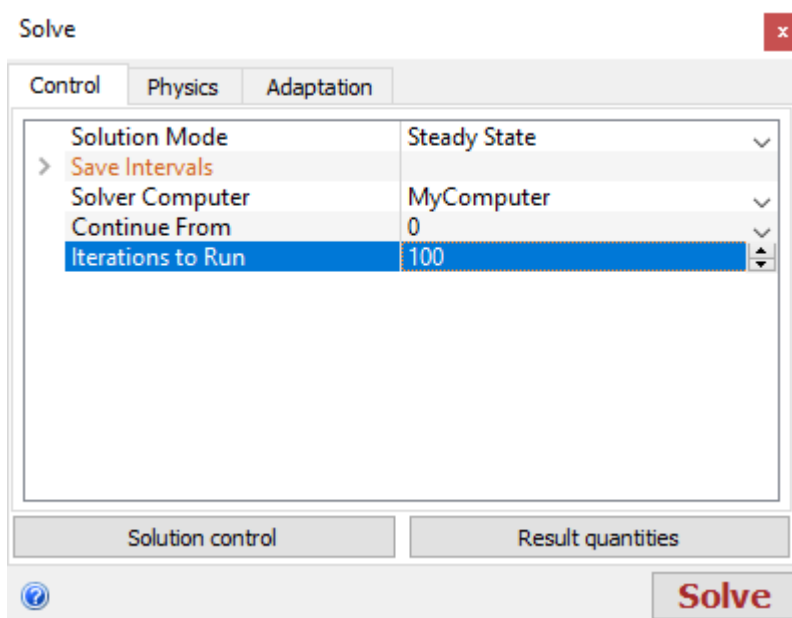


Figura 5.28. Configuración de simulación.

Escala de velocidades encontradas por la simulación (m/h):

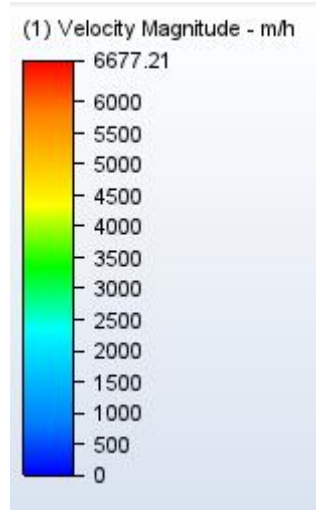


Figura 5.29. Escala de velocidades encontradas por la simulación.

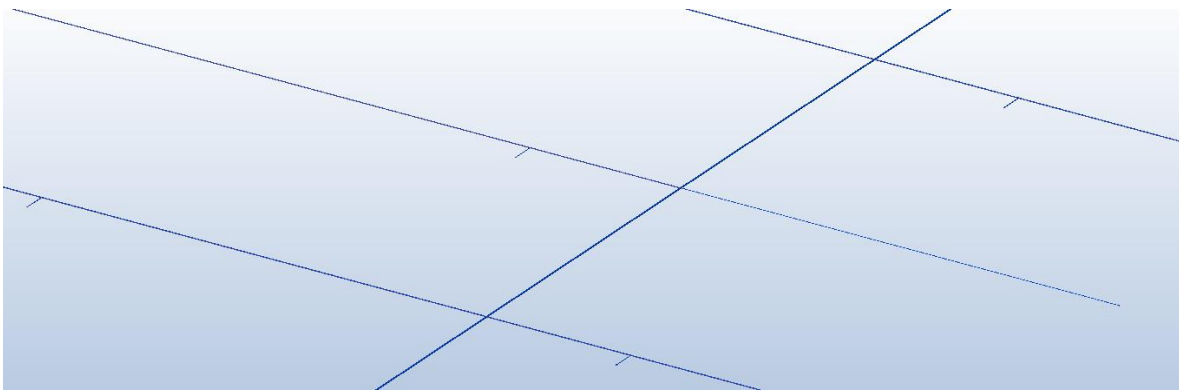


Figura 5.30. Captura de pantalla de tubería en simulación.

Se obtienen los siguientes resultados (convertidos ya a caudales despejando Q de la ecuación 15):

Tabla 5.8. Resultados de simulación. Calculados en Excel.

# de aspersor	Caudal (m3/h)	Caudal (l/h)	A (m2)	V (m/h)	Salidas en tubería
1	0,19	185,50	0,000964974	192,235	4
2	0,51	507,09	0,000964974	525,492	4
3	0,75	749,28	0,000964974	776,475	4
4	0,35	354,47	0,000964974	367,337	4
5	0,17	169,14	0,000557581	303,342	3
6	0,41	410,26	0,000557581	735,791	3
7	0,40	397,15	0,000557581	712,27	3
8	0,26	256,22	0,000964974	265,525	4
9	0,65	647,16	0,000964974	670,648	4
10	0,97	965,09	0,000964974	1000,12	4
11	0,48	478,28	0,000964974	495,637	4
12	0,31	306,46	0,000557581	549,631	3
13	0,58	580,14	0,000557581	1040,45	3
14	0,66	655,33	0,000557581	1175,31	3
15	0,53	531,96	0,000964974	551,274	4
16	1,18	1183,12	0,000964974	1226,06	4
17	1,76	1761,37	0,000964974	1825,3	4
18	0,97	965,20	0,000964974	1000,23	4
19	0,67	672,92	0,000557581	1206,85	3
20	1,22	1219,64	0,000557581	2187,37	3
21	1,36	1356,24	0,000557581	2432,36	3
22	1,16	1162,95	0,000964974	1205,16	4
23	2,44	2440,74	0,000964974	2529,33	4
24	3,54	3543,51	0,000964974	3672,13	4
25	2,08	2080,11	0,000964974	2155,61	4

5.2.2.1.1. Discusión

Se puede ver de nuevo que el caudal se ve altamente influenciado, al igual que en las simulaciones del sistema anterior, por la distancia de la salida de agua individual en comparación con la entrada de agua. O sea, los que tienen menos camino que recorrer. Esto significa que, en este estado, el riego puede ser insuficiente en áreas más alejadas. Por otro lado, varios aspersores cercanos presentan valores de caudal significativamente mayores en comparación con el valor nominal de 825 l/h.

Con un caudal nominal de $0,825 \text{ m}^3/\text{h}$ (825 l/h) para los aspersores, se puede considerar que se logra distribuir una cantidad aceptable de agua a los aspersores 20-25, 16-18, 10 y 3. Se puede observar en la Figura 5.27 que en el caso de los aspersores lejanos, son los que se encuentra más cercanos a la central, lo cual de nuevo concuerda con la conclusión a la que se había llegado de que la longitud del camino que el agua debe recorrer tiene una gran influencia sobre los caudales en cada salida.

Para posibles soluciones a este problema, se puede considerar aumentar la velocidad a la entrada de la tubería para asegurarse de que al aspersor que actualmente le llega menos caudal le llegue lo suficiente, y ajustar el resto de los caudales mediante la instalación de reductores de caudal, los cuales permiten el ajuste del tiempo durante el cual dejan pasar agua y posteriormente se cierran. Otra alternativa es la división de las tuberías en varios subsistemas y poner varias fuentes de agua, como por ejemplo la instalación de tanques en diferentes puntos alrededor del área de riego, para así asegurar que los aspersores reciben agua de un área relativamente cercana, haciendo los caudales de cada uno más uniformes.

Finalmente, se puede considerar el uso de diferencias de altura en la tubería para aumentar la presión en partes cruciales y que llegue mayor caudal a las salidas que lo necesitan. Para ofrecer una comparación breve entre estas tres opciones, la primera de esta requiere la instalación de nuevos elementos antes de los aspersores, sin embargo, el arreglo general de la tubería puede mantenerse básicamente sin cambiar. Por otro lado, las dos opciones posteriores requerirían muy probablemente un rediseño significativo del arreglo físico de la tubería, por lo cual podrían no resultar prácticas.

5.2.3. Conclusión

Comparando los resultados de ambas simulaciones, la única ventaja teórica que el primer sistema ofrece, que era la regularidad del riego, resulta nula, debido a esta uniformidad no se logra en la simulación, haciendo aún menos probable que se logre en una implementación de la propuesta de solución. Considerando además la

diferencia significativa del costo de implementación, se determina que la mejor opción económica y prácticamente es el sistema con aspersores *Rotator R33*.

5.3. Pruebas del software automático

Habiendo determinado que la alternativa que utiliza los aspersores *Rotator R33* es la mejor opción debido a las ventajas en costo que ofrece y ofrecer cobertura similar del terreno, se programa el funcionamiento automático para alternativa nada más. Esto simplifica el control, al no tener que diferenciar entre tipos de aspersores.

Para el software de automatización, se crearon varias pruebas para asegurar que este se comporta de la manera correcta. Dado que el comportamiento de la propuesta de solución trata de riegos cada cierto tiempo, se escaló el tiempo para realizar las pruebas en un tiempo razonable. El ciclo de riego se definió como el tiempo entre 10 y 20 segundos de cada minuto (por ejemplo, a las 10:23:10 comienza un ciclo y este termina a las 10:23:20). Debe notarse que igual se utilizó la hora real para realizar estas pruebas, de ahí la presencia del reloj mostrando la en la interfaz. De esta manera, se demuestra que funciona con un reloj constantemente cambiante, con solo necesidad de modificar la escala de tiempo y los valores específicos de hora de activación y desactivación del ciclo de riego. Se realizaron 100 pruebas por cada tipo de prueba, en varias combinaciones de 5 zonas de riego. Las pruebas son las siguientes:

Tabla 5.9. Pruebas realizadas sobre el software. Realización propia.

Número	Descripción	Comportamiento esperado
1	El usuario intenta activar el área de riego fuera de ciclo de riego	El terreno se activa para regar en el siguiente ciclo
2	El usuario intenta activar el área de riego dentro de ciclo de riego	El terreno se activa para el siguiente ciclo pero no comienza a regar
3	El usuario intenta desactivar el área de riego fuera de ciclo de riego	El terreno se desactiva para el siguiente ciclo
4	El usuario intenta desactivar el área de riego dentro de ciclo de riego	El terreno se desactiva para el siguiente ciclo pero no comienza a regar
5	Llega la hora de activación de aspersores	Se activan la señal correspondiente a los aspersores
6	Termina el ciclo de riego	Se desactiva la señal correspondiente a los aspersores
7	El usuario presiona el botón de emergencia	Set de todos los conteos a 0, todas las luces en rojo.

Se puede ver que las pruebas consisten en comprobar la funcionalidad correcta del software en diferentes puntos de la rutina que se espera que realice repetidas veces. Además, se revisa que no se pueda cambiar el estado de un terreno mientras este se encuentra en medio de un ciclo de riego. Es decir, el usuario no debe poder cambiar el estado de riego en que la zona particular que desea cambiar se encuentra, solo cambiar el estado que tendrá en el próximo ciclo. Las pruebas tuvieron los siguientes resultados:

Tabla 5.10. Resultados de pruebas sobre software de automatización.

Número	Aciertos
1	100/100
2	100/100
3	100/100
4	100/100
5	100/100
6	100/100
7	100/100

Se muestran unas pocas capturas de pantalla de las pruebas realizadas.

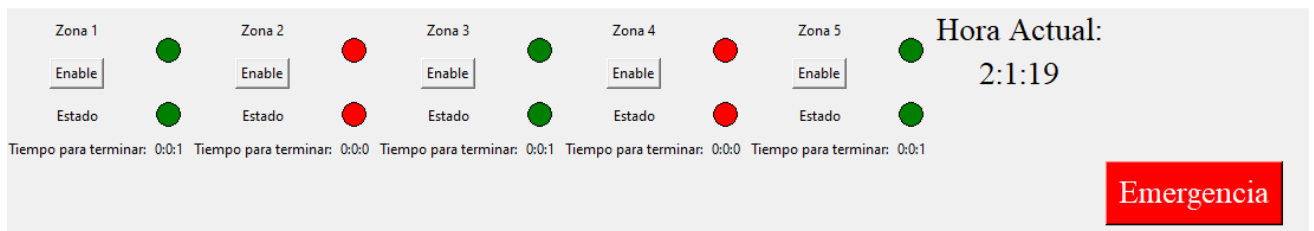


Figura 5.31. Captura de pantalla de interfaz con zonas 1, 3 y 5 activadas en medio de ciclo de riego. Realización propia.

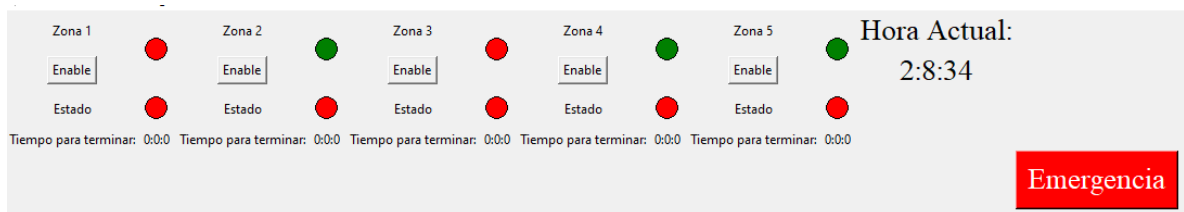


Figura 5.32. Captura de pantalla de interfaz con zonas 2, 4 y 5 activadas fuera de ciclo de riego. Realización propia

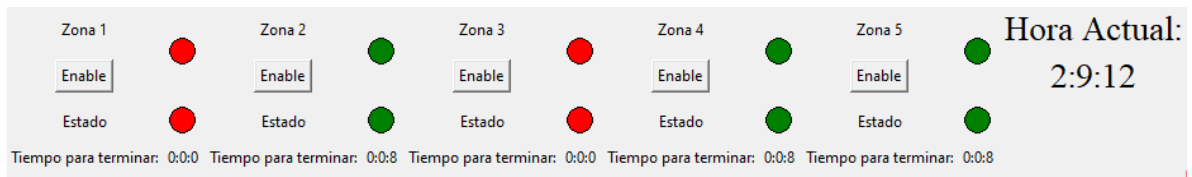


Figura 5.33. Captura de pantalla de interfaz con zonas 2, 4 y 5 activadas dentro de ciclo de riego. Realización propia.

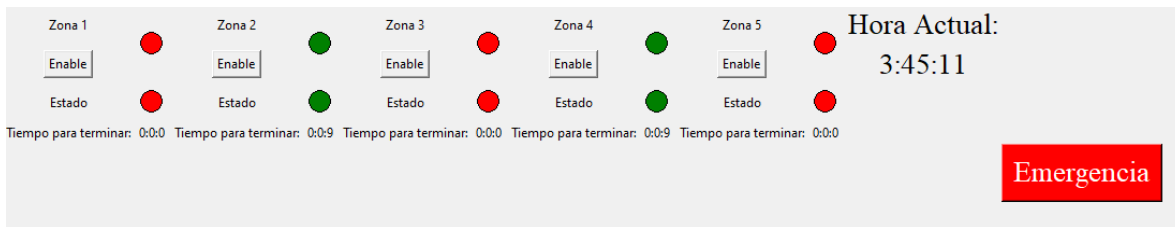


Figura 5.34. Captura de pantalla con zonas 2 y 4 activadas en medio ciclo de riego, antes de presionar el botón de emergencia. Realización propia.

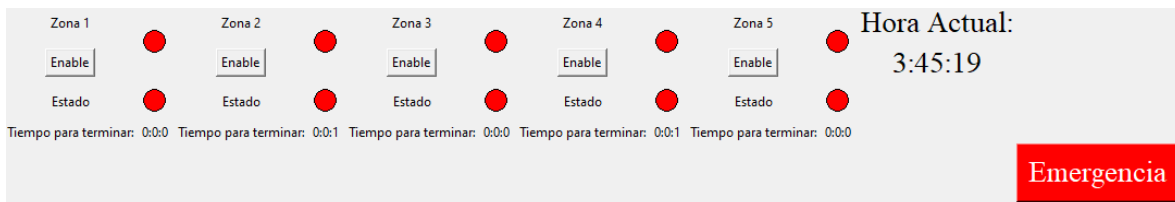


Figura 5.35. Captura de pantalla inmediatamente después de presionar el botón de emergencia.

Al probar el comportamiento del software, este se comporta de manera esperada en todas las iteraciones de las pruebas. Se puede ver que el software no hace diferencia sobre el tamaño de las zonas, por lo cual se pueden hacer tan pequeñas o tan grandes como el usuario desee, ya que para el software representan una simple señal.

Capítulo 6

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

- Se determinó que un sistema de automático de irrigación resolvería la problemática a la que se enfrenta la empresa.
- De las propuestas de diseño desarrolladas, la opción que utiliza aspersores *Rotator R33* resulta significativamente más económica, con un costo de ₡3.711.630 en comparación con el costo de la alternativa con aspersores *Big Gun*, con un costo de ₡15.701.615, por lo cual esta es la solución propuesta.
- La solución recupera su costo a partir del tercer año de uso.
- La propuesta de solución es económicamente viable.
- Es necesario aumentar la presión de la bomba e igualar los caudales para obtener riego uniforme de toda el área.
- Se diseñó un sistema de irrigación automática que puede funcionar a horas óptimas del día sin supervisión mediante la programación de un software de automatización.
- Se diseñó una interfaz para el uso de la solución propuesta que permite al cliente controlar el comportamiento del área de riego.
- Las pruebas realizadas sobre la interfaz utilizando un ciclo de riego acelerado de 10 segundos fueron exitosas a lo largo de realizar las pruebas.

- Las pruebas fueron realizadas utilizando el reloj del sistema, por lo cual adaptarlo a que funcione con la escala de tiempo real propuesta resulta sencillo, al solo tener que cambiar condicionales en el código.
- La solución propuesta es escalable, la interfaz incorpora espacio para la conexión de hasta nueve sub-áreas de riego adicionales a la que ya está programada, sin limitación sobre su tamaño de superficie.

6.2. Recomendaciones

- Se recomienda hacer caminos cortos para que el agua alcance los aspersores, para ahorrar gastos de material de tubería.
- Se puede poner menos énfasis en la uniformidad de riego a favor de utilizar menos aspersores, para ahorrar en el costo de implementación.
- Para obtener mejores resultados en el dimensionamiento de las tuberías, calcular las pérdidas locales mediante datos de fabricante en lugar de utilizar estimaciones.
- Se pueden utilizar reductores de caudal en caso de caudal excesivo en algún sector de la tubería.
- Se puede designar varios puntos de almacenamiento de agua y dividir la tubería para que diferentes segmentos sean alimentados por estas fuentes, haciendo la distancia de la entrada de agua a las salidas más uniforme y mejorando la uniformidad del riego.
- Se pueden aprovechar diferencias de altura en caso de velocidad insuficiente en algún punto de la tubería.
- De las propuestas para mejorar la uniformidad, se recomienda el uso de reductores de caudal en caso de que se desee minimizar el impacto sobre el diseño existente.
- El bajo caudal de algunos aspersores más baratos puede ser compensado con riegos más frecuentes para igualar el volumen de agua entregado por aspersores más potentes.
- La interfaz se puede cambiar para incorporar diferentes tipos de cultivos, posiblemente mediante un menú que permita al usuario elegir el tipo de

cultivo y que ajuste las horas y frecuencia de riego automáticamente según la elección.

7. Bibliografía

- [1] A. Veintimilla y R. Lalangui, Diseño de un Sistema de Riego de Pastizales para La Crianza de Ganado Vacuno en la Hacienda San Alfonso del Cantón Ponce Enríquez, Cuenca, Ecuador, 2021. Obtenido de: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/21409/1/UPS-CT009408.pdf>
- [2] Fundación Aquae, La escorrentía: un proceso clave en el ciclo del agua. Obtenido de: <https://www.fundacionaquae.org/wiki/escorrentia/>
- [3] Bach. G. Ipurre, Mejoramiento del Sistema de Riego para el Sector Llushcapampa Baja, Distrito de Cajamarca, Provincia de Cajamarca, Región Cajamarca, Lima, Perú, 2017. Obtenido de: <https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/3410/ipurre-tovar-gino-eduardo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [4] Pereira, L. & Valero, Jose & Picornell, M^a & Martin-Benito, Jose. (2010). El riego y sus tecnologías. Obtenido de: https://www.researchgate.net/publication/272171215_El_riego_y_sus_tecnologias
- [5] Fundación Aquae. Tipos de sistema de riego y sus características. Obtenido de: <https://www.fundacionaquae.org/wiki/tipos-de-riego/>
- [6] Netafim, ¿Qué es el riego por goteo? Obtenido de: <https://www.netafim.co.cr/riego-por-goteo/>
- [7] Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Riego por gravedad. Obtenido de: <https://www.mapa.gob.es/es/ministerio/servicios/informacion/plataforma-de-conocimiento-para-el-medio-rural-y-pesquero/observatorio-de-tecnologias-probadas/material-de-riego/riego-gravedad.aspx>
- [8] Gestión Ambiental, Sistema de riego por inundación. Obtenido de: <https://gestionagroambiental.com/sistema-de-riego-por-inundacion/>
- [9] F. González et al, Principios básicos del riego por superficie, 1994. Obtenido de: <http://hdl.handle.net/10261/18632>
- [10] S. Delgado, ¿En qué consiste el riego por inundación? Obtenido de: <https://prismab.com/blog/en-que-consiste-el-riego-por-inundacion/>
- [11] C. García, A. Días Robaina y M. Calgaro, Selección de bombas para riego, 2003. Obtenido de: <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2877/1/15630021107114325.pdf>
- [12] PumpsBombas, El concepto de NPSH de las bombas. Obtenido de: <https://pumpsbombas.com/tutorial-concepto-npsh-bombas/>
- [13] W. J. Villareal Lopez, Diseño de un banco para ensayos de bombas en serie y paralelo, Santiago de Cali, 2008. Obtenido de:

<https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/6191/T04198.pdf;jsessionid=C6E5619878D65E369C16121995A5D536?sequence=1>

[14] G. Martín Reina, Manual para el diseño de una red hidráulica de climatización, Tema 6: Bombas Centrífugas, 1980. Obtenido de: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/5091/fichero/6+-+BOMBAS+CENTR%C3%8DFUGAS.pdf>

[15] Bombascentrifugas.net, Tubería de Succión. Obtenido de: <https://www.bombascentrifugas.net/tuberia-de-succion/>

[16] Bombascentrifugas.net, Tipos de Impulsores para Bombas Centrífugas. Obtenido de: <https://www.bombascentrifugas.net/tipos-de-impulsores-para-bombas-centrifugas/>

[17] Agri, 5 Irrigation Solutions For Industrial Farming In Hot Climate. Obtenido de: <https://agri.com.sa/blog/5-irrigation-solutions-for-industrial-farming-in-hot-climates/>

[18] P. Osorio, C. Castro y M. Cruz, Tecnologías de riego para zonas áridas, 2021. Obtenido de: https://www.inapi.cl/docs/default-source/2021/centro-de-documentacion/informes/informe-tecnologías-de-dominio-público/informe_dp_121.pdf?sfvrsn=419c4240_0

[19] P. Silva et al, Manual de estudio y ejercicios relacionados con el contenido de agua en el suelo y su uso por los cultivos, 2015. Obtenido de: <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/130642/Manual-de-estudio-y-ejercicios-relacionados-con-el-contenido-de-agua.pdf>

[20] A. Antúnez et al, Propiedades Físico-Hídricas del Suelo en el Cultivo del Maíz Grano. Obtenido de: <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/7892/NR40309.pdf?sequence=7&isAllowed=y>

[21] Universidad de Sonora, Uso consuntivo: su determinación y aplicación. Obtenido de: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/3526/Capitulo1.pdf>

[22] Fertilab, La conductividad hidráulica y la humedad del suelo. Obtenido de: <https://www.fertilab.com.mx/Sitio/notas/NTF-19-021-La-CH-y-la-humedad-del-suelo.pdf>

[23] Prosap, Instructivo: MEDICIÓN DE LA INFILTRACIÓN EN EL SUELO MEDIANTE INFILTRÓMETROS DOBLE ANILLO. Obtenido de: http://www.prosap.gov.ar/Docs/INSTRUCTIVO%20R014_%20infiltrometro%20doble%20anillo.pdf

[24] R. Valencia et al, Diseño de un sistema de riego por aspersión para la granja experimental Valencia de la Universidad de Nariño, 1987.

[25] MSc. A. Azenkot, Irrigation Systems Design. Obtenido de: https://matc.mfa.gov.il/sites/default/files/2021-03/azenkot_a_irrigation_design.pdf

- [26] Pressurized Irrigation Techniques, Chapter 4: System Design. Obtenido de: <https://www.fao.org/3/a1336e/a1336e04.pdf>
- [27] Engineering Toolbox, PVC Pipes Schedule 40 - Friction Loss vs. Water Flow. Obtenido de: https://www.engineeringtoolbox.com/pvc-pipes-friction-loss-d_802.html
- [28] Pumps and Systems, Pump Efficiency – What is Efficiency? Obtenido de: <https://www.pumpsandsystems.com/pump-efficiency-what-efficiency>
- [29] Khandani, S. Agosto 2005, Engineering Design Process, IISME Education Transfer Plan.
- [30] SEIKA Automation, Los 5 Niveles de la Automatización Industrial. Obtenido de: <https://www.seika.com.mx/5-niveles-de-la-automatizacion-industrial/>
- [31] Brothers CR, Raspberry Pi 4, 8GB RAM. Obtenido de: <https://brotherscr.com/product/raspberry-pi-4-8gb-ram/>
- [32] cuandovisitar.com, El clima de Aranjuez y la mejor época para viajar. Obtenido de: <https://www.cuandovisitar.com.bo/costa-rica/aranjuez-1148610/>
- [33] Nelson Irrigation, Aspersores de Impacto de Círculo completo. Obtenido de: <https://nelsonirrigation.com/es/products/impact-sprinklers/full-circle-impact-sprinklers>
- [34] Hansen, Watering Grass for Optimal Growth. Obtenido de: <https://www.greensideup.com/watering-grass-optimal-growth/>
- [35] IFA, IFA's Lawn Watering Guide - The Best Time To Water Your Grass. Obtenido de: <https://grow.ifa.coop/lawn-care/lawn-watering-guide>
- [36] Sistemas de riego por goteo, microaspersión y aspersión. Diseño modular para formación de promotores en gestión del conocimiento. Obtenido de: <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/21092/BVE22098484e.pdf?sequence=1>
- [37] Rain Bird, Consejos de diseño de riego: Cálculo de pluviometría. Obtenido de: <https://www.rainbird.com/es/profesionales/consejos-de-diseno-de-riego-calculo-de-pluviometria>
- [38] Ing. L. Génova et al, Unidad 8: Riego por aspersión. Obtenido de: https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/15625/mod_resource/content/1/unidad%208%20aspersion.pdf
- [39] Nelson Irrigation, Rotator® R2000WF/R2000LP. Obtenido de: <https://nelsonirrigation.com/es/products/rotator-sprinklers/r2000wf-rotator>
- [40] Nelson Irrigation, Rotator® R33/R33LP. Obtenido de: <https://nelsonirrigation.com/es/products/rotator-sprinklers/r33-rotator>

[41] Nelson Irrigation, Soluciones BIG GUN®. Obtenido de: https://nelsonirrigation.com/library/BG_MAIN-MARCH2020_SP.pdf

[42] Ready Able, Ultimate Guide to Well Pumps. Obtenido de: <https://www.ready-able.com/ultimate-guide-to-well-pumps/>

[43] PVC Pipe Supplies, PVC and CPVC Pipe Sizes and Weights. Obtenido de: <https://pvcpipesupplies.com/pvc-cpvc-pipe-sizes-and-weights>

A. Anexo A

Código de software de automatización utilizado para pruebas (Python)

```
from tkinter import *

import math

from functools import partial

import time

import datetime

win = Tk()

#flags de enable de cada zona de riego

global flag, flag2, flag3, flag4, flag5, flag6, flag7, flag8, flag9, flag10

flag, flag2, flag3, flag4, flag5, flag6, flag7, flag8, flag9, flag10 =
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0

#estados de riego para cada zona

global stat, stat2, stat3, stat4, stat5, stat6, stat7, stat8, stat9, stat10

stat, stat2, stat3, stat4, stat5, stat6, stat7, stat8, stat9, stat10 =
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0

global currentTime

currentTime = 0

#funcion de crear circulos

def create_circle(x, y, r, canvas,var): #coordenadas de centro y el radio de
circulo, toma como entradas tambien el canvas en que dibujar y una bandera de
valor binario 'var'
```

```
x0 = x - r
y0 = y - r
x1 = x + r
y1 = y + r
if(var==True):
    return canvas.create_oval(x0, y0, x1, y1,fill='green')
else:
    return canvas.create_oval(x0, y0, x1, y1,fill='red')
```

```
win.title("Control de Área de Riego")
```

```
win.geometry("600x600")
```

```
#reloj
```

```
horaLocal = Label(win,font = 'times 20',justify = 'center',text='Hora Actual:')
```

```
horaLocal.grid(row=1,column=20)
```

```
reloj = Label(win,justify='center')
```

```
reloj.grid(row=2,column=20)
```

```
#funcion que maneja todo lo relacionado al tiempo del sistema
```

```
def clock():
```



```

global stat
global stat2
global stat3
global stat4
global stat5

t = datetime.datetime.now()

hours = str(t.hour)

minutes = str(t.minute)

seconds = str(t.second)

global currentTime

if t!=":":

    dots = ":"

    t = hours + dots + minutes + dots + seconds

    reloj.config(text=t,font='times 20')

#revision de hora para tomar acciones

#se activa riego

#if(hours == "20" and minutes == "0" and seconds == "0"):

if(seconds == "10"):

    if(flag == True):

        stat = 1

        create_circle(15,15,10,activo1,stat)

        currentTime = int(seconds)

    if(flag2 == True):

```

```

    stat2 = 1

    create_circle(15,15,10,activo2,stat2)

    currentTime = int(seconds)

if(flag3 == True):

    stat3 = 1

    create_circle(15,15,10,activo3,stat3)

    currentTime = int(seconds)

if(flag4 == True):

    stat4 = 1

    create_circle(15,15,10,activo4,stat4)

    currentTime = int(seconds)

if(flag5 == True):

    stat5 = 1

    create_circle(15,15,10,activo5,stat5)

    currentTime = int(seconds)

#elif(hours == "4" and minutes == "0" and seconds == "0"):

elif(seconds == "20"):

    if(stat == 1):

        stat = 0

        create_circle(15,15,10,activo1,stat)

        countdown1.config(text = "0:0:0")

    if(stat2 == 1):

        stat2 = 0

```

```

        create_circle(15,15,10,activo2,stat2)
        countdown2.config(text = "0:0:0")
    if(stat3 == 1):
        stat3 = 0
        create_circle(15,15,10,activo3,stat3)
        countdown3.config(text = "0:0:0")
    if(stat4 == 1):
        stat4 = 0
        create_circle(15,15,10,activo4,stat4)
        countdown4.config(text = "0:0:0")
    if(stat5 == 1):
        stat5 = 0
        create_circle(15,15,10,activo5,stat5)
        countdown5.config(text = "0:0:0")
elif(int(seconds) < 20 and int(seconds) > 10):
    if(stat == 1):
        countdown1.config(text = "0:0:" + str(10 - (int(seconds) - currentTime)))
    if(stat2 == 1):
        countdown2.config(text = "0:0:" + str(10 - (int(seconds) - currentTime)))
    if(stat3 == 1):
        countdown3.config(text = "0:0:" + str(10 - (int(seconds) - currentTime)))
    if(stat4 == 1):
        countdown4.config(text = "0:0:" + str(10 - (int(seconds) - currentTime)))

```

```
if(stat5 == 1):
    countdown5.config(text = "0:0:" + str(10 - (int(seconds) - currentTime)))

win.after(100,clock)

#cuentas regresivas para terminar el riego

countdown1 = Label(win,justify='center')
countdown1.config(text = "0:0:0")
countdown1.grid(row=6,column=3,rowspan=3)
countdown2 = Label(win,justify='center')
countdown2.config(text = "0:0:0")
countdown2.grid(row=6,column=6,rowspan=3)
countdown3 = Label(win,justify='center')
countdown3.config(text = "0:0:0")
countdown3.grid(row=6,column=9,rowspan=3)
countdown4 = Label(win,justify='center')
countdown4.config(text = "0:0:0")
countdown4.grid(row=6,column=12,rowspan=3)
countdown5 = Label(win,justify='center')
countdown5.config(text = "0:0:0")
countdown5.grid(row=6,column=15,rowspan=3)

clock()
```

```
#creacion de señales de enable

circulo1 = Canvas(win,width=30,height=30)

circulo1.grid(row=1,column=3,rowspan=2,columnspan=2)

circulo1.create_oval(5, 5, 25, 25,fill='red')

circulo2 = Canvas(win,width=30,height=30)

circulo2.grid(row=1,column=6,rowspan=2,columnspan=2)

circulo2.create_oval(5, 5, 25, 25,fill='red')

circulo3 = Canvas(win,width=30,height=30)

circulo3.grid(row=1,column=9,rowspan=2,columnspan=2)

circulo3.create_oval(5, 5, 25, 25,fill='red')

circulo4 = Canvas(win,width=30,height=30)

circulo4.grid(row=1,column=12,rowspan=2,columnspan=2)

circulo4.create_oval(5, 5, 25, 25,fill='red')

circulo5 = Canvas(win,width=30,height=30)

circulo5.grid(row=1,column=15,rowspan=2,columnspan=2)

circulo5.create_oval(5, 5, 25, 25,fill='red')

#creacion de señales de estatus

activo1 = Canvas(win,width=30,height=30)

activo1.grid(row=3,column=3,rowspan=2,columnspan=2)
```

```
activo1.create_oval(5,5,25,25,fill='red')
```

```
activo2 = Canvas(win,width=30,height=30)
```

```
activo2.grid(row=3,column=6,rowspan=2,columnspan=2)
```

```
activo2.create_oval(5,5,25,25,fill='red')
```

```
activo3 = Canvas(win,width=30,height=30)
```

```
activo3.grid(row=3,column=9,rowspan=2,columnspan=2)
```

```
activo3.create_oval(5,5,25,25,fill='red')
```

```
activo4 = Canvas(win,width=30,height=30)
```

```
activo4.grid(row=3,column=12,rowspan=2,columnspan=2)
```

```
activo4.create_oval(5,5,25,25,fill='red')
```

```
activo5 = Canvas(win,width=30,height=30)
```

```
activo5.grid(row=3,column=15,rowspan=2,columnspan=2)
```

```
activo5.create_oval(5,5,25,25,fill='red')
```

```
#funciones de invertir señal de enable
```

```
def invert_flag():
```

```
    global flag
```

```
    global stat
```

```
    if(stat == 0 and flag == 0):
```

```

    print("La zona 1 se regará en el siguiente ciclo de riego")

    flag = not flag

    create_circle(15,15,10,circulo1,flag)

elif(stat == 1 and flag ==0):

    print("La zona 1 se regará en el siguiente ciclo de riego")

    flag = not flag

    create_circle(15,15,10,circulo1,flag)

elif(stat ==1 and flag == 1):

    print("La zona 1 no se regará en el siguiente ciclo de riego")

    flag = not flag

    create_circle(15,15,10,circulo1,flag)

elif(stat == 0 and flag ==1):

    print("La zona 1 no se regará en el siguiente ciclo de riego")

    flag = not flag

    create_circle(15,15,10,circulo1,flag)

def invert_flag2():

    global flag2

    global stat2

    if(stat2 == 0 and flag2 == 0):

        print("La zona 2 se regará en el siguiente ciclo de riego")

        flag2 = not flag2

        create_circle(15,15,10,circulo2,flag2)

```

```

elif(stat2 == 1 and flag2 ==0):

    print("La zona 2 se regará en el siguiente ciclo de riego")

    flag2 = not flag2

    create_circle(15,15,10,circulo2,flag2)

elif(stat2 ==1 and flag2 == 1):

    print("La zona 2 no se regará en el siguiente ciclo de riego")

    flag2 = not flag2

    create_circle(15,15,10,circulo2,flag2)

elif(stat2 == 0 and flag2 ==1):

    print("La zona 2 no se regará en el siguiente ciclo de riego")

    flag2 = not flag2

    create_circle(15,15,10,circulo2,flag2)

```

```

def invert_flag3():

    global flag3

    global stat3

    if(stat3 == 0 and flag3 == 0):

        print("La zona 3 se regará en el siguiente ciclo de riego")

        flag3 = not flag3

        create_circle(15,15,10,circulo3,flag3)

    elif(stat3 == 1 and flag3 ==0):

        print("La zona 3 se regará en el siguiente ciclo de riego")

        flag3 = not flag3

```



```

    create_circle(15,15,10,circulo3,flag2)
elif(stat3 ==1 and flag3 == 1):
    print("La zona 3 no se regará en el siguiente ciclo de riego")
    flag3 = not flag3
    create_circle(15,15,10,circulo3,flag3)
elif(stat3 == 0 and flag3 ==1):
    print("La zona 3 no se regará en el siguiente ciclo de riego")
    flag3 = not flag3
    create_circle(15,15,10,circulo3,flag3)

def invert_flag4():
    global flag4
    global stat4
    if(stat4 == 0 and flag4 == 0):
        print("La zona 4 se regará en el siguiente ciclo de riego")
        flag4 = not flag4
        create_circle(15,15,10,circulo4,flag4)
    elif(stat4 == 1 and flag4 ==0):
        print("La zona 4 se regará en el siguiente ciclo de riego")
        flag4 = not flag4
        create_circle(15,15,10,circulo4,flag4)
    elif(stat4 ==1 and flag4 == 1):
        print("La zona 4 no se regará en el siguiente ciclo de riego")

```

```

    flag4 = not flag4

    create_circle(15,15,10,circulo4,flag4)

elif(stat4 == 0 and flag4 ==1):

    print("La zona 4 no se regará en el siguiente ciclo de riego")

    flag4 = not flag4

    create_circle(15,15,10,circulo4,flag4)

def invert_flag5():

    global flag5

    global stat5

    if(stat5 == 0 and flag5 == 0):

        print("La zona 5 se regará en el siguiente ciclo de riego")

        flag5 = not flag5

        create_circle(15,15,10,circulo5,flag5)

    elif(stat5 == 1 and flag5 ==0):

        print("La zona 5 se regará en el siguiente ciclo de riego")

        flag5 = not flag5

        create_circle(15,15,10,circulo5,flag5)

    elif(stat5 ==1 and flag5 == 1):

        print("La zona 5 no se regará en el siguiente ciclo de riego")

        flag5 = not flag5

        create_circle(15,15,10,circulo5,flag5)

    elif(stat5 == 0 and flag5 ==1):

```

```

    print("La zona 5 no se regará en el siguiente ciclo de riego")

    flag5 = not flag5

    create_circle(15,15,10,circulo5,flag5)

#funcion de boton de emergencia
def emergencia():

    global flag,flag2,flag3,flag4,flag5,stat,stat2,stat3,stat4,stat5

    flag,flag2,flag3,flag4,flag5,stat,stat2,stat3,stat4,stat5=0,0,0,0,0,0,0,0,0,0

    create_circle(15,15,10,circulo1,flag)

    create_circle(15,15,10,circulo2,flag2)

    create_circle(15,15,10,circulo3,flag3)

    create_circle(15,15,10,circulo4,flag4)

    create_circle(15,15,10,circulo5,flag5)

    create_circle(15,15,10,activo1,flag)

    create_circle(15,15,10,activo2,flag2)

    create_circle(15,15,10,activo3,flag3)

    create_circle(15,15,10,activo4,flag4)

    create_circle(15,15,10,activo5,flag5)

    countdown1.config(text = "0:0:0")

    countdown2.config(text = "0:0:0")

    countdown3.config(text = "0:0:0")

    countdown4.config(text = "0:0:0")

    countdown5.config(text = "0:0:0")

```

```
#creacion de botones
```

```
l1 = Label(win, text= "Zona 1",justify='center')
```

```
l1.grid(row=1,column=1)
```

```
b1 = Button(win,text = "Enable",command = invert_flag)
```

```
b1.grid(row=2,column=1)
```

```
l2 = Label(win, text= "Zona 2",justify='center')
```

```
l2.grid(row=1,column=5)
```

```
b2 = Button(win,text = "Enable",command = invert_flag2)
```

```
b2.grid(row=2,column=5)
```

```
l3 = Label(win, text= "Zona 3",justify='center')
```

```
l3.grid(row=1,column=8)
```

```
b3 = Button(win,text = "Enable",command = invert_flag3)
```

```
b3.grid(row=2,column=8)
```

```
l4 = Label(win, text= "Zona 4",justify='center')
```

```
l4.grid(row=1,column=11)
```

```
b4 = Button(win,text = "Enable",command = invert_flag4)
```

```
b4.grid(row=2,column=11)
```

```
l5 = Label(win, text= "Zona 5",justify='center')
```

```
l5.grid(row=1,column=14)
```

```
b5 = Button(win,text = "Enable",command = invert_flag5)
```

```
b5.grid(row=2,column=14)
```

```
#boton de emergencia
```

```
e1 = Button(win, text="Emergencia",justify='center',font='times 20', command =  
emergencia,bg = 'red',fg='white')
```

```
e1.grid(row=20,column=30)
```

```
#texto de estatus
```

```
l1 = Label(win, text= "Estado",justify='center')
```

```
l1.grid(row=3,column=1,rowspan=2)
```

```
l2 = Label(win, text= "Estado",justify='center')
```

```
l2.grid(row=3,column=5,rowspan=2)
```

```
l1 = Label(win, text= "Estado",justify='center')
```

```
l1.grid(row=3,column=8,rowspan=2)
```

```
l1 = Label(win, text= "Estado",justify='center')
```

```
l1.grid(row=3,column=11,rowspan=2)
```

```
l1 = Label(win, text= "Estado",justify='center')
```

```
l1.grid(row=3,column=14,rowspan=2)
```

```
#texto tiempo para siguiente riego
```

```
t1 = Label(win, text = "Tiempo para terminar:", justify ='center')
```

```
t1.grid(row=5,column=1,rowspan=3)
```

```
t2 = Label(win, text = "Tiempo para terminar:", justify ='center')
```

```
t2.grid(row=5,column=5,rowspan=3)
```

```
t3 = Label(win, text = "Tiempo para terminar:", justify ='center')
```

```
t3.grid(row=5,column=8,rowspan=3)
```

```
t4 = Label(win, text = "Tiempo para terminar:", justify ='center')
```

```
t4.grid(row=5,column=11,rowspan=3)
```

```
t5 = Label(win, text = "Tiempo para terminar:", justify ='center')
```

```
t5.grid(row=5,column=14,rowspan=3)
```

```
#correr ventana
```

```
win.mainloop()
```

B. Anexo B

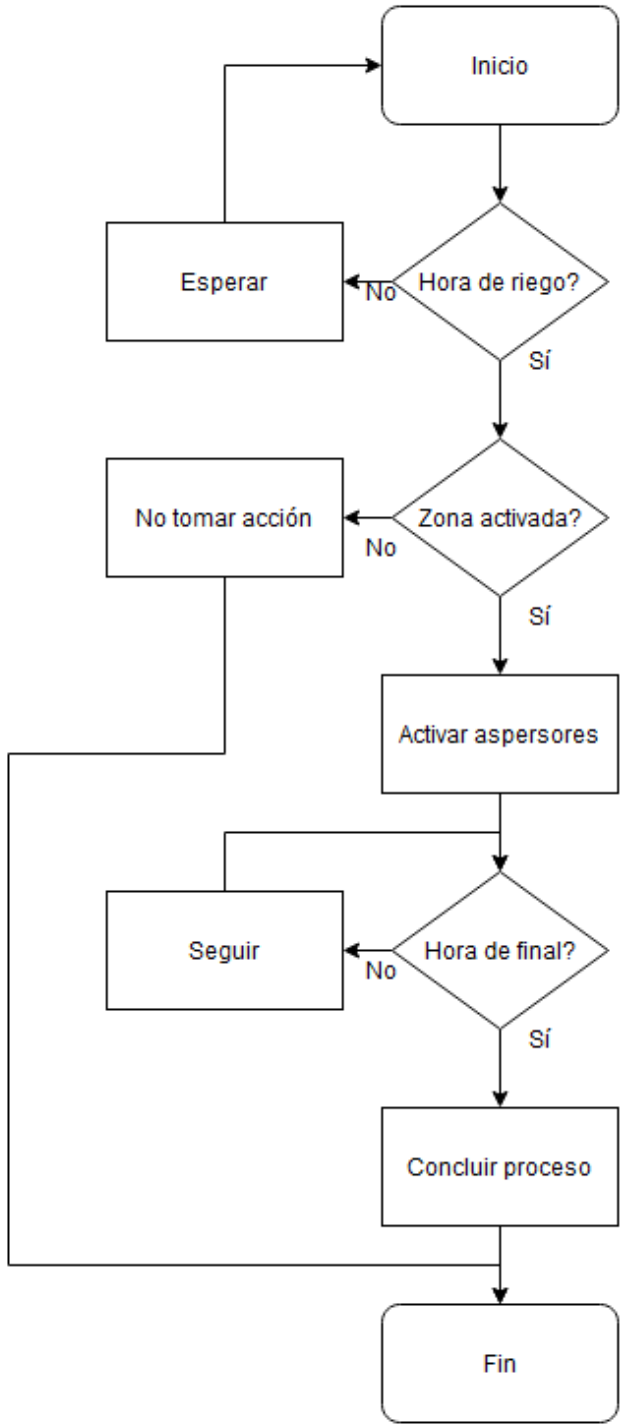


Figura B.1. Diagrama de flujo software de automatización modificado para una zona de riego individual. Realización propia.

C. Anexo C

Tabla C.1. Estimación de consumo de electricidad para propuesta de solución con aspersores *Rotator R33*. Realización propia. Datos de consumo de CNFL.

Ítem	Horas por día	Horas por año	Potencia (kW)	Consumo (kWh)	Costo (₡/kW)	Costo total (₡)
Bomba	6	936	3,04	2845,44	27,22	77452,88
Computadora	24	8760	0,0051	44,767	158,67	7103,18
Total						84556,06

Cargo por energía Costo de cada kWh
Consumo de 0 a 500 kWh
Periodo
De Punta: De 10:00 a 12:30 y de 17:30 a 20:00
Bloque de 0-500 cada kWh ₡ 158,67
Valle: De 6:01 a 10:00 y de 12:30 a 17:30
Bloque de 0-500 cada kWh ₡ 65,05
Nocturno: De 20:00 a 6:00
Bloque de 0-500 cada kWh ₡ 27,22

Figura C.1. Datos de CNFL sobre cargo por consumo de energía.

Raspberry Pi 4 B

Pi State	Power Consumption
Idle	540 mA (2.7 W)
ab -n 100 -c 10 (uncached)	1010 mA (5.1 W)
400% CPU load (stress --cpu 4)	1280 mA (6.4 W)

Figura C.2. Datos de consumo de energía de Raspberry Pi.

D. Anexo D

Datos de pérdidas por fricción cada 100 m para varios tamaños de tubos PVC (datos métricos en azul). Datos obtenidos de Engineering Toolbox.

PVC Pipes Schedule 40 - Friction Loss - 1/2"				
Volume Flow (gal/min) <small>(l/s)</small>	Volume Flow (gal/hr)	Velocity (ft/sec)	Friction Head (ft _{H₂O} /100 ft) <small>(kPa/100 m)</small>	Friction Loss (psi/100 ft)
1 0.0631	60	1.1	2.1 20.6	0.9
2 0.126	120	2.3	4.2 41.1	1.8
5 0.315	300	5.6	23.4 229	10.5
7 0.442	420	7.9	43.1 422	18.6
10 0.631	600	11.3	82.0 803	35.5

Figura D.1. Datos para tubería de 0,5".

PVC Pipes Schedule 40 - Friction Loss - 3/4"				
Volume Flow (gal/min)	Volume Flow (gal/hr)	Velocity (ft/sec)	Friction Head (ft/100 ft)	Friction Loss (psi/100 ft)
1 0.0631	60	0.6	0.5 4.9	0.2
2 0.126	120	1.3	1.0 9.79	0.4
5 0.315	300	3.2	5.7 55.8	2.5
7 0.442	420	4.4	10.5 103	4.6
10 0.631	600	6.3	20.0 196	8.7
15 0.946	900	9.5	42.5 416	18.4
20 1.26	1200	12.7	72.3 708	31.3

Figura D.2. Datos para tubería de 0,75".

PVC Pipes Schedule 40 - Friction Loss - 1"				
Volume Flow (gal/min)	Volume Flow (gal/hr)	Velocity (ft/sec)	Friction Head (ft/100 ft)	Friction Loss (psi/100 ft)
2 0.126	120	0.8	0.6 5.88	0.2
5 0.315	300	1.9	1.7 16.6	0.8
7 0.442	420	2.7	3.2 31.3	1.4
10 0.631	600	3.9	6.0 58.8	2.6
15 0.946	900	5.8	12.8 125	5.5
20 1.26	1200	7.7	21.8 214	9.4
25 1.58	1500	9.7	32.9 322	14.2
30 1.89	1800	11.6	46.1 452	20.0

Figura D.3. Datos para tubería de 1"

PVC Pipes Schedule 40 - Friction Loss - 1 1/4"				
Volume Flow (gal/min)	Volume Flow (gal/hr)	Velocity (ft/sec)	Friction Head (ft/100 ft)	Friction Loss (psi/100 ft)
2 0.126	120	0.4	0.1 0.979	0.1
5 0.315	300	1.1	0.4 3.92	0.2
7 0.442	420	1.6	0.8 7.84	0.4
10 0.631	600	2.2	1.6 15.7	0.7
15 0.946	900	3.3	3.3 32.3	1.4
20 1.26	1200	4.4	5.6 54.8	2.4
25 1.58	1500	5.5	8.5 83.2	3.7
30 1.89	1800	6.6	11.9 117	5.1
35 2.21	2100	7.7	15.8 155	6.8
40 2.52	2400	8.8	20.2 198	8.7
45 2.84	2700	9.9	25.1 246	10.9
50 3.15	3000	11.1	30.5 299	13.2

Figura D.4. Datos para tubería de 1,25".

PVC Pipes Schedule 40 - Friction Loss - 1 1/2"				
Volume Flow (gal/min)	Volume Flow (gal/hr)	Velocity (ft/sec)	Friction Head (ft/100 ft)	Friction Loss (psi/100 ft)
2 0.126	120	0.3	0.1 0.979	0.03
5 0.315	300	0.8	0.2 1.96	0.1
7 0.442	420	1.1	0.4 3.92	0.2
10 0.631	600	1.6	0.7 6.86	0.3
15 0.946	900	2.4	1.5 14.7	0.7
20 1.26	1200	3.2	2.6 25.5	1.1
25 1.58	1500	4.0	4.0 39.2	1.7
30 1.89	1800	4.9	5.5 53.9	2.4
35 2.21	2100	5.7	7.4 72.5	3.2
40 2.52	2400	6.5	9.4 92.1	4.1
45 2.84	2700	7.3	11.7 115	5.1
50 3.15	3000	8.1	14.3 140	6.2
60 3.79	3600	9.7	20.0 196	8.7

Figura D.5. Datos para tubería de 1,5”.

PVC Pipes Schedule 40 - Friction Loss - 2"				
Volume Flow (gal/min)	Volume Flow (gal/hr)	Velocity (ft/sec)	Friction Head (ft/100 ft)	Friction Loss (psi/100 ft)
5 0.315	300	0.5	0.07 0.686	0.03
7 0.442	420	0.7	0.1 0.979	0.05
10 0.631	600	1.0	0.2 1.96	0.09
15 0.946	900	1.5	0.5 4.9	0.2
20 1.26	1200	2.0	0.8 7.84	0.3
25 1.58	1500	2.4	1.2 11.8	0.5
30 1.89	1800	2.9	1.6 15.7	0.7
35 2.21	2100	3.4	2.2 21.5	0.9
40 2.52	2400	3.9	2.8 27.4	1.2
45 2.84	2700	4.4	3.4 33.3	1.5
50 3.15	3000	4.9	4.2 41.1	1.8
60 3.79	3600	5.9	5.8 56.8	2.5
70 4.42	4200	6.8	7.8 76.4	3.4
75 4.73	4500	7.3	8.8 86.2	3.8
80 5.05	4800	7.8	9.9 97	4.3
90 5.68	5400	8.8	12.4 121	5.4
100 6.31	6000	9.8	15.0 147	6.5

Figura D.6. Datos para tubería de 2".

PVC Pipes Schedule 40 - Friction Loss - 2 1/2"				
Volume Flow (gal/min)	Volume Flow (gal/hr)	Velocity (ft/sec)	Friction Head (ft/100 ft)	Friction Loss (psi/100 ft)
5 0.315	300	0.3	0.04 0.392	0.02
7 0.442	420	0.5	0.05 0.49	0.02
10 0.631	600	0.7	0.1 0.979	0.04
15 0.946	900	1.0	0.2 1.96	0.08
20 1.26	1200	1.4	0.3 2.94	0.1
25 1.58	1500	1.7	0.5 4.9	0.2
30 1.89	1800	2.1	0.7 6.86	0.3
35 2.21	2100	2.4	0.9 8.81	0.4
40 2.52	2400	2.7	1.2 11.8	0.5
45 2.84	2700	3.1	1.4 13.7	0.6
50 3.15	3000	3.4	1.8 17.6	0.8
60 3.79	3600	4.1	2.5 24.5	1.1
70 4.42	4200	4.8	3.3 32.3	1.4
75 4.73	4500	5.1	3.7 36.2	1.6
80 5.05	4800	5.5	4.2 41.1	1.8
90 5.68	5400	6.2	5.2 50.9	2.3
100 6.31	6000	6.8	6.3 61.7	2.7
125 7.89	7500	8.6	9.6 94	4.2
150 9.46	9000	10.3	13.4 131	5.8

Figura D.7. Datos para tubería de 2,5".

E. Anexo E

Datos de aspersores *Big Gun* Serie 75 y Serie 100. Datos de fabricante.

75 SERIES

■ TAPER RING NOZZLE: 24° Trajectory

Pressure BAR	0.40 in 10.2 mm		0.45 in 11.4 mm		0.50 in 12.7 mm		0.55 in 14.0 mm		0.60 in 15.2 mm		0.65 in 16.5 mm		0.70 in 17.8 mm		0.75 in 19.1 mm	
	m³/hr	Rad. (m)	m³/hr	Rad. (m)	m³/hr	Rad. (m)	m³/hr	Rad. (m)	m³/hr	Rad. (m)	m³/hr	Rad. (m)	m³/hr	Rad. (m)	m³/hr	Rad. (m)
1.75	-	-	-	-	-	-	9.5	22.5	11.5	24.0	13.4	25.0	15.7	26.0	18.2	27.0
2.0	-	-	-	-	8.3	24.0	10.2	24.0	12.2	25.0	14.4	26.5	16.8	27.5	19.3	28.5
2.5	-	-	7.5	24.0	9.3	25.5	11.4	26.0	13.7	27.5	16.0	28.5	18.7	29.5	21.5	31.0
3.0	6.4	23.5	8.2	25.0	10.2	27.0	12.4	28.0	14.9	29.5	17.6	31.0	20.4	32.0	23.4	33.0
3.5	6.9	24.5	8.9	26.5	11.0	28.5	13.4	30.0	16.1	31.5	19.0	33.0	22.0	34.0	25.2	35.5
4.0	7.4	25.5	9.5	27.5	11.8	30.0	14.3	31.5	17.2	33.0	20.3	34.5	23.4	36.0	26.8	37.0
4.5	7.9	26.5	10.0	29.0	12.5	31.5	15.2	33.0	18.2	34.5	21.5	36.0	24.8	37.5	28.3	39.0
5.0	8.3	27.0	10.5	30.0	13.2	32.5	16.0	34.5	19.2	36.0	22.7	37.5	26.1	39.0	29.8	40.5
5.5	8.8	27.5	11.0	31.5	13.8	34.0	16.8	35.5	20.1	37.0	23.8	39.0	27.3	40.5	31.2	41.5

Figura E.1. Datos para serie 75.

100 SERIES

■ TAPER BORE NOZZLE: 24° Trajectory

Pressure BAR	0.50 in 12.7 mm		0.55 in 14.0 mm		0.60 in 15.2 mm		0.65 in 16.5 mm		0.70 in 17.8 mm		0.75 in 19.1 mm		0.80 in 20.3 mm		0.85 in 21.6 mm	
	m³/hr	Rad. (m)	m³/hr	Rad. (m)	m³/hr	Rad. (m)	m³/hr	Rad. (m)	m³/hr	Rad. (m)	m³/hr	Rad. (m)	m³/hr	Rad. (m)	m³/hr	Rad. (m)
2.75	10.4	29.5	13.0	31.0	14.9	32.5	17.7	34.0	20.5	35.0	23.3	36.5	26.6	38.0	30.4	39.0
3.0	10.8	30.0	13.5	31.5	15.6	33.0	18.5	34.5	21.4	36.0	24.4	37.5	27.7	39.0	31.7	40.0
3.5	11.7	31.0	14.5	33.0	16.9	34.5	20.0	36.0	23.1	37.5	26.3	39.0	30.0	40.5	34.3	42.0
4.0	12.5	32.5	15.5	34.0	18.1	36.0	21.3	37.5	24.7	39.0	28.2	40.5	32.0	42.5	36.6	43.5
4.5	13.2	33.5	16.3	35.5	19.3	37.0	22.6	39.0	26.2	40.5	29.9	42.0	34.0	44.0	38.9	45.0
5.0	13.9	34.5	17.1	36.5	20.3	38.5	23.8	40.5	27.6	42.0	31.5	43.5	35.8	45.0	41.0	46.5
5.5	14.6	36.0	17.9	38.0	21.4	39.5	25.0	41.5	29.0	43.5	33.1	45.0	37.5	46.5	43.0	48.0
6.0	15.2	37.0	18.7	39.0	22.3	41.0	26.1	43.0	30.3	44.5	34.5	46.0	39.2	47.5	44.9	49.0
6.5	15.8	38.0	19.4	40.0	23.3	42.0	27.2	44.0	31.5	46.0	36.0	47.5	40.8	49.0	46.7	50.5
7.0	16.4	39.0	20.0	41.0	24.2	43.0	28.2	45.0	32.7	47.0	37.3	48.5	42.3	50.0	48.4	51.5
7.5	17.0	40.0	20.7	42.0	25.1	44.0	29.2	46.0	33.8	47.5	38.6	49.5	43.8	51.0	50.1	52.5

Figura E.2. Datos para serie 100.

F. Anexo F

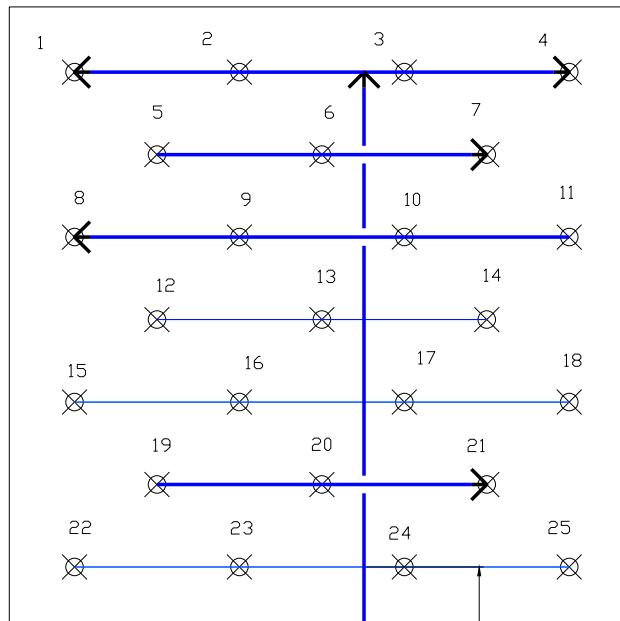
Datos de aspersores *Rotator R33*. Datos de fabricante.

Plato	Boquilla		Presión en Bares											
			1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5				
dorado 18	3,6 mm	LPH	659	703	745	786	825	862	897	931				
		RAD	11,0	11,5	11,9	12,3	12,8 13,4	12,8 13,6	12,9 13,7	13,0 13,7				
marrón 20	4,0 mm	LPH	805	859	911	961	1009	1054	1099	1143				
		RAD	11,6	12,1	12,5	12,9	13,1 14,0	13,2 14,2	13,3 14,5	13,5 14,6				
gris 22	4,4 mm	LPH	970	1036	1099	1160	1218	1272	1325	1375				
		RAD	11,9	12,4	13,1	13,4	13,4 14,6	13,4 14,8	13,4 15,1	13,5 15,2				
verde 24	4,8 mm	LPH	1144	1227	1304	1378	1447	1513	1577	1639				
		RAD	12,5	13,0	13,4	13,8	14,0 14,9	14,0 15,2	14,0 15,4	14,1 15,5				
granate 26	5,2 mm	LPH	1350	1449	1542	1630	1712	1786	1860	1935				
		RAD	13,0	13,6	13,6	13,8	14,0 -	14,3 -	14,3 -	14,3 -				

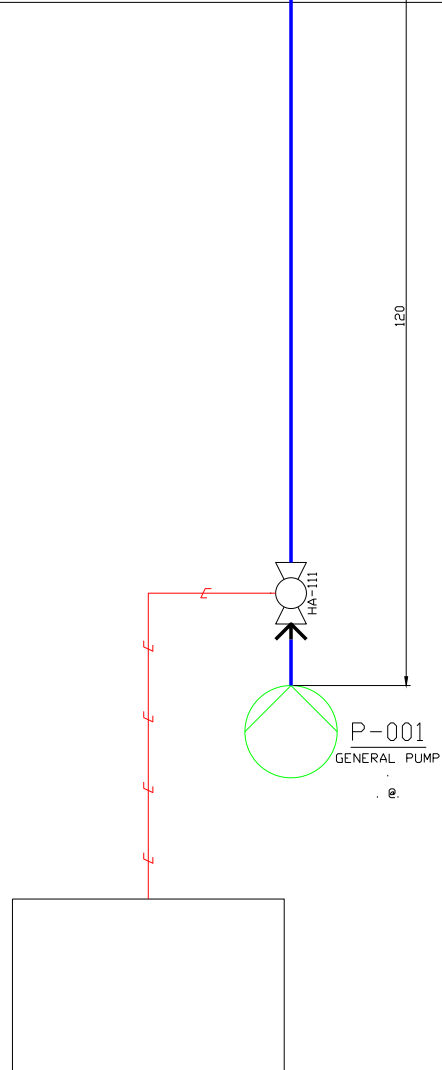
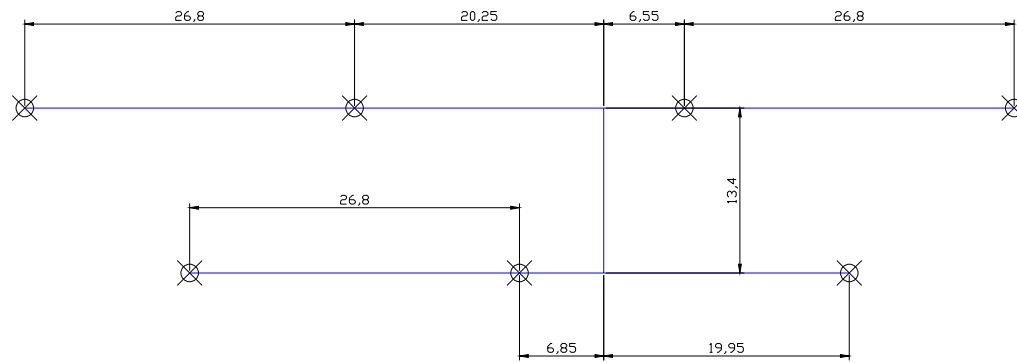
Figura F.1. Datos de *Rotator R33*.

G. Anexo G

Diagrama físico de solución. Realización propia en AutoCAD Plant 3D.



Dimensiones de laterales:



General Notes

Dimensiones en metros
 No a escala
 Aspersor: ☒
 Aspersores Rotator R33 de Nelson Irrigation
 Accesorios de aspersores:
 Plato gris 22
 Boquilla 4,4 mm
 Espacio entre laterales es constante 13,4 m
 Accesorios de tubería>
 1 válvula solenoide
 25 aspersores
 14 hombros 90°
 12 conexiones T
 6 conexiones cuatro sentidos
 Para principal: PVC 2,5"
 Laterales de 3 aspersores: PVC 1"
 Laterales de 4 aspersores: 1,25"

→ Tubería
 - - Señal eléctrica

No.	Revision/Issue	Date

Drawing Name
 Diagrama Físico de Sistema de Irrigación

Project Name and Address
 Sistema de Irrigación Automático

Area N/A	Stamp
Drawing Number #1	
Author G. Madrigal	