

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**ANÁLISIS DEL DESGASTE ACELERADO DE UN SISTEMA DE RIEGO
POR GOTEO MEDIANTE SIMULACIÓN FLUIDODINÁMICA
COMPUTACIONAL EN UN HUERTO DE FRUTALES MAYORES YA
ESTABLECIDO**

PABLO ESTEBAN GUTIÉRREZ SEPÚLVEDA

PROYECTO DE TÍTULO PRESENTADO A
LA FACULTAD DE INGENIERÍA
AGRÍCOLA DE LA UNIVERSIDAD DE
CONCEPCIÓN, PARA OPTAR AL TÍTULO
DE INGENIERO CIVIL AGRÍCOLA

CHILLÁN – CHILE

2021

**ANÁLISIS DEL DESGASTE ACELERADO DE UN SISTEMA DE RIEGO
POR GOTEO MEDIANTE SIMULACIÓN FLUIDODINÁMICA
COMPUTACIONAL EN UN HUERTO DE FRUTALES MAYORES YA
ESTABLECIDO**

Aprobado por:

Rudi Radrigán Ewoldt
Ingeniero Agroindustrial, Dr.
Director CDTA – UDEC

Profesor Guía

Jerónimo Paredes Cáceres
Licenciado en Matemática, Dr.
Profesor Asociado

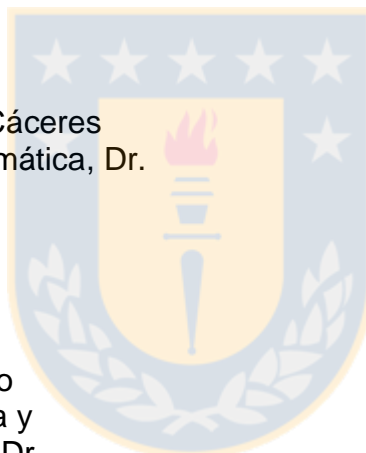
Profesor Asesor

Christian Folch Cano
Profesor de Química y
Ciencias Naturales, Dr.
Profesor Asistente

Director Departamento

María Eugenia González Rodríguez
Ingeniero Agrónomo, PhD.
Profesor Asociado

Decana



DEDICATORIA

A mis padres Juana y Pedro, por el apoyo constante, el amor y la entrega durante mi vida, y por sobre todo, en estos años de estudio, a mi hermano Andrés, por acompañarme en mi camino personal y estudiantil, por secundar en las noches de la elaboración de esta tesis, los adoro.

A Tamara por su constante apoyo, que, aún en tiempos difíciles, estuviste para mí y por darme al amor de mi vida, a nuestra hija Maite Isidora que llegó a alegrarnos la vida, las amo.

A mi hermana del alma, Constanza Quijada, por su interminable apoyo en sus años por la universidad y por aún acompañarme desde el cielo, te quiero.

A mis profesores y amigos, Don Rudi y Don Cesar, por su apoyo, ayuda, consejos y principalmente por la paciencia, tanto a nivel personal como estudiantil, por ser un gran pilar en mi paso por la universidad.

A Walter, Joaquín, Ricardo y Carlos, por su interminable sed de conocimiento, por animar el camino y por el apoyo mutuo en todo momento en esta etapa universitaria, los quiero.

A Sergio y Diego, mis amigos que supieron brindarme un gran apoyo para forjarme como persona y como profesional, en las buenas y en las malas.

ÍNDICE DE MATERIAS

	Página
RESUMEN.....	1
SUMMARY.....	3
1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. OBJETIVOS.....	8
2.1. Objetivo general.....	8
2.2. Objetivos específicos.....	8
3. ANTECEDENTES GENERALES.....	9
3.1. Supuestos.....	9
3.2. Diseño del sistema hidráulico.....	10
3.2.1. Número de Reynolds.....	11
3.2.2. Ecuación de Bernoulli.....	13
3.2.3. Pérdidas de carga.....	14
3.3. Dinámica de fluido computacional.....	20
3.3.1. ANSYS.....	21
3.3.2. Ecuaciones numéricas de simulación.....	23
3.3.3. Modelos de turbulencia.....	26
3.3.3.1. Modelo $k - \epsilon$	28
4. METODOLOGÍA.....	30
4.1. Limitaciones.....	30
4.2. Área de estudio.....	30

4.3. Curvas de nivel.....	32
4.4. Sistema de riego por goteo.....	33
4.5. Puntos críticos del sistema de riego.....	36
4.6. Simulación de puntos críticos.....	38
4.6.1. Geometría.....	40
4.6.2. Mallado.....	40
4.6.3. Configuración.....	41
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	46
5.1. Resultados previos.....	46
5.2. Análisis de simulación de puntos críticos.....	55
5.3. Sistema de riego propuesto.....	66
5.4. Simulación de solución propuesta.....	68
6. CONCLUSIONES.....	79
7. LITERATURA CITADA.....	82
8. ANEXO.....	87
9. APÉNDICE.....	91

ÍNDICE DE TABLAS

En el texto	Página
Tabla 1. Rango deseable de algunos elementos en el agua de riego.....	10
Tabla 2. Coeficiente adimensional de resistencia dependiente de cada pieza que lo produzca.....	15
Tabla 3. Evapotranspiración de referencia (ET_o) mensual de la estación agrometeorológica Copihue, Retiro.....	20
Tabla 4. Ubicación de cada predio, superficie total y plantada.....	30
Tabla 5. Tuberías y accesorios de diferentes diámetros exteriores (D_{ext}) del sistema de riego por goteo actual.....	31
Tabla 6. Altura manométrica a la entrada de cada partidor (P_2/γ) y presión mínima requerida a la entrada de cada lateral (H_c) por sector de riego	48
Tabla 7. Diseño agronómico del sistema de riego.....	49
Tabla 8. Diseño hidráulico del sistema de riego.....	50
Tabla 9. Condiciones de evaluación para la elección de bomba del sistema de riego.....	50
Tabla 10. Presión de entrada (P_{in}) al partidor y presión mínima requerida a la entrada de cada lateral (P_s) para las condiciones de borde en cada sector, 11 y 12 (M1), 15 y 16 (M2) y, 17 y 18 (M3).....	55
Tabla 11. Presión (P_{fi}) y velocidad (V_{fi}) de flujo con una llave de paso abierta en cada modelo.....	59
Tabla 12. Presión de entrada (P_{in}) y salida (P_{s1} y P_{s2}) con ambas llaves de paso abiertas para las condiciones de borde en cada modelo.....	61
Tabla 13. Presión (P_{fi}) y velocidad (V_{fi}) de flujo con ambas llaves de paso abiertas en cada modelo.....	65

Tabla 14.	Presión de entrada (P_{in}) al partidor y presión mínima requerida a la entrada de cada lateral (P_s) con un nuevo caudal para las condiciones de borde en cada sector, 11 y 12 (M1), 15 y 16 (M2) y, 17 y 18 (M3).....	68
Tabla 15.	Presión (P_{fi}) y velocidad (V_{fi}) de flujo con ambas llaves de paso abiertas y un nuevo caudal en cada modelo.....	71
Tabla 16.	Presión (P_{fi}) y velocidad (V_{fi}) de flujo con ambas llaves de paso abiertas, un nuevo caudal y M2 en reemplazo de cada modelo.....	71
Tabla 17.	Presión (P_{fi}) y velocidad (V_{fi}) de flujo con ambas llaves de paso abiertas, M2 en reemplazo de cada modelo y cambio de accesorios en el modelo, para un caudal inicial (300 L min^{-1}) y un nuevo caudal ($246,9 \text{ L min}^{-1}$).....	74



ÍNDICE DE FIGURAS

En el texto	Página
Figura 1. Área de estudio, Huertos El Castaño y La Loma.....	31
Figura 2. Sistema de riego por goteo actual, Huertos El Castaño y La Loma.....	32
Figura 3. Altimetría en los huertos El Castaño y La Loma.....	33
Figura 4. Boceto del corte transversal del terreno y ubicación de la bomba de riego.....	35
Figura 5. Comportamiento del flujo circulante en: a) Reducción brusca del diámetro y b) Reducción gradual del diámetro...	40
Figura 6. Mallado del volumen del fluido (a) en la tubería y mallado del dominio (b) para una válvula.....	41
Figura 7. Configuración para la edición de propiedades.....	42
Figura 8. Modelos disponibles para la resolución de problemas.....	43
Figura 9. Descripción del modelo basado en resolución $k - \epsilon$	44
Figura 10. Materiales que influyen en la simulación para fluido y solido.....	45
Figura 11. Método de solución para la relación presión – velocidad.....	45
Figura 12. Cuarteles en los predios El Castaño (rojo) y La Loma (azul)	46
Figura 13. Sectores de riego en los predios El Castaño (a) y La Loma (b).....	47
Figura 14. Partidores presentes en el huerto, modelos en ANSYS Fluent para los sectores 11 – 12 (a), 15 – 16 (b) y 17 – 18 (c).....	52
Figura 15. Opción “Inflation” de mallado para formación del objeto en estudio a la entrada del sector.....	53
Figura 16. Opción “Sizing” de mallado para formación del objeto en estudio, a la entrada del sector.....	53

Figura 17.	Mallado Modelo 2.....	54
Figura 18.	Presión del fluido para M1 (a), M2 (b) y M3 (c) con una llave de paso abierta.....	56
Figura 19.	Velocidad del flujo para M1 (a), M2 (b) y M3 (c) con una llave de paso abierta.....	58
Figura 20.	Cizalle en el pvc en M1 (a), M2 (b) y M3 (c) con una llave de paso abierta.....	60
Figura 21.	Presión del fluido sobre la pared del PVC para M1 (a), M2 (b) y M3 (c) con las dos llaves de paso abiertas.....	62
Figura 22.	Velocidad del fluido para M1 (a), M2 (b) y M3 (c) con las dos llaves de paso abiertas.....	64
Figura 23.	Presión en M1 (a), M2 (b) y M3 (c) con las dos llaves de paso abiertas y un nuevo caudal.....	70
Figura 24.	Presión en M2 como reemplazo de M1 (a), M2 (b) y M3 (c) con las dos llaves de paso abiertas y un nuevo caudal.....	72
Figura 25.	Velocidad en M2 como reemplazo de M1 (a), M2 (b) y M3 (c) con las dos llaves de paso abiertas y un nuevo caudal...	73
Figura 26.	Velocidad en M2 con las dos llaves de paso abiertas, nuevos accesorios, con un caudal inicial (a) y un nuevo caudal (b).....	74
Figura 27.	Cizalle en M2 con las dos llaves de paso abiertas, nuevos accesorios, con un caudal inicial (a) y un nuevo caudal (b)	75
Figura 28.	Modelo 1 (a), modelo 2 (b) y modelo 3 (c) simulados en ANSYS Fluent (de forma interna).....	76
Figura 29.	Desgaste acelerado en el modelo 1, fractura de la tubería a la entrada del partidador (p) y reforzamiento a llave de paso por fisura en el accesorio (q).....	77

En el Anexo		Página
Figura 30.	Curvas y datos de prestaciones de bomba sumergible Pedrollo siendo el modelo 4SR12m/14-N la bomba actual..	87
Figura 31.	Curvas y datos de prestaciones de bomba sumergible Pedrollo siendo el modelo 4SR10m/16-N la bomba actual..	88
Figura 32.	Planilla de cálculo para anteproyecto de riego tecnificado por goteo.....	89
Figura 33.	Criterios de cumplimiento para la estimación según visión del proyectista para el riego por goteo.....	90
En el Apéndice		Página
Figura 34.	Desnivel presente en el predio, sector 14.....	91
Figura 35.	Desnivel presente en el predio, sector 1 y 4.....	91
Figura 36.	Desnivel presente en el predio, pradera natural.....	92
Figura 37.	Desnivel presente en el predio, sector 17.....	92
Figura 38.	Desnivel presente en el predio, sector 11 y 12.....	93
Figura 39.	Desnivel presente en el predio, sector 10, 2, 3, 5 y 6 (fondo).....	93

ÍNDICE DE ECUACIONES

		Página
Ecuación 1.	Número de Reynolds (Re).....	11
Ecuación 2.	Factor de fricción mediante Colebrook – White.....	12
Ecuación 3.	Factor de fricción mediante Diagrama de Moody de forma computacional.....	13
Ecuación 4.	X: Factor condicionante para la obtención de f	13
Ecuación 5.	Y: Factor condicionante para la obtención de f	13
Ecuación 6.	Ecuación de Bernoulli.....	14
Ecuación 7.	Pérdidas de carga lineales.....	14
Ecuación 8.	Pérdidas de carga singulares.....	15
Ecuación 9.	Ecuación de Bernoulli; inclusión de pérdidas por succión y presión añadida por la bomba del sistema.....	16
Ecuación 10.	Coeficiente de Christiansen.....	16
Ecuación 11.	Pérdidas por conexión.....	16
Ecuación 12.	Pérdidas por fricción en lateral.....	17
Ecuación 13.	Pérdidas por fricción en lateral corregido por la conexión de emisor.....	17
Ecuación 14.	Pérdidas de carga a la entrada del lateral.....	17
Ecuación 15.	Pérdidas de carga totales.....	19
Ecuación 16.	Evapotranspiración de cultivo.....	20
Ecuación 17.	Teorema de Bernoulli de forma energética.....	25
Ecuación 18.	Derivación de ecuación de transporte, energía cinética de turbulencia (k).....	29

Ecuación 19.	Derivación de ecuación de transporte, tasa de disipación de turbulencia (ε).....	29
Ecuación 20.	Viscosidad turbulenta.....	29



**ANÁLISIS DEL DESGASTE ACELERADO DE UN SISTEMA DE RIEGO
POR GOTEO MEDIANTE SIMULACIÓN FLUIDODINÁMICA
COMPUTACIONAL EN UN HUERTO DE FRUTALES MAYORES YA
ESTABLECIDO**

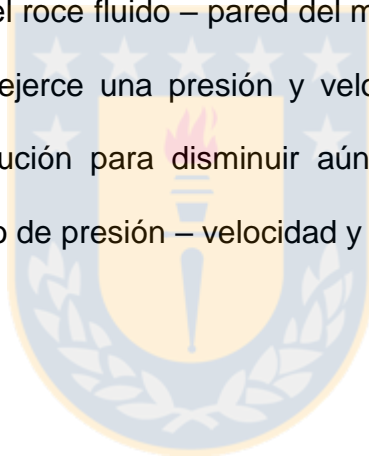
**ANALYSIS OF ACCELERATED WEAR OF A DRIP IRRIGATION SYSTEM
USING COMPUTATIONAL FLUIDDYNAMIC SIMULATION IN AN ALREADY
ESTABLISHED SENIOR FRUIT ORCHARD**

Palabras claves: Puntos críticos, flujo turbulento, ANSYS Fluent, relación velocidad – presión, roce fluido – pared.

RESUMEN

La evaluación del sistema de riego por goteo en un predio con cultivos ya establecidos desde un punto de vista energético, permitió determinar las zonas en donde se producirá un desgaste acelerado en secciones de la matriz principal, (estas degradaciones pueden llamarse puntos críticos del sistema), identificando en éste, tres partidores diferentes de paso de agua para simular dadas las condiciones del mismo, las que se componen de una entrada, accesorios y dos salidas que alimentan a un sector diferente cada una, los cuales ya existen en el huerto y permite el riego en el predio, para entender el comportamiento del flujo de fluidos, es necesario identificar el tipo de flujo que se mueve y el régimen que lo gobierna, que para este proyecto, corresponde a un flujo turbulento de régimen permanente en los modelos presentados. ANSYS Fluent como herramienta computacional, permite la simulación de fluidos de forma dinámica, vale decir, estudiar el comportamiento de una

partícula en movimiento en el flujo (Método de Lagrange), que, con el fin de conocer las zonas más afectadas de cada modelo, se genera una relación velocidad – presión, por lo que es necesaria la integración de métodos de simulación de flujos turbulentos, basados en aproximaciones como el promedio de Reynolds en las ecuaciones de Navier – Stokes (RANS), originando modelos como $k - \varepsilon$, el cual evalúa la energía cinética del sistema y la tasa de disipación en el flujo turbulento. La combinación de estas variables, dan origen a la viscosidad turbulenta que muestra de forma teórica las zonas más afectadas por el roce fluido – pared del modelo que sobresalga del resto (siendo aquel que ejerce una presión y velocidad mayor que los demás), generando una solución para disminuir aún más el cizalle en el interior, evaluando el cambio de presión – velocidad y de piezas secundarias en éste.



ANALYSIS OF ACCELERATED WEAR OF A DRIP IRRIGATION SYSTEM USING COMPUTATIONAL FLUIDDYNAMIC SIMULATION IN AN ALREADY ESTABLISHED SENIOR FRUIT ORCHARD

Keywords: Critical zones, turbulent flux, ANSYS Fluent, speed - pressure relationship, fluid friction – wall.

SUMMARY

The evaluation of the drip irrigation system in a property with crops already established from an energy point of view, allowed to determine the areas where there will be an accelerated wear in sections of the main matrix, (these degradations can be called critical zones of the system), identifying in this one, three different partitions of water passage to simulate given the conditions of the same one, which are composed of an inlet, accessories and two outlets that feed a different barracks each, which already exist in the orchard and allow irrigation on the premises, to understand the behavior of fluid flux, it is necessary to identify the type of flux that moves and the regime that governs it, which for this project, corresponds to a turbulent flux of permanent regime in the models presented. ANSYS Fluent as a computer tool, allows the simulation of fluids dynamically, meaning, the study of the behavior of a moving particle in the flux (Lagrange Method), which, in order to know the most affected areas of each model, a speed - pressure relationship is generated, reason why it is necessary the integration of methods of simulation of turbulent flux, based on approximations like the average of Reynolds in the equations of Navier - Stokes (RANS), originating models as $k - \varepsilon$, which, evaluates the kinetic energy of the

system and the rate of dissipation in the turbulent flux. The combination of these variables, gives origin to the turbulent viscosity that shows in a theoretical way the areas most affected by the fluid friction - wall of the model that stands out from the rest (being the one that exerts a greater pressure and speed than the others), generating a solution to further decrease the shear in the interior, evaluating the change of pressure - speed and secondary parts in it.



1. INTRODUCCIÓN

La formación de mecánica de fluidos moderna fue iniciada por Clairaut, D'Alembert, Lagrange, Euler y Bernoulli, matemáticos del siglo XVIII con la implementación del cálculo diferencial e integral. Por otra parte, Reynolds y Froude dieron bases físicas a la ecuación, que, al ser sintetizada por Prandtl, tanto la parte teórica como la experimental, se le puede conocer como el fundador de la actual mecánica de fluidos (Mataix, 1982).

El objetivo de estudiar el comportamiento de los fluidos, ya sea estacionarios o en movimiento, se conocen como hidrostática e hidrodinámica, respectivamente, cada una dependiente de ciertos parámetros como el peso específico, la densidad y/o la viscosidad del fluido. La utilización del agua y aire como base de estudio en condiciones ideales (incompresible y no viscoso), entrega un concepto generalizado de un fluido ideal, pero si un fluido es compresible, entonces las leyes de la termodinámica actúan, y si a su vez, consideramos en la ecuación que el fluido tiene viscosidad, entonces, estamos en presencia de un fluido real (Giles, 1969).

Dentro de la hidrodinámica se identifica el principio de Bernoulli, Gracia (2017) menciona que esta ecuación “centra su estudio en describir el comportamiento de fluidos que se mueven a lo largo de una corriente de agua, si es un fluido ideal con un régimen de circulación por un conducto cerrado, la energía que posee el fluido permanece constante a lo largo de su recorrido”.

El estudio de estos fluidos está gobernado por las ecuaciones de conservación:

- La conservación de la masa, que hace mención a un volumen de fluido que no varía con el tiempo.
- La conservación de la cantidad de movimiento, la cual especifica que la variación de la cantidad de movimiento asociado a un volumen de fluido debe ser igual a la suma de las fuerzas externas que actúa sobre él.
- La conservación de energía, en la que se afirma que la variación de energía total de un volumen de flujo es igual al trabajo realizado por fuerzas externas más el calor exterior recibido, ambas por unidad de tiempo (Heras, 2011).

Las ecuaciones diferenciales parciales (EDP) descritas por Navier – Stokes modelan fenómenos relacionados a la mecánica de medios continuos, en el contexto de riego, se utilizan para modelar fenómenos relacionados a la dinámica de fluidos. El desarrollo de una solución analítica para este tipo de ecuaciones presenta un alto grado de complejidad por lo que se resolvió mediante métodos numéricos. La dinámica de fluidos computacional (CFD) permite resolver problemas relacionados a la mecánica de fluidos que impliquen una significativa cantidad de cálculos, utilizando en este contexto el

método de volúmenes finitos que describe y visualiza un elemento único o compuesto a simular, discretizando el espacio en pequeños volúmenes de control.

Para este estudio, la utilización de este software en su versión Student y aplicando la herramienta ANSYS Fluent, toma un enfoque Lagrangiano, el cual observa una partícula y su movimiento en el flujo, por sobre la Euleriana, que fija su atención sobre las partículas que pasan por el punto a evaluar y como base de resolución numérica de estas ecuaciones, volúmenes finitos. Lo que permitirá obtener una simulación de los puntos críticos que se identificarán en el sistema de riego a evaluar, relacionando las variables del fluido transportado en estas zonas turbulentas.

Dentro de la variedad de métodos que simulan flujos turbulentos, destaca el método RANS (Reynolds Averaged Navier – Stokes), la cual entrega una rápida solución gracias a la exigencia media de recursos en un equipo computacional para su desarrollo (ANSYS, 2021), además de incorporar variadas ecuaciones que facilitan la obtención de una correcta simulación, y resaltando sobre las demás, la formulación $k - \epsilon$ que se basa en la hipótesis de un gradiente de difusión para relacionar las tensiones de Reynolds con los gradientes medios de velocidad y viscosidad en puntos turbulentos (Toapanta et al., 2018).

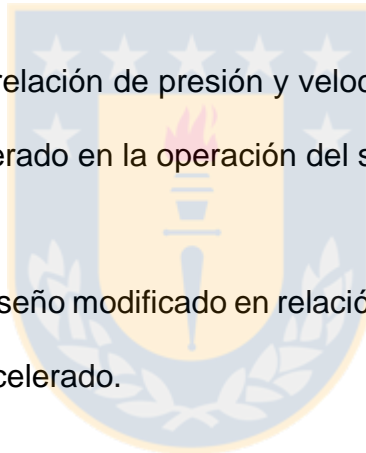
2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Analizar el desgaste acelerado ocasionado por la interacción fluido – sistema de riego, mediante simulación fluidodinámica computacional (CFD).

2.2. Objetivos Específicos

- Modelar el flujo en régimen permanente de los puntos críticos del sistema de riego por goteo, utilizando el software ANSYS Student.
- Determinar la relación de presión y velocidad del fluido en los puntos de desgaste acelerado en la operación del sistema.
- Proponer un diseño modificado en relación a las condiciones de aparición de desgaste acelerado.



3. ANTECEDENTES GENERALES

3.1. Supuestos

- **Referente al flujo.** El flujo será considerado de régimen permanente al no variar sus propiedades en el tiempo, éste tendrá un módulo, dirección y sentido de la velocidad, sin variación dentro de una misma sección desde un punto cualquiera a otro, considerándose como un flujo uniforme. Por último, el número de Reynolds determinará el tipo de flujo que existe entre un punto y otro, considerando de igual forma, que los puntos críticos del sistema de riego serán del tipo de flujo turbulento.

- **Referente al fluido.** El agua como tal, varía su densidad y viscosidad según la temperatura del medio en el que se encuentre y su estado, para efectos de cálculos se considera en estado líquido a 18°C con una densidad de 998,6 kg m⁻³ y una viscosidad dinámica (μ) de $106,0 \times 10^{-5}$ kg m⁻¹ s⁻¹ (Mataix, 1982), por lo que su comportamiento será lineal, siendo un fluido Newtoniano e incompresible, y a su vez, el fluido será considerado como homogéneo, independiente si éste lleva en su caudal fertilizante o no, esto se debe a que las concentraciones de abono son bajas en la mezcla de la solución madre al ser inyectada al sistema, sin afectar la densidad y viscosidad del fluido, por lo que se puede considerar como las propiedades del agua a temperatura constante (Antúnez y Felmer, 2009).

Tabla 1. Rango deseable de algunos elementos en el agua de riego.

Elemento	Concentración (ppm)
Nitrato	0,0 – 5,0
Fósforo	0,005 – 5,0
Potasio	0,5 – 10,0
Calcio	40,0 – 120,0
Magnesio	6,0 – 24,0
Fierro	2,0 – 5,0
Boro	0,0 – 0,3

Fuente: Hirzel, 2009

- **Referentes al sistema de riego.** Los accesorios y tuberías hidráulicas son de PVC clase 6, con diámetros de 63 mm para la línea principal y los secundarios reducen su diámetro a 50 mm y luego a 40 mm, con espesor de 1,9 mm, 1,8 mm y 1,8 mm, respectivamente (Vinilit, 2018), mientras que las cintas de riego son de polietileno con un caudal (q) de $1,55 \text{ L h}^{-1}$, de diámetro 16 mm, espesor de 0,9 mm y presión de trabajo (P_g) de 1 bar, equivalente a 10,13 m.c.a. (AZUD, 2018).

3.2. Diseño del sistema hidráulico

Dentro del denominado microrriego se incluye el riego por goteo, caracterizado por la aplicación de nutrientes y agua al suelo de forma localizada por medio de emisores de caudal definido, obteniendo una elevada humedad en el suelo en donde se desarrolla el sistema radicular del cultivo, maximizando la producción y calidad del cultivo.

La alta eficiencia del sistema de riego, minimiza el riesgo de problemas fitológicos que afectan al cultivo, aumenta la aireación del suelo y provee una mayor cantidad de agua y nutrientes durante el riego. Este sistema no requiere de mayor cantidad de horas hombre, debido a que puede ser automatizado y funcionar durante las 24 horas del día (Castro, 2004). Los predios El Castaño y La Loma cuentan con dicho sistema de riego, son huertos ya formados y colindan entre sí, por lo que el microrriego es compartido, sin embargo, la bomba utilizada es la misma que se propuso en el diseño original, la cual apuntaba a regar en su totalidad solo el Huerto El Castaño.

3.2.1. Número de Reynolds (Re)

Una de las propiedades de cualquier fluido es su viscosidad, la cual determina, energéticamente, las pérdidas por fricción durante el movimiento del mismo, la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas entrega un valor adimensional, el que permite distinguir distintos tipos de régimen en los flujos, conforme a la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{D_{int} \cdot v \cdot \rho}{\mu} \quad [1]$$

Donde:

D_{int} = Diámetro interior de la tubería (m)

v = Velocidad del fluido (m s⁻¹)

ρ = Densidad del fluido (kg m⁻³)

μ = Viscosidad dinámica del fluido (kg m⁻¹ s⁻¹)

Un flujo laminar se puede definir como un fluido que se desliza de forma suave por una superficie sin verse atenuada por los fenómenos viscosos, si este número adimensional entrega un valor menor a 2100, indica que las fuerzas viscosas son mayores que las fuerzas inerciales, si esto se cumple, entonces el factor de fricción se calcula por medio de la ecuación de Hagen – Poiseuille.

Un flujo turbulento, en cambio, las partículas del fluido siguen un movimiento errático de forma violenta, si el número adimensional da un valor por sobre 4000 se denomina como régimen turbulento ($Re \geq 4000$), lo que indica que las fuerzas inerciales son mayores que las viscosas (Anaya-Durand *et al.*, 2014), y el factor se puede obtener de forma implícita mediante Colebrook – White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right] \quad [2]$$

Donde:

ϵ = Rugosidad absoluta de la tubería (m)

f = Factor de fricción

D = Diámetro de la tubería

De esta ecuación se origina el Diagrama de Moody para obtener de forma gráfica el factor de fricción, basándose en la relación de la rugosidad de la pared de la tubería y el diámetro interior del mismo, y del número de Reynolds. De forma computacional, la obtención de f está en función de la rugosidad

absoluta (ϵ) de la pared de la tubería, por lo que el diagrama de Moody se representa de la siguiente manera (Besio, 2014):

$$f = 8 \left[\left(\frac{8}{Re} \right)^{12} + (X + Y)^{-1.5} \right]^{1/12} \quad [3]$$

Donde:

X = Factor condicionante para la obtención de f

Y = Factor condicionante para la obtención de f

En donde X y Y se obtienen con las siguientes ecuaciones:

$$X = \left\{ -2.457 \ln \left[\left(\frac{7}{Re} \right)^{0.9} + \frac{0.27 \epsilon}{D} \right] \right\}^{16} \quad [4]$$

y

$$Y = \left(\frac{37530}{Re} \right)^{16} \quad [5]$$

3.2.2. Ecuación de Bernoulli

La energía de un fluido se puede expresar bajo el principio de Bernoulli, el cual describe el comportamiento de un fluido en movimiento por un conducto cerrado, siendo esta energía constante en su recorrido, este principio entrega una altura hidráulica que puede igualarse entre un punto 1 y un punto 2, compuesta cada parte por una altura cinemática (altura de velocidad) y una altura piezométrica (altura de presión y altura de posición), obteniendo la siguiente ecuación:

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} \quad [6]$$

Donde:

$z_{1,2}$ = Diferencia de cota (m)

$P_{1,2}$ = Presión del fluido (kg m⁻²)

γ = Peso específico (kg m⁻³)

$v_{1,2}^2$ = Velocidad del fluido (m s⁻¹.)

g = Aceleración de gravedad (m s⁻²)

3.2.3. Pérdidas de carga

La fricción ejercida por las partículas del fluido entre ellas y contra la pared de la tubería de conducción genera pérdidas de presión en el trayecto, a lo que se le llama pérdidas de carga lineales y puede calcularse por medio de la ecuación de Darcy – Weisbach, que, según literatura es la más utilizada para este tipo de cálculos.

$$H_l = f * \frac{L}{D_{int}} * \frac{v^2}{2g} \quad [7]$$

Donde:

H_l = Pérdidas de carga lineales (m)

L = Largo de la tubería (m)

Las pérdidas de carga singulares o menores, denominan a accesorios que componen el sistema de riego a evaluar, siendo esto, un cambio de diámetro, dirección u obstrucción que afecten al desplazamiento del fluido. Para la

obtención de esta pérdida de presión, se requiere de coeficientes (K) que representan la resistencia de cada pieza que es partícipe del sistema y de la altura cinemática promedio en donde esté tal pieza (Gracia, 2017).

$$H_s = K * \frac{V^2}{2g} \quad [8]$$

Donde:

H_s = Pérdidas de carga singulares (m)

K = Coeficiente de resistencia

Tabla 2. Coeficiente adimensional de resistencia dependiente de cada pieza que lo produzca.

Accesorio	K
Codo 90°	0,60
Te, salida bilateral	1,90
Te, salida de lado	1,30
Válvula de compuerta	0,25
Válvula de bola	10,00
Unión	0,30

Fuente: Elaboración propia.

Las bombas de agua a su vez que impulsan el agua, añaden presión al sistema de riego, también tiene pérdidas desde su succión hasta su impulsión y dependerá de cada ejemplar instalado, conforme a lo anterior y como sus nombres indican, son obstáculos y facilitadores que tendrá el fluido para llegar a destino, si se incluye todos los parámetros en una sola ecuación, se obtiene la siguiente forma (Márquez, 2012):

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} - H_l - H_s - H_r + H_b = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} \quad [9]$$

Donde:

H_r = Pérdidas por succión de la bomba (m)

H_b = Presión añadida por la bomba al sistema (m)

Un término extra para la ecuación [9], determina las pérdidas por fricción en una tubería con salidas múltiples, la cual considera el coeficiente de Christiansen (F), las pérdidas por conexión (M) y las pérdidas por fricción:

$$F = \frac{1}{m+1} + \frac{1}{2N} + \frac{(m-1)^{0,5}}{6N^2} \quad [10]$$

Donde:

F = Coeficiente de Christiansen

m = Exponente de la velocidad en la fórmula usada para calcular la pérdida de presión causada por la fricción, para riego por goteo se considera un valor de 1,75

N = Número de salidas de riego a lo largo de la tubería

$$M = \left(\frac{S_e + f_e}{S_e} \right) \quad [11]$$

Donde:

M = Pérdidas por conexión (m)

S_e = Separación entre emisores (m)

f_e = Longitud equivalente de la pérdida de carga por conexión (m), considerando un valor de 0,15 m

Para que la variable m tenga sentido, la ecuación [7] debe relacionarse matemáticamente con la ecuación de Blasius, la cual considera la temperatura, que se mencionó con un valor de 18°C, por tanto, la ecuación será:

$$h_f = 0,000798 * \frac{Q^{1,75}}{D_{int}^{4,75}} * L \quad [12]$$

Donde:

$$h_f = \text{Pérdidas por fricción en lateral (m)}$$

Una vez obtenido los resultados de las ecuaciones [10], [11] y [12], converge en una única ecuación:

$$h_f^* = h_f * F * M \quad [13]$$

Donde:

$$h_f^* = \text{Pérdidas por fricción en lateral corregido por la conexión de emisor (m)}$$

Por lo tanto, las pérdidas por fricción en una tubería con salidas múltiples, se obtiene mediante la ecuación siguiente:

$$H_c = h_0 + \left(\frac{3}{4}\right) h_f^* \quad [14]$$

Donde:

$$H_c = \text{Pérdidas de carga a la entrada del lateral (m)}$$

$$h_0 = \text{Presión de operación del emisor (m)}$$

Entonces, la energía que se requiere para suplir las necesidades que exigirá como mínimo el sistema el riego en cada sector, se considerará las ecuaciones

anteriores, con el fin de incluir cada reducción del lateral y las salidas desde el mismo, que, para este caso, son las cintas riego por goteo, ya sea en sectores de riego cercanos a la bomba de riego como en puntos más alejados de la misma, siendo de forma exclusiva una pérdida de carga del sistema, posterior a los puntos de partida de riego de cada sector (partidores).

Para el diseño de un sistema de riego, la comisión nacional de riego (CNR) propone una plantilla de anteproyecto para la implementación de cintas de riego o riego por goteo para los cultivos existentes (frambuesas y arándanos), la estimación de las pérdidas de carga las realiza bajo los siguientes criterios:

- La presión de operación del emisor
- 15% de pérdidas de carga en laterales
- 15% de pérdidas de carga en submatrices
- 3 m.c.a. de pérdidas de carga en succión y descarga
- 5 m.c.a. de pérdidas de carga en filtros
- Pérdidas de carga en la matriz, las cuales se estiman como el 2% del largo de la matriz
- Diferencia de cota existente

Por lo que las pérdidas de carga se resumen como:

$$\Sigma H_T = P_g * 1,15 * 1.15 + 3 + 5 + T_M * 0,02 \pm \Delta z \quad [15]$$

Donde:

ΣH_T = Pérdidas de carga totales (m)

P_g = Presión de operación del gotero (m)

T_M = Pérdidas de carga en la matriz (m)

Δz = Diferencia de cota existente (m)

1,15 = Corresponde a las pérdidas de carga en laterales y submatrices

Con la estimación de las pérdidas de carga y aportes al sistema riego, se debe integrar a la ecuación, el concepto de Evapotranspiración del cultivo (ET_c) que se expresa en mm día^{-1} promedio para el mes de máxima demanda para el periodo de producción, mediante estaciones agrometeorológicas impulsadas por el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) y la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), y basándose en la Ecuación de Penman – Monteith del documento FAO 56 de Evapotranspiración, lo cual facilita la determinación de un caudal adecuado para suplir las necesidades de agua de los cultivos bajo un programa de riego, es decir, la bomba de riego, por lo que, los datos a utilizar serán de la estación Copihue de la comuna de Retiro, siendo esta la más cercana al predio y con información completa de la última temporada de producción (2019 – 2020).

Tabla 3. Evapotranspiración de referencia (ET_o) mensual de la estación agrometeorológica Copihue, Retiro.

Mes	ET_o (mm mes ⁻¹)
Nov-2019	154,4
Dic-2019	189,1
Ene-2020	171,8
Feb-2020	122,9
Mar-2020	110,3
Abr-2020	64,0

Fuente: Agrometeorología, 2021

El concepto de evapotranspiración de cultivo (ET_c) proviene de la evapotranspiración de referencia (ET_o) y un coeficiente de cultivo (k_c), este último considera que los cultivos son Frambuesos y Arándanos, por lo que sus valores varían según su fase de desarrollo y por lo general se considera un k_c medio, el cual corresponde a la fase de desarrollo máximo, siendo estos valores 1,00 y 1,20, respectivamente (Carrazón, 2007; López, 2016).

$$ET_c = ET_o * K_c \quad [16]$$

Donde:

ET_c = Evapotranspiración de cultivo (mm día⁻¹)

K_c = Coeficiente de cultivo

3.3. Dinámica de fluido computacional

Computational Fluid Dynamics o CFD, es una de las aplicaciones a la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para analizar y predecir de forma cuantitativa los fenómenos de los fluidos en movimiento.

Núñez (2014) menciona que “la clave para diversos métodos numéricos es convertir las ecuaciones en derivadas parciales que gobiernan un fenómeno físico en un sistema de ecuaciones algebraicas”, el autor Dávalos (2020) hace mención a la resolución de EDP, mediante el método numérico de volúmenes finitos para dar solución a la fase turbulenta que denota la simulación mediante la herramienta Fluent.

Para ello, un modelo tridimensional bajo ciertas condiciones de estructura (material y propiedades), iniciales (presión, velocidad, densidad y temperatura del fluido) y de frontera (espesor y fricción), permite discernir los puntos afectados de forma crítica y simular sobre el diseño que actualmente se encuentra instalado, para dar hincapié a un sistema de riego mejorado y aplicable, optimizando el equipo, sistema y/o pieza para prevenir problemas futuros, el reemplazo de accesorios y/o aumentar la vida útil de los puntos evaluados.

3.3.1. ANSYS

ANSYS es un software que ofrece soluciones a la ingeniería, prediciendo cómo funcionará y reaccionará determinado producto bajo un entorno real, esta herramienta funciona principalmente para resolver dichos problemas de forma numérica, que, para este documento, es válida la implementación del método de volúmenes finitos para fluidos dinámicos, evaluando parámetros como densidad, viscosidad del fluido, presión, velocidad, entre otras variables.

ANSYS Fluent es una de las herramientas basada en la modelación física para el flujo de fluidos, modelos turbulentos, reacciones de aplicación industrial y de transferencia de calor (ANSYS, 2021), dicho software complementa la búsqueda de puntos críticos dentro del sistema o accesorios que pueden ser mejorados, como las presiones son mayores a la entrada del partidore que la mínima exigencia de cada lateral en el sistema de riego, el régimen es generalmente turbulento dentro de cada modelo existente, por lo que la utilización de los promediados de Reynolds de las ecuaciones de Navier – Stokes (RANS) es totalmente aplicable en este caso de estudio.

El fluido toma la dirección del recipiente que lo contenga, incluyendo los obstáculos y adaptándose a ellos, generando cambios en el vector velocidad en cada punto durante su avance. La forma de observar lo que ocurre con una partícula representativa del fluido tendrá dos enfoques: Euleriano, que se basa en observar la variación de propiedades y condiciones en un punto del espacio conforme avanza a través y/o sobre esta partícula y el Lagrangiano, que consta de seguir la trayectoria de una partícula en el espacio conforme avanza y varían sus propiedades, siendo éste último en que la herramienta Fluent resuelve problemas de flujos turbulentos (Modon, 2017; Dávalos, 2020).

3.3.2. Ecuaciones numéricas de simulación

ANSYS Fluent permite la interacción entre fluidos (sólido, líquido y/o gaseoso) bajo mismas condiciones y al unísono, permitiendo que el fluido en cuestión se mueva por superficies libres, a presión o de forma multifásica en entornos cerrados.

Este paquete computacional proporciona tipos de solución como métodos de volumen de fluido (VOF), de mezcla, de Euler y de fase discreta (DPM), este último concepto se basa en trayectorias lagrangianas para fases dispersas, como partículas, gotitas o burbujas, incluido el acoplamiento con la fase continua del sistema. La resolución de problemas hidráulicos mediante Fluent consta de ecuaciones de la mecánica de fluidos del medio continuo, como la continuidad, la cantidad de movimiento y las ecuaciones de Navier – Stokes (Dávalos, 2020) que se obtienen del uso de principios de conservación de energía en forma generalizada.

- **Ecuación de continuidad:** La ecuación de continuidad establece que la masa en el interior de un elemento fluido es consecuencia del flujo neto de masa hacia dicho elemento, representando la tasa de entrada, salida y acumulación en el volumen de control (Dávalos, 2020).
- **Conservación de la cantidad de movimiento:** Se basa en la segunda Ley de Newton, *la suma de todas las fuerzas externas ejercidas sobre*

un volumen de control es igual a la tasa de cambio del momentum de la sustancia en dicho volumen (Besio, 2014), es decir, la variación temporal de la cantidad de movimiento para un elemento infinitesimal dentro de un volumen de control donde actúan fuerzas externas, como las de superficie y fuerzas de cuerpo.

- **Conservación de energía:** El principio de conservación de la energía se basa en la primera ley de la Termodinámica, en donde relaciona la energía interna del sistema con la energía del entorno en forma de trabajo o calor. La aplicación de este principio expresa una variación temporal de la energía total en el volumen de control, la cual se iguala al incremento de trabajo de las fuerzas que actúan sobre el volumen y el flujo neto de calor a través del contorno del dominio.

Esta expresión, aplicada en flujos permanentes de fluidos incompresibles, en donde su energía interna es despreciable, se reduce a los aportes y retiro de energía a nivel macro, sin considerar fisión o fusión a nivel molecular entre otras variaciones, obteniendo el teorema de Bernoulli. Giles (1969), hace mención de que “prácticamente todos los problemas que entrañan flujos de líquidos se resuelven básicamente con esta ecuación”:

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} - H_A - H_E - H_P = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} \quad [17]$$

Donde:

H_A = Energía añadida (m.c.a.)

H_E = Energía extraída (m.c.a.)

H_P = Energía perdida (m.c.a.)

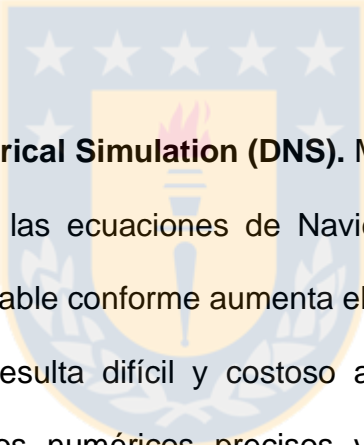
La solución numérica de simulación que el software ANSYS utiliza, específicamente su herramienta Fluent, emplea métodos numéricos y algoritmos para analizar y resolver problemas que involucren el flujo de fluidos, por lo general, debido a la complejidad de resolución de problemas, los cuales no son lineales, se utilizan métodos de aproximación, en las cuales se discretiza la ecuación. Dávalos (2020), menciona que “el procedimiento reduce el problema a la solución de un sistema finito de ecuaciones algebraicas cuya justificación teórica involucra teoremas del análisis, análisis funcional y álgebra lineal”.

Dentro de las principales técnicas de discretización está el método de volúmenes finitos, descomponiendo el dominio en pequeños volúmenes de control donde las variables se almacenan en nodos, conformando una malla, que al sumar los volúmenes de control considerados forman el volumen total del fluido. El desarrollo de esta discretización de volúmenes finitos, entrega una solución que satisface las ecuaciones de conservación consideradas,

independientemente si la malla es pequeña o grande, el paquete Fluent se basa en este método para resolver las problemáticas que se presenten.

3.3.3. Modelos de turbulencia

La inestabilidad en el flujo es causada por gradientes de velocidades medias, generando torbellinos en movimiento, los cuales son cada vez más pequeños y la velocidad cada vez mayor en esos puntos, la simulación de estos flujos turbulentos es difícil y su solución dependerá de la solvencia computacional de cada usuario.

- 
- **Direct Numerical Simulation (DNS).** Modelo que otorga una solución completa de las ecuaciones de Navier – Stokes, siendo cada vez menos abordable conforme aumenta el valor del número de Reynolds, por lo que resulta difícil y costoso a nivel computacional, ya que requiere datos numéricos precisos y mallas muy finas. En otras palabras, este modelo solo se aplica en geometrías muy simples y de flujo laminar (Sánchez, 2004).
 - **Large Eddy Simulation (LES).** Se define como una discretización menos fina que el DNS, debido a que se descartan los vórtices de menor tamaño y simulando solo los de tamaño mayor, y que modela de esta manera, la disipación viscosa para escalas menores, logrando una simulación más generalizada (Dávalos, 2020).

- **Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS).** Es una aproximación basada en la descomposición de variables de flujo en un valor medio y otro fluctuante, reformulando las ecuaciones de Navier – Stokes, las cuales resuelven para valores medios, como Reynolds medio o profundidades medias. La obtención de estos valores medios dependerá, si el flujo turbulento es estacionario, el cual no varía en el tiempo, pero sí en el espacio y se denomina como promedio temporal; pero si el flujo turbulento es homogéneo, vale decir, uniforme en el espacio y con variación en el tiempo, se denomina como promedio espacial. La variable fluctuante contribuye al transporte neto del momento por medio de los esfuerzos de Reynolds y de flujos turbulentos si existiesen variables escalares (Sánchez, 2004).

ANSYS Fluent presenta modelos para la resolución de flujos turbulentos mediante RANS, que, para esta evaluación del sistema de riego, será utilizado el modelo $k - \epsilon$ (modelo de energía cinética turbulenta k y su tasa de disipación turbulenta ϵ).

3.3.3.1. Modelo k – épsilon

- **Modelo estándar.** Emplea una solución de dos ecuaciones de transporte, que determina de forma independiente la velocidad turbulenta y las longitudes de escala. Como modelo semiempírico, k se basa en la ecuación exacta y ε en el razonamiento físico y de mínima semejanza con su contraparte matemática exacta. Siendo válido en flujos únicamente turbulentos (Toapanta et al., 2018).
- **Modelo renormalizado de grupo (RNG).** Aplica técnicas estadísticas de renormalización de la teoría de grupo, si bien es similar en forma a las ecuaciones del modelo estándar, este incluye un término adicional que mejora el análisis del flujo rápidamente forzados, el efecto de vórtices en la turbulencia y una fórmula diferencial derivada de forma analítica para la viscosidad efectiva, integrando al análisis números de Reynolds laminares, ampliando la gama de flujos. (Dávalos, 2020).
- **Modelo realizable.** Es una formulación alternativa para la viscosidad turbulenta, incluyendo una nueva ecuación de transporte para la razón de disipación, presentando una resolución mejorada para flujos que incluyen rotación, capas límites bajo gradientes de presión fuertes y adversos, separación y recirculación.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{u_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad [18]$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{u_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho \left(C_{1\varepsilon} S_\varepsilon - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad [19]$$

Donde:

- k = Energía cinética de turbulencia (J kg^{-1})
- ε = Tasa de disipación de turbulencia ($\text{J kg}^{-1} \text{s}^{-1}$)
- $S_{k,\varepsilon}$ = Términos fuente definidos por el usuario o por defecto
- G_k = Generación de energía cinética de turbulencia debido a la velocidad
- G_b = Generación de energía cinética de turbulencia debido a la flotabilidad
- σ_k = Número de Prandtl para k (1,0)
- σ_ε = Número de Prandtl para ε (1,3)
- Y_M = Contribución de dilatación fluctuante
- $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ = Constantes del modelo

Y la viscosidad turbulenta, se calcula combinando k y ε ,

$$u_t = \rho C_u \frac{k^2}{\varepsilon} \quad [20]$$

Donde:

- u_t = Viscosidad turbulenta (Pa s)
- C_u = Constante predeterminada (0,09)

4. METODOLOGÍA

4.1. Limitaciones

El estudio a realizar se enfoca a un análisis de carácter energético que se desarrolla en el sistema de riego, por lo que una evaluación económica no será considerada, tampoco una profundización en las ecuaciones involucradas en el desarrollo de la herramienta Fluent. Esto limita el alcance de este proyecto a un plano de evaluación y no de aplicación, no obstante, la recomendación y/o diseño a proponer quedará en criterio del lector para ser aplicado.

4.2. Área de estudio

El predio a evaluar se conforma por dos huertos que comparten el sistema de riego y con mismos cultivos (Arándanos y Frambuesas), se ubican en la Comuna de Retiro, Provincia de Linares, Región del Maule:

Tabla 4. Ubicación de cada predio, superficie total y plantada.

Huerto	Superficie total (ha)	Superficie plantada (ha)	Coordenadas Huso 19	
			Este	Sur
El Castaño	3,50	3,00	258973,37	5992090,20
La Loma	8,30	2,55	258869,31	5991876,29

Fuente: Elaboración propia

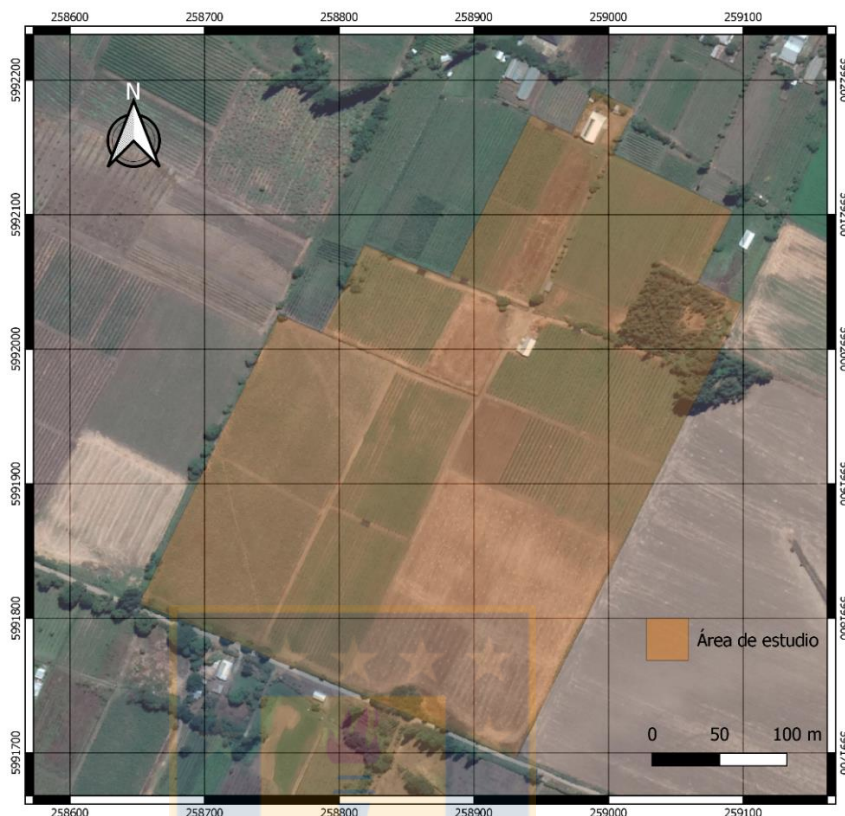


Figura 1. Área de estudio, Huertos El Castaño y La Loma. **Fuente:** Elaboración propia (QGis).

El sistema de riego fue montado en su totalidad en PVC clase 6 marca VINILIT, con las siguientes medidas:

Tabla 5. Tuberías y accesorios de diferentes diámetros exteriores (D_{ext}) del sistema de riego por goteo actual.

Ítem	D_{ext} (mm)	Ítem	D_{ext} (mm)
Tubería	63	Codo 90°	63
Tubería	50	Válvula de bola	63
Tubería	40	Válvula compuerta	63
Reducción brusca	63 a 50	Tee	63
Reducción brusca	50 a 40		

Fuente: Elaboración propia

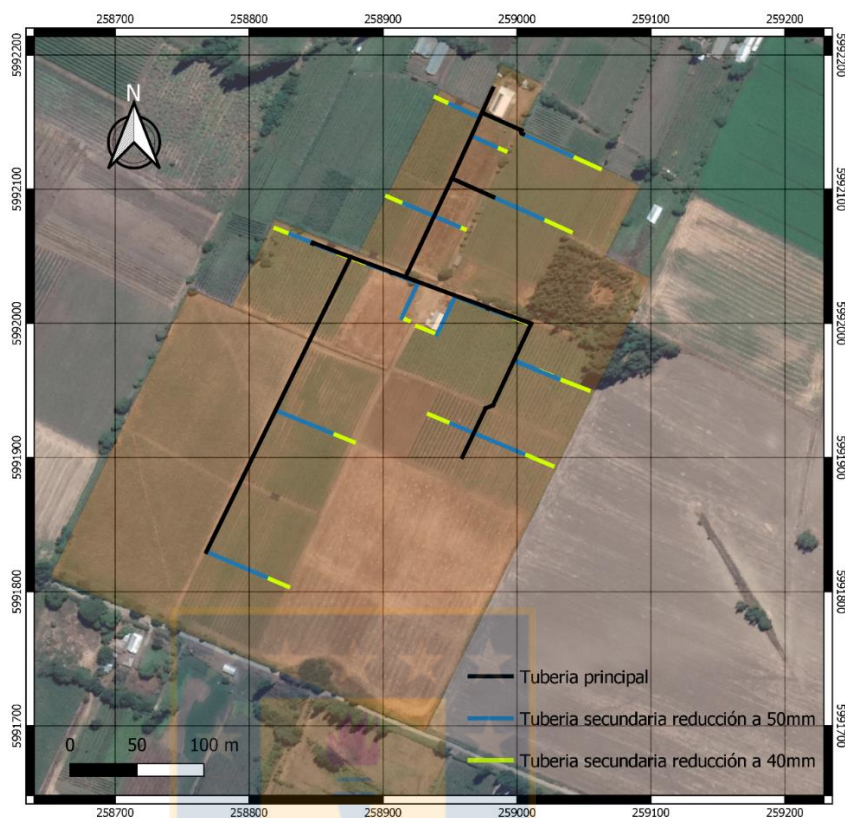


Figura 2. Sistema de riego por goteo actual, Huertos El Castaño y La Loma.
Fuente: Elaboración propia (Qgis).

4.3. Curvas de nivel

La topografía del Huerto El Castaño es de poca pendiente, mientras que el Huerto La Loma presenta curvas de nivel más pronunciadas, como el sistema de riego es compartido, la topografía conjugada del predio total sugiere el uso de un sistema de alta eficiencia para maximizar el uso de los recursos.

La altimetría será obtenida mediante Qgis 3.10.5-A Coruña, añadiendo Google Earth Pro para la imagen base, que es ofrecido por el plugin “Quick Map Services”, en donde se determinará el posicionamiento del sistema de

riego actual, el cual sigue estas curvas de nivel a una profundidad promedio de 50 centímetros bajo el nivel del suelo.

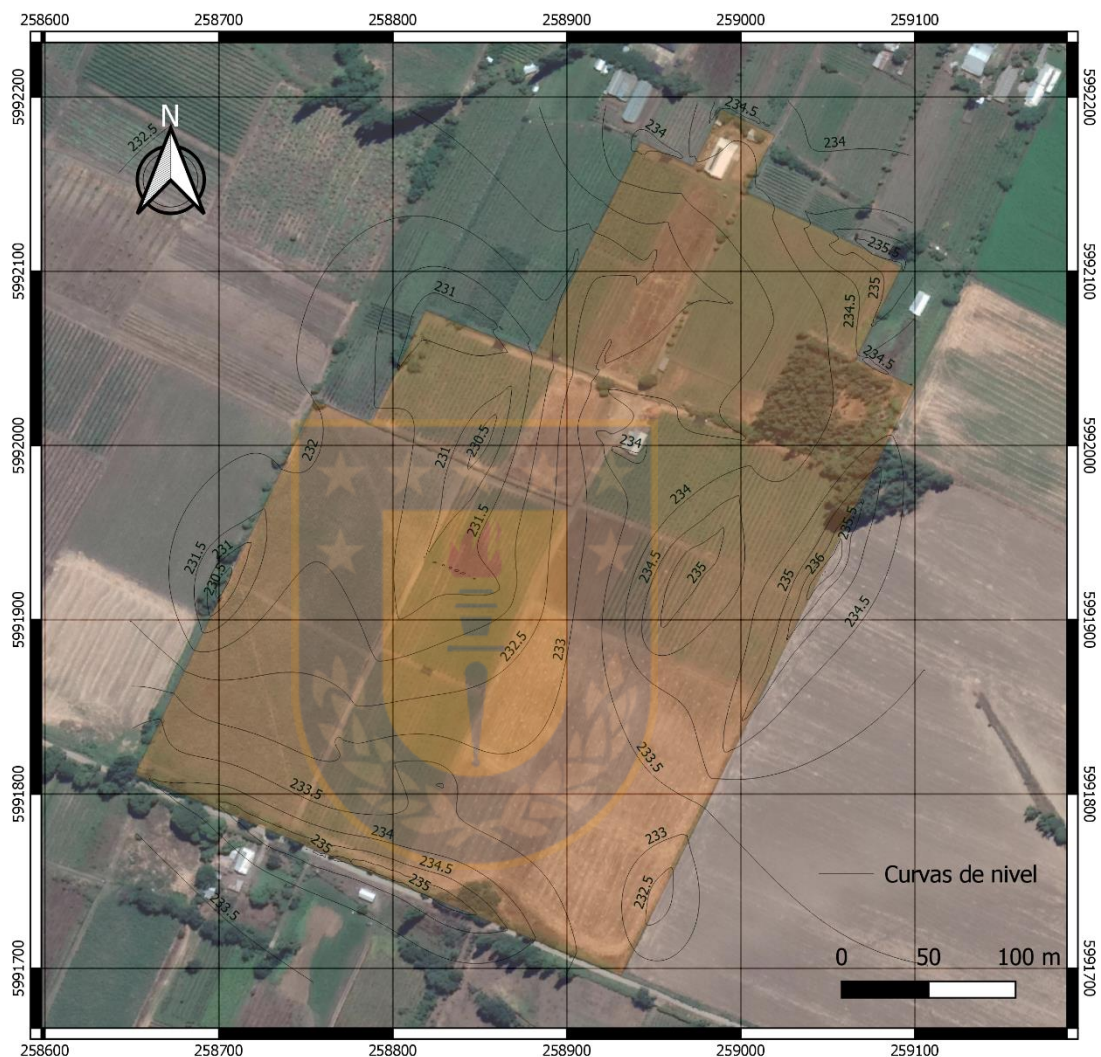


Figura 3. Altimetría en los Huertos El Castaño y La Loma. Fuente: Elaboración propia (QGIS).

4.4. Sistema de riego por goteo

Los requerimientos del cultivo determinan el sistema de riego a instalar, basado en características empíricas que son utilizadas en ecuaciones que entregan un aproximado a las necesidades de agua del cultivo, como la

radiación solar, la humedad relativa, la evapotranspiración de cultivo, el tipo de suelo y la disponibilidad de agua. Para la necesidad hídrica se requiere definir la fase agronómica y con dicha información se calcula la fase hidráulica.

Fase agronómica. Se define como la necesidad del cultivo y se refleja en la formulación del proyecto como: la evapotranspiración de cultivo en el diseño, disposición de emisores, milímetros de agua necesarios por hora de riego y el tiempo de riego para reponer la demanda hídrica del cultivo. Los datos de la estación agrometeorológica Copihue en la comuna de Retiro, serán utilizados para el desarrollo de esta fase, entregando los datos de forma mensual para la temporada 2019 – 2020, por lo que se basarán en la Tabla 3 (ET_0) y la Ecuación [16].

Fase hidráulica. Se basa en los datos obtenidos de la fase agronómica, añadiendo a la base de información la superficie total a regar, la topografía del lugar y el caudal necesario para suplir la demanda del cultivo, por lo que se debe otorgar un periodo de operación diaria del sistema en los sectores de riego y el diseño de la red hidráulica, siendo éste la tubería principal, secundaria, terciaria y lateral – según corresponda – , estableciendo la altura manométrica total, iniciando el cálculo con la obtención de presión mínima necesaria desde los laterales, y en forma ascendente, hasta la tubería principal, la cual termina en la caceta de riego, en donde se seleccionará la bomba adecuada, incluyendo el sistema de filtración y fertirrigación (Castro,

2004). La Comisión Nacional de Riego (CNR) ofrece una planilla (Véase ANEXO) de prediseño del sistema de riego tecnificado, para calcular la potencia requerida de la bomba, seleccionar un equipo ad-hoc y tener un riego óptimo, sin dificultades técnicas, así mismo, es posible obtener un anteproyecto de riego tecnificado con las ecuaciones mencionadas

Esta nueva bomba entregará un nuevo caudal, el cual será integrado en la evaluación de puntos críticos para contrastar con el sistema de riego actual, comparando si éste acelera o no, el desgaste del sistema de riego.

Para un análisis consecuente, ambos sistemas (actual y propuesto) serán analizados bajo las ecuaciones de pérdidas de carga lineales y singulares hasta los puntos críticos del sistema.

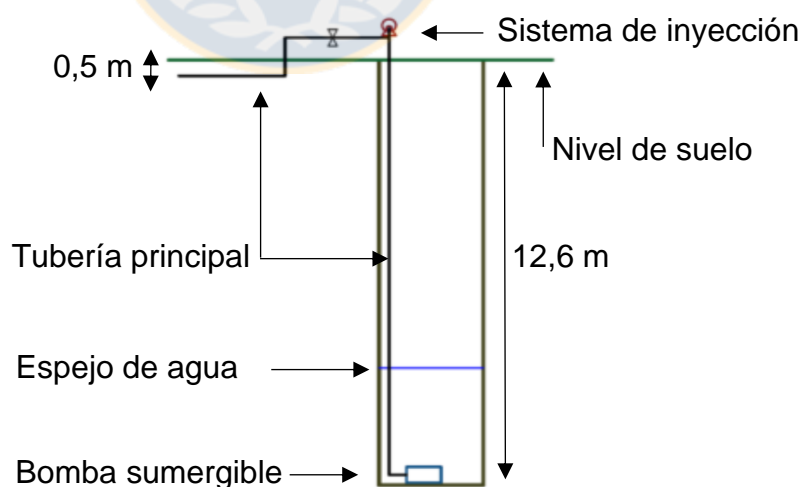


Figura 4. Boceto del corte transversal del terreno y ubicación de la bomba de riego. **Fuente: Elaboración propia.**

La figura 4 muestra la bomba de riego (rectángulo) actual de 3 Hp marca Pedrollo, sumergible, con una boca de salida de 63 mm, en posición horizontal al fondo del pozo, que, por placa, la bomba es un modelo 4SR12m/14-N y acorde al catálogo de la empresa, entrega un caudal de 300 L min^{-1} a una altura manométrica de 14 m.c.a. ($18 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ aproximadamente). La altura a elevar es de 12,6 m antes de un recorrido horizontal (en el cual se encuentra adosado un sistema de inyección (figura roja) con un motor de 0,5 Hp con boca de salida de 32 mm para fertiirrigación y una llave de bola (figura gris) tipo jardín de 25 mm), dando posteriormente origen a la matriz de riego de 63 mm al descender a los 50 cm bajo el nivel del suelo (línea verde).

4.5. Puntos críticos del sistema de riego

Las componentes de cualquier sistema (independiente del material del que estén hechos) presentan algún grado de desgaste en algún momento de su vida útil debido a la fricción del fluido contra las paredes del que las conduce, para ello, la velocidad de cualquier fluido y la presión que genera sobre su contenedor se consideran como parámetros principales que definen si las componentes se dañarán o no, ya sea destruyendo la película de inhibidor que protege la pared de la tubería y exponiéndola a la corrosión o por una fricción demasiado alta, que desgaste la tubería por abrasión, en el caso opuesto, puede generar problemas de depósito de sólidos en más de un punto a lo largo de la tubería, disminuyendo su diámetro y actuando como una reducción

gradual o brusca, por lo que la determinación del diámetro de tubería requerido dependerá de su uso y bajo qué condiciones funcionará.

No obstante, son los accesorios quienes presentan mayor desgaste y son en parte, el objeto de estudio para mejorar tanto su eficiencia, como su durabilidad, para ello, la simulación del avance de fluidos permite identificar en el sistema los puntos críticos en los cuales puede ocurrir un desgaste acelerado.

Los puntos de unión entre piezas, como los accesorios y tuberías, presentan altos grados de desgaste en el tiempo, dependientes de la velocidad del fluido y numéricamente expresado por medio de las ecuaciones de Navier – Stokes de flujos incompresibles (principio de la conservación de la energía y la cantidad de movimiento) (Ordóñez-Viñán et al., 2018).

Esto dirige a identificar preliminarmente los accesorios del sistema de riego como posibles puntos críticos, así como la unión entre cintas de riego y laterales, y la matriz del sistema, que, por medio de CFD se determinan dichos puntos que son de alta probabilidad de presentar fallos por desgaste acelerado. En esto, se ve reflejado su comportamiento conforme a la topografía del lugar, prediciendo el comportamiento del fluido dentro del accesorio y tubería, sujeto a la relación presión – velocidad y diámetro de

estos, que por lo general se consideran como un flujo turbulento, en las cuales será aplicado el modelo $k - \varepsilon$.

4.6. Simulación de puntos críticos

En WorkBench de ANSYS, seleccionando la herramienta Fluid Flow (Fluent) podemos subdividir en tres etapas: preprocesamiento, procesamiento y Postprocesamiento, descritos a continuación:

Preprocesamiento. La cual se define como modelar (geometría), mallado y configuración (setup) en Fluent, dando forma y dirección a lo que realizará la simulación:

La geometría del objeto en estudio es la única parte del preprocesamiento que puede realizarle por softwares ajenos a ANSYS con exportación de archivo que pueda reconocer esta fuente o trabajarlo directamente en su herramienta SpaceClaim.

El mallado del dominio será el encargado de definir la precisión de la simulación, este espacio de trabajo se denomina Meshing y presenta variadas opciones de dar sentido a la figura para su posterior simulación.

Las propiedades y condiciones de frontera son el paso final antes de la simulación, definiendo el tipo de material que contiene al flujo y el o los fluidos

que fluyen por éste, si bien, esto es parte del sistema, las condiciones de frontera fijarán el comportamiento del fluido en el medio por el que se mueva, definiendo la entrada del fluido (velocidad, presión, otros), la salida (ya sea en velocidad, presión o simplemente a criterio de la simulación) y la pared que contiene al fluido.

Procesamiento. Consta de una resolución en estado estacionario del volumen de control, considerando las propiedades del fluido que se ingresaron previamente y el cálculo del mismo, pudiendo variar la intensidad de la turbulencia y realizar un análisis de convergencia de la simulación en ANSYS Fluent.

Postprocesamiento. Una vez realizada la simulación, Fluent permite observar el análisis del resultado obtenido y encontrar los puntos críticos del objeto simulado, ya sea, basándose en velocidad, temperatura, presión u otro parámetro, en caso de que el error esté fuera de los parámetros que el usuario estime, es posible volver a simular, manipulando los datos ya ingresados y no volver a iniciar desde cero.

El dominio computacional corresponde a las características dadas al sistema al momento de modelar, mallar y simular, en este punto se definirá la ruta a seguir para lograr el objetivo propuesto. Para ello, es la definición de los espacios de trabajo previos como la geometría, mallado y configuración.

4.6.1. Geometría

La geometría de los puntos críticos será acorde y en lo posible, fiel copia del accesorio y sección de tubería a evaluar en su situación actual, varios autores han realizado geometrías y mallados para piezas en particular o unidas a tuberías de forma directa, tanto en aguas arriba como en aguas abajo, en este caso, dichos puntos críticos a identificar se modelarán como sección completa a como se muestra en la Figura 5, estos serán realizados en la herramienta SpaceClaim que pertenece al mismo ANSYS.



Figura 5. Comportamiento del flujo circulante en: a) Reducción brusca del diámetro y b) Reducción gradual del diámetro. **Fuente:** Villegas-León et al., 2015.

4.6.2. Mallado

Ordóñez-Viñán et al. (2018) sugiere el uso de un mallado tetraédrico para las tuberías, debido a su simplicidad, la ocupación total del espacio y una calidad aceptable de la malla a utilizar (Figura 6), Fiz (2017) utiliza un mallado automático por medio de la opción “Advance Size Function: Proximity and Curvature” para detallar hasta el más mínimo detalle, haciendo un mallado mixto y complejo de evaluar con equipos computacionales de gama media (Figura 6).

Para el proceso que se llevará a cabo, los accesorios que se consideren como punto crítico tendrán un mallado mixto y utilizando la función mencionada con anterioridad, con esto aumentaremos la cantidad de puntos que conforman la figura y se obtiene un resultado de mejor calidad y resolución. En cuanto a la tubería primaria, los puntos críticos a considerar serán en los puntos de división del sistema o unión principal – lateral, y aquellos en que las curvas de nivel tengan algún tipo de incidencia, ya sea cuesta arriba o su inversa, asumiendo un ángulo aproximado de estas para su posterior análisis con un mallado de tipo tetraédrico.

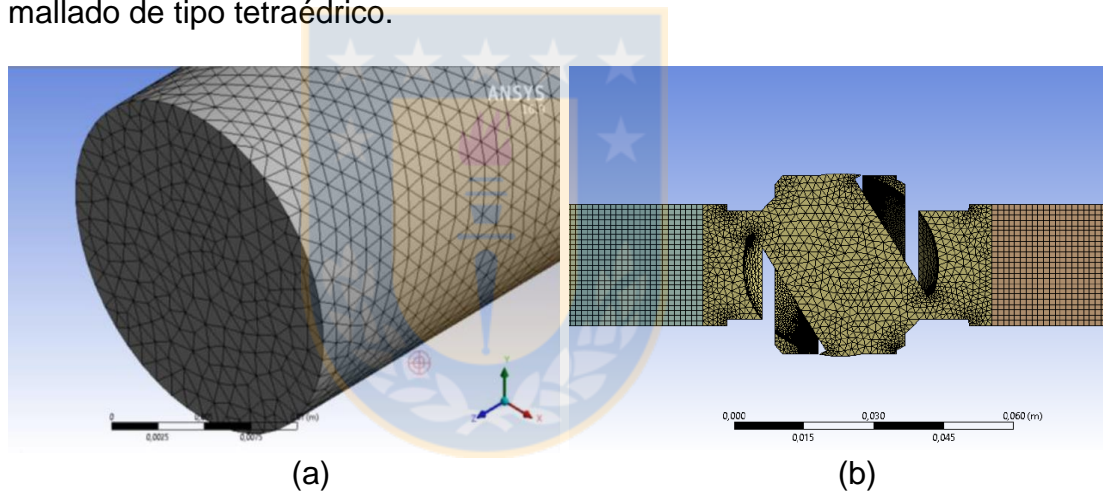


Figura 6. Mallado del volumen del fluido (a) en la tubería y mallado del dominio (b) para una válvula. **Fuente:** Ordóñez-Viñán et al., 2018; Fiz, 2017

4.6.3. Configuración

ANSYS Fluent permite configurar el sistema de procesamiento acorde a las características que presente el ordenador, para que esté a disposición del proceso basado en el mallado de las figuras, otro punto a considerar es el poder variar las dimensiones a utilizar, 2D o 3D y la precisión del análisis.

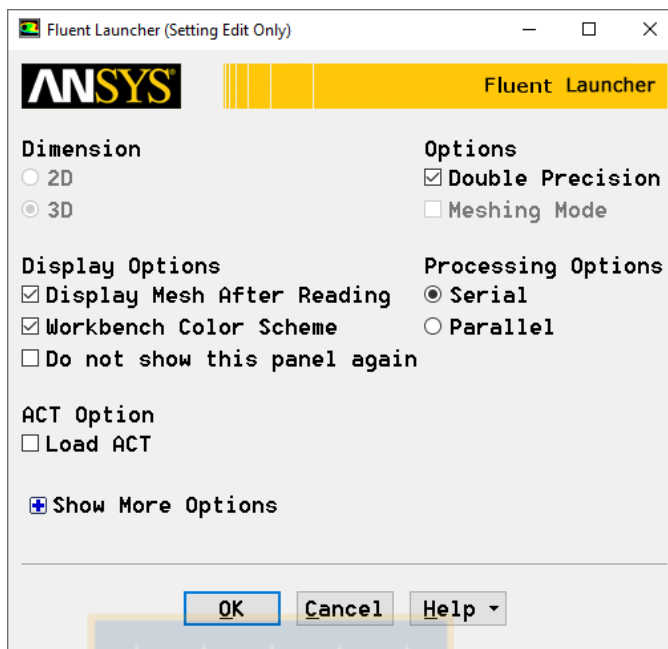


Figura 7. Configuración para la edición de propiedades. **Fuente:** ANSYS, 2021.

El software Fluent se basa en dos directrices de soluciones, uno basado en presión, el cual se enfoca en flujos incompresibles de baja velocidad y otro basado en densidad, para flujos compresibles de alta velocidad, sin embargo, ambas fueron modificadas y puestas a disposición para distintas condiciones de flujo (Fiz, 2017).

La simulación se llevará a cabo a partir de los principios de conservación de cantidad de movimiento y energía, considerando cada punto del mallado como un volumen de control a resolver y convergiendo en una solución que satisfaga el modelo simulado, estos puntos de control son linealizados y resueltos de forma diferente, esto se debe a que ANSYS Fluent trae por defecto estas ecuaciones, las cuales pueden ser modificadas, desactivadas o integrar otras

para una óptima resolución. En este caso, se utilizará las ecuaciones por defecto, que coinciden con las presentadas de forma integral.

Estas ecuaciones dan paso al modelo de turbulencia que se utilizará para resolver los puntos críticos del sistema de riego, el modelo $k - \varepsilon$, por lo que es necesario formular basado en la presión del sistema, desarrollando por separado la ecuación de energía.

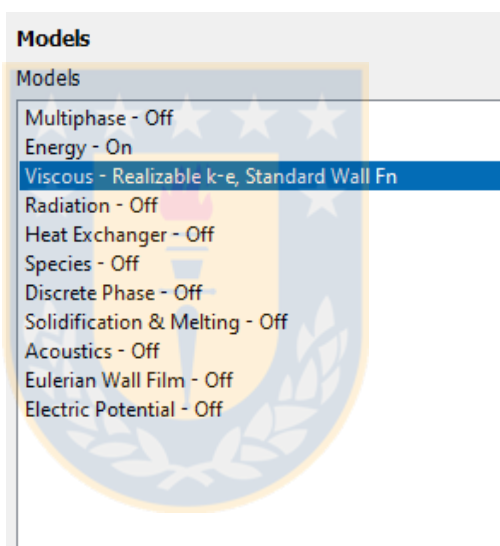


Figura 8. Modelos disponibles para resolución de problemas. **Fuente:** ANSYS, 2021.

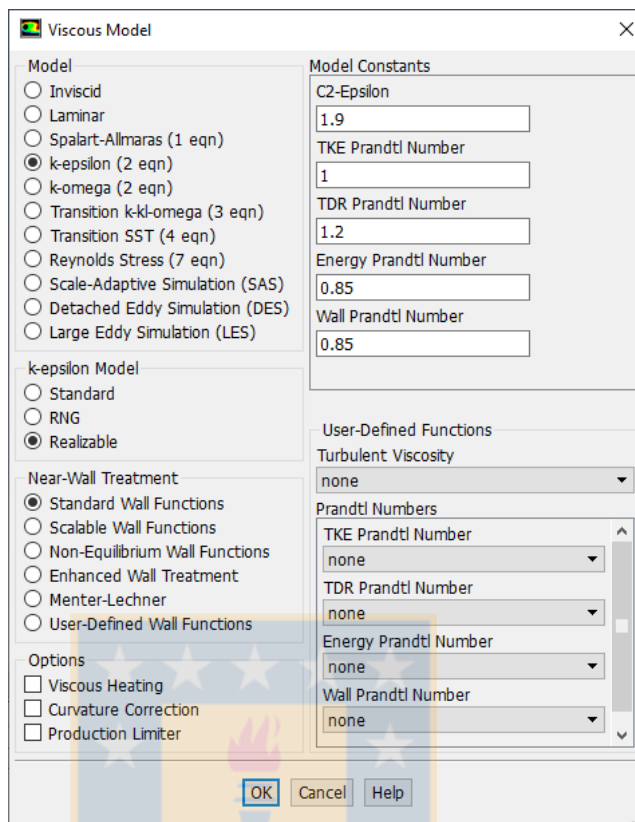


Figura 9. Descripción del modelo basado en resolución $k - \varepsilon$. **Fuente:** ANSYS, 2021.

El modelo $k - \varepsilon$ se configura en Realizable, la obtención de la variación de velocidad de flujo en cada sector de la simulación relacionando la presión como parámetro inicial, se tiene en cuenta que, las llaves de paso estarán en apertura completa según el sector a regar y acorde a lo conversado con los propietarios de los predios, el riego se realiza de un sector a la vez, debido a la poca presión en algunos sectores de riego.

Los materiales que se consideran en el software serán agua líquida a 18°C y PVC, con sus respectivas propiedades.

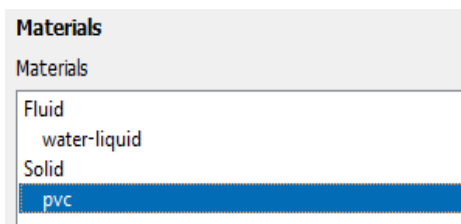


Figura 10. Materiales que influyen en la simulación para fluido y solido
Fuente: ANSYS, 2021

El método de solución acoplado resuelve un sistema de ecuaciones basado en los principios de conservación centrado en la presión, esta opción permite un nivel de convergencia significativamente mayor, ya que el sistema de ecuaciones discretizadas se almacenan en la memoria del ordenador mientras se resuelven los campos de velocidad y presión (Fiz, 2017).

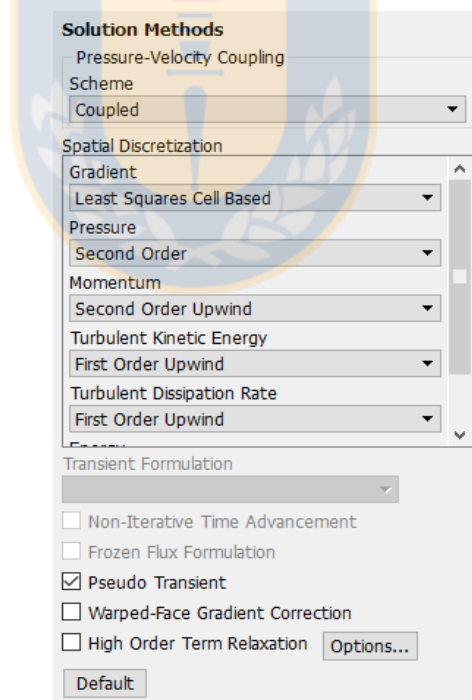


Figura 11. Método de solución para la relación presión – velocidad. **Fuente:** ANSYS, 2021.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Resultados previos

El Propietario menciona que el predio inicial fue el Huerto El Castaño con 5 cuarteles y 12 sectores de riego, con la integración del Huerto La Loma, esta configuración inicial aumenta en 2 cuarteles, por ende, 6 sectores de riego adicionales, dando un total de 7 cuarteles (Figura 12) y 18 sectores de riego (Figura 13), manteniendo el sistema de riego original, por lo que el ciclo de riego se completa en 3 días invirtiendo 2 horas en cada sector. Como la bomba hidráulica es la misma pese al aumento, el regar mayor superficie a la vez, no es una opción viable para reducir el tiempo de riego.



Figura 12. Cuarteles en los predios El Castaño (rojo) y La Loma (azul).
Fuente: Elaboración propia (Google Earth).

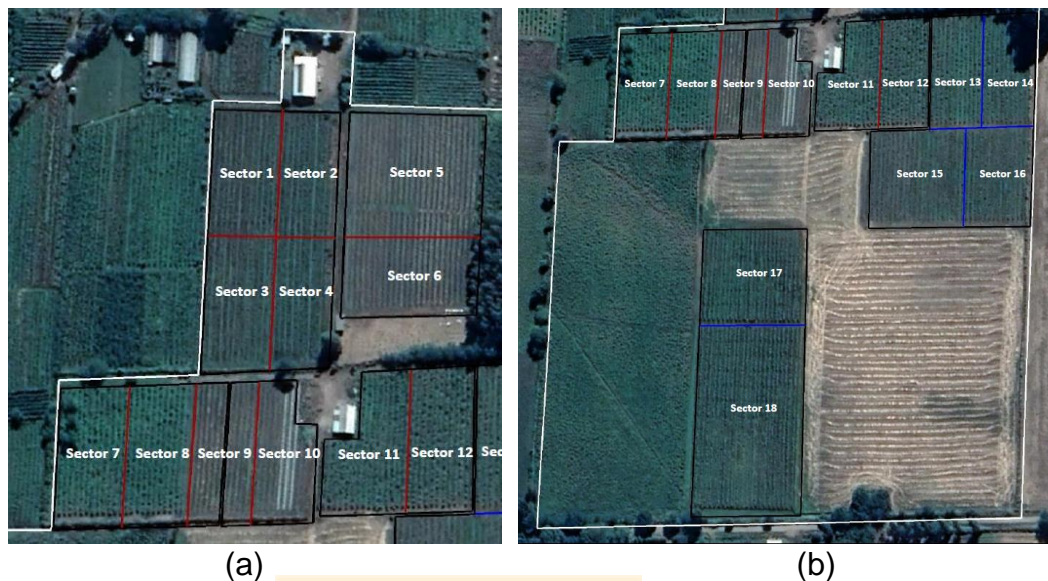


Figura 13. Sectores de riego en los predios El Castaño (a) y La Loma (b).
Fuente: Elaboración propia (Google Earth).

La elección de bomba se realiza supliendo la energía necesaria para que el gotero más alejado de la fuente hidráulica trabaje de forma adecuada, estimando las pérdidas por fricción lineal y en accesorios. Al considerar las zonas más lejanas (Figura 2) del sistema de riego y contrastando con la Figura 13, estos corresponden a los sectores 16 y 18, los cuales presentarán mayor pérdidas de carga por fricción, si se incluye las diferencias de cota (Figura 3) se observa que el sector 18 presenta un descenso y por contraparte, el sector 16 presenta un ascenso, si se toma en cuenta la posición del pozo como el punto inicial, la altura manométrica debe incluir la altura de impulsión desde la bomba sumergible hasta este punto referencial, que se encuentra a una profundidad de 12,6 metros bajo el nivel del suelo.

Por catálogo, la bomba actual es capaz de entregar entre $3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ y $18 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, para alturas manométricas de entre 70 y 14 metros, respectivamente. La máxima eficiencia de la bomba es de un 68%, entregando un caudal de $12 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ y elevando 46,5 metros. Mediante la ecuación [9] se obtiene la presión con la que se llega a la entrada del partidor (P_2/γ) y por medio de la ecuación [14], se obtiene la presión mínima que cada sector de riego requiere para suplir su necesidad.

Tabla 6. Altura manométrica a la entrada de cada partidor (P_2/γ) y presión mínima requerida a la entrada de cada lateral (H_c) por sector de riego

Sector	P_2/γ (m.c.a.)	H_c (m.c.a.)	Sector	P_2/γ (m.c.a.)	H_c (m.c.a.)
1	25,503	15,308	10	18,781	16,207
2	25,003	14,153	11	14,730	17,948
3	22,606	15,803	12	14,930	15,481
4	22,006	13,372	13	10,120	15,633
5	23,263	18,594	14	9,720	18,352
6	21,913	20,303	15	7,147	16,194
7	19,662	14,799	16	5,747	18,689
8	19,662	14,799	17	9,888	19,231
9	18,781	14,799	18	10,688	24,967

Fuente: Elaboración propia.

Mediante la planilla de anteproyecto ofrecida por la CNR, se corrobora la utilización de la bomba actual para suplir la necesidad de los huertos por cultivo, empleando los datos agroclimáticos de la Tabla 3, los registros en el cuaderno de campo del agricultor (marco de plantación, superficie por sector de riego, modelo de emisor) y para el mes de máxima demanda: Diciembre.

Tabla 7. Diseño agronómico del sistema de riego.

Cultivo	Arándanos	Frambuesas	
Distancia entre hileras	3,00	2,70	m
Distancia sobre hileras	0,80	0,30	m
ET_P max	6,10	6,10	mm día ⁻¹
K_c	1,00	1,20	
Demanda hídrica bruta	6,78	8,13	mm día ⁻¹
Demanda hídrica neta	6,10	7,32	mm día ⁻¹
Eficiencia del sistema	90	90,00	%
Modelo emisor	Línea de gotero AZUD PRO 1,6L		
Presión de operación	10,20	10,2	m.c.a.
Caudal emisor	1,55	1,55	L h ⁻¹
Nº laterales / hilera	2	2	
Nº de emisores / planta	4,85	1,82	
Distancia entre emisores	0,33	0,33	m
Nº emisores / hectárea	20202	22447	
Caudal por hectárea	8,70	9,66	L s ⁻¹
Número de sectores	5	5	
Superficie máxima regable	2,87	2,59	ha
Superficie diseño	1,75	1,75	ha
Nº de plantas / ha	4167	12346	
Nº total plantas	7291	21604	
Precipitación equipo	3,13	3,48	mm h ⁻¹
Tiempo de riego / sector	2,16	2,34	h
Tiempo total de riego	10,82	11,69	h

Fuente: CNR, 2019

La estimación se considera para cada cultivo, pero debido a la falta de información del predio, como datos de capacidad de campo y punto de marchitez permanente, la elección de la bomba se realiza de forma generalizada, es decir, considerando solo la evapotranspiración diaria del mes con mayor demanda, dando paso al diseño hidráulico.

Tabla 8. Diseño hidráulico del sistema de riego.

Cultivo	Arándanos	Frambuesas	
Largo hileras	100	100	m
Trazado submatriz	45	183	m
Trazado matriz	395	315	m
Diferencia de cota	0,5	-4	m
Ubicación válvulas en submatriz	Extremo	Extremo	
Válvulas/sector	1	1	unidad
Ø de la succión/ descarga	2	2	pulg
Total Submatriz	45	183	m
Total Matriz	445	365	m
Largo máximo de hileras por válvula	100	100	m
Superficie aproximada por sector	0,35	0,35	ha
Caudal aproximado por sector	3,04	3,38	L s ⁻¹
Polietileno	11900	13222	m
Emisores	36061	40067	unidad
CDT estimado	32,43	26,03	m.c.a.
Potencia requerida (BHP) al 65%	2,23	1,99	Hp
Motor seleccionado	3,00	3,00	Hp

Fuente: CNR, 2019

Lo que resulta en un ingreso de caudal apropiado para suplir la necesidad del predio, considerando el tiempo de riego diario habitual.

Tabla 9. Condiciones de evaluación para la elección de bomba del sistema de riego.

Caudal instantáneo Q85%	5	L s ⁻¹
Tiempo máximo de riego	12	h día ⁻¹
Mes máxima demanda	Diciembre	
Tipo de riego	Goteo	

Fuente: CNR, 2019

Empíricamente, la bomba actual (3 Hp) es capaz de regar un solo sector a la vez, con una presión que satisface la necesidad mínima requerida para un riego por goteo. Teóricamente, en gran parte del predio (sectores del 1 al 10) la presión a la entrada del partidador es mayor a lo requerido a la salida de éste,

y por debajo de lo que se necesita como mínimo para los demás sectores, si bien, el tiempo invertido es de 3 días para completar el ciclo de riego para 18 sectores, durante las 12 horas diarias, invirtiendo 2 horas por sector, repitiendo este patrón de riego de forma incesante, el gasto energético generando es importante, ocasionando un desgaste de material acelerado.

A lo largo de la matriz, la tubería toma diferentes posturas conforme a la cota del suelo entre un punto y otro, al observar la Figura 3, se muestra diferencias de cota de hasta 4 metros, tomando en cuenta que el pozo se denotó como la cota 0 (234,5 m.s.n.m.), el resto de la superficie no presenta ascensos ni descensos bruscos, sino que, de forma gradual, sin afectar mayormente la tubería en su trayectoria ni entre las entradas de cada sector, por lo que el simular dichas longitudes, no generarán un interés en estudiar las pérdidas por aumento de presión y velocidad en el sistema, más que solo cumplirán su función de transporte del fluido a los reales puntos de estrés en el sistema, que son los partidores de cada sector y los accesorios que las conforman, identificando tres partidores y que serán objeto de estudio, teniendo en cuenta que las llaves están abiertas completamente y la simulación será del fluido y una pared que recubre al flujo, el cual presenta las propiedades del PVC, principalmente la rugosidad y el diámetro hidráulico, y no las piezas de forma idéntica a las reales con vista externa, debido a que se trata de un análisis fluidodinámico a un conjunto de piezas o tramos y no a una pieza en específico.

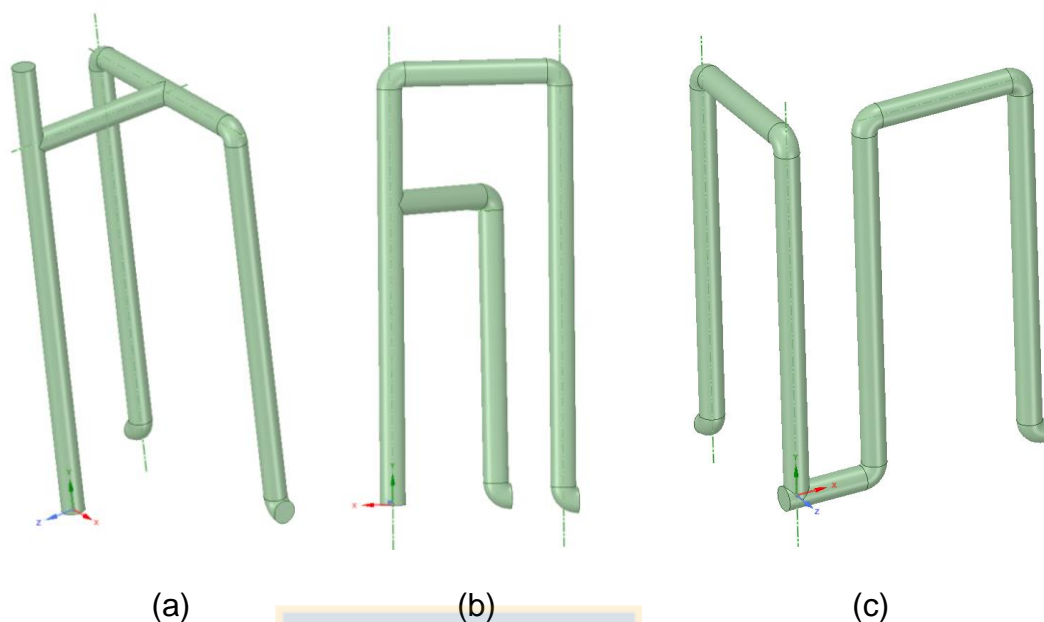


Figura 14. Partidores presentes en el huerto, modelos en ANSYS Fluent para los sectores 11 – 12 (a), 15 – 16 (b) y 17 – 18 (c). **Fuente:** Elaboración propia (ANSYS Student).

Para los diseños de partidores de la Figura 14, se denominarán en adelante como Modelo 1 (M1), Modelo 2 (M2) y Modelo 3 (M3) a las Figura 14.a, 14.b y 14.c, respectivamente. El proceder inicial será seleccionar solo una salida en cada uno y su presión de entrada respectivo para simular el comportamiento del fluido en el sistema, procediendo al mallado bajo las opciones de “Inflation” (Figura 15) y “Sizing” (Figura 16), para un mallado más homogéneo, uniforme y fino.

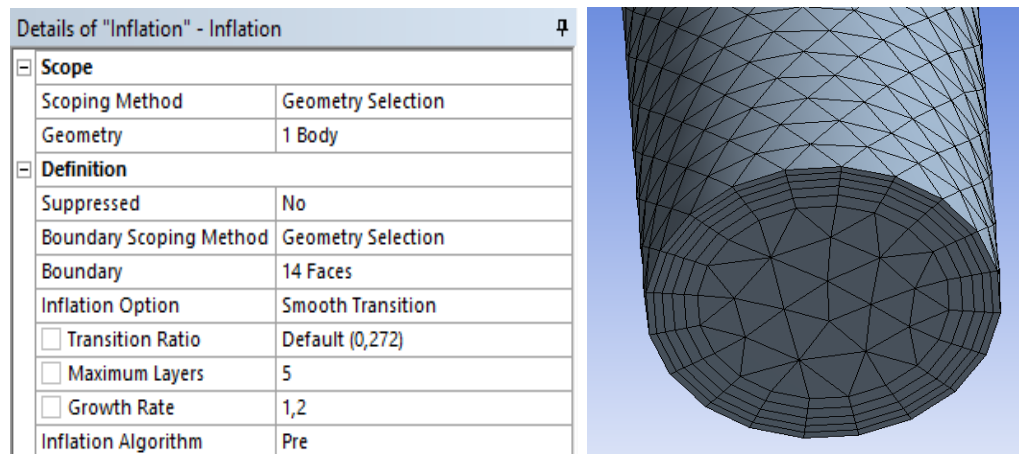


Figura 15. Opción "Inflation" de mallado para formación del objeto en estudio a la entrada del sector. **Fuente:** Elaboración propia (ANSYS Student).

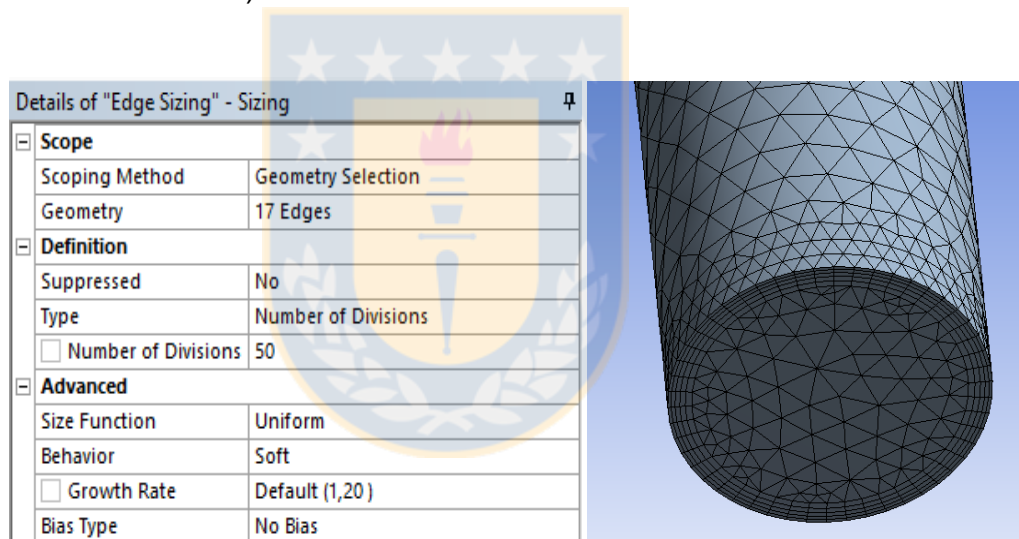


Figura 16. Opción "Sizing" de mallado para formación del objeto en estudio, a la entrada del sector. **Fuente:** Elaboración propia (ANSYS Student).

Si se toma como referencia el Modelo 2 para el mallado, resulta en un diseño más definido para la simulación:

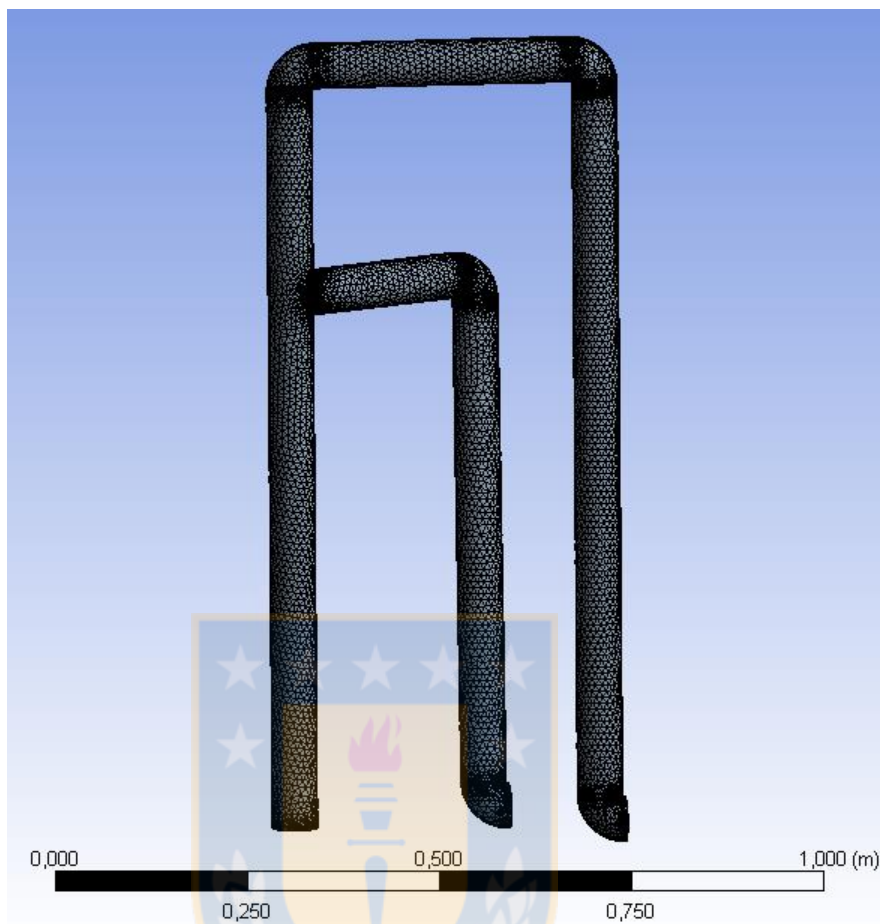


Figura 17. Mallado Modelo 2. **Fuente:** Elaboración propia (ANSYS Student).

La definición de propiedades del sistema depende de la identificación de zonas en el mallado, que posteriormente pasan a ser las condiciones de borde, ingresando valores en cada punto identificado, previo a la simulación, como temperatura del fluido, presión de entrada y salida, rugosidad del pvc y diámetro hidráulico, que serán aplicados para los tres modelos en cuestión, los que serán considerados como puntos críticos del sistema por su composición entre tuberías y accesorios, y debido a la rotura constante de algunos partidores según comenta el propietario (Figura 29).

5.2. Análisis de simulación de puntos críticos

La simulación se hizo conforme a la demanda de presión de cada sector a la entrada del mismo según las pérdidas de carga entre la bomba y el inicio del lateral, en donde la bomba deberá suplir esta exigencia y lograr un equilibrio energético entre ambos puntos.

Los valores ingresados inicialmente son de los sectores con altura por sobre la cota 0 y por debajo del mismo punto, los cuales tienen una composición diferente a lo convencional (M3), y se añaden otros dos partidores (M1 y M2), siendo uno de ellos, el punto más alejado del sistema y que está con disposición ascendente (M2) en su altimetría.

Estos sistemas comparten un mismo valor en cuanto a la temperatura del fluido (18°C), rugosidad del PVC ($1,5 \times 10^{-6}$ m) y diámetro hidráulico a la entrada de cada partidor (0,0592 m) y a sus salidas con reducción brusca (0,0464 m), para lo cual, la presión como condición inicial son los siguientes:

Tabla 10. Presión de entrada (P_{in}) al partidor y presión mínima requerida a la entrada de cada lateral (P_s) para las condiciones de borde en cada sector, 11 y 12 (M1), 15 y 16 (M2) y, 17 y 18 (M3).

Sector	P_{in} (bar)	P_s (bar)	Sector	P_{in} (bar)	P_s (bar)
11	1,474	1,531	16	0,642	1,580
12	1,474	1,511	17	1,185	1,717
15	0,642	1,442	18	1,185	1,638

Fuente: Elaboración propia

Si se ejecuta con solo una salida para la simulación inicial de M1, M2 y M3, los datos utilizados son de los sectores 12, 16 y 18, respectivamente. Elegidos por la altimetría ascendente con respecto al partidor (Figura 3), evaluando la velocidad y la presión, siendo esta última variable con la que Fluent evalúa.

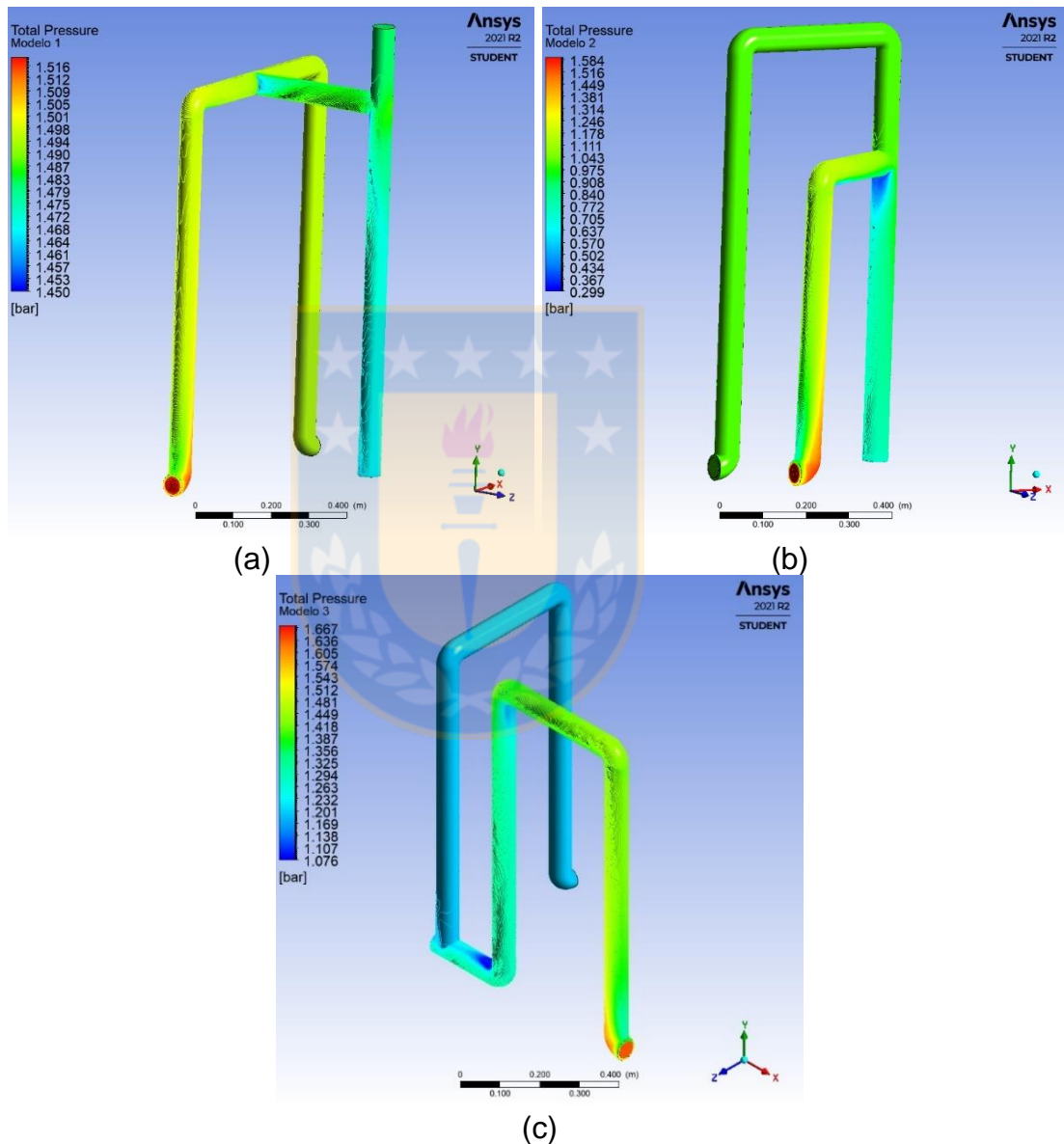


Figura 18. Presión del fluido para M1 (a), M2 (b) y M3 (c) con una llave de paso abierta. **Fuente:** Elaboración propia (ANSYS Student).

La presión para los tres modelos no supera los 2 bar a la salida del partidador, pero no cumple con la exigencia mínima de 1,5 bar a la entrada del partidador para un óptimo funcionamiento, estos modelos muestran una presión que no llega al límite soportado por la clase de tubería (C6), que es equivalente a una resistencia de presión de 6 bar aproximadamente, aun así, el riego es posible y satisface la exigencia hídrica constante del predio.

Si la presión de entrada es baja, no debería romper la tubería por donde fluye el fluido, pero el Propietario afirma que le ha ocurrido en más de una ocasión y debe reemplazar la tubería antes de las llaves de paso en M1 (Figura 18.a), existiendo una leve diferencia entre la presión de entrada y salida, manteniéndose bajo 2 bar.

En cuanto a M2 (Figura 18.b), siendo unos de los extremos más alejados y el que se encuentra en mayor altura topográfica, es el que menos presión de entrada tiene y la exigencia de lateral está muy similar a sus pares, este diferencial de casi 1,3 bar indica una deficiencia en cuanto a la bomba de riego para alcanzar un mínimo garantizado.

M3 (Figura 18.c) muestra condiciones similares a M1, siendo el segundo más alejado del sistema y es el que, teóricamente, debería ser utilizado para la elección de la bomba de riego, sin embargo, no ha presentado problemas de fatiga de material, pero no se descarta la posibilidad de que esto ocurra.

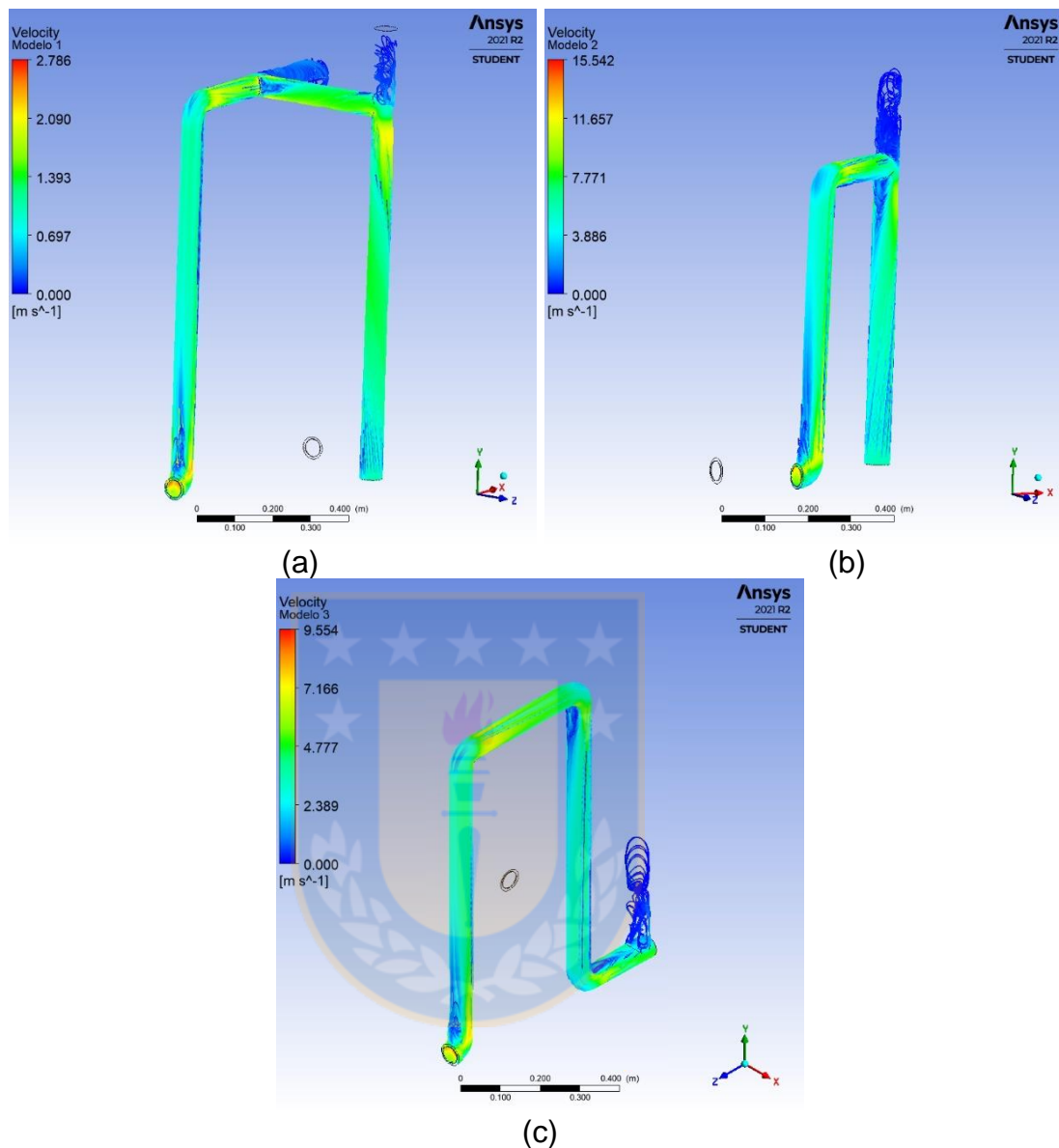


Figura 19. Velocidad del flujo para M1 (a), M2 (b) y M3 (c) con una llave de paso abierta. **Fuente:** Elaboración propia (ANSYS Student).

La velocidad baja a la entrada (derecha) con respecto a la salida del modelo (izquierda) que denota tonos verdes en transición a amarillos, indica un aumento significativo de velocidad en dichos puntos, destacando tonos rojizos para las zonas críticas en cada partidor, en el cual, el agua tiene mayor fricción y puede producir desgaste, mostrando una alta velocidad del fluido en el

interior de la tubería que conduce hacia el sector, lo cual indica en M2 (Figura 19.b) un alza considerable en esta variable y en M1 (Figura 18.a) la más baja, siendo en esta última, la que presenta daños que requieren reemplazo.

Si bien, cada modelo muestra su propia escala, las zonas afectadas corresponden a las mismas, los codos de 90° y las tee, mostrando en su cara más amplia una baja velocidad y la zona cerrada de la curva un aumento considerable de esta variable, continuando este aumento en la pared contraria de este punto y disminuyendo mientras el flujo avanza hasta encontrarse con otro accesorio. El modelo 2 presenta en las zonas más cerradas de la curva velocidades mayores con respecto a las demás, siendo motivo para un posible reemplazo de la pieza mencionadas.

Estos modelos presentan un valor específico para cada punto de simulación (entrada, salida, pvc y fluido)

Tabla 11. Presión (P_{fi}) y velocidad (V_{fi}) de flujo con una llave de paso abierta en cada modelo.

Variable	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	v ($m s^{-1}$)	P (bar)	v ($m s^{-1}$)	P (bar)	v ($m s^{-1}$)	P (bar)
Entrada	0,235	1,480	1,127	0,852	1,194	1,280
Fluido	0,608	1,493	3,832	1,043	2,456	1,308
Salida	0,262	1,511	1,631	1,579	1,025	1,638

Fuente: Elaboración propia.

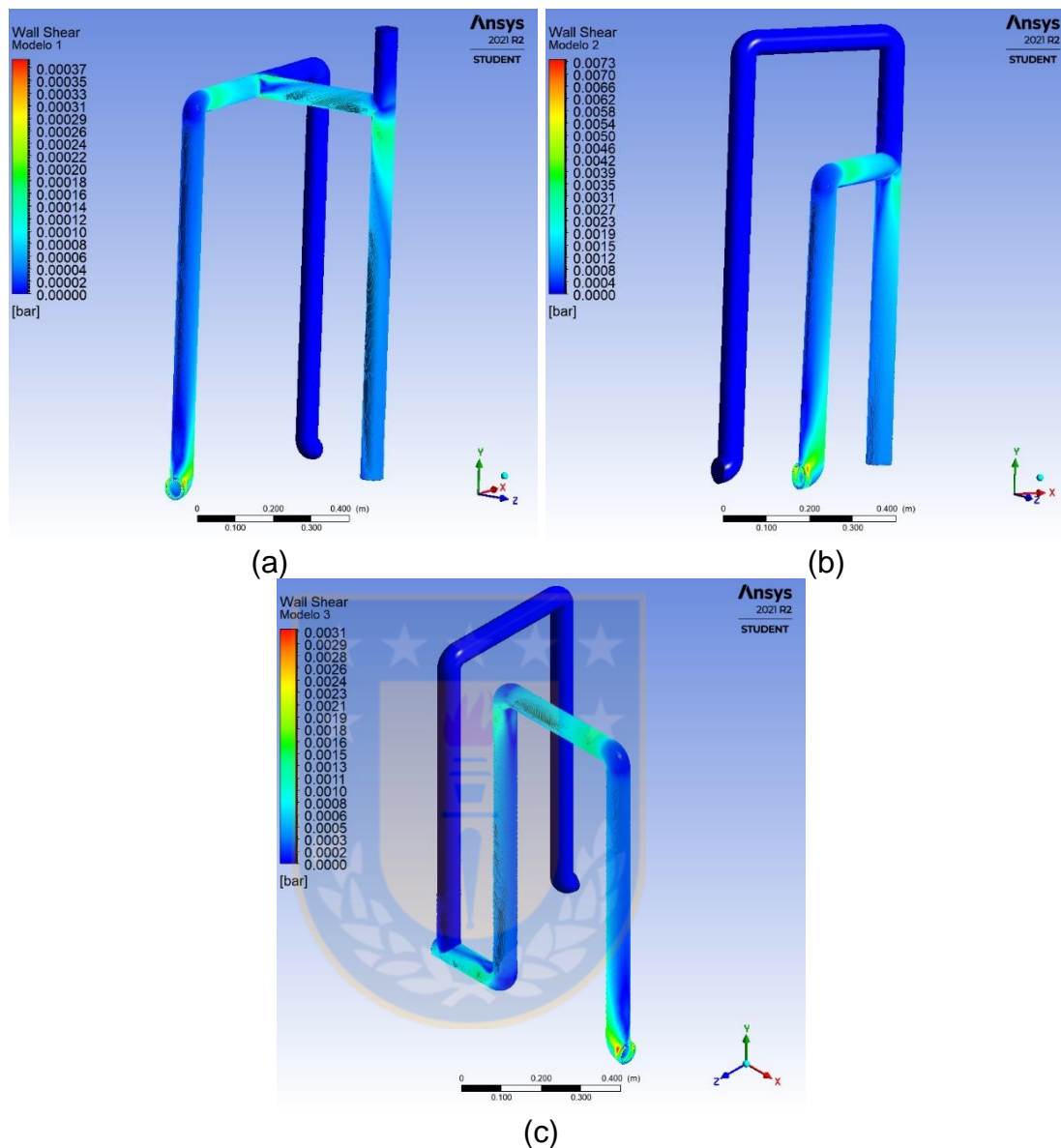


Figura 20. Cizalle en el pvc en M1 (a), M2 (b) y M3 (c) con una llave de paso abierta. **Fuente:** Elaboración propia (ANSYS Student).

La Tabla 9 muestra los valores iniciales de simulación, que difieren levemente de los obtenidos en la Tabla 10, esto indica un reajuste sobre el sistema actual de riego, por lo que, el modelo 1 es el que demuestra ser el más ad-hoc para la bomba actual desde el punto de vista de presión, aunque ocasione desgaste acelerado pese a su baja velocidad de flujo (Figura 20.a) en cuanto a M2 y M3,

estos muestran una presión menor a la mínima de entrada y cumple con una presión mínima de salida, disminuyendo al mínimo la posibilidad de fractura en los partidores, aunque sigue siendo M2 quien muestra un mayor desgaste por mínimo que sea (Figura 20.b)

Teóricamente, por el principio de Bernoulli, si la presión aumenta, la velocidad debe disminuir conforme a su avance, y aún más si existe una contracción brusca en cada salida del partidor, si analizamos según el factor velocidad, M1 es bajo en su inicio y aumenta al final del partidor, pero M3 disminuye en su salida y M2 denota un aumento considerable a la salida del partidor.

Hipotéticamente, la bomba hidráulica es capaz de proveer la necesidad del partidor completo para el sistema de riego con ambas salidas, en la práctica, no es posible, debido a problemas de presión en el sistema, suponiendo que la necesidad de riego fuera posible cubrirla, la simulación de la presión sería lo único necesario de evaluar para ver el comportamiento del flujo de fluido.

Tabla 12. Presión de entrada (P_{in}) y salida (P_{s1} y P_{s2}) con ambas llaves de paso abiertas para las condiciones de borde en cada modelo

Modelo	P_{in} (m s⁻¹)	P_{s1} (bar)	P_{s2} (bar)
1	1,474	1,531	1,511
2	0,642	1,442	1,580
3	1,185	1,717	1,638

Fuente: Elaboración propia.

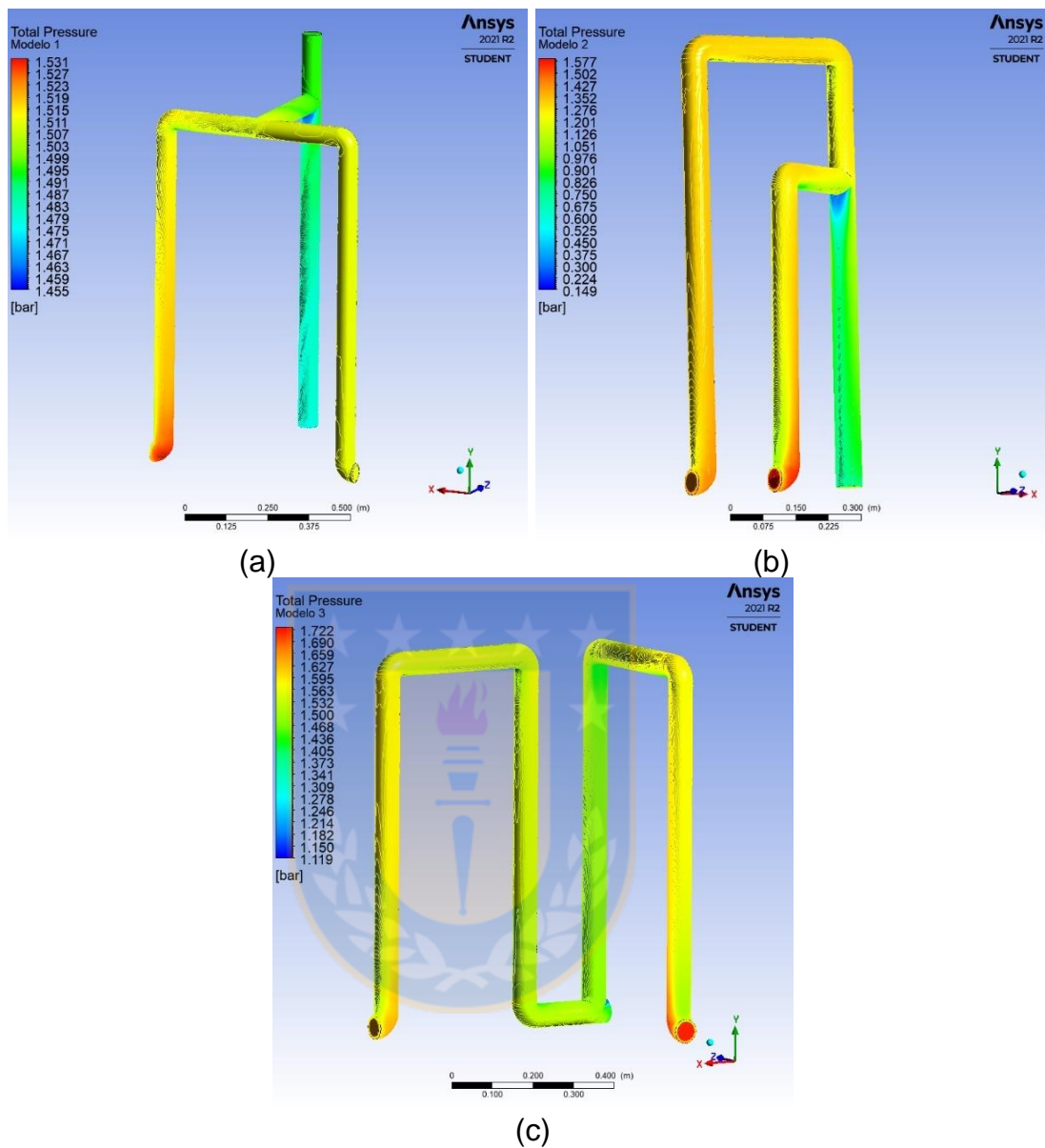


Figura 21. Presión del fluido sobre la pared del PVC para M1 (a), M2 (b) y M3 (c) con las dos llaves de paso abiertas. **Fuente:** Elaboración propia (ANSYS Student).

Al igual que en la Figura 18, las piezas que componen el modelo toleran la presión que se ejerce en ellas y están dentro del margen de clase 6 de la tubería, siendo una silueta muy similar conforme avanza el fluido hacia sus respectivos sectores en cada partidor, las zonas curvas más cerradas de cada

modelo, principalmente en las tee, muestran tonos azules debido a que la presión es menor y concentra la presión en la cara opuesta para una entrada más estable a dicho sector de riego.

Al ordenar por presión los modelos simulados y con una sola salida (Figura 18), la presión en M3 es mayor que en M2 y a su vez, estos dos son mayores que M1, al igual que en los modelos de dos salidas (Figura 21), por lo que, de forma hipotética, el modelo 3 entrega una mejor opción para repetir como conductor para el riego tecnificado por goteo en los sectores existentes, ya sea, uno a la vez o ambos simultáneamente, como la presión ejercida es menor a la que soporta el pvc (C6), será la velocidad quien determine el modelo ad – hoc, el cual reemplazará los demás para mantener una presión y velocidad adecuada, y así, reducir el desgaste acelerado en los partidores.

La variación de velocidad al interior del sistema indica la desviación del fluido a otros puntos en el partidor, como fugas en algún accesorio del mismo, presencia de sedimentación o simplemente por alimentar dos sectores simultáneamente con una bomba que no es la adecuada para el riego.

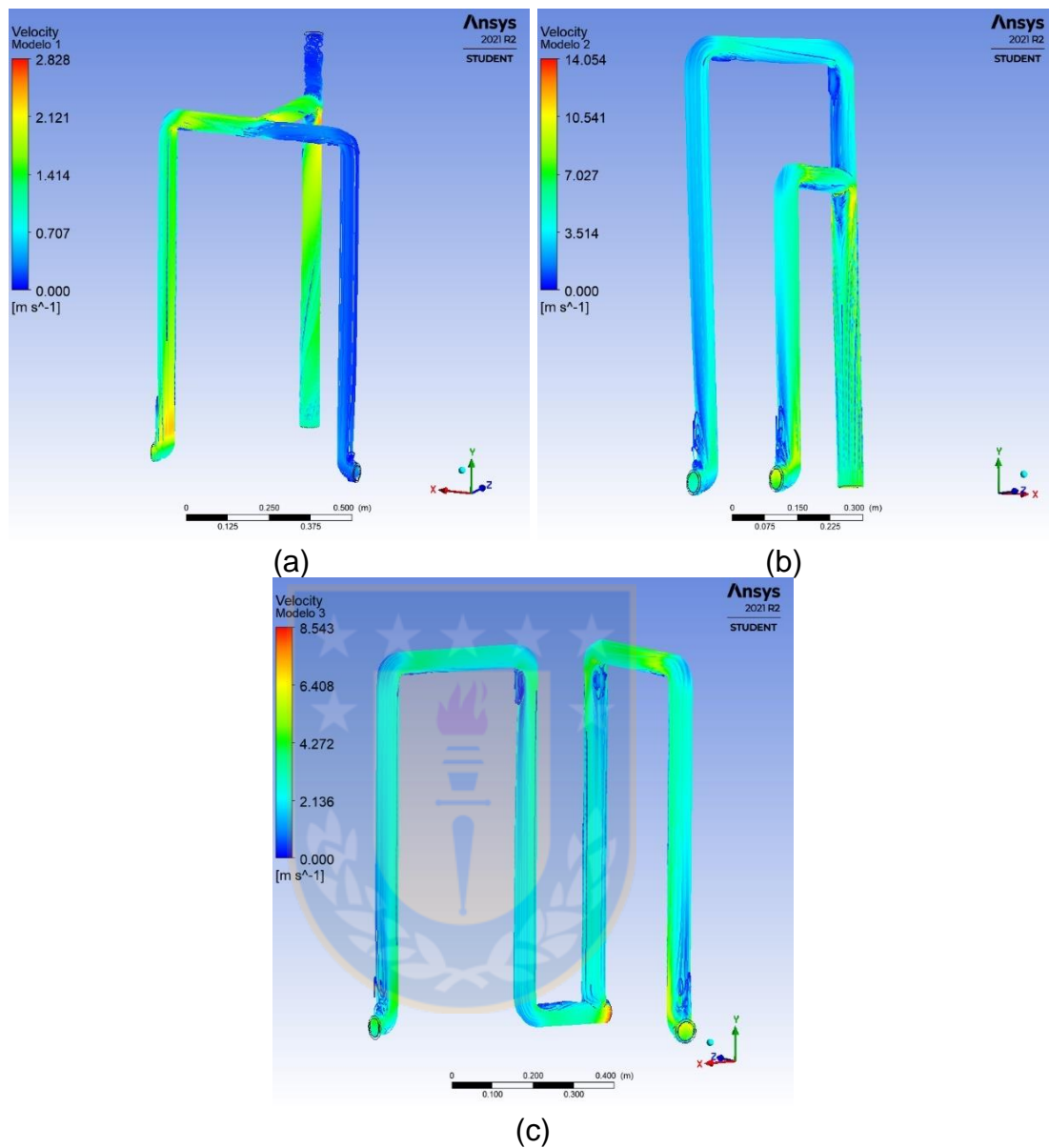


Figura 22. Velocidad del fluido para M1 (a), M2 (b) y M3 (c) con las dos llaves de paso abiertas. **Fuente:** Elaboración propia (ANSYS Student).

Esto denota a M2 como un modelo representativo como reemplazo de los otros modelos, debido a una presión intermedia estable entre M1 y M3, y una velocidad del fluido demasiado alta que requiere disminuir, y en lo posible,

variar lo menos posible la presión actual del sistema para no sobrepasar la capacidad de tolerancia del pvc.

Tabla 13. Presión (P_{fi}) y velocidad (V_{fi}) de flujo con ambas llaves de paso abiertas en cada modelo.

Modelo	P_{fi} (bar)	V_{fi} ($m\ s^{-1}$)
1	1,506	0,701
2	1,271	2,598
3	1,569	1,486

Fuente: Elaboración propia.

M1 tiene una velocidad de entrada y de salida por debajo de la mínima requerida ($0,5\ m\ s^{-1}$), por lo que se descarta como modelo para modificar y reemplazar los demás partidores por posible sedimentación, pese a tener una velocidad del fluido (V_{fi}) de $0,7\ m\ s^{-1}$ en su recorrido por el partidor.

M3 tiene una alta velocidad de entrada que puede provocar abrasión por sobrepasar la velocidad máxima estimada ($3,0\ m\ s^{-1}$) dentro de un conducto de pvc para un criterio de riego por goteo, pero tiene una velocidad mínima a la salida – recordar que todos los modelos tienen reducciones de 63 mm a 50 mm en cada salida –, por lo que es necesario aclarar empíricamente el por qué existen pérdidas de carga en el recorrido y no hayan daños visibles en el partidor, su velocidad de flujo es un valor dentro del rango mencionado, pero precisa ser mayor, por ser el segundo partidor más alejado del pozo.

M2 muestra una velocidad de entrada media, mientras que la de salida están por sobre el mínimo requerido, denotando una pérdida de carga y de energía mínima, y la velocidad de flujo es cercana al máximo, lo que permite que estos sectores, siendo los más alejados de la fuente de agua, no presente problemas de abrasión general ni de sedimentación, por lo tanto, este partididor cumpliría con ser un modelo a duplicar en otros sectores por su estabilidad.

5.3. Sistema de riego propuesto

De entre los modelos presentados que se consideraron como puntos críticos del sistema, demostró que son capaces de tolerar la presión que ejerce el flujo del fluido sobre el pvc, pese a la fricción ocasionada en la tubería por la velocidad del fluido.

Al considerar que solo un sector estuviera activo durante el riego, denotando que los accesorios facilitan el desgaste acelerado de otras zonas del sistema (zonas azules y rojas en cada modelo simulado), se puede considerar que el modelo 2 (Figura 18.b) tiene una presión consistente, que no es muy baja, pero tampoco es alta para ocasionar problemas, con ambos sectores regando al unísono (Figura 21.b), resultó ser el mismo modelo el que menos dificultades presenta con las condiciones actuales del sistema de riego, pero éste último resultado es válido solo de forma hipotética, porque en la práctica, la presión no es suficiente para regar de dos sectores a la vez, como se mencionó con anterioridad.

Por el factor velocidad, M2 es quien presenta una alta velocidad en ciertos puntos del partidador, ya sea con una salida o con ambas funcionando, por lo que este modelo es quien será sometido a cambios para disminuir el cizalle.

Por lo que la propuesta para mejorar los puntos críticos del sistema es:

1. Mejorar el sistema de riego con respecto a la presión y la velocidad en M2, por medio de la ecuación [9] y tomando los sectores 15 y 16 como referencia, siendo el partidador más alejado y en mayor altitud con respecto al pozo. Por tanto, si se opta por cambiar la bomba hidráulica y considerando el resultado expresado en la Tabla 7, la bomba debiese ser de 3,0 Hp como mínimo, priorizando una periférica por sobre una centrífuga, ya que la bomba actual es de la misma potencia. Si se utiliza el mismo equipo, es necesario añadir otra más al sistema para aumentar la presión para no realizar un cambio en la alimentación eléctrica.
2. Reemplazar los partidores de cada sector por un modelo ad – hoc, basado en simulaciones anteriores, será M2 quien sea duplicado, el cual demuestre que la presión no termine fatigado a corto plazo el conducto, y que la velocidad por un alza no provoque un desgaste mayor por fricción, pero que pueda ser suficiente para llegar al punto más alejado del predio.
3. La implementación de nuevos accesorios a este modelo, lo que permitirá disminuir la fricción en las zonas que presentan un mayor desgaste, ya

sea, reemplazando las tee por vee de 45°, seguido de curvas de 45° y los codos de 90° por curvas de 90°, logrando una conducción más apacible en las curvas que conforman el modelo.

5.4. Simulación de solución propuesta

Al integrar la propuesta uno, implica hacer funcionar el sistema con un nuevo caudal, por ende, una nueva presión en el sistema, condicionando la elección de una nueva bomba para la impulsión del fluido por la matriz, por lo que las pérdidas de carga serán diferentes al modelo original instalado.

Por tanto, si la solución es cambiar la bomba actual (modelo 4SR12m/14-N) de 300 L min⁻¹ por una bomba de igual potencia (4SR10m/16-N) con mayor presión y un caudal menor de 246,9 L min⁻¹, puede que sea posible el riego con ambos sectores funcionando – teóricamente hablando –, existe una variación considerable en cuanto a presión y velocidad en cada partidor que alimenta cada sector de riego evaluados con anterioridad:

Tabla 14. Presión de entrada (P_{in}) al partidor y presión mínima requerida a la entrada de cada lateral (P_s) con un nuevo caudal para las condiciones de borde en cada sector, 11 y 12 (M1), 15 y 16 (M2) y, 17 y 18 (M3)

Sector	P_{in} (bar)	P_s (bar)	Sector	P_{in} (bar)	P_s (bar)
11	2,750	1,389	16	2,111	1,438
12	2,750	1,370	17	2,610	1,576
15	2,111	1,301	18	2,610	1,497

Fuente: Elaboración propia

La presión mínima de entrada se centra en los sectores 15 y 16, que corresponde a M2, el cual sería el que menos problemas de fatiga presentaría en el partidador (teóricamente hablando), mientras que M1 tiene una mayor presión a la entrada, cabe recordar que, el Agricultor hizo mención de que este partidador presentaba de forma seguida fractura en accesorios y tuberías antes de las llaves de paso, por lo que, si se compara con las condiciones iniciales de la bomba anterior (Tabla 11), su aumento fue de casi el doble y es posible que presente aún más problemas si la presión es mayor y nuevamente se deba regar de un solo cuartel a la vez. M3 es un modelo convencional que funciona como partidador independiente cada uno, pero están presentes en un mismo punto, los que los hace parecer como un solo partidador, como se mencionó con anterioridad, no se nota a simple vista si este modelo tiene daños internos, pero si aumentó a más del doble su presión inicial, dejando a M2 como un modelo más versátil y sensible al cambio de equipo, ya que este cambio ocasionó un aumento de 2,5 veces su presión, con respecto al equipo de bombeo anterior. Tras simular, la presión de salida en M1 y M2, visualmente, muestra que son cercanos a 1,7 bar, mientras que M3 es cercano a 2 bar, si se observa la presión de entrada, deja a M2 por debajo de sus pares, pero cumpliendo con la presión mínima que exige el sistema, por lo que, la mínima variación de presión entre la entrada y salida en M2, lo define como un modelo versátil.

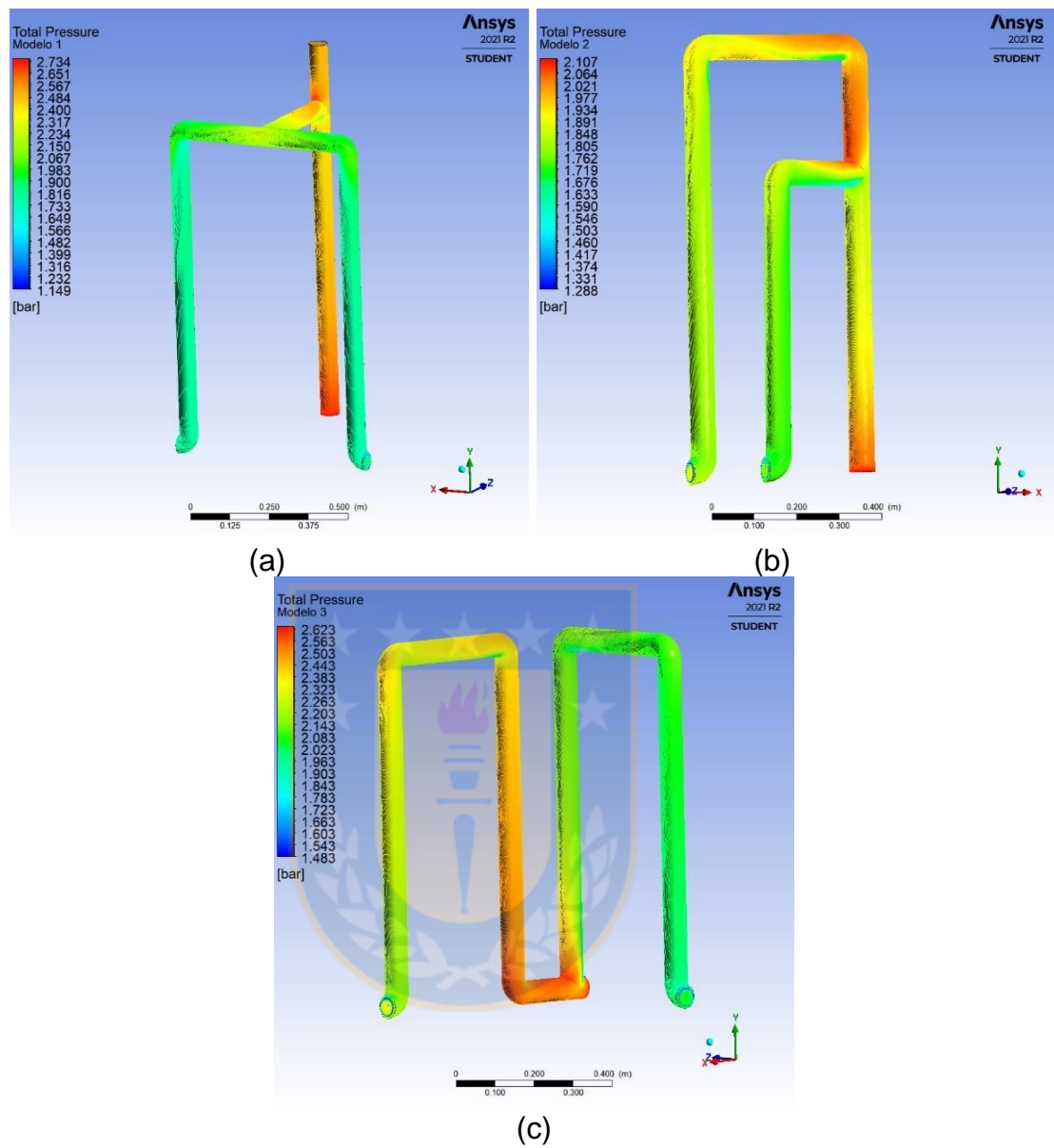


Figura 23. Presión en M1 (a), M2 (b) y M3 (c) con las dos llaves de paso abiertas y un nuevo caudal. **Fuente:** Elaboración propia (ANSYS Student).

Entregando los siguientes valores de presión post procesamiento:

Tabla 15. Presión (P_{fi}) y velocidad (V_{fi}) de flujo con ambas llaves de paso abiertas y un nuevo caudal en cada modelo.

Modelo	P_{fi} (bar)	V_{fi} (m s⁻¹)
1	2,117	2,426
2	2,038	2,521
3	2,103	2,290

Fuente: Elaboración propia.

Si nos referimos a presión de entrada, M1 sobresale de sus pares, pero no es suficiente para dañar el partidador, mientras que M2 se mantiene en un perfil bajo, pero superior al mínimo funcionamiento, lo que lo hace ideal para el sistema de riego por su baja presión ejercida sobre la tubería y velocidad que no supere la recomendada, concluyendo en M2 como la opción más viable.

La segunda propuesta indica el reemplazo de los demás modelos por el modelo anteriormente seleccionado, por lo que al sustituir a M1 y M3 por M2, conservando los valores de condición de borde de la tabla 11, se tiene:

Tabla 16. Presión (P_{fi}) y velocidad (V_{fi}) de flujo con ambas llaves de paso abiertas, un nuevo caudal y M2 en reemplazo de cada modelo

Modelo	P_{fi} (bar)	V_{fi} (m s⁻¹)
2.1	2,260	2,992
2.2	2,038	2,521
2.3	2,218	2,645

Fuente: Elaboración propia

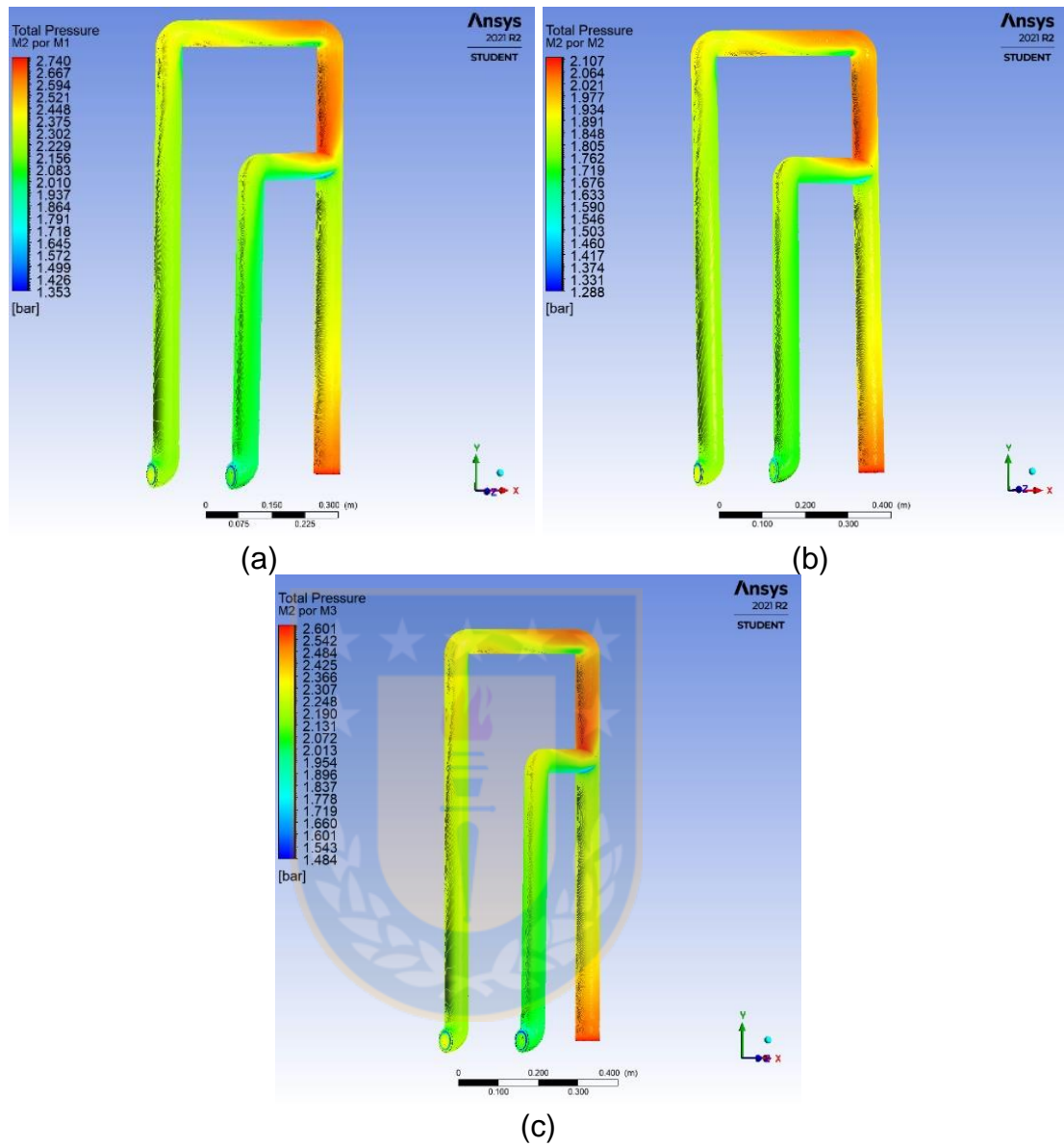


Figura 24. Presión en M2 como reemplazo de M1 (a), M2 (b) y M3 (c) con las dos llaves de paso abiertas y un nuevo caudal. **Fuente:** Elaboración propia (ANSYS Student).

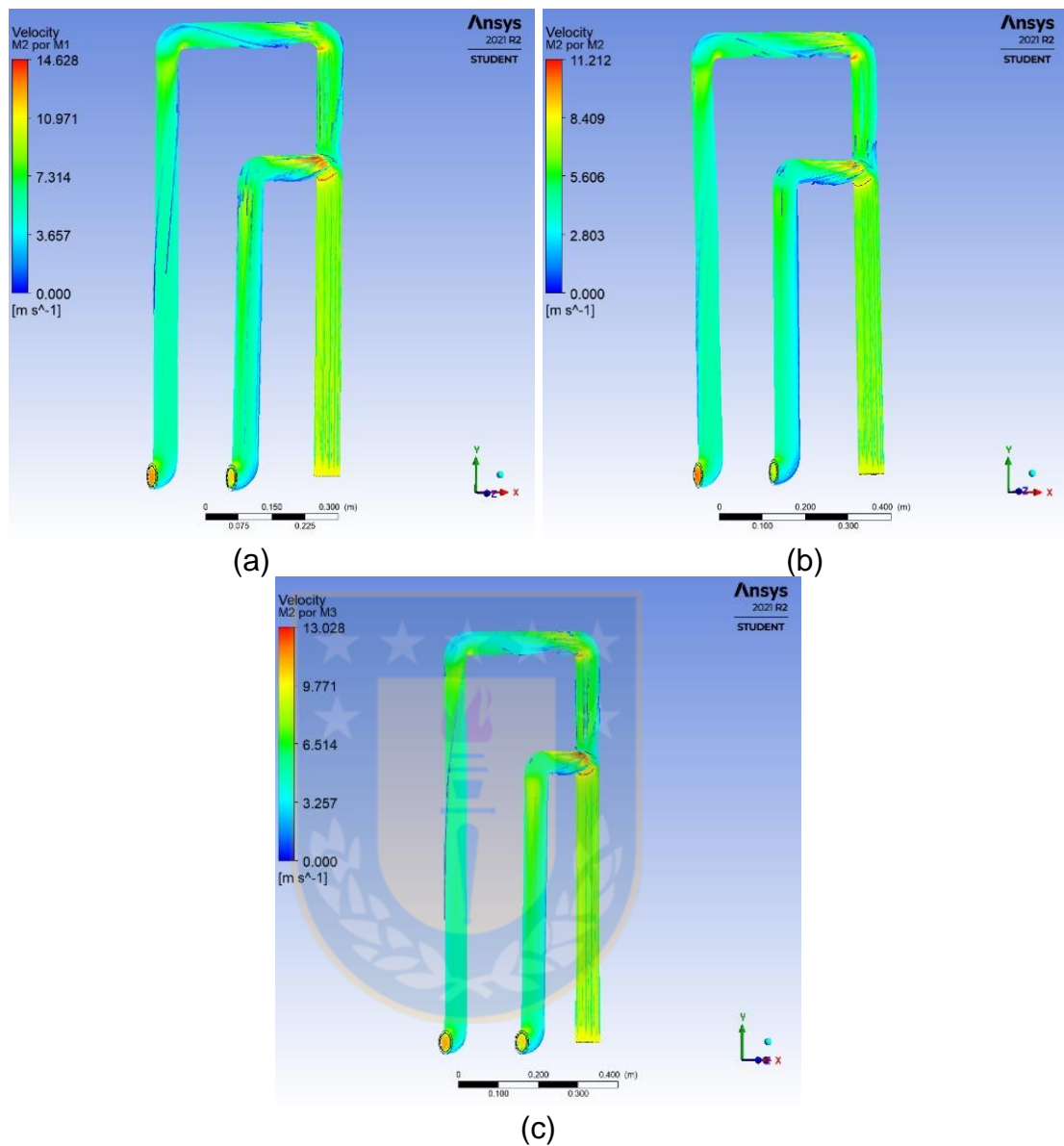


Figura 25. Velocidad en M2 como reemplazo de M1 (a), M2 (b) y M3 (c) con las dos llaves de paso abiertas y un nuevo caudal. **Fuente:** Elaboración propia (ANSYS Student).

La tercera propuesta implica cambiar los accesorios como codos y tee, también entregará un nuevo valor de presión y caudal en el sistema, por su nueva composición con accesorios diferentes y su ubicación en reemplazo de los otros modelos, por lo que puede abordarse por dos caminos, el primero es

con el caudal inicial, es decir, 300 L min^{-1} o adaptarlo a la nueva bomba sugerida, de $246,9 \text{ L min}^{-1}$.

Tabla 17. Presión (P_{fi}) y velocidad (V_{fi}) de flujo con ambas llaves de paso abiertas, M2 en reemplazo de cada modelo y cambio de accesorios en el modelo, para un caudal inicial (300 L min^{-1}) y un nuevo caudal ($246,9 \text{ L min}^{-1}$)

Modelo	Caudal inicial		Nuevo caudal	
	P_{fi} (bar)	V_{fi} (m s^{-1})	P_{fi} (bar)	V_{fi} (m s^{-1})
2.1	2,163	3,302	1,506	0,683
2.2	2,098	2,601	1,682	2,271
2.3	2,183	3,122	1,542	1,849

Fuente: Elaboración propia

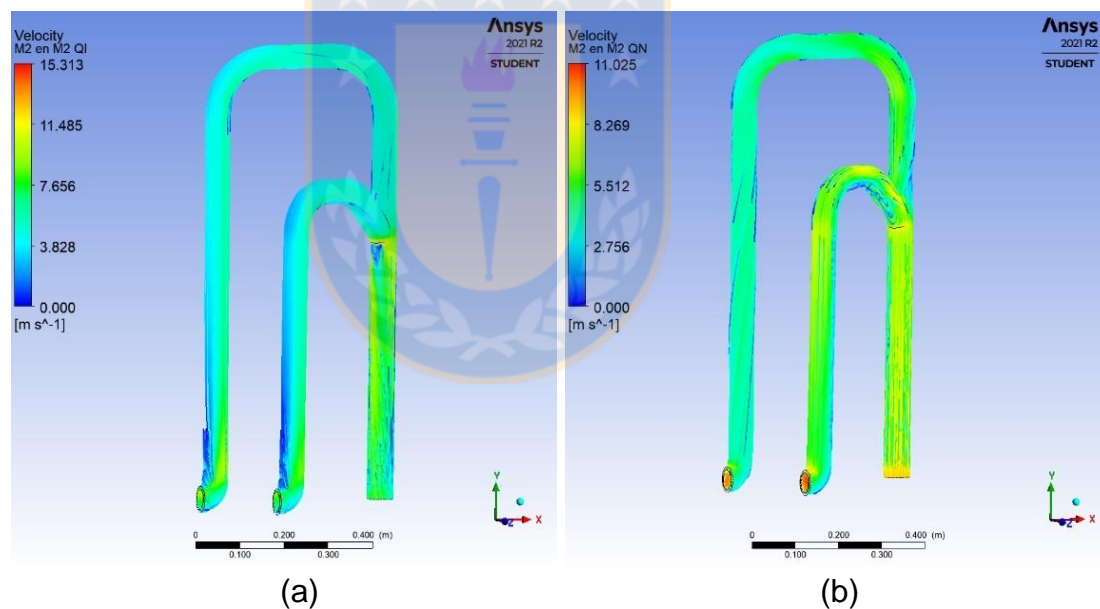


Figura 26. Velocidad en M2 con las dos llaves de paso abiertas, nuevos accesorios, con un caudal inicial (a) y un nuevo caudal (b).
Fuente: Elaboración propia (ANSYS Student).

Teniendo en cuenta la presión y velocidad de los modelos al regar con ambas salidas (Tabla 16), al referirse al caudal inicial (300 L min^{-1}) existe una diferencia notable en la presión y por sobre todo en la velocidad, la cual

sobrepasa el límite recomendado del flujo de 3 m s^{-1} , salvo M2.2 que tiene una velocidad alta, por lo que teóricamente, se descartaría a M2.1 y M2.3 como modelos viables.

Al considerar un caudal nuevo ($246,9 \text{ L min}^{-1}$), la presión es menor a 2 bar, pero suficiente para suplir la necesidad del lateral, en cuanto a velocidad, ocurre lo contrario, es menor que para los modelos 2.1 y 2.2 que en sus pares originales, excepto el modelo 2.3 que mostró un pequeño aumento, aun así, sigue siendo M2.2 el que tiene una mayor velocidad y presión a la vez.

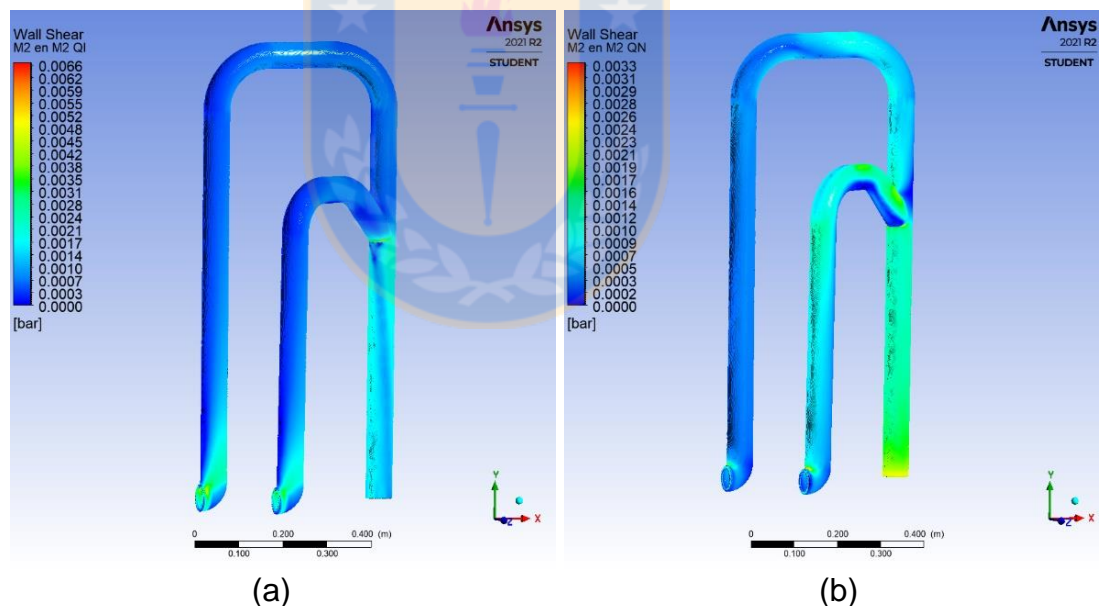


Figura 27. Cizalle en M2 con las dos llaves de paso abiertas, nuevos accesorios, con un caudal inicial (a) y un nuevo caudal (b).
Fuente: Elaboración propia (ANSYS Student).

La Figura 27.a (caudal 300 L min^{-1}) muestra que la fricción es mayor en el recorrido desde el inicio del partidor hasta la primera salida, manteniendo al mínimo el desgaste en el recorrido hasta cada salida, en las cuales vuelve a aumentar, a diferencia de la Figura 27.b (caudal de $246,9 \text{ L min}^{-1}$) que mantiene un desgaste homogéneo en todo su avance, aun así, este último causa un menor daño.

Si bien, estos modelos simulados presentan las posibles fallas en puntos específicos, su origen se demuestra en la siguiente figura:

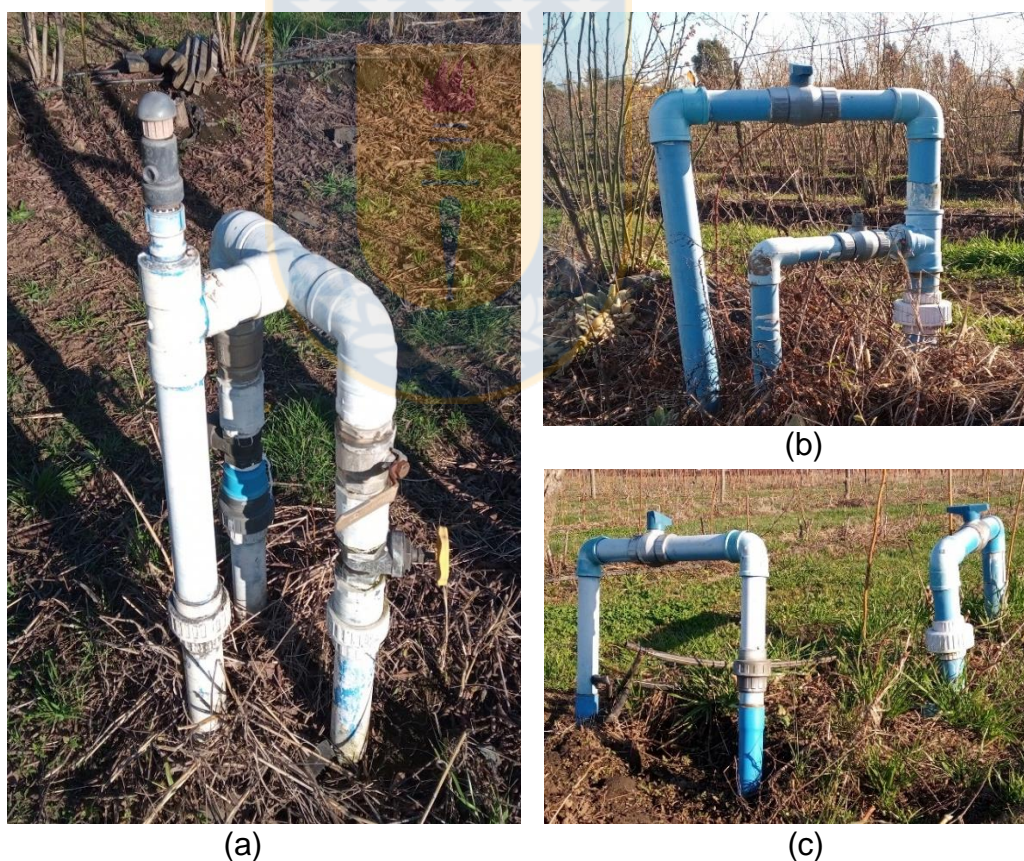


Figura 28. Modelo 1 (a), modelo 2 (b) y modelo 3 (c) simulados en ANSYS Fluent (de forma interna). **Fuente:** Elaboración propia.

Dichos diseños son modificados y adaptados según los materiales que el propietario tuvo en dicho momento, saliendo de diseños predeterminados como el M3 (Figura 28.c) y utilizando el ingenio para creaciones como el M2 (Figura 28.b) y M1 (Figura 28.a), los cuales divulgan desconfianza por su forma poco particular en otros agricultores, pero puede tener sus pro y contras, como lo es el modelo 2, en el que la presión no superó la admitida por la tubería (C6) y la velocidad es considerable para cubrir la necesidad de cada sector, presentando un decrecimiento tenue de estos parámetros debido a su forma, caso contrario es el M1, el cual presentó problemas en la tubería de entrada del partidador, a la altura de la primera tee del modelo y en una de sus llaves de paso (Figura 29), el goteo por dicho accesorio es frecuente al regar un sector por vez (Figura 21) y no siendo reemplazado, sino que, fortificando la zona:

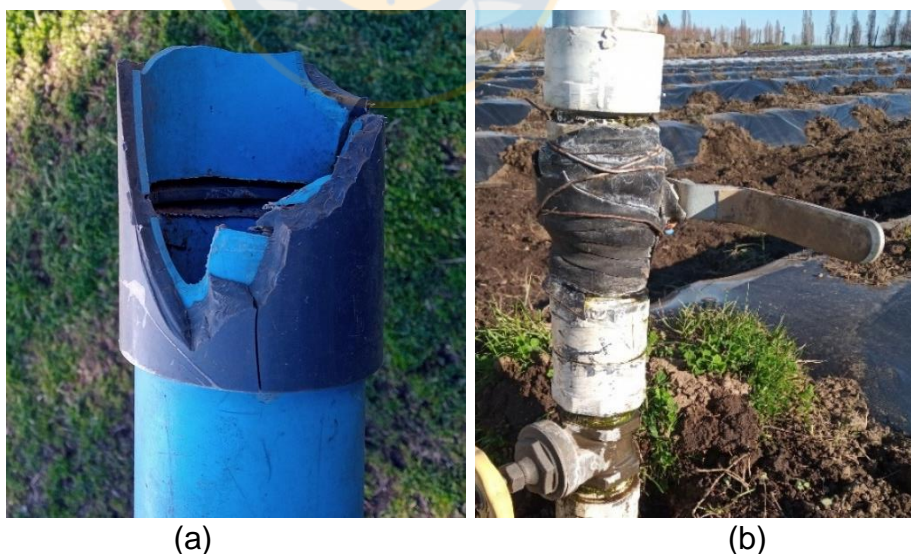


Figura 29. Desgaste acelerado en el modelo 1, fractura de la tubería a la entrada del partidador (a) y reforzamiento a llave de paso por fisura en el accesorio (b). **Fuente:** Elaboración propia.

Esta falla es recurrente en el sistema de riego para el modelo 1 y debe ser revestido para continuar con el mismo accesorio o sección, por otro lado, el reemplazo de ciertas piezas en el partididor se realiza cada tres o cuatro años, debiéndose a la fatiga en dicha zona por diferentes razones y de las cuales se puede especular, como sedimentación, alta fricción u otras. Como la simulación predijo, la fractura será en puntos de alta presión y el desgaste por la alta velocidad, pero lo que no exhibió, fue la fatiga en la llave de paso en el modelo 1 (Figura 29.b), lo cual pudo deberse a la circulación del fluido a una alta presión y la llave no estaba completamente abierta, tal como se consideró en la simulación, o simplemente la presión fue demasiada, que al estar cerrada una de ellas, el sistema no fue capaz de soportar dicha presión y la llave cedió, lo que también sería válido para la fractura presentada.

Este daño causado al sistema por la presión y la velocidad en los partidores demuestra la cercanía entre los datos ingresados y lo visto en terreno, siendo los modelos una representación de lo que pudo haber sucedido, sucede y/o sucederá en cada punto, zona o sistema en evaluación, esto se ve reflejado en la fractura en M1 y su modelación, apuntando con precisión en la zona en donde ocurre el colapso de la tubería – accesorio, por lo que, la simulación, aunque no incluye en detalle la información hasta el n-ésimo punto que compone el sistema, de forma global influye y entrega una aproximación representativa del modelo, zona o punto a simular.

6. CONCLUSIONES

El desgaste ocasionado por la interacción fluido – sistema de riego generó que los modelos existentes cedieran unos antes que otros a la presión ejercida por el flujo y la velocidad con la que entra y sale de cada sección y/o accesorio que compone cada modelo, esto involucra la distancia entre cada sector y la bomba de riego, por lo que, los partidores que estén más cercanos, presentarán mayor presión en el sistema, lo que culmina en el descarte parcial del modelo convencional de los partidores que se instalaron (Figura 14.c), la modificación de los otros modelos por uno más eficiente y un menor cizalle por velocidad en accesorios con salidas bruscas y curvas.

Dentro de los modelos presentados, tanto la presión como la velocidad gobiernan en el sistema, generando turbulencia en el interior y remolinos en algunos sectores de cada modelo, estas zonas son consideradas como puntos críticos dentro del sistema por la complejidad de su estructura (accesorios – tuberías) y son analizadas de forma macro, vale decir, el partidador en sí, los cuales se encuentran en tres modelos diferentes dentro del establecimiento y fueron objeto de estudio, considerándose como puntos críticos del sistema de riego por goteo, descartando las tuberías debido a que su flexibilidad (manual VINILIT) permite acoplarse a la topografía del predio sin mayor problema, el cual si puede ser modelado para su estudio, pero el software es limitado en la cantidad de datos ingresados y el mallado del mismo sería menos fino,

permitiendo una representación del sistema con un error mayor al esperado y un resultado aún más alejado de la realidad.

La velocidad y la presión del fluido no están separadas ni apuntan a diferentes zonas en los puntos críticos evaluados, sino que una es consecuencia de la otra y viceversa, según la dirección del flujo y los obstáculos que se encuentre en su recorrido, generando una relación velocidad – presión, indicando que son proporcionales entre sí y que actúan sobre el sistema en las mismas zonas, salvo en curvas cerradas o bifurcaciones, generando mayor turbulencia en las zonas de cambio de dirección abrupta (Figura 20), la identificación en la simulación de esta relación entre presión y velocidad, determinan consistentemente, las zonas en donde el fluido causará daño interno a su conductor y la fatiga acelerada del mismo.

Los partidores tienen un desgaste gradual y cada cierta cantidad de años deben ser reemplazados, pero si el sistema es forzado a soportar presiones mayores para la cual fue diseñado, entonces el desgaste se acelera y disminuye su durabilidad, por lo que es necesario reemplazarlos o modificarlos para disminuir dicho daño y causar un menor impacto a estos puntos críticos en los partidores que yacen en el predio (considerando que la bomba de riego se mantiene y recordando que la bomba no es capaz de regar dos sectores a la vez y se sobredimensiona si riega solo uno), generando que de entre los partidores, se considere el que menor presión ejerce y modificarlo para

disminuir aún más su presión y el sistema no colapse de forma abrupta, siendo tentativo para reemplazar los otros partidores presentes en el huerto por este modelo modificado, así como la bomba de riego para el aumento de superficie de riego.

De forma presencial, los partidores presentan fugas principalmente en los accesorios y no en la unión con la tubería, la rotura en el modelo se da antes del primer accesorio y después o sobre la llave de paso, debiéndose a diferentes posibilidades como una alta velocidad en el sistema generando fricción y la presión encargándose de realizar la fisura, lo cual lleva a cambiar una sección del modelo. Dichas fallas son reflejadas en la simulación y conllevan dos aseveraciones, una simulación a cabalidad y representación de cada partididor y sus modificaciones, y predecir futuros problemas, ya sea, para mejorar la eficiencia o estar preparado para reparar aquella sección.

Por último, el rediseñar el sistema de riego con visión de mantener lo ya instalado y el costo sea mínimo para sus modificaciones, será necesario el cambio tes y codos de 90° por vees y curvas de 45 y 90°, lo que permite la regulación de la presión (y por ende la velocidad) en el sistema, manteniendo este parámetro estable dentro de los márgenes que este soporta (clase 6) y sin perder la cantidad mínima necesaria requerida por el lateral, con el fin de aumentar la superficie de riego y optimizar los recursos con los que se cuenta.

7. LITERATURA CITADA

1. Agrometeorología. 2019. Red agrometeorológica de INIA: Evapotranspiración (ET_o) [en línea: programa computacional]. INIA, Chile. <<https://agrometeorologia.cl/evapotranspiracion/>>. [Consulta: 18 julio 2020].
2. Anaya-Durand, A.I., G.I. Cauich-Segovia, O. Funabazama-Bárcenas y V.A. Gracia-Medrano-Bravo. 2014. Evaluación de ecuaciones de factor de fricción explícito para tuberías. Educ. Quím. 25(2): 128-134.
3. ANSYS. 2021. Ansys Fluent: fluid simulation software [en línea]. ANSYS. <<https://www.ansys.com/products/fluids/turbulence-modeling>>. [Consulta: 28 junio 2020].
4. AZUD. AZUD PRO [folleto]. Sistema AZUD. España, 2018.
5. Besio, J.F. 2014. Caracterización del transporte de pulpa de cobre en tuberías, mediante simulación. Tesis, Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Mecánica. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Mecánica. Santiago, Chile.

6. Carrazón, J. 2007. Manual práctico para el diseño de sistemas de minirriego. Serie: Tecnologías. FAO. Roma, Italia.
7. Castro, S.P. 2004. Diseño de un sistema de riego localizado en frutillas y estudio de la rentabilidad del cultivo considerando diferentes aportes del estado a la inversión, a través de la Ley 18.450. Memoria de título, Ingeniero Agrónomo. Universidad de Talca, Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela de Agronomía. Talca, Chile.
8. CNR (Chile). 2019. Planilla anteproyecto de riego tecnificado [en línea]. Comisión Nacional de Riego, Chile. <<https://www.cnr.gob.cl/wp-content/uploads/2019/04/Planilla-anteproyectos.xlsx>>. [Consulta: 08 agosto 2020].
9. Dávalos, E.T. 2020. Modelo numérico CDF del túnel de carga, tubería a presión y distribuidores utilizando el paquete computacional Ansys Fluent. Caso de aplicación proyecto hidroeléctrico sopladora. Proyecto de título, Magíster en Recursos Hídricos mención en Diseño de Obras Hidráulicas. Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental. Quito, Ecuador.

10. Fiz, C.J. 2017. Cálculo de coeficientes de flujo en válvulas mediante CFD para uso en AVL BOOST. Grado, Ingeniería Mecánica. Universidad de Valladolid, Escuela de Ingenierías Industriales. Valladolid, España.
11. Giles, R.V. 1969. Mecánica de los fluidos e hidráulica: Teoría y 75 problemas resueltos. (2a. ed.). McGraw-Hill. Madrid, España.
12. Gracia, J.M. 2017. Análisis pérdidas de carga en tubos venturi mediante técnicas CFD. Trabajo fin de grado, Ingeniería en Tecnologías Industriales. Universitat Politècnica de València, Escuela Técnica Superior Ingenieros Industriales Valencia. Valencia, España.
13. Heras, S. de las. 2011. Fluidos, bombas e instalaciones hidráulicas. Oficina de Publicacions Acadèmiques Digitals de la UPC. Barcelona, España.
14. Hirzel, J.F. 2009. Nodo tecnológico de riego en el secoano Región de O'Higgins Fase II. Boletín INIA N°190. INIA Rayentué. Litueche, Chile.

15. López, R. 2016. Manejo y uso eficiente del agua de riego intrapredial para el sur de Chile: Conceptos y consideraciones básicas en métodos y programación de riego para optimizar el recurso hídrico. Boletín INIA N°340. INIA Carillanca. Temuco, Chile.
16. Márquez, R.I. 2012. Evaluación técnico económica del entubamiento presurizado de dos canales de riego en la comuna de Alto del Carmen de la III Región de Atacama, Chile. Memoria de título, Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Escuela de Pregrado. Santiago, Chile.
17. Mataix, C. 1982. Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. (2a. ed.). Ediciones del Castillo. Madrid, España.
18. Modon, A. 2017. Teoría de mecánica de los fluidos: Apuntes. Universidad Nacional de Cuyo, Facultad de Ingeniería. Mendoza, Argentina (Documento de clases, ariel.modon@ingenieria.uncuyo.edu.ar).
19. Núñez, J.A. 2014. Método de Newton para la simulación numérica del modelo de Houska. Proyecto de titulación, Matemático. Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ciencias. Quito, Ecuador.

20. Ordóñez-Viñán, M.A., S.M. Aquino-Arroba, L.S. Orozco-Cantos, E.R. Pozo-Safla, y E.Á. Jácome-Domínguez. 2018. Modelización CFD para determinar el comportamiento del fluido en tuberías de PVC. Dom. Cienc. 4(1): 434-446.
21. Sánchez, J. 2004. Simulación numérica directa en paralelo de las ecuaciones de Navier-Stokes en flujos con capa límite desprendida. Aplicaciones en instalaciones deportivas con gradas cubiertas. Proyecto de fin de estudio, Ingeniería Industrial. Universidad de Sevilla, Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla. Sevilla, España.
22. Toapanta, L.F., G.A. Bohórquez, L.E. Caiza y W. Quitiaquez. 2018. Análisis numérico de los perfiles de velocidad de un flujo de agua a través de una tubería con reducción gradual. Enfoque UTE 9(3): 80-92.
23. Villegas-León, J.J., A. López-Lambraño, J.G. Morales-Nava, M. Pliego- Díaz, C. Fuentes y A. López-Ramos. 2015. Expresiones analíticas del coeficiente de pérdidas de energía en dispositivos de reducción del diámetro bajo régimen forzado. Rev. Ing. (43): 24-31.
24. Vinilit. 2018. Línea presión. Boletín técnico. Duraltec Vinilit. Santiago, Chile.

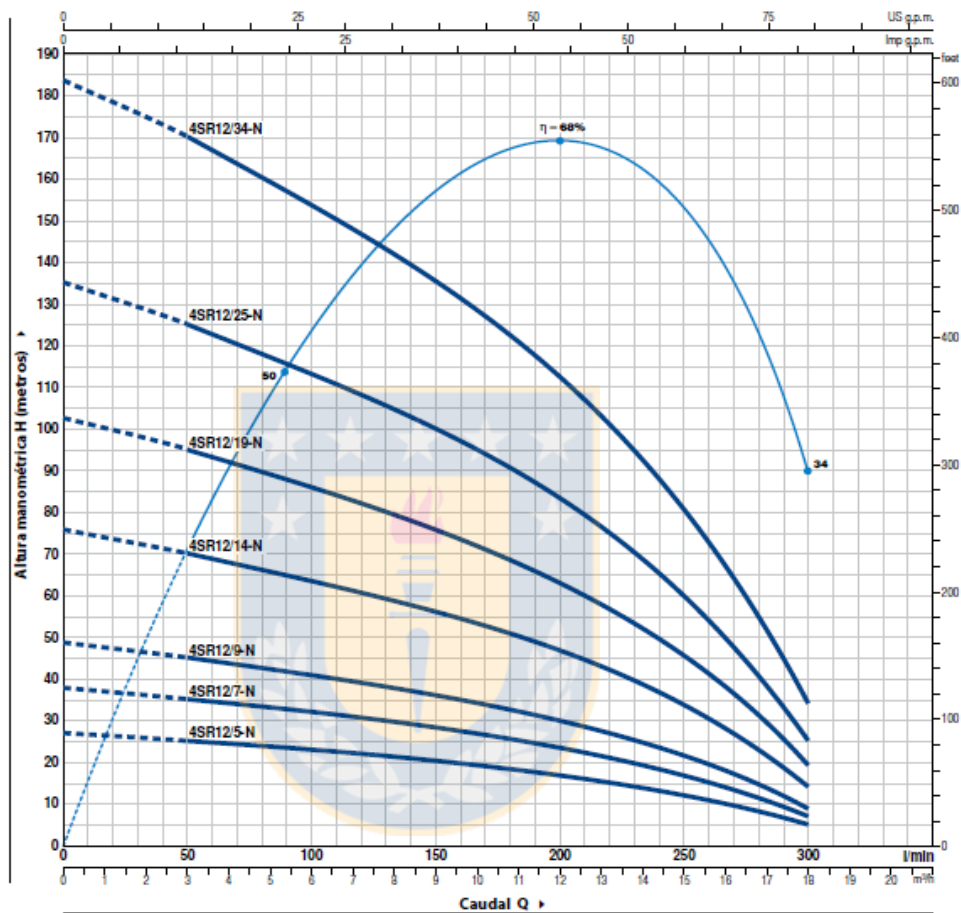
8. ANEXO

4SR12



CURVAS Y DATOS DE PRESTACIONES

50 Hz n= 2900 rpm



MODELO		POTENCIA (P ₂)		Q	Flow Rate (l/min)														
Monofásica	Trifásica	kW	HP		0	3.0	6.0	8.4	10.2	12	13.8	15.6	16.8	18.0					
4SR12m/5 -N	4SR12/5 -N	0.75	1	0	50	100	140	170	200	230	260	280	300						
4SR12m/7 -N	4SR12/7 -N	1.1	1.5	27	25	22.5	20.5	18.5	16.5	14	10.7	8	5						
4SR12m/9 -N	4SR12/9 -N	1.5	2	38	35	31.5	28.5	26	23.2	19.7	15	11.2	7						
4SR12m/14-N	4SR12/14-N	2.2	3	48	45	40.7	36.7	33.5	29.8	25.4	19.2	14.5	9						
-	4SR12/19-N	3	4	75	70	63.3	57	52	46.5	39.5	30	22.5	14						
-	4SR12/25-N	4	5.5	102	95	85.8	77.5	70.7	63	53.5	40.5	30.5	19						
-	4SR12/34-N	5.5	7.5	135	125	113	102	93	83	70.5	53.5	40.2	25						
				183	170	153.7	138.7	126.5	112.8	95.8	72.7	54.7	34						

Q = Caudal H = Altura manométrica total

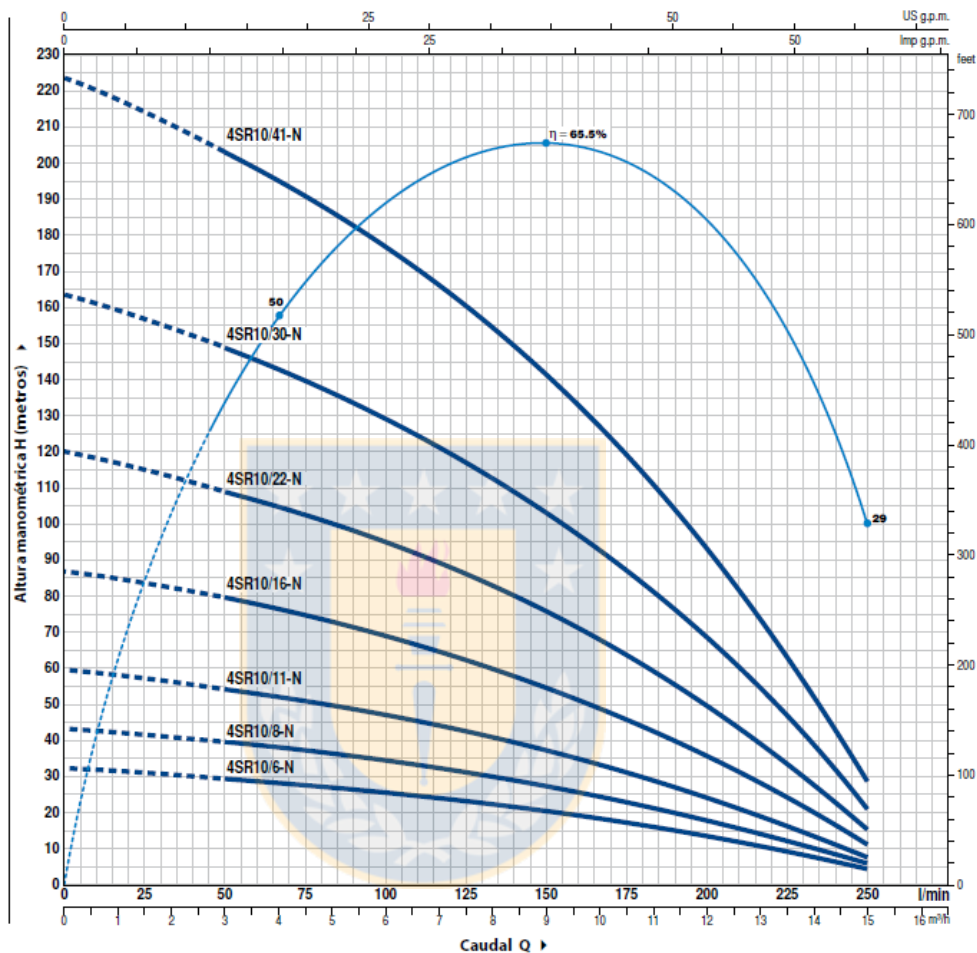
Tolerancia de las curvas de prestación según EN ISO9906 Grado 3B.

Figura 30. Curvas y datos de prestaciones de bomba sumergible Pedrollo, siendo el modelo 4SR12m/14-N la bomba actual. Fuente: Pedrollo

4SR10

CURVAS Y DATOS DE PRESTACIONES

50 Hz n= 2900 rpm



MODELO		POTENCIA (P ₂)		Q	H metros										
Monofásica	Trifásica	kW	HP		0	3.0	6.0	7.5	9.0	10.5	12	13.5	15.0		
4SR10m/6 -N	4SR10/6 -N	0.75	1	0	50	100	125	150	175	200	225	250			
4SR10m/8 -N	4SR10/8 -N	1.1	1.5	33	29	25	23	20.5	17	13.5	9	4			
4SR10m/11 -N	4SR10/11 -N	1.5	2	43	39	35	31	27.5	23	18	12	6			
4SR10m/16 -N	4SR10/16 -N	2.2	3	60	54	47	42	37.5	31	25	16.5	8			
-	4SR10/22 -N	3	4	87	79	69	62	55	45	36.5	24	11			
-	4SR10/30 -N	4	5.5	120	109	95	85	76	63	50	33	15			
-	4SR10/41 -N	5.5	7.5	163	148	129	116	103	86	68	45	21			
				223	203	176	159	141	117	93	61.5	29			

Q = Caudal H = Altura manométrica total

Tolerancia de las curvas de prestación según EN ISO9906 Grado 3B.

Figura 31. Curvas y datos de prestaciones de bomba sumergible Pedrollo, siendo el modelo 4SR10m/16-N la bomba actual. Fuente: Pedrollo

Caudal instantáneo Q85% (l/s)	2,5	
Volumen/temporada (m ³ /año)	10000	
Tiempo máximo de riego (h/d)	8	
Mes máxima demanda (mm/día)	Enero	
Tipo de riego	Cinta	

DISEÑO AGRONÓMICO DEL SISTEMA		Celdas a completar
Cultivo	Naranjos	
Distancia entre hileras	5 m	
Distancia sobre hileras	2 m	
Etp max	5,9 mm/día	
kc	0,9	
Demanda hídrica bruta	5,9 mm/día	
Demanda hídrica neta	5,3 mm/día	
Eficiencia del sistema	90 %	Unidad comercial
Modelo emisor	Línea integral de goteo no compensado 16/35/2 @ 0,5 m.	500
Presión de operación	10 m.c.a.	
Caudal emisor	2,20 l/h	
Nº laterales / hilera	2	
Nº de emisores / planta	8,00	
Distancia entre emisores	0,50 m	
Nº emisores / hectárea	8.000	
Caudal por hectárea	4,89 l/s	
Número de sectores	4	
Superficie máxima regable	2,05 ha	
Superficie diseño	0,90 ha	
Nº de plantas / há	1.000	
Nº total plantas	900	
Precipitación equipo	1,76 mm/h	
Tiempo de riego / sector	3,35 h	
Tiempo total de riego	13,41 h	

Largo hileras	242
Trazado submatriz (m)	100
Trazado matriz (m)	200
Diferencia de cota (m)	-1

Ubicación válvulas en submatriz	Extremo
Válvulas/sector (u)	3
Ø de la succión/ descarga (")	1"

Total Submatriz (m)	300
Total Matriz (m)	552
Largo máximo de hileras por válvula (81

Superficie aproximado por sector	0,23 ha
Caudal aproximado por sector	1,10 l/s
Poliétileno	3.672 m
Emisores	7.344 u
CDT estimado	32,82 m.c.a.
Potencia requerida (BHP) al 65%	0,8 Hp
Motor seleccionado	3 Hp

Figura 32. Planilla de cálculo para anteproyecto de riego tecnificado por goteo. Fuente: CNR,2019

Criterio de tiempo de riego		Superficie regable máx (ha)
No cumple, disminuir N° sectores		2,05
Criterio de caudal instantáneo		Criterio de Volumen/temporada
Cumple		Cumple
Es posible la estimación		

Figura 33. Criterios de cumplimiento para la estimación según visión del proyectista para el riego por goteo. **Fuente:** CNR,2019



9. APÉNDICE



Figura 34. Desnivel presente en el predio, sector 14. **Fuente:** Elaboración propia.



Figura 35. Desnivel presente en el predio, sector 1 y 4. **Fuente:** Elaboración propia.



Figura 36. Desnivel presente en el predio, pradera natural. **Fuente:** Elaboración propia.



Figura 37. Desnivel presente en el predio, sector 17. **Fuente:** Elaboración propia.



Figura 38. Desnivel presente en el predio, sector 11 y 12. **Fuente:** Elaboración propia.



Figura 39. Desnivel presente en el predio, sector 10, 2, 3, 5 y 6 (fondo). **Fuente:** Elaboración propia.