

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Mecánica



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Diseño hidráulico de un sistema de aspersión por gravedad para mitigar polvos en suspensión en camino de acarreo de Unidad Minera

Para obtener el Título Profesional de Ingeniero Mecánico-Electricista

Elaborado por

Jesus Javier Fernandez Ramos

 [0009-0009-8804-0552](https://orcid.org/0009-0009-8804-0552)

Asesor

MSc. Carlos Alfonso Rojas Serna

 [0000-0002-4331-2309](https://orcid.org/0000-0002-4331-2309)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	(Fernandez, 2025)
Referencia/Reference	Fernandez, J. (2025). <i>Diseño hidráulico de un sistema de aspersión por gravedad para mitigar polvos en suspensión en camino de acarreo de Unidad Minera</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

A mi esposa, Draisy, y a mis padres, Javier y Viviana, por su amor y apoyo incondicional. Siempre juntos, en las buenas y las malas.

Agradecimientos

A mis padres, Javier y Viviana, por construir en mí las bases de una persona de bien.

A mi tío, José Ramos, por su constante guía en este proceso sin fin de aprendizaje en el camino de la ingeniería y el desarrollo personal. Gracias, papá.

A mi asesor, por su orientación y paciencia a lo largo de esta investigación.

A mis amigos de la universidad, el dúo de toda la vida. A Jean Pierre, Frank, por su apoyo emocional e incondicional.

A mi familia por darme tanta confianza y amor, y permitirme ser recíproco. A mi hermana, por su ejemplo de esfuerzo y dedicación en el camino de la excelencia. A mi abuelos, Humberto y Victoria, por inculcar en mí la curiosidad y el deseo de aprendizaje.

Draisy, mi esposa, en esta realidad y cualquier otra siempre estaremos juntos, gracias por todo.

Resumen

El presente trabajo desarrolla un diseño hidráulico-mecánico de un sistema de aspersión a gravedad, con el fin de mitigar eficientemente el polvo generado por el tránsito de los vehículos de acarreo. Esta investigación es de tipo aplicada, con un enfoque cuantitativo, alcance descriptivo y diseño no experimental. Para realizar el diseño de este sistema se consideraron los datos geográficos del terreno, condiciones operativas, parámetros hidráulicos y características de los componentes mecánicos para realizar el diseño. También se identificaron puntos críticos del perfil hidráulico, pérdidas de carga, presiones máximas y mínimas. En base a ello se recomendó el uso de válvulas ventosas y reductoras de presión para garantizar el correcto funcionamiento del sistema. Los resultados de la encuesta realizada al personal operativo muestran una mejora en la visibilidad de más de un 90%. Además, los resultados técnicos permitieron establecer una configuración óptima del sistema en función de la topografía del terreno, asegurando una adecuada cobertura del área de aspersión, mantenimiento del caudal de operación y presión en puntos estratégicos. De esta manera, se concluye que el diseño propuesto contribuye significativamente a la mitigación del polvo en caminos mineros de manera sostenible, sin recurrir a fuentes de energía externas.

Palabras clave — aspersión por gravedad, diseño hidráulico, caminos mineros, mitigación de polvo, sistema autónomo.

Abstract

This work develops a hydraulic-mechanical design of a gravity-fed sprinkler system aimed at efficiently mitigating dust generated by the movement of haul trucks. This is an applied research study with a quantitative approach, descriptive scope, and non-experimental design. The design of the system considered geographic data of the terrain, operational conditions, hydraulic parameters, and the characteristics of mechanical components. Critical points of the hydraulic profile, head losses, and maximum and minimum pressures were identified. Based on this, the use of air release valves and pressure-reducing valves was recommended to ensure the correct operation of the system. The survey results from operational personnel show an improvement in visibility of over 90%. In addition, the technical results enabled the establishment of an optimal system configuration adapted to the topography, ensuring adequate sprinkler coverage, operational flow maintenance, and pressure at strategic points. It is concluded that the proposed design significantly contributes to sustainable dust mitigation on mining roads without relying on external energy sources.

Keywords — gravity-fed sprinkling, hydraulic design, mining roads, dust mitigation, autonomous system.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract.....	vi
Introducción	xii
Capítulo I. Generalidades	1
1.1. Antecedentes Investigativos.....	1
1.2. Descripción de la realidad problemática	3
1.3. Formulación del problema	5
1.3.1. Problema General	5
1.4. Justificación e importancia	5
1.5. Objetivos	6
1.5.1. Objetivo General.....	6
1.6. Hipótesis	6
1.6.1. Hipótesis General	6
1.7. Variables y operacionalización de variables	6
1.7.1. Operacionalización de variables	7
1.8. Unidad de Análisis	8
1.9. Tipo, enfoque, nivel y diseño de investigación	9
1.9.1. Tipo de investigación	9
1.9.2. Enfoque de investigación.....	9
1.9.3. Diseño de la investigación	9
1.10. Fuentes de información e instrumentos utilizados	10
1.10.1. Fuentes de información	10
1.10.2. Instrumentos utilizados	10
1.11. Técnicas de recolección y procesamiento de datos	10
1.11.1. Técnicas de recolección de datos.....	11

1.11.2. Técnicas de procesamiento de datos	11
Capítulo II. Marco Teórico y Marco Conceptual.....	12
2.1. Marco Teórico	12
2.1.1. Principio de conservación de la masa.....	12
2.1.2. Ecuación de Bernoulli	13
2.1.3. Líneas de gradiente hidráulico y de energía	13
2.1.4. Principio de conservación de la energía	14
2.1.5. Viscosidad	15
2.1.6. Flujo laminar, turbulento, transitorio y número de Reynolds.....	16
2.1.7. Pérdida de presión y pérdida de carga	17
2.1.8. Flujo laminar en tuberías	18
2.1.9. Flujo turbulento en tuberías	18
2.1.10. Golpe de ariete.....	19
2.1.11. Celeridad de onda en el golpe de ariete	20
2.1.12. Tiempo crítico o característico	20
2.1.13. Tiempo de maniobra o de cierre	20
2.1.14. Sobrepresiones en cierre de tuberías	21
2.1.15. Pérdidas secundarias en tuberías.....	22
2.1.16. Selección de tuberías y accesorios por presión	23
2.1.17. Ecuación de Hazen-Williams	24
2.1.18. Bentley Hammer.....	24
2.1.19. AFT Fathom	24
2.1.20. Riego por camión cisterna	25
2.1.21. Riego por aspersión.....	25
2.1.22. Aspersor	26
2.1.23. Válvula	26
2.1.24. Válvula mariposa	27

2.1.25. Válvula reductora de presión	28
2.2. Marco conceptual.....	29
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación.....	30
3.1. Condiciones de entrada de diseño	30
3.1.1. Datos geográficos del sistema de aspersión.....	30
3.1.2. Condiciones de diseño del sistema de aspersión	30
3.2. Diseño de sistema de riego por aspersión.....	31
3.2.1. Datos de entrada y descripción conceptual del sistema.....	31
3.2.2. Cálculos hidráulicos en flujo dinámico	34
3.2.3. Resultados del flujo dinámico	53
3.2.4. Cálculo de tiempo crítico de cierre	61
Capítulo IV. Resultados, Contrastación de Hipótesis y Discusión de Resultados.....	63
4.1. Resultados	63
4.1.1. Contrastación de hipótesis.....	65
4.2. Discusión	65
Conclusiones	67
Recomendaciones	68
Referencias bibliográficas	69
Anexos.....	71

Índice de figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Plano de ubicación del sistema de riego por aspersión fase IV.....</i>	8
Figura 2 <i>Línea de gradiente hidráulica (LGH) y línea de energía (LE) para la descarga libre desde un depósito por un tubo horizontal con un difusor.....</i>	14
Figura 3 <i>Flujos laminar, de transición y turbulento.....</i>	16
Figura 4 <i>Caída de presión en tubería.....</i>	17
Figura 5 <i>Golpe de ariete en una tubería.....</i>	19
Figura 6 <i>Camión cisterna en operación minera.....</i>	25
Figura 7 <i>Aspersor como parte de un sistema de riego.....</i>	26
Figura 8 <i>Aspersor en funcionamiento.....</i>	26
Figura 9 <i>Válvula perteneciente a un sistema de tuberías.....</i>	27
Figura 10 <i>Válvula mariposa.....</i>	28
Figura 11 <i>Válvula reductora de presión.....</i>	28
Figura 12 <i>Detalle típico de estación de reducción.....</i>	33
Figura 13 <i>Simulación en Bentley Hammer del primer escenario.....</i>	41
Figura 14 <i>Simulación en AFT Fathom del primer escenario.....</i>	42
Figura 15 <i>Simulación en Bentley Hammer del segundo escenario.....</i>	44
Figura 16 <i>Simulación en AFT Fathom del segundo escenario.....</i>	45
Figura 17 <i>Simulación en Bentley Hammer del tercer escenario.....</i>	47
Figura 18 <i>Simulación en AFT Fathom del tercer escenario.....</i>	48
Figura 19 <i>Simulación en Bentley Hammer del cuarto escenario.....</i>	50
Figura 20 <i>Simulación en AFT Fathom del cuarto escenario.....</i>	51
Figura 21 <i>Grado hidráulico y volumen de aire/vapor, Escenario 1.....</i>	54
Figura 22 <i>Perfil de presión, Escenario 1.....</i>	55
Figura 23 <i>Grado hidráulico y volumen de aire/vapor, Escenario 2.....</i>	56
Figura 24 <i>Perfil de presión, Escenario 2.....</i>	57
Figura 25 <i>Grado hidráulico y volumen de aire/vapor, Escenario 3.....</i>	58
Figura 26 <i>Perfil de presión, Escenario 3.....</i>	59
Figura 27 <i>Grado hidráulico y volumen de aire/vapor, Escenario 4.....</i>	60
Figura 28 <i>Perfil de presión, Escenario 4.....</i>	61

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Operacionalización de Variables</i>	7
Tabla 2 <i>Parámetros de entrada</i>	32
Tabla 3 <i>Rango de cotas</i>	32
Tabla 4 <i>Valores de diámetro interno, diámetro externo y espesor para tuberías de HDPE de 10"</i>	36
Tabla 5 <i>Datos considerados para el tramo del primer aspersor</i>	37
Tabla 6 <i>Valores de presión en flujo permanente</i>	39
Tabla 7 <i>Valores de presión consideradas para válvulas reductoras</i>	40
Tabla 8 <i>Tabla comparativa de presiones, Escenario 1</i>	43
Tabla 9 <i>Presiones en válvulas reductoras, Escenario 1</i>	43
Tabla 10 <i>Tabla comparativa de presiones, Escenario 2</i>	46
Tabla 11 <i>Presiones en válvulas reductoras, Escenario 2</i>	46
Tabla 12 <i>Tabla comparativa de presiones, Escenario 3</i>	49
Tabla 13 <i>Presiones en válvulas reductoras, Escenario 3</i>	49
Tabla 14 <i>Tabla comparativa de presiones, Escenario 4</i>	52
Tabla 15 <i>Presiones en válvulas reductoras, Escenario 4</i>	52
Tabla 16 <i>Presiones máximas en válvulas de servicio</i>	61
Tabla 17 <i>Resultado de la encuesta a personal operativo (n=15)</i>	64

Introducción

En los caminos de acarreo en el rubro minero sin pavimentar, la presencia de polvo en suspensión representa un riesgo para la salud ocupacional, la visibilidad operativa, la vida útil de los equipos acarreo y el impacto ambiental. Uno de los puntos clave de este trabajo de investigación es la cantidad de incidentes por baja visibilidad en los caminos de acarreo. Además, se ha observado un incremento en las labores de mantenimiento correctivo debido al desgaste acelerado de componentes por la exposición constante al polvo. Esta situación ha motivado la necesidad de investigar y comprender con mayor profundidad las condiciones actuales de mitigación de polvo en suspensión en los caminos de acarreo.

El trabajo de investigación consta de cuatro capítulos los cuales se describen a continuación:

En el Capítulo I se presentan las generalidades del estudio, incluyendo los antecedentes, la descripción y formulación del problema, así como la justificación e importancia del tema en el contexto de las operaciones mineras que requieren soluciones eficientes para el control de polvo en vías. Además, se exponen los objetivos de la investigación, la hipótesis, las variables y su respectiva operacionalización. Finalmente, se define el tipo, enfoque, nivel y diseño de la investigación, junto con la unidad de análisis correspondiente.

En el Capítulo II se desarrolla el marco teórico y conceptual necesario para el diseño hidráulico del sistema de aspersión. Se abordan conceptos clave como el comportamiento del flujo en tuberías, pérdidas de carga, cavitación, sistemas por gravedad, y elementos mecánicos involucrados como aspersores y válvulas.

En el Capítulo III se lleva a cabo el desarrollo del trabajo de investigación, que incluye la caracterización del fluido y del terreno, el análisis del perfil hidráulico, la ubicación

estratégica de aspersores, y la selección de componentes mecánicos e hidráulicos que permiten el funcionamiento autónomo del sistema por gravedad.

En el Capítulo IV se realiza el análisis y discusión de los resultados obtenidos, comparando escenarios y evaluando el comportamiento del sistema frente a condiciones variables de operación. Se analiza la eficiencia del diseño propuesto en función de parámetros hidráulicos y operativos.

Finalmente se presentan las conclusiones del trabajo en función del cumplimiento de los objetivos planteados, así como las recomendaciones para futuras investigaciones y mejoras en la aplicación del sistema en otros contextos similares. Además, se incluyen las referencias bibliográficas y los anexos complementarios.

Capítulo I. Generalidades

1.1. Antecedentes Investigativos

Quispe, J. (2022)¹, el objetivo de la investigación es diseñar un sistema de aspersión autónomo para la mitigación del polvo en vías mineras, optimizando el uso del agua y mejorando la visibilidad en las operaciones. El autor identifica que el método tradicional de riego con camiones cisterna presentaba problemas de ineficiencia, alto consumo de agua y combustible, además de generar interrupciones en el tránsito minero. Para abordar esta problemática, el autor propone una solución basada en redes de tuberías con aspersores estratégicamente ubicados a lo largo de las rutas de acarreo, operando de forma programada según las condiciones ambientales. Los resultados muestran que la implementación del sistema de aspersión autónomo reduce en un 70% la dispersión de partículas en suspensión, lo que contribuyó a mejorar la visibilidad y la calidad del aire en la zona de operación. Además, se evidencia que este sistema permite optimizar el consumo de agua, reduciendo la dependencia de camiones cisterna y minimizando costos operativos. Así, el autor concluye que la implementación de un sistema de aspersión automatizado es una alternativa eficiente y sostenible para el control de polvo en caminos mineros, validando la importancia de un diseño hidráulico adecuado para garantizar su funcionamiento óptimo.

Ventura, L. (2024)², el objetivo de la investigación es diseñar un sistema automatizado de riego por aspersión con generación fotovoltaica para optimizar el consumo de agua en aplicaciones agrícolas. El autor identifica que los sistemas de riego tradicionales presentan altos niveles de desperdicio de agua, debido a la falta de control en la distribución del recurso. Para solucionar este problema, se desarrolla un sistema que utiliza sensores de humedad y radiación solar para regular la activación de los aspersores, asegurando que el agua se

¹ Quispe, J. (2022). Diseño de un sistema de aspersión autónomo para las vías de las minas. [Tesis de titulación, Universidad Nacional de San Agustín].

² Ventura, L. (2024). Diseño de un sistema automatizado de riego por aspersión con generación fotovoltaica para optimizar el consumo del recurso hídrico. [Tesis de titulación, Universidad Continental].

distribuya solo cuando sea necesario. Los resultados muestran que la implementación de este sistema logra una reducción del 40% en el consumo de agua en comparación con los métodos tradicionales de riego por aspersión, lo que demuestra su eficiencia en la gestión del recurso hídrico. Así, el autor concluye que la automatización del riego por aspersión combinada con energía fotovoltaica permite optimizar el uso del agua, ofreciendo un enfoque sostenible para su aplicación en distintas áreas. Aunque el estudio está orientado a la agricultura, sus principios pueden ser extrapolados al control de polvo en caminos mineros, donde la eficiencia en el uso del agua es un factor crítico.

Pérez, M. (2023)³, el objetivo de la investigación es diseñar un sistema de riego por aspersión para mitigar el polvo en rutas de acarreo minero, optimizando el consumo de agua mediante la regulación de caudal y presión en función de la demanda real. El autor identifica que los sistemas tradicionales de control de polvo presentan ineficiencias en la distribución del agua, ya que aplican cantidades constantes sin considerar las condiciones del entorno, lo que genera desperdicio del recurso y costos operativos elevados. Para solucionar este problema, se desarrolla un sistema que integra sensores de presión y caudal, permitiendo una distribución controlada del agua en función de la carga vehicular y las condiciones climáticas. Los resultados demuestran que el sistema logra una reducción del 65% en la cantidad de polvo en suspensión en comparación con los métodos convencionales, mejorando la visibilidad y seguridad en las operaciones. Además, la implementación de un control más preciso permite una reducción del consumo de agua del 30%, optimizando su uso sin comprometer la efectividad del sistema. Así, el autor concluye que un diseño hidráulico eficiente, considerando el perfil de presión y caudal adecuado, permite mejorar el rendimiento de los sistemas de aspersión en minería. Este estudio es relevante para la presente investigación, ya que, valida la importancia del cálculo hidráulico en la distribución del agua,

³ Pérez, M. (2023). Diseño de un sistema inteligente de riego por aspersión para la gestión eficiente del agua en las rutas de acarreo en pequeña y mediana minería. [Tesis de titulación, Universidad Católica de Santa María].

lo que puede aplicarse en el diseño del sistema de tuberías, selección de aspersores y regulación de presión en el presente trabajo.

1.2. Descripción de la realidad problemática

En la industria minera, la mitigación de polvos en los caminos de acarreo es un desafío crucial, ya que su acumulación impacta negativamente la visibilidad de los operadores, incrementa el desgaste de los equipos y genera riesgos para la salud de los trabajadores. Estudios recientes indican que el polvo en suspensión puede reducir la visibilidad en condiciones secas, afectando la seguridad operacional y la eficiencia del transporte de material en las minas a cielo abierto. Además, la exposición prolongada al material particulado está directamente relacionada con enfermedades respiratorias en los trabajadores mineros, lo que incrementa los costos en salud ocupacional y disminuye la productividad del sector, (Antezano, 2015).

A nivel internacional, las estrategias de control de polvo en minería han evolucionado en los últimos años, con un incremento en la implementación de sistemas de aspersión hidráulica como método principal de sistemas de aspersión hidráulica como método principal de mitigación. Empresas mineras líderes han destinado recursos significativos en tecnologías de supresión de polvo, debido a normativas ambientales cada vez más estrictas y a la presión de las comunidades locales. Se estima que la falta de un sistema eficiente de control de polvo puede reducir la vida útil de los neumáticos de los camiones y aumentar los costos de mantenimiento, (Brauer, Giubergia, & Gil-Costa, 2019).

En el contexto nacional, se ha señalado que, en las operaciones mineras peruanas, el control de polvo en caminos de acarreo sigue siendo deficiente, lo que provoca que las concentraciones de material particulado superen los límites recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS). La implementación de sistemas de aspersión automatizados ha sido limitada debido a la falta de diseños hidráulicos adaptados a la topografía de las operaciones mineras del país. Estudios recientes han demostrado que la

ineficiencia de estos sistemas puede generar un desperdicio significativo del agua utilizada en el proceso, incrementando los costos operacionales y afectando el cumplimiento de normativas ambientales (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2023).

A nivel local, según el informe técnico N° 030-2023-GRL/DREM/DTAA/DTM/OAL de la Dirección Regional de Energía y Minas de Lima (2023), las deficiencias en la mitigación de polvo han causado un aumento del 20% en los incidentes relacionados con baja visibilidad en caminos de acarreo, lo que ha afectado el rendimiento del transporte de mineral. Además, las comunidades cercanas han reportado un incremento en quejas por contaminación de polvo, lo que ha llevado a las empresas mineras a recibir sanciones regulatorias en los últimos dos años. La ausencia de un diseño eficiente de aspersión hidráulica y el uso inadecuado del recurso hídrico han generado pérdidas económicas considerables, así como una disminución en los estándares de seguridad y sostenibilidad ambiental en la operación minera, (Dirección Regional de Energía y Minas de Lima, 2023).

En la unidad minera ubicada en la región de Áncash, donde se desarrolla el presente estudio, se ha identificado una problemática recurrente asociada al polvo generado en los caminos de acarreo. Personal operativo ha reportado dificultades frecuentes en la visibilidad durante las operaciones presentadas en el Anexo 6, lo que ha comprometido la seguridad y eficiencia del transporte.

Los resultados evidencian que más del 80% del personal operativo experimenta baja visibilidad por polvo en forma recurrente, mientras que el 78% considera ineficiente el sistema actual de mitigación. Además, el 57% ha presenciado incidentes derivados de la visibilidad reducida, y un 64% señala que el agua utilizada en los métodos actuales se desperdicia. Estos datos confirman la existencia de un problema operativo que afecta directamente la seguridad y eficiencia del transporte en los caminos de acarreo.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema General

¿De qué manera se realiza la mitigación de los polvos en suspensión en el camino de acarreo de una unidad minera ubicada en la región de Ancash?

1.4. Justificación e importancia

La presente investigación se justifica por la necesidad de mitigar los impactos negativos que genera el polvo en suspensión en los caminos de acarreo de operaciones mineras. En este contexto, el diseño de un sistema de aspersión eficiente se plantea como una solución técnica viable que responde a tres dimensiones clave: social, económica y tecnológico.

Desde el punto de vista social, la emisión de polvo representa un riesgo para la salud de los trabajadores mineros y de las comunidades cercanas. Estudios han demostrado que la exposición prolongada a material particulado puede provocar enfermedades respiratorias crónicas, lo que genera preocupación en la población y en las autoridades ambientales. La implementación de un sistema de aspersión permite reducir significativamente estos niveles de contaminación, promoviendo un entorno más seguro y saludable. Además, responde a las exigencias de responsabilidad social empresarial, fortaleciendo las relaciones comunitarias y evitando conflictos socioambientales.

En términos económicos, el polvo en suspensión genera un desgaste prematuro en los componentes de los equipos de acarreo, tales como neumáticos, filtros y motores, lo que incrementa los costos de mantenimiento. Asimismo, la baja visibilidad ocasionada por el polvo puede provocar accidentes que detienen la operación y generan pérdidas por inactividad. Un sistema de aspersión bien diseñado reduce estos riesgos, prolonga la vida útil de los activos y optimiza el uso de recursos hídricos, lo que se traduce en ahorros significativos a mediano y largo plazo para la empresa.

Desde la perspectiva tecnológica, el diseño hidráulico-mecánico del sistema de aspersión permite la optimización del uso del agua y la eficiencia en la distribución del caudal requerido para el control de polvo. La implementación de tecnologías avanzadas en la selección de aspersores, tuberías y válvulas garantiza una mayor precisión en la cobertura y en la presión de operación, minimizando pérdidas y maximizando su efectividad. Además, este diseño contribuye a la innovación en la ingeniería aplicada en la minería, promoviendo soluciones técnicas que mejoran la automatización y el monitoreo en tiempo real del sistema, facilitando su integración con estrategias de mantenimiento predictivo y gestión de recursos.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Diseñar un sistema hidráulico de aspersión por gravedad para mitigar los polvos en suspensión en el camino de acarreo de una unidad minera en Ancash.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis General

El diseño de un sistema hidráulico de aspersión influye en la mitigación de polvos en el camino de una unidad minera en la región Ancash.

1.7. Variables y operacionalización de variables

VD: Mitigar los polvos en suspensión.

VI: Diseño de un sistema hidráulico de aspersión a gravedad.

1.7.1. Operacionalización de variables

En la Tabla 1 se muestra la operacionalización de variables de la presente investigación.

Tabla 1

Operacionalización de Variables

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores
Variables Independientes: - Diseño de un sistema hidráulico de aspersión a gravedad	Conjunto de elementos y principios de ingeniería aplicados para proyectar una red de distribución de agua con aspersores para el control de polvo.	Diseño técnico del sistema compuesto por tuberías, válvulas, aspersores y tanque, considerando presiones, caudales y pendientes del terreno.	-Configuración de aspersores. -Caudal de operación. -Presión en punto estratégicos. -Pérdidas de carga en la red.	-Número, tipo y ubicación de los aspersores instalados a lo largo del camino. -Caudal estimado requerido para el funcionamiento adecuado del sistema en L/s. -Presión registrada en el primer y último aspersor del sistema en Psi. -Pérdidas de carga total del sistema medida en mca entre el punto de inicio y el último punto de aspersor.
Variables Dependientes: - Mitigar los polvos en suspensión.	Reducción del material particulado generado por el tránsito vehicular en caminos no pavimentados mediante la aplicación de agua por aspersión.	Evaluación del funcionamiento del sistema de aspersión en términos de alcance, presión mínima y cobertura sobre el camino.	-Cobertura del área de aspersión. -Presión mínima mantenida en operación. -Alcance efectivo del aspersor.	-Longitud del camino efectivamente humedecido por el sistema. -Presión registrada en el último tramo del sistema durante operación. -Radio de cobertura estimado por cada aspersor.

Nota: Elaboración propia

1.8. Unidad de Análisis

La presente investigación tendrá como unidad de análisis la fase IV del camino minero Mina-Truck Shop ubicado en una compañía minera del departamento de Ancash. La compañía es un complejo minero polimetálico que produce concentrados de cobre y otros minerales, y como subproducto concentrado de plata.

La compañía minera realiza sus operaciones a 420 km. Al noreste de la región de Lima, en los andes del Perú aproximadamente a 4300 m.s.n.m. La altura de operación de la fase IV del camino minero Mina-Truck Shop se encuentra entre los 4150 y 4290 m.s.n.m. La longitud aproximada del recorrido del sistema pipe-line es de 3000 m. Ver **Figura 1**.

Figura 1

Plano de ubicación del sistema de riego por aspersión fase IV.



Nota: De Google Earth.

1.9. Tipo, enfoque, nivel y diseño de investigación

1.9.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación es aplicada dado que se va a resolver un problema real con conocimientos existentes en la ciencia. El alcance de la presente investigación es descriptivo y correlacional. Es descriptivo porque se analizan las características y el funcionamiento del sistema de aspersión a gravedad diseñado para la mitigación del polvo en caminos mineros, considerando aspectos como el perfil hidráulico, la distribución de presión, el caudal y la eficiencia del sistema. Asimismo, es correlacional, ya que se busca establecer la relación entre variables hidráulicas y mecánicas, tales como la presión, el caudal, el diámetro de tuberías y la reducción del polvo en suspensión, con el objetivo de optimizar el diseño del sistema.

1.9.2. Enfoque de investigación

La presente investigación tiene un enfoque cuantitativo, ya que se basa en la recopilación, análisis y cuantificación de datos hidráulicos y mecánicos para el diseño del sistema de aspersión a gravedad en caminos mineros.

1.9.3. Diseño de la investigación

En cuanto al diseño, la investigación es de tipo cuasi experimental y transversal. Se considera no experimental porque no se manipulan directamente las variables, sino que se analizan mediante cálculos hidráulicos y simulaciones con software especializado (AFT Fathom y Bentley Hammer), permitiendo evaluar el comportamiento del sistema sin intervención física. Además, es transeccional, ya que los datos se recopilan en un único momento en el tiempo, basándose en la información del terreno.

1.10. Fuentes de información e instrumentos utilizados

1.10.1. Fuentes de información

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación, se recurrió a diversas fuentes de información y al uso de instrumentos técnicos que permitieron recopilar, procesar y analizar los datos necesarios para el diseño hidráulico-mecánico del sistema de aspersión. A continuación, se detallan los principales recursos utilizados:

Planos topográficos y estándares proporcionados por la empresa minera, los cuales permitieron identificar las cotas altimétricas, pendientes, distancias del camino minero, así como los estándares típicos de los equipos a utilizar.

Normativas técnicas de diseño como las normas ASTM, ASME, API, etc. Esto con la finalidad de tener controles necesarios para que el diseño sea normado y sigas los estándares de la empresa minera, así como de las normas nacionales e internacionales.

Referencias bibliográficas, incluyendo artículos científicos, manuales de hidráulica aplicada, catálogos técnicos de fabricantes, libros de texto teórico, trabajos de tesis o referenciados que ayuden al desarrollo del presente trabajo.

1.10.2. Instrumentos utilizados

Software de modelado hidráulico como AFT Fathom y Bentley Hammer, empleados para simular el comportamiento del sistema de tuberías, calcular pérdidas de carga, presiones máximas y mínimas, y prever puntos de cavitación o necesidad de válvulas especiales.

Hojas de cálculo en Excel, para el procesamiento de datos preliminares, dimensionamiento, estimaciones etc.

1.11. Técnicas de recolección y procesamiento de datos

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación, se aplicaron técnicas de recolección y procesamiento de datos que permitieron obtener la información necesaria para el diseño hidráulico y mecánico del sistema de aspersión por gravedad. Estas técnicas y

operativos directamente relacionados con el recorrido del sistema, desde el punto de alimentación hasta el último aspersor.

1.11.1. Técnicas de recolección de datos

La recolección de datos se realizó mediante las siguientes técnicas:

Revisión documental: Se recopilaron planos proporcionados por la operación minera, así como fichas técnicas, normativas aplicables, estándares de la unidad minera.

Observación directa y registro topográfico: Durante visitas técnicas se verificó el estado actual de la zona, rutas de acceso, condiciones del terreno y puntos estratégicos para la ubicación de los aspersores y centrales de reducción de presión.

Entrevistas técnicas no estructuradas: Se consultó a ingenieros de campo y supervisores para entender la operatividad del sistema actual, restricciones del terreno y criterios prácticos de instalación y mantenimiento.

1.11.2. Técnicas de procesamiento de datos

El procesamiento de datos se realizó con las siguientes herramientas de ingeniería y software especializado:

AFT Fathom y Bentley Hammer: para la simulación del perfil hidráulico del sistema, análisis de presiones, velocidades, pérdidas por fricción, detección de puntos críticos y evaluación de cavitación.

Microsoft Excel: Para la organización de datos, cálculos complementarios y elaboración de cuadros comparativos.

Software CAD: Para la elaboración de planos del sistema y esquemas del diseño hidráulico-mecánico.

Capítulo II. Marco Teórico y Marco Conceptual

2.1. Marco Teórico

2.1.1. Principio de conservación de la masa

Cengel, Y. A., & Cimbala J. M. (2019). Mecánica de Fluidos. Fundamentos y Aplicaciones.

Principio de conservación de la masa: “La transferencia neta de masa hacia dentro un volumen de control (m_{ent}), o hacia fuera de éste (m_{sal}), durante un intervalo Δt , es igual al cambio neto (aumento o disminución) en la masa total que está dentro de ese volumen en el transcurso de Δt (Δm_{VC})”. El principio se expresa de forma general en la ecuación (1.

$$m_{ent} - m_{sal} = \Delta m_{VC} \quad (1)$$

Se simplifica el análisis al considerar un flujo estacionario, es decir que dentro del volumen de control no hay cambio de masa con el tiempo, y un fluido incompresible, es decir que no hay cambio de densidad (ρ , unidad: kg/m^3) a través del volumen de control, como los líquidos. Así, para el flujo uniforme y estacionario de una sola corriente de un fluido incompresible, el principio de conservación de la masa se expresa en la (2, conocida como ecuación de continuidad, donde cada parte de la ecuación equivale al caudal.

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 = Q \quad (2)$$

Donde:

A : área de sección de flujo (m^2)

V : velocidad (m/s)

Q : caudal (m^3/s)

2.1.2. Ecuación de Bernoulli

Munson, B. R., Young, D. F., et al. (2017). *Fundamentals of fluid mechanics*

Ecuación de Bernoulli como balance de energía mecánica: “La suma de la energía cinética ($V_1^2/2$, por unidad de masa), la potencial (gz , por unidad de masa) y la de flujo (P/ρ , por unidad de masa) de una partícula de fluido es constante a lo largo de una línea de corriente en el transcurso del flujo estacionario, cuando los efectos de la compresibilidad y de la fricción son despreciables”. Se expresa en la ecuación (3).

$$\frac{P_1}{\rho} + gz_1 + \frac{V_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho} + gz_2 + \frac{V_2^2}{2} \quad (3)$$

Donde:

P : presión (Pa)

z : altura desde referencia (m)

2.1.3. Líneas de gradiente hidráulico y de energía

Cengel, Y. A., & Cimbala J. M. (2019). *Mecánica de Fluidos. Fundamentos y Aplicaciones*.

Se divide cada elemento de la ecuación 3 entre g , expresando la energía en alturas para realizar su representación de manera gráfica. Se muestra la expresión en la (4).

$$\frac{P_1}{\rho g} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = H \quad (4)$$

Donde:

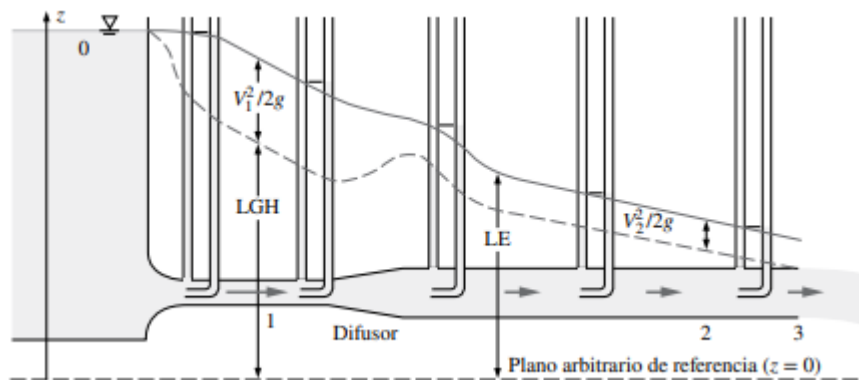
H : carga del fluido en movimiento (m)

Se reconoce $V_1^2/2g$ como carga de velocidad, z como carga de elevación y $P/\rho g$ como carga de presión, todo por unidad de masa.

La línea de gradiente hidráulico (LGH), también conocida como línea piezométrica o línea de alturas piezométricas, es la que expresa las cargas de presión estática y elevación. Se obtiene cuando se coloca piezómetros en varios lugares a lo largo de un tubo y se traza una línea que pase por los niveles del líquido en los piezómetros. Mientras la línea de energía (LE) también conocida como la línea de alturas totales, expresa la carga total del fluido, y se obtiene cuando se traza una línea que pase por los niveles del líquido en los tubos de Pitot. Se observan las líneas en un tubo horizontal de descarga libre en la **Figura 2**.

Figura 2

Línea de gradiente hidráulica (LGH) y línea de energía (LE) para la descarga libre desde un depósito por un tubo horizontal con un difusor.



Nota: Cengel, Y. A. & Cimbala J. M. (2019). *Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones*.

2.1.4. Principio de conservación de la energía

Fox, R. W., McDonald, A. T., & Pritchard, P. J. (2015). *Introduction to fluid mechanics*.

“El cambio en el contenido de energía de un sistema (ΔE) es igual a la diferencia entre la entrada de energía (E_{ent}) y la salida de ésta (E_{sal})”. El principio se expresa de forma general en la (5).

$$m_{ent} - m_{sal} = \Delta m_{VC} \quad (5)$$

Considerando flujo uniforme y estacionario de una sola corriente de un fluido incompresible, pérdidas de tuberías, y expresando la ecuación de energía en función de cargas, se obtiene la (6).

$$\frac{P_1}{\rho g} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_L \quad (6)$$

Donde:

h_L : pérdida de carga (m)

2.1.5. Viscosidad

Munson, B. R., Young, D. F., et al. (2017). *Fundamentals of fluid mechanics*

Medida de la adherencia o resistencia interna del mismo, pues cuando dos capas de fluido se mueven una en relación con la otra, se presenta una fuerza de fricción entre ellas y la capa más lenta trata de desacelerar a la más rápida.

La relación lineal del esfuerzo cortante en el flujo unidimensional de fluidos newtonianos, cuya razón de deformación es proporcional al esfuerzo cortante, se expresa mediante la (7):

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (7)$$

En la ecuación, el término “ μ ” se llama viscosidad dinámica (o absoluta) del fluido, cuya unidad es $kg/m.s$, o de modo equivalente, $N.s/m^2$. Así también, por cuestión de conveniencia en algunas aplicaciones, a la razón de la viscosidad dinámica a la densidad se le conoce como viscosidad cinemática “ ν ”.

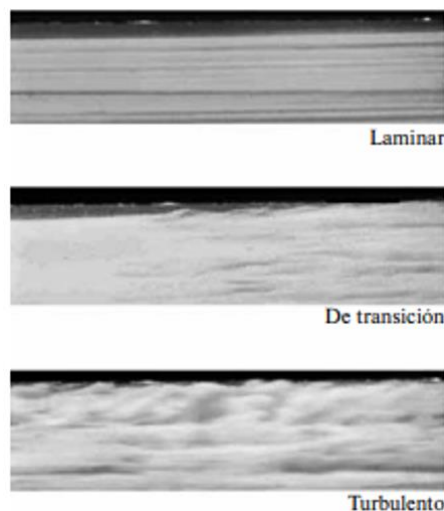
2.1.6. Flujo laminar, turbulento, transitorio y número de Reynolds

Cengel, Y. A., & Cimbala J. M. (2019). *Mecánica de Fluidos. Fundamentos y Aplicaciones*.

El flujo laminar presenta movimiento altamente ordenado, se presenta en fluidos intensamente viscosos. El flujo turbulento presenta movimiento altamente desordenado, se presenta en fluidos de baja viscosidad a altas velocidades y presenta fluctuaciones de velocidad. Los flujos transitorios alternan entre laminar y transitorio. En la **Figura 3** se observan los tres tipos de flujo.

Figura 3

Flujos laminar, de transición y turbulento.



Nota: Cengel, Y. A. & Cimbala J. M. (2019). *Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones*.

Para el flujo interno en una tubería circular, Reynolds expresó la razón de las fuerzas inerciales y fuerzas viscosas de un fluido, como se muestra en la (8), y descubrió su relación con el régimen de flujo:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (8)$$

Donde:

D : diámetro de tubería (m)

La transición de flujo laminar a turbulento dependerá del grado de perturbación del flujo, cuyo control se efectúa en condiciones de laboratorio. Pero en condiciones prácticas el flujo en una tubería circular es laminar para $Re \leq 2300$, turbulento para $Re \geq 4000$, y de transición entre ellos.

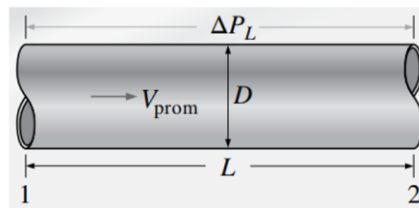
2.1.7. Pérdida de presión y pérdida de carga

Cengel, Y. A., & Cimbala J. M. (2019). *Mecánica de Fluidos. Fundamentos y Aplicaciones*.

En la **Figura 4** se observa una sección de tubería circular horizontal de longitud “ L ” y diámetro interno “ D ”.

Figura 4

Caída de presión en tubería.



Nota: Fuente. Cengel, Y. A. & Cimbala J. M. (2019). *Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones*.

La pérdida de presión “ ΔP_L ” en la tubería se da en la dirección del flujo, del punto 1 al 2, y para los flujos internos totalmente desarrollados se expresa en la (9.

$$\Delta P_L = f \frac{L}{D} \frac{\rho V_{prom}^2}{2} \quad (9)$$

En la ecuación 9, f es el denominado factor de fricción de Darcy-Weisbach. La pérdida de presión es expresable en términos de altura, obteniendo así la pérdida de carga “ h_L ” indicada en la (6. La pérdida de carga se expresa en la (10.

$$h_L = f \frac{L}{D} \frac{V_{prom}^2}{2g} \quad (10)$$

2.1.8. Flujo laminar en tuberías

Mott, R. L. (2014). *Applied Fluid Mechanics*.

En un flujo laminar totalmente desarrollado en una tubería, cada partícula de fluido se desplaza a una velocidad axial constante a lo largo de una línea de corriente, el perfil de velocidades en flujo laminar es parabólico, y la velocidad promedio V_{prom} es la mitad de la velocidad máxima, que ocurre en la línea central.

En flujo laminar se expresa la caída de presión a través de la (11.

$$\Delta P = \frac{32\mu L V_{prom}}{D^2} \quad (11)$$

Igualando la (9 y (11, se obtiene el factor de fricción para flujo laminar de una tubería circular, expresado en la (12.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (12)$$

Despejando la velocidad en la (11 y reemplazándola en la (2 se obtiene la ley de Poiseuille, expresada en la (13.

$$Q = \frac{\Delta P \pi D^2}{128\mu L} \quad (13)$$

2.1.9. Flujo turbulento en tuberías

Fox, R. W., McDonald, A. T., & Pritchard, P. J. (2015). *Introduction to fluid mechanics*.

El flujo turbulento presenta fluctuaciones aleatorias a lo largo del flujo, cuyo efecto es mayor en la zona central de la tubería, y se encuentra dominado por fuerzas viscosas en una pequeña sección cercana a las paredes.

La rugosidad de la superficie “ ε ” incide en la fricción del flujo turbulento. Así, el factor de fricción del flujo turbulento en tubería es función del número de Reynolds y la rugosidad

relativa “ ε/D ”. Las ecuaciones que relacionan estos factores se han obtenido de resultados experimentales, como la ecuación de Colebrook, una función implícita expresada en la (14).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (14)$$

El diagrama de Moody representa el factor de fricción de Darcy para flujo en tubería en función al número de Reynolds y la rugosidad relativa sobre un amplio rango de valores.

2.1.10. Golpe de ariete

Chaudhry, M.H. (2013). *Applied hydraulic transients*.

El golpe de ariete es un fenómeno transitorio en sistemas hidráulicos que ocurre debido a cambios súbitos en la velocidad del fluido dentro de una tubería. Estos cambios generan variaciones abruptas de presión que se propagan en forma de ondas a través del fluido, pudiendo causar vibraciones, fallas estructurales y daños en las tuberías y equipos del sistema. Ver **Figura 5**.

Figura 5

Golpe de ariete en una tubería.



Nota: <https://recursoscivilblog.wordpress.com/2016/10/20/sabes-que-es-el-golpe-de-ariete/>

2.1.11. Celeridad de onda en el golpe de ariete

Chaudhry, M.H. (2013). Applied hydraulic transients.

La celeridad de onda en el golpe de ariete representa la velocidad a la que una perturbación de presión viaja a través del fluido contenido en una tubería. Se expresa mediante la (15).

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho \cdot (1 + \frac{K \cdot D}{E \cdot e})}} \quad (15)$$

La celeridad de onda depende tanto de las propiedades del fluido como de la flexibilidad de la tubería. En sistemas con tuberías rígidas (como las de acero), la velocidad de propagación de la onda es mayor, mientras que en tuberías más flexibles (como las de HDPE), la onda se atenúa debido a la deformabilidad del material.

2.1.12. Tiempo crítico o característico

Chaudhry, M.H. (2013). Applied hydraulic transients.

EL tiempo crítico o característico en el golpe de ariete es el tiempo que tarda una onda de presión en viajar desde la perturbación inicial (como el cierre de una válvula) hasta el extremo del sistema y regresar. Se expresa con la (16

$$t_c = \frac{2 \cdot L}{a} \quad (16)$$

2.1.13. Tiempo de maniobra o de cierre

Chaudhry, M.H. (2013). Applied hydraulic transients.

El tiempo de maniobra o de cierre en el golpe de ariete es el tiempo que toma una válvula o compuerta en cerrarse completamente desde que inicia su movimiento. Este parámetro es clave para determinar la magnitud del golpe de ariete, ya que si el tiempo de

cierre es menor que el tiempo crítico t_c , se generan sobrepresiones significativas en el sistema.

Se clasifica en dos tipos:

Cierre lento: cuando el tiempo de cierre es mayor que el tiempo crítico (t_c), lo que permite disipar la onda de presión gradualmente, reduciendo el impacto del golpe de ariete.

Cierre rápido: Cuando el tiempo de cierre es menor que t_c , lo que genera un aumento brusco de la presión, incrementando el riesgo de daos en la tubería.

Matemáticamente, el tiempo de cierre (t_{cierre}) debe compararse con el tiempo crítico (t_c) para evaluar su impacto en el sistema hidráulico.

2.1.14. Sobrepresiones en cierre de tuberías

Chaudhry, M.H. (2013). Applied hydraulic transients.

Para calcular el valor máximo de sobrepresión en un cierre lento y un cierre rápido en una tubería, se utilizan distintas ecuaciones según el tiempo de cierre de la válvula en relación con el tiempo característico de la onda de presión.

Cierre rápido: como ya hemos visto en el subcapítulo **2.1.13**, el tiempo de cierre es menos que el tiempo característico (T), la sobrepresión máxima (ΔP) se calcula con la ecuación de Joukowsky que se muestra en la (17.

$$\Delta P = \rho \cdot c \cdot \Delta V \quad (17)$$

Cierre lento: como ya hemos visto en el subcapítulo **2.1.13**, el tiempo de cierre t_c es mayor que el tiempo característico (T), la sobrepresión es menor y se estima usando la (18.

$$\Delta P = \rho \cdot c \cdot \frac{\Delta V \cdot t_c}{T} \quad (18)$$

Siendo T el tiempo que tarda la onda en viajar ida y vuelta en la tubería y se representa con la (19.

$$T = \frac{2 \cdot L}{c} \quad (19)$$

Donde:

L: Longitud de la tubería.

2.1.15. Pérdidas secundarias en tuberías

Munson, B. R., Young, D. F., et al. (2017). *Fundamentals of fluid mechanics*.

Se consideran pérdidas secundarias a aquellas generadas por el pase del fluido a través de válvulas, uniones, codos y otros accesorios. Son pérdidas determinadas de forma experimental por los fabricantes de accesorios.

Para considerarlas como parte de las ecuaciones de energía, estas pérdidas se expresan en términos de coeficientes de pérdidas " K_L ", como se observa en la (20

$$h_L = K_L \frac{V^2}{2g} \quad (20)$$

Las pérdidas secundarias también se expresan en términos de longitud equivalente " L_{equiv} ", que equivalen a la pérdida de carga causada por un tramo de tubo cuya longitud es " L_{equiv} ", como se observa en la (21.

$$h_L = f \frac{L_{equiv}}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (21)$$

Las pérdidas totales de un sistema de tuberías es la suma de pérdidas primarias para todos los diámetros a lo largo del recorrido más la suma de pérdidas secundarias, como se observa en la (22.

$$h_L = \sum_i f_i \frac{L_i}{D_i} \frac{V_i^2}{2g} + \sum_j K_{L,j} \frac{V_j^2}{2g} + \sum_k f_k \frac{L_{equiv,k}}{D_k} \frac{V_k^2}{2g} \quad (22)$$

2.1.16. Selección de tuberías y accesorios por presión

Plastic Pipe Institute.(2018). *Handbook of Polyethylene pipe (2nd ed.)*. *Plastics pipe institute*.

En tuberías de polietileno de alta densidad (HDPE), la presión máxima admisible de operación (MAOP, por sus siglas en inglés) se determina a partir del esfuerzo de diseño hidroestático (HDS) del material. A diferencia de las tuberías metálicas, donde la MAOP se calcula con la ecuación de Barlow, en tuberías plásticas se utiliza la (23)

$$MAOP = \frac{2 \cdot HDS}{SDR - 1} \quad (23)$$

Donde:

HDS: Hydrostatic design stress (Esfuerzo de diseño hidroestático), obtenido aplicando un factor de seguridad al esfuerzo hidroestático base σ_0 del material.

SDR: Standard dimension ratio (relación de dimensión estándar), definido como la relación entre el diámetro exterior de la tubería y su espesor definido como la relación entre el diámetro exterior de la tubería y su espesor de pared.

El esfuerzo de diseño hidroestático se calcula como se muestra en la (24).

$$HDS = \frac{\sigma_0}{FS} \quad (24)$$

Donde *FS* es el factor de seguridad, típicamente 2 para tuberías HDPE utilizadas en sistemas presurizados.

Cuanto menos sea el SDR, mayor será el espesor de tubería y, por lo tanto, mayor será la MAOP.

2.1.17. Ecuación de Hazen-Williams

Streeter, V. L., Wylie, E. B., & Bedford, K. W. (2010). *Mecánica de fluidos*.

Para la cuantificación de pérdidas de carga en tuberías se utilizan las ecuaciones de Hazen-Williams, las cuales se pueden expresar como la (25 y (26:

$$H_f = \frac{6.8243 * v^{1.852}}{C^{1.852} * D^{1.167}} * L \quad (25)$$

$$H_f = \frac{10.67 * Q^{1.852}}{C^{1.852} * D^{4.87}} * L \quad (26)$$

Donde:

H_f : pérdida de cargas.

L : longitud de tubería.

C : Coeficiente de Hazen-Williams (adimensional, depende del material).

D : Diámetro interno de la tubería

Q : Caudal

2.1.18. Bentley Hammer

Se trata de un software especializado en el estudio de sistemas de bombeo complejos y redes de tuberías. Su característica distintiva frente a otras herramientas de la misma empresa es su habilidad para efectuar análisis de flujos transitorios o no permanentes.

2.1.19. AFT Fathom

Es un programa computacional orientado al análisis de sistemas complejos de bombeo y redes de tuberías.

2.1.20. Riego por camión cisterna

Es el método más utilizado y el inicialmente considerado para la gestión del polvo en operaciones mineras. Se basa en un camión equipado con un sistema de bombeo que distribuye agua a presión sobre la superficie a tratar, como se ilustra en la **Figura 6**.

Figura 6

Camión cisterna en operación minera.



Nota: <https://tiempominero.com/nuevo-camion-cat-777-05-para-reducir-el-polvo-en-los-caminos-de-acarreo/>

2.1.21. Riego por aspersión

Es un sistema que suele instalarse a lo largo de los bordes de las vías de circulación y que permite realizar el riego continuo de caminos mediante aspersores colocados de forma estratégica dentro del diseño hidráulico del sistema **Figura 7**.

Figura 7

Aspersor como parte de un sistema de riego.



Nota: <https://igc.com.pe/caracteristicas-de-los-sistemas-de-riego-por-aspersion/>

2.1.22. Aspersor

Mecanismo destinado a esparcir un líquido a presión, como el agua para el riego o los herbicidas químicos (Real Academia Española, s.f.). Ver **Figura 8**.

Figura 8

Aspersor en funcionamiento.



Nota: <https://www.netafim.com.mx/productos-y-soluciones/nuestros-productos/aspersores/d-net/d-net-8550/>

2.1.23. Válvula

Instrumento de regulación de flujo entre dos puntos de un sistema (Real Academia Española, s.f.). Ver **Figura 9**.

Figura 9

Válvula perteneciente a un sistema de tuberías.



Nota: <https://www.canadaperu.org/noticia/sabes-cual-es-la-correcta-ubicacion-y-funcion-de-una-valvula-compuerta>

2.1.24. Válvula mariposa

Una Válvula mariposa es un tipo de válvula de control de flujo que se utiliza para regular el flujo de fluido en una tubería. Consiste en un disco circular o elipsoide montado en un eje perpendicular al flujo del fluido. La válvula se abre o se cierra girando el disco en un ángulo respecto al flujo del fluido. Se utiliza en una variedad de aplicaciones industriales y de procesos para controlar el flujo de líquidos, gases y vapores (Béla, 2014). Ver **Figura 10**.

Figura 10

Válvula mariposa.



Nota: <https://www.hidroglobal.com/catalogo-de-producto/valvula-de-mariposa-tipo-lug-gaer-pn10-pn16/>

2.1.25. Válvula reductora de presión

Una válvula reductora de presión es un dispositivo utilizado para controlar y mantener la presión de un fluido a un nivel deseado en un sistema. Funciona reduciendo la presión del fluido que pasa a través de ella a un valor preestablecido, independientemente de las variaciones en la presión de entrada o en el caudal del fluido (Béla, 2014). Ver **Figura 11**.

Figura 11

Válvula reductora de presión.



Nota: <https://sotermic.cl/valvula-reguladora-de-presion-para-agua/>

2.2. Marco conceptual

- a) **Perfil hidráulico:** Representación gráfica de la variación de la carga hidráulica a lo largo del sistema.
- b) **Aspersión:** Método de distribución de agua en forma de gotas para mitigar el polvo.
- c) **Diseño hidráulico:** Selección y disposición de tuberías y accesorios según condiciones operativas y topográficas.
- d) **Mitigación de polvos:** Acción destinada a reducir la generación y dispersión de partículas sólidas en suspensión.
- e) **Camino de acarreo:** Vía utilizada en operaciones mineras para el transporte de material entre frentes de carga y zonas de descarga.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1. Condiciones de entrada de diseño

El sistema de aspersión a gravedad presenta condiciones y parámetros que se deben evaluar para obtener los datos de entrada de diseño.

3.1.1. Datos geográficos del sistema de aspersión

El área de estudio del presente trabajo se observa en el Anexo 2, donde se incluye un plano de ubicación geográfica con las mediciones y datos de campo correspondientes a la distribución del agua utilizada en el sistema de aspersión.

El sistema de aspersión diseñado en este estudio parte del tanque de alimentación, ubicado en el área de Truck Shop, a una altitud de 4420 msnm. Desde este punto, el sistema transporta agua a lo largo de un recorrido aproximado de 3000 metros, hasta alcanzar el último aspersor.

El primer aspersor, identificado como “Aspersor N°1”, se encuentra a una altitud de 4288 msnm, mientras que el último, “Aspersor N°29”, está situado a 4185 msnm. El trazado del sistema considera la topografía del camino minero y las condiciones operativas de la mina, asegurando una cobertura óptima para la mitigación del polvo generado por el tránsito de vehículos de acarreo.

3.1.2. Condiciones de diseño del sistema de aspersión

La nueva línea de aspersión tendrá un recorrido de 3000 m aproximadamente, y a partir de las progresivas kilométrica 0+850 estará ubicado en el primer aspersor “Aspersor N°1”, extendiéndose 2 km hasta el último aspersor “Aspersor N°29”, con una separación promedio entre aspersores de 70m y una pendiente aproximada de 9%.

Por la necesidad del proyecto el aspersor a seleccionar debe tener un radio de 40m de cobertura, con un consumo de 33.6 m³/h y un rango de presión de 427.47-868.73 kPa (62-126 psi).

Para controlar las altas presiones generadas por la diferencia de alturas estáticas se instalarán válvulas reductoras de presión, las cuales serán colocadas cada cierto tramo y a una determinada elevación, acompañadas de una válvula de alivio de presión por cada válvula reductora. De igual manera, para eliminar las burbujas de aire que se acumulan dentro de la línea, se instalarán válvulas de venteo en los puntos más elevados o donde haya cambio de pendientes, así como también en tramos largos.

La línea principal que transporta el agua recuperada para el riego por aspersión es de 10" de diámetro, en cada tramo se considera la instalación de aspersores.

Con el fin de evitar un transiente hidráulico que pueda generar daños a la válvulas, tuberías y equipos aguas abajo, se debe considerar la activación secuencial o por escenarios.

3.2. Diseño de sistema de riego por aspersión

Recopilados los datos correspondientes a geografía de la unidad de análisis y la información de condiciones de diseño del sistema de aspersión, se analiza el sistema hidráulico.

3.2.1. Datos de entrada y descripción conceptual del sistema

A partir de las condiciones ambientales de la unidad de análisis, como la temperatura, se caracterizan parámetros del fluido para el diseño correspondiente. Los datos conseguidos son utilizados en el diseño del sistema de riego por aspersión. Los parámetros se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2*Parámetros de entrada.*

Parámetro	Unidad	Valor
Descripción	-	Agua de proceso
Temperatura mínima	°C	-2
Temperatura máxima	°C	15
Temperatura de diseño	°C	7
Densidad	kg/m3	1000
Presión de vapor	psi	0.255

Nota: *Elaboración propia*

A partir del análisis de datos en el subcapítulo 3.1.1, se obtuvieron valores de diseño para el rango de las cotas de suministro, primer y último punto de aspersión del sistema. Los parámetros de operación se ven en la Tabla 3.

Tabla 3*Rango de cotas.*

Parámetro	Unidad	Valor
Cota de tanque de agua	msnm	4418
Cota de primer punto de aspersión	msnm	4283.14
Cota de último punto de aspersión	msnm	4152.52

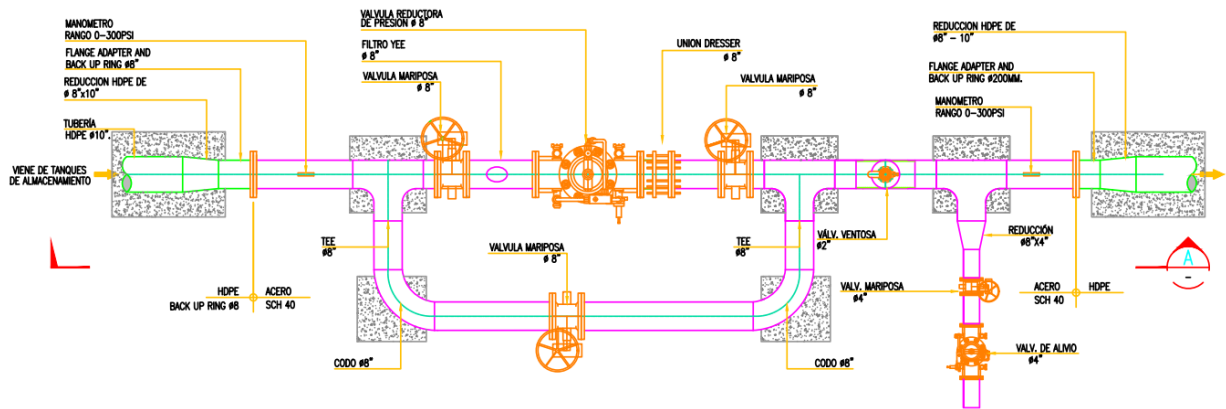
Nota: *Elaboración propia*

El sistema de riego es alimentado por el Tanque “TK-1”, dicho tanque se conectará a la tubería principal que transporta el agua recuperada para el riego por aspersión de 10” HDPE, en los tramos de distribución de aspersión estarán distribuidos 29 aspersores.

De acuerdo con el subcapítulo 3.1.2; se implementarán las estaciones reductoras de presión cuyas tuberías de la estación son de 8” de diámetro tal y como se muestra el detalle en la Figura 12, se colocarán a lo largo del sistema de tuberías en puntos estratégicos en base a los datos calculados, este sistema contará con tuberías de acero al carbono ASTM A53/A106 Sch 40.

Figura 12

Detalle típico de estación de reducción.



Nota: *Compañía minera.*

Con el fin de evitar transiente hidráulico que pueda generar daños a las válvulas, instrumentos y tuberías aguas abajo, se debe considerar la activación secuencial de cada válvula diafragma.

La estrategia es cubrir la mayor cantidad de superficie a regar, evitando transientes hidráulicos cuando se apertura más de 3 válvulas al mismo tiempo, además, procurando que el ciclo de riego se culmine y repita en el menor tiempo posible.

3.2.2. Cálculos hidráulicos en flujo dinámico

El diseño del sistema de aspersión desde el tanque “TK-1” consiste en el dimensionamiento de los elementos y equipos para la operación en función a las condiciones de diseño.

Para el dimensionamiento, se realizó cálculos hidráulicos considerando los elementos del sistema, régimen de flujo, diferencias de altura estática entre succión y último punto de aspersión, pérdidas de carga y pérdidas secundarias.

Los cálculos en base a simulaciones realizadas en el programa AFT Fathom y Bentley Hammer, a través de estos softwares permiten un desarrollo y comprensión del comportamiento del fluido a través de toda la red del sistema de tuberías.

De acuerdo al capítulo 3.2.1 el accionamiento de los aspersores se hará de manera secuencial. Las 5 válvulas de corte (válvula mariposa) están distribuidas en la línea principal de 10”. La apertura de los aspersores se dividió en 4 grupos o escenarios, en el primer grupo se tomaron los primeros 8 aspersores y los 3 grupos restantes se tomaron 7 aspersores consecutivos en cada uno, es decir:

- a) Escenario 1:** aspersores 1 al 8.
- b) Escenario 2:** aspersores 9 al 15.
- c) Escenario 3:** aspersores 16 al 22.
- d) Escenario 4:** aspersores 23 al 29.

3.2.2.1. Caudal de trabajo

Debido a las exigencias del proyecto y de la unidad minera, se dispone de datos sobre el caudal, la presión de funcionamiento de los aspersores y el alcance de riego. Los valores de caudal y presión en la salida de los aspersores de terminan a partir del radio de cobertura (40m), utilizando la tabla correspondiente que se encuentra en el Anexo 3. Donde, con las

consideraciones mencionadas se determina: $Q=33.6 \text{ m}^3/\text{h} = 9.33 \text{ l/s}$ y $P=74.48 \text{ psi}$, se tiene en consideración también que el rango de presión de trabajo admisible es 62 – 126 psi.

El funcionamiento del sistema hidráulico propuesto en este trabajo depende de la activación de los aspersores en grupo o escenarios previamente descritos en el subcapítulo 3.2.2.

Entonces, por la ecuación de continuidad se tiene la (27):

$$Q_T = Q. (N^\circ \text{ de aspersores en funcionamiento}) \quad (27)$$

Reemplazando en la (27 para el primer escenario se tiene que el caudal de trabajo (Q_{T1}) es:

$$Q_{T1} = 33.6 \text{ m}^3/\text{h} * 8$$

$$Q_{T1} = 268.8 \text{ m}^3/\text{h} = 0.07464 \text{ m}^3/\text{s}$$

Reemplazando en la (27 para los 3 escenarios restantes se tiene que el caudal de trabajo (Q_{T2}) es:

$$Q_{T2} = 33.6 \text{ m}^3/\text{h} * 7$$

$$Q_{T2} = 235.2 \text{ m}^3/\text{h} = 0.06533 \text{ m}^3/\text{s}$$

3.2.2.2. Selección de tubería

Una vez establecido el caudal requerido, se selecciona el diámetro de la tubería utilizando la ecuación de continuidad, a partir de la cual se despeja dicho valor. Es importante tener en cuenta que esta ecuación depende del caudal (Q) y la velocidad (v). El valor del caudal considerado fue determinado previamente en subcapítulo 3.2.2.1 de este documento, teniendo como valor $0.07464 \text{ m}^3/\text{s}$ de esta manera, la velocidad queda como la variable a determinar. Para el diseño de tuberías presurizadas, se suele emplear un rango de velocidad

comprendido entre 0.3 y 5 m/s. Dentro de este intervalo, se adopta un valor representativo, por lo que se ha optado por utilizar 2m/s como referencia para los cálculos.

Reemplazado en la (2 y despejando el diámetro (D) se tiene:

$$D = \sqrt{\frac{4 * (0.07464)}{\pi * (2)}} = 0.21798 \text{ m} = 8.58 \text{ in}$$

Como resultado obtenemos un diámetro (D) de 8.58 in.

El diseño requiere de valores comerciales para el diámetro se considera el más cercano superior, en este caso de 10 in.

Ya que hemos obtenido el diámetro nominal de 10 in, con ayuda el Anexo 7 obtenemos los valores de diámetro interno, valor necesario para los cálculos correspondientes.

Tabla 4

Valores de diámetro interno, diámetro externo y espesor para tuberías de HDPE de 10”.

Tubería	Espesor (mm)	Diámetro externo (mm)	Diámetro interno (mm)	Presión de trabajo (psi)
HDPE PE-4710 10" SDR 7.3	37.4	273.02	198.22	317
HDPE PE-4710 10" SDR 9	30.3	272.7	212.1	250
HDPE PE-4710 10" SDR 11	24.8	272.8	223.2	200

Nota: ASTM F714

Se considerará el diámetro interno de 198.22 mm por corresponder a la tubería con mayor presión de trabajo y espesor. Esta selección nos permite asegurar que los valores de presión del sistema en operación no excedan la presión máxima permitida por la tubería. Con esto al hacer los cálculos discernir si hay posibilidad de considerar una tubería con menor espesor.

3.2.2.3. Presión en nodos de ubicación de aspersores

Se calcularán las pérdidas de carga con la ecuación de Hazen-William de la (26 para todo el arreglo hidráulico.

Tomando en cuenta los datos de estado para el primer aspersor:

Tabla 5

Datos considerados para el tramo del primer aspersor.

Punto inicial	Punto final	Tubería		
Cota inicial Z (msnm)	Cota final Z (msnm)	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Presión de llegada (psi)
4418.00	4283.14	198.22	932.00	159.30

Nota: *Elaboración propia.*

Se tiene como dato de caudal:

$$Q_T = 268.8 \text{ m}^3/h = 0.07464 \text{ m}^3/s$$

De la (26 se calculan las pérdidas por fricción en el tramo:

$$H_f = \frac{10.67 * Q^{1.852}}{C^{1.852} * D^{4.87}} * L$$

Se considera la constante C=140 como coeficiente de Hazen-Williams para materiales como el HDPE, además, se convierten las unidades de caudal a m^3/s y las de diámetro a m.

$$H_{f((P1)-(ASP1))} = \frac{10.67 * 0.07464^{1.852}}{140^{1.852} * 198.22^{4.87}} * 932$$

$$H_{f((P1)-(ASP1))} = 22.834 \text{ mca}$$

Se calcula la presión en (ASP1):

$$H_{llegada} = H_{inicial} - H_f$$

$$H_{llegada} = 4418.0 - 22.834 = 4395.165 \text{ mca}$$

Restando la altitud del aspersor, se tiene:

$$P_{(ASP1)} = 4395.165 - 4283.14 = 112.025 \text{ mca} = 159.3 \text{ psi}$$

Los cálculos antes visto se ejecutan de la misma manera para los demás aspersores contemplados en el arreglo hidráulico (29 en total).

Los valores obtenidos para cada punto de aspersión se observan en la **Tabla 6**, se toma en consideración que el punto inicial es la salida del tanque de alimentación y el punto final es la altitud del nodo del aspersor correspondiente.

Tabla 6*Valores de presión en flujo permanente.*

Aspersor N°	Punto inicial	Punto final	Tubería		
	Cota inicial Z (msnm)	Cota final Z (msnm)	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Presión de llegada (psi)
1	4418.00	4283.14	198.22	932.00	159.30
2	4418.00	4275.13	198.22	1002.00	168.25
3	4418.00	4271.28	198.22	1072.00	171.29
4	4418.00	4266.85	198.22	1142.00	175.15
5	4418.00	4258.96	198.22	1212.00	183.93
6	4418.00	4252.37	198.22	1282.00	190.86
7	4418.00	4246.84	198.22	1352.00	196.29
8	4418.00	4243.68	198.22	1422.00	198.34
9	4418.00	4241.92	198.22	1492.00	209.79
10	4418.00	4241.55	198.22	1562.00	208.42
11	4418.00	4241.48	198.22	1632.00	206.61
12	4418.00	4241.62	198.22	1702.00	204.51
13	4418.00	4243.50	198.22	1772.00	199.93
14	4418.00	4241.70	198.22	1842.00	200.58
15	4418.00	4240.90	198.22	1912.00	199.82
16	4418.00	4138.88	198.22	1982.00	342.99
17	4418.00	4235.19	198.22	2052.00	204.13
18	4418.00	4227.45	198.22	2122.00	213.23
19	4418.00	4219.71	198.22	2192.00	222.33
20	4418.00	4212.10	198.22	2262.00	231.25
21	4418.00	4205.42	198.22	2332.00	238.84
22	4418.00	4198.66	198.22	2402.00	246.55
23	4418.00	4192.00	198.22	2472.00	254.12
24	4418.00	4185.78	198.22	2542.00	261.06
25	4418.00	4179.20	198.22	2612.00	268.51
26	4418.00	4172.06	198.22	2682.00	276.76
27	4418.00	4166.00	198.22	2752.00	283.47
28	4418.00	4166.00	198.22	2822.00	281.57
29	4418.00	4152.52	198.22	2892.00	298.83

Nota: *Elaboración propia.*

Se observa que los valores de presión van en aumento conforme el arreglo avanza y se aleja del punto de alimentación, llegando a presentar valores de 298.83 psi, presión que está por debajo de la presión máxima de trabajo presentada en la **Tabla 4** para tuberías HDPE

SDR 7.3 más sin embargo excede los valores de presión de trabajo de los componentes como los aspersores.

En consecuencia, es necesario considerar el uso de válvulas reductoras de presión a lo largo del arreglo hidráulico. Tomando en consideración la premisa se efectuará la simulación en los 4 escenarios incluyendo las válvulas reductoras de presión.

3.2.2.4. Adición de válvulas reductoras de presión

De acuerdo con el subcapítulo **3.2.2.3, Tabla 6**, se adicionan válvulas reductoras de presión en los puntos del sistema donde la presión tenga valores elevados, considerando ello se tiene la **Tabla 7**.

Tabla 7

Valores de presión consideradas para válvulas reductoras.

Válvula reductora	Presión de seteo de salida (Psi)
PRV 1	58
PRV 2	71
PRV 3	60

Nota: Elaboración propia.

Teniendo las presiones de seteo de salida de las válvulas reductoras se procede a analizar los 4 escenarios. Para mayor detalle de la ubicación de las válvulas reductoras ver el Anexo 4.

3.2.2.5. Escenario 1

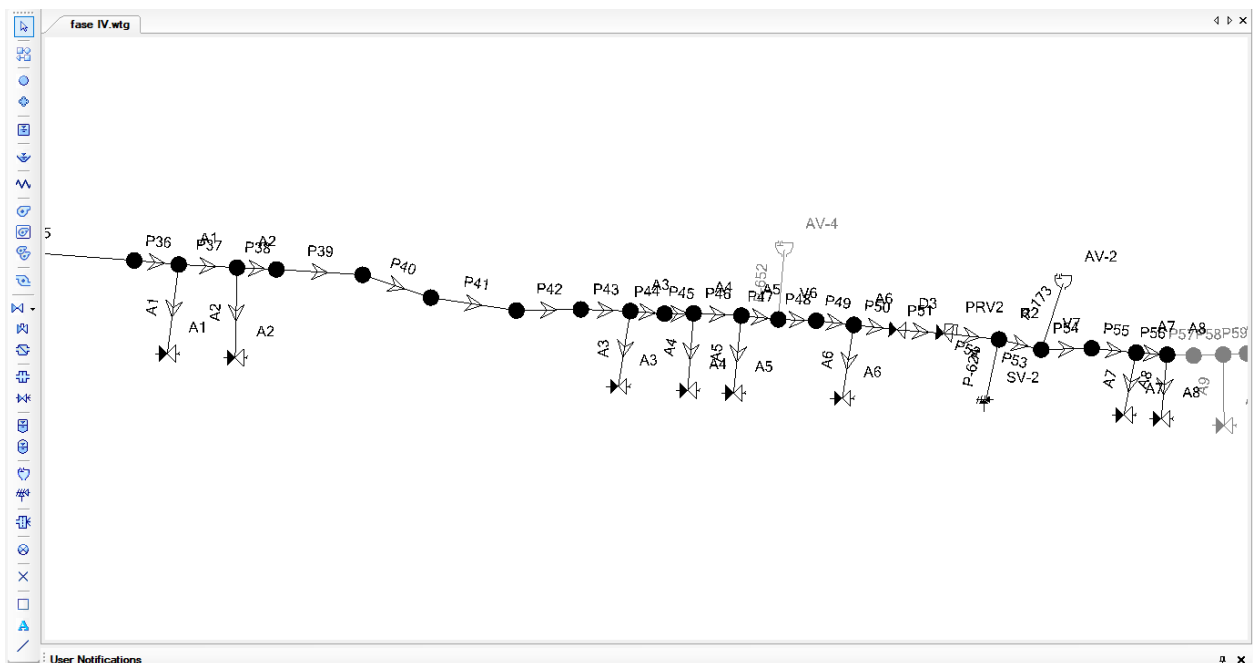
Según lo indicado en el texto del capítulo 3.2.2 el primer escenario consta del aspersor 1 al 8, para el cálculo de esto se hace la simulación total del sistema y solo se apertura dichos aspersores considerando como caudal de trabajo a Q_{T1}

Para los cálculos en flujo estático se desarrollaron en el programa AFT Fathom, la simulación se puede observar en la **Figura 14**.

Para los cálculos en flujo estático y transiente se desarrollaron en el programa Bentley Hammer, ver **Figura 13**. Esto con la finalidad de poder comparar los valores entre sí.

Figura 13

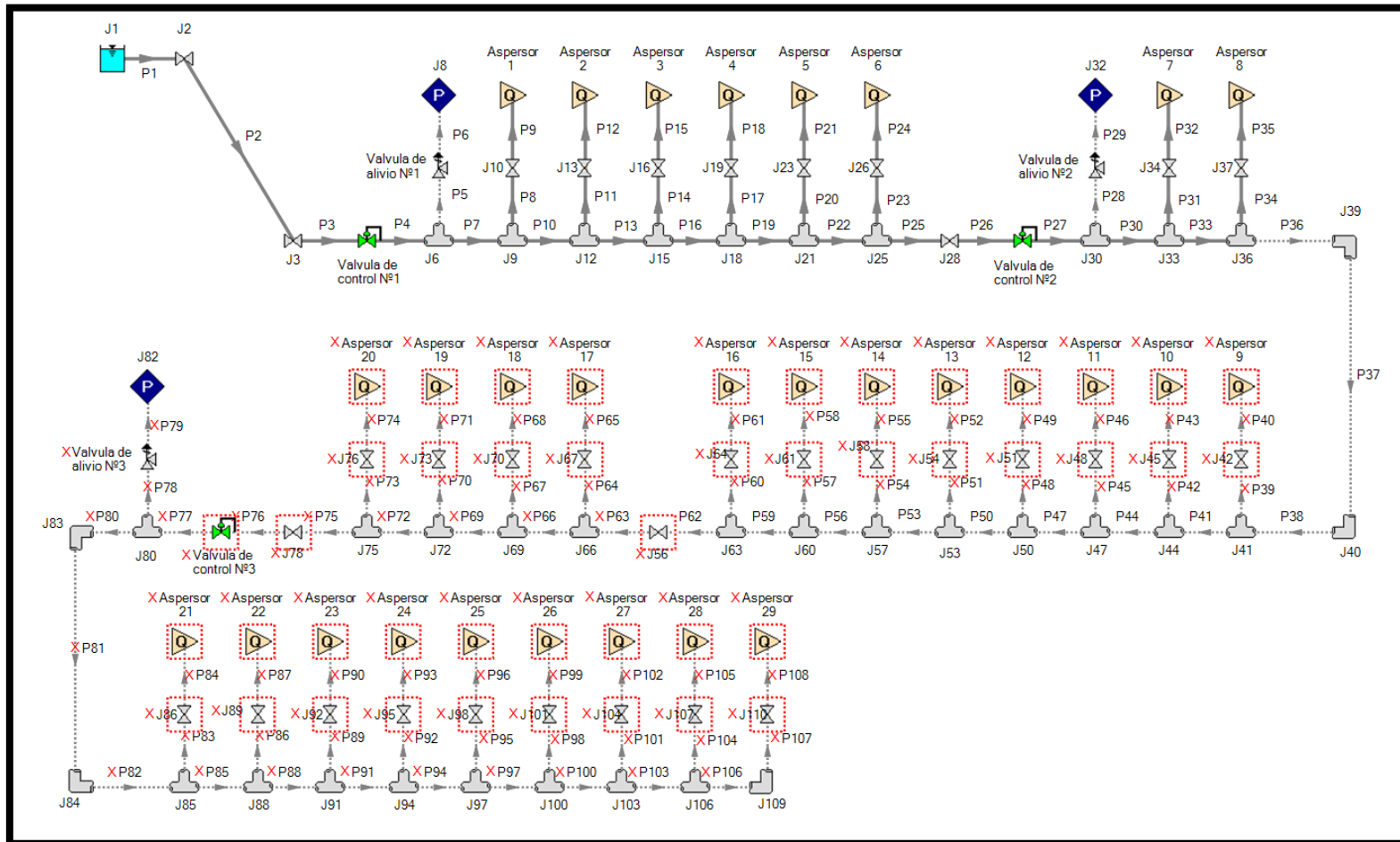
Simulación en Bentley Hammer del primer escenario.



Nota: *Elaboración propia.*

Figura 14

Simulación en AFT Fathom del primer escenario.



Nota: *Elaboración propia.*

Tabla 8*Tabla comparativa de presiones, Escenario 1.*

N° Aspersor	Presión (Psi)	
	Bentley Hammer	AFT Fathom
1	62	58.9
2	71	68.3
3	76	72.7
4	82	77.8
5	92	88.7
6	101	97.4
7	75	74.3
8	79	78.4

Nota: *Elaboración propia.*

En la **Tabla 9** se observa las presiones de llegada y seteo de las válvulas reductoras en operación de simulación.

Tabla 9*Presiones en válvulas reductoras, Escenario 1.*

Válvula reductora	Bentley Hammer v8i		AFT Fathom 9	
	Entrada (psi)	Salida (psi)	Entrada (psi)	Salida (psi)
PRV 1	155	58	156.7	58
PRV 2	104	71	102.1	71
PRV 3	x	x	x	x

Nota: *Elaboración propia.*

3.2.2.6. Escenario 2

Según lo indicado en el texto del capítulo 3.2.2 el primer escenario consta del aspersor 9 al 15, para el cálculo de esto se hace la simulación total del sistema y solo se apertura dichos aspersores considerando como caudal de trabajo a Q_{T2}

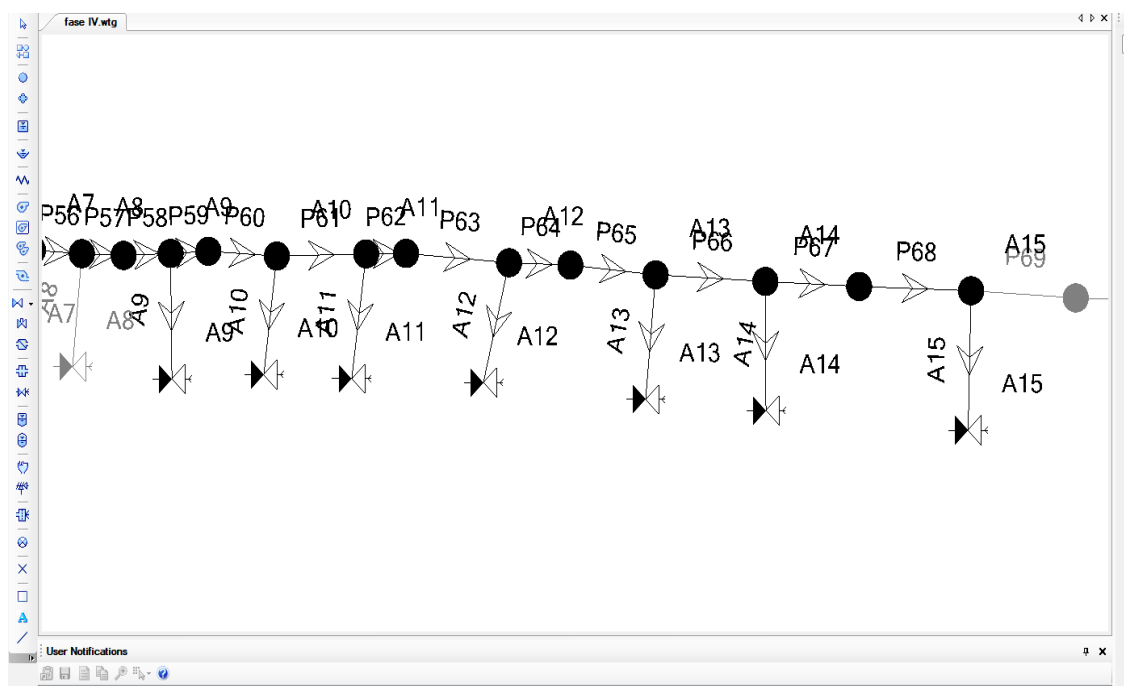
Para los cálculos en flujo estático y transiente se desarrollaron en el programa Bentley Hammer, ver **Figura 15**.

Para los cálculos en flujo estático se desarrollaron en el programa AFT Fathom, la simulación se puede observar en la **Figura 16**

Se presenta ambas simulaciones con la finalidad de poder comparar los valores entre sí.

Figura 15

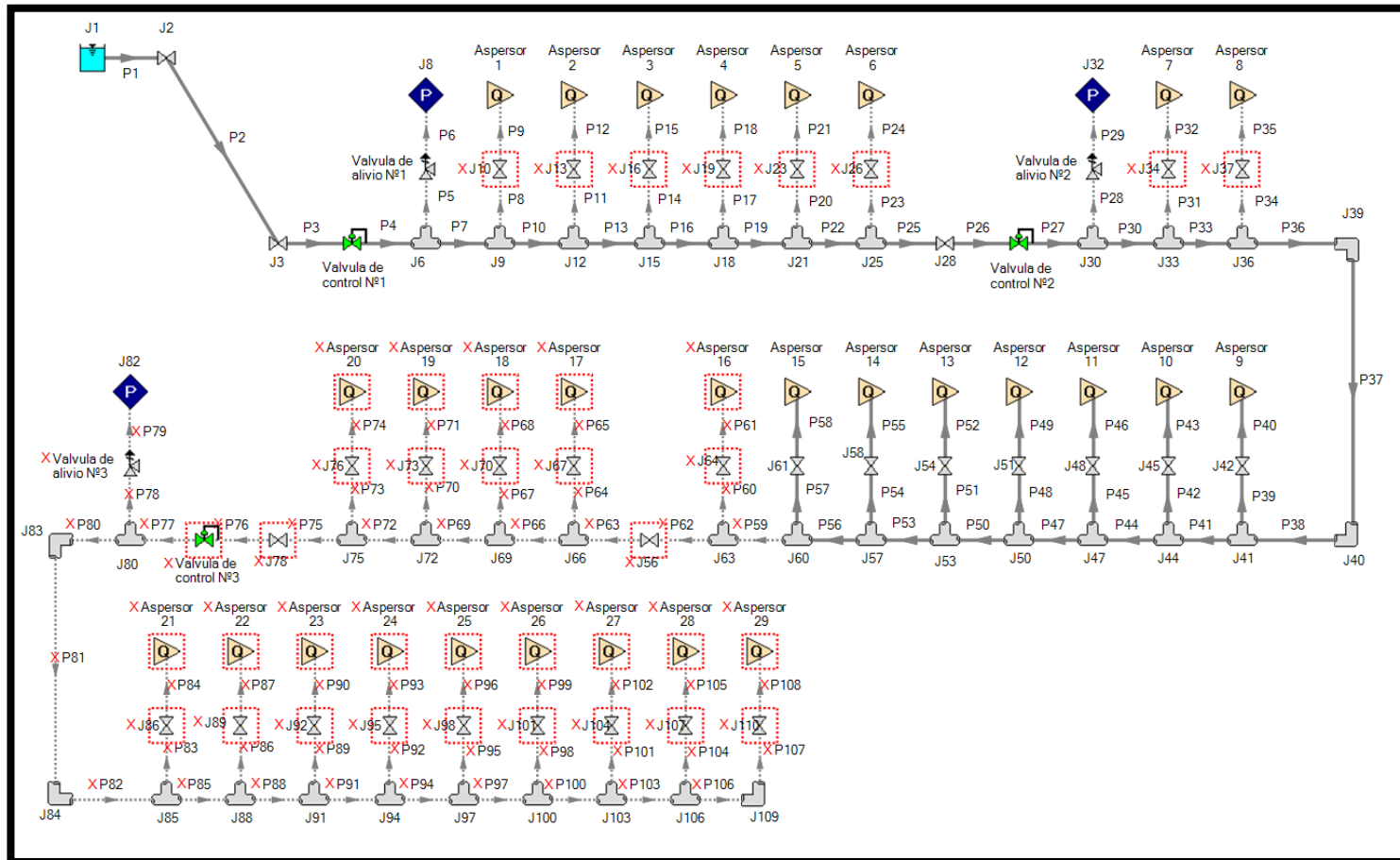
Simulación en Bentley Hammer del segundo escenario.



Nota: *Elaboración propia.*

Figura 16

Simulación en AFT Fathom del segundo escenario.



Nota: *Elaboración propia.*

De los resultados se obtiene la siguiente tabla comparativa, ver **Tabla 10**.

Tabla 10

Tabla comparativa de presiones, Escenario 2.

N° Aspersor	Presión (Psi)	
	Bentley Hammer	AFT Fathom
9	77	77.7
10	76	76.7
11	76	76.1
12	73	73.6
13	72	72.3
14	74	74.4
15	75	75.8

Nota: *Elaboración propia.*

En la **Tabla 11** se observa las presiones de llegada y seteo de las válvulas reductoras en operación de simulación.

Tabla 11

Presiones en válvulas reductoras, Escenario 2.

Válvula reductora	Bentley Hammer v8i		AFT Fathom 9	
	Entrada (psi)	Salida (psi)	Entrada (psi)	Salida (psi)
PRV 1	162	58	162.9	58
PRV 2	100	71	97.3	71
PRV 3	x	x	x	x

Nota: *Elaboración propia.*

3.2.2.7. Escenario 3

Según lo indicado en el texto del capítulo 3.2.2 el primer escenario consta del aspersor 16 al 22, para el cálculo de esto se hace la simulación total del sistema y solo se apertura dichos aspersores considerando como caudal de trabajo a Q_{T2}

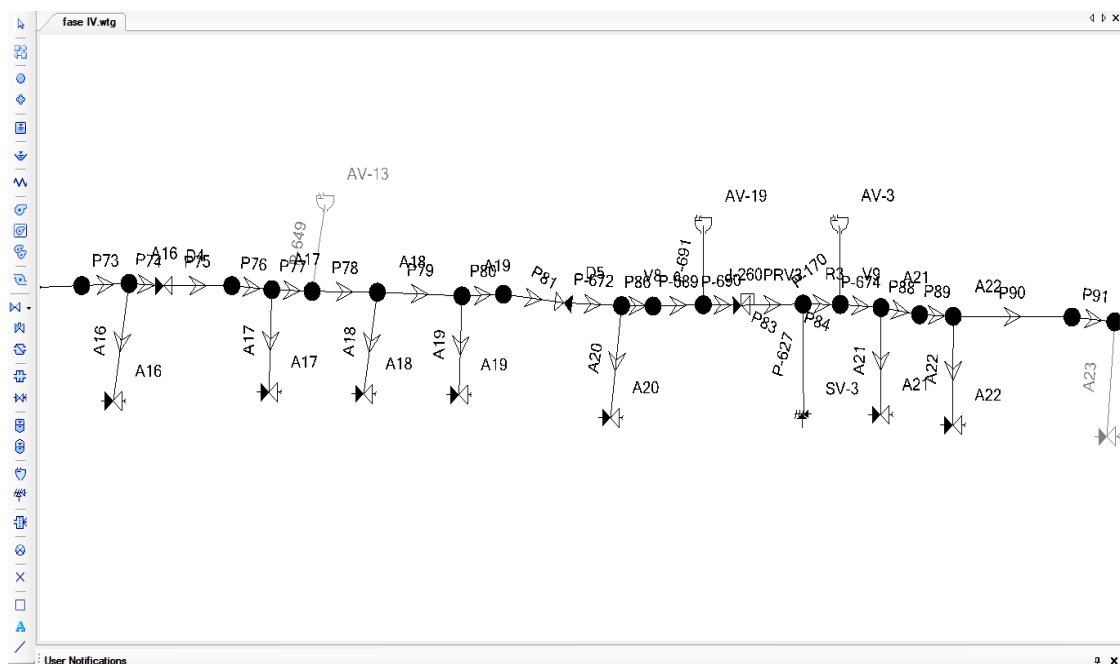
Para los cálculos en flujo estático y transiente se desarrollaron en el programa Bentley Hammer, ver **Figura 17**.

Para los cálculos en flujo estático se desarrollaron en el programa AFT Fathom, la simulación se puede observar en la **Figura 18**.

Se presenta ambas simulaciones con la finalidad de poder comparar los valores entre sí.

Figura 17

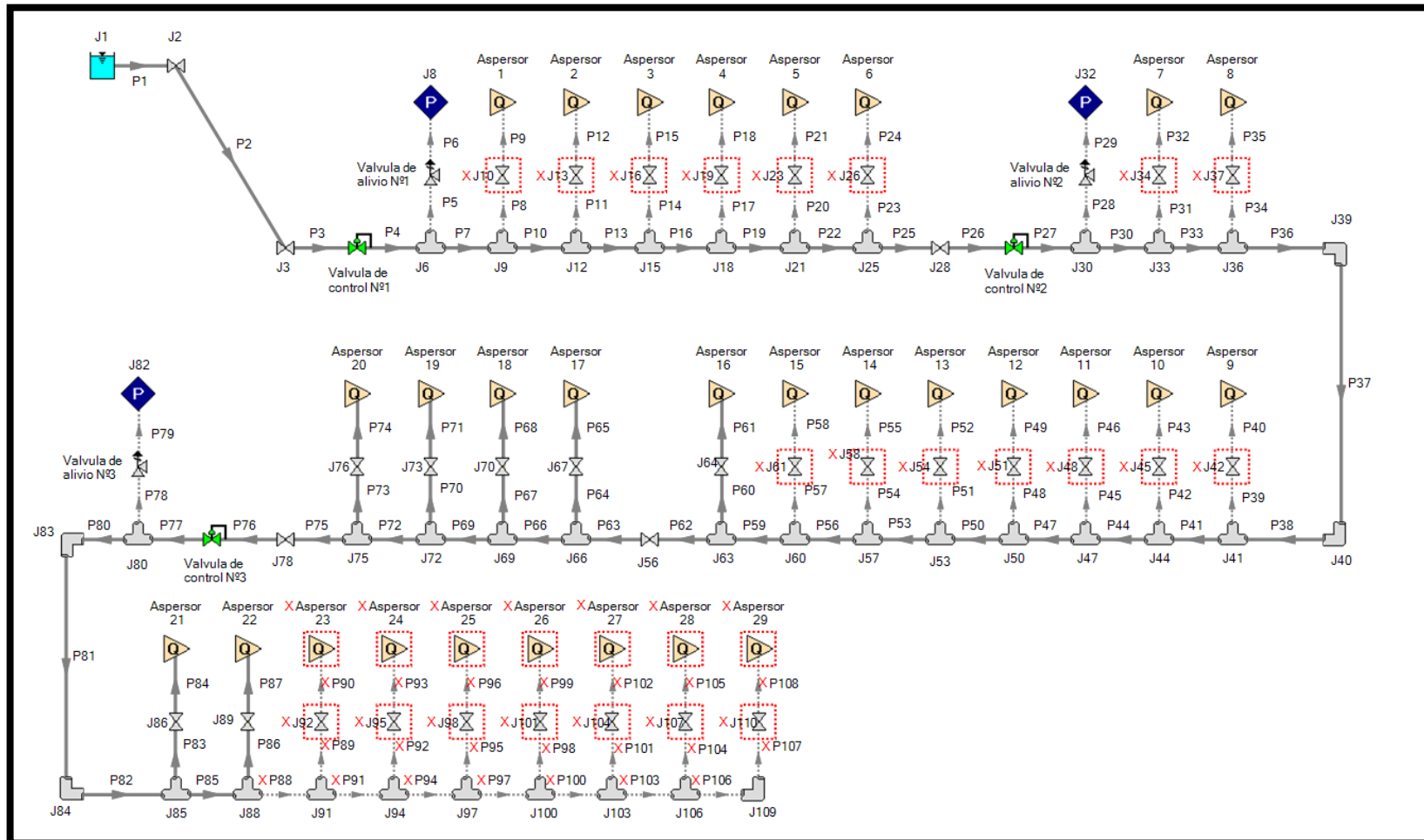
Simulación en Bentley Hammer del tercer escenario.



Nota: *Elaboración propia.*

Figura 18

Simulación en AFT Fathom del tercer escenario.



Nota: Elaboración propia.

De los resultados se obtiene la siguiente tabla comparativa, ver **Tabla 12**.

Tabla 12

Tabla comparativa de presiones, Escenario 3.

N° Aspersor	Presión (Psi)	
	Bentley Hammer	AFT Fathom
16	69	69.5
17	72	73.6
18	82	83.4
19	93	94
20	103	104.2
21	59	58
22	69	67.3

Nota: *Elaboración propia.*

En la **Tabla 13** se observa las presiones de llegada y seteo de las válvulas reductoras en operación de simulación.

Tabla 13

Presiones en válvulas reductoras, Escenario 3.

Válvula reductora	Bentley Hammer v8i		AFT Fathom 9	
	Entrada (psi)	Salida (psi)	Entrada (psi)	Salida (psi)
PRV 1	162	58	162.4	58
PRV 2	100	71	96.9	71
PRV 3	103	60	115.7	60

Nota: *Elaboración propia.*

3.2.2.8. Escenario 4

Según lo indicado en el texto del capítulo 3.2.2 el primer escenario consta del aspersor 23 al 29, para el cálculo de esto se hace la simulación total del sistema y solo se apertura dichos aspersores considerando como caudal de trabajo a Q_{T2}

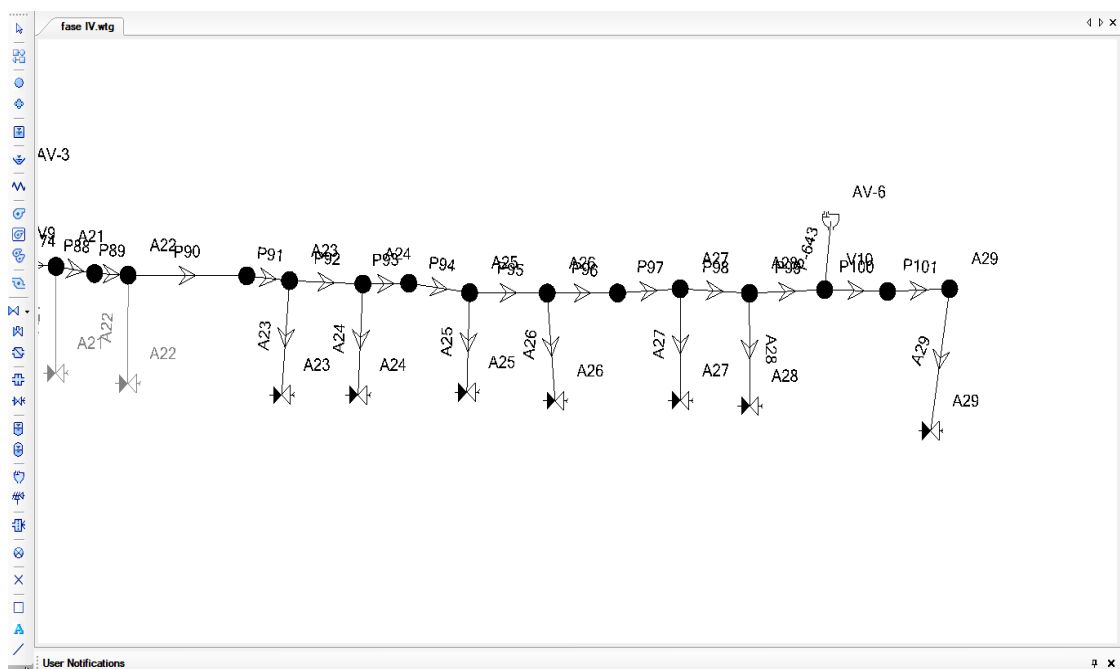
Para los cálculos en flujo estático y transiente se desarrollaron en el programa Bentley Hammer, ver **Figura 19**.

Para los cálculos en flujo estático se desarrollaron en el programa AFT Fathom, la simulación se puede observar en la **Figura 20**.

Se presenta ambas simulaciones con la finalidad de poder comparar los valores entre sí.

Figura 19

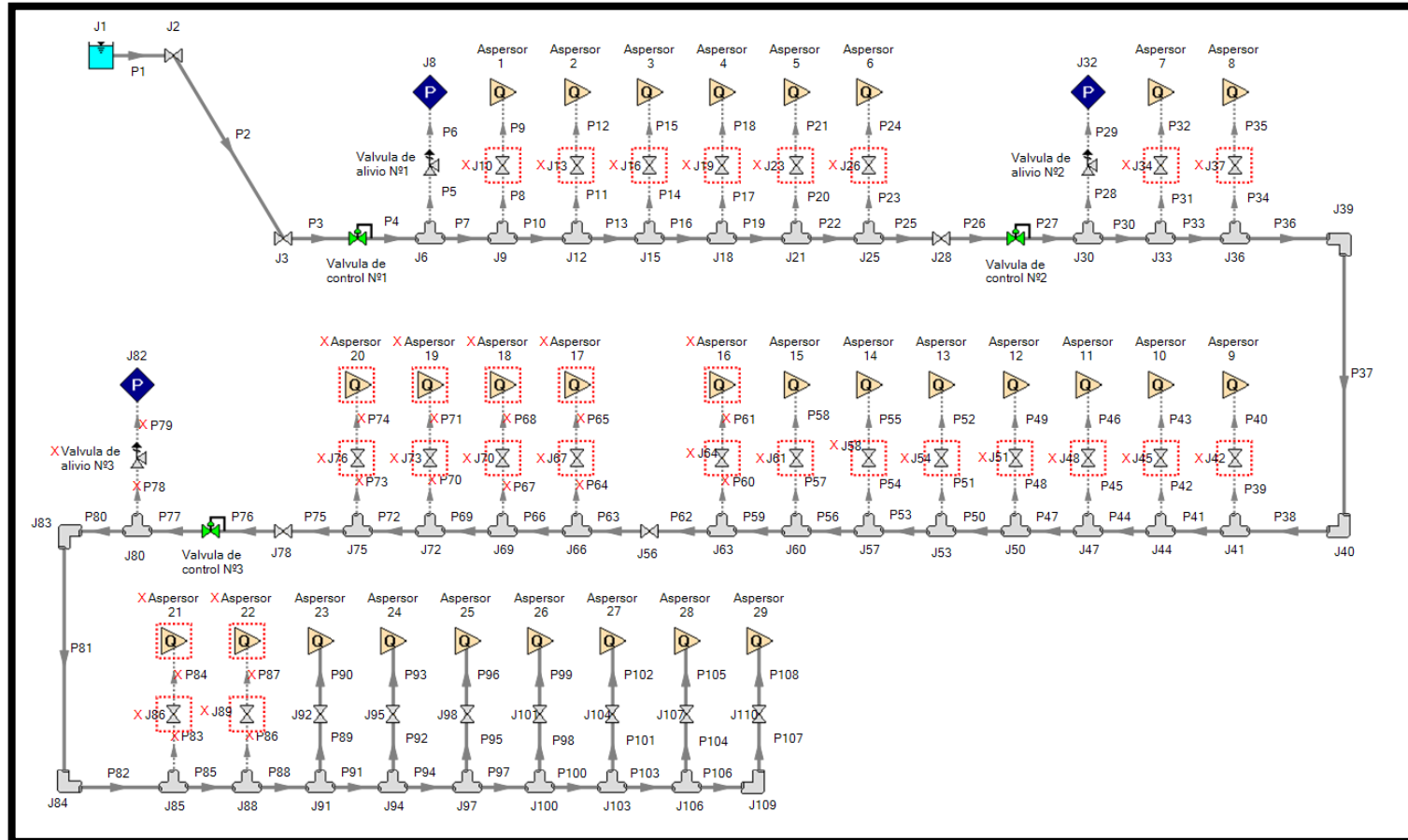
Simulación en Bentley Hammer del cuarto escenario.



Nota: *Elaboración propia.*

Figura 20

Simulación en AFT Fathom del cuarto escenario.



Nota: *Elaboración propia.*

De los resultados se obtiene la siguiente tabla comparativa, ver Tabla 14.

Tabla 14

Tabla comparativa de presiones, Escenario 4.

N° Aspersor	Presión (Psi)	
	Bentley Hammer	AFT Fathom
23	74	72
24	82	79.4
25	90	87.7
26	99	97.2
27	108	105.4
28	116	113.7
29	126	124.4

Nota: *Elaboración propia.*

En la **Tabla 11** se observa las presiones de llegada y seteo de las válvulas reductoras en operación de simulación.

Tabla 15

Presiones en válvulas reductoras, Escenario 4.

Válvula reductora	Bentley Hammer v8i		AFT Fathom 9	
	Entrada (psi)	Salida (psi)	Entrada (psi)	Salida (psi)
PRV 1	162	58	160.5	58
PRV 2	100	71	95.9	71
PRV 3	108	60	108.7	60

Nota: *Elaboración propia.*

3.2.3. Resultados del flujo dinámico

Se obtuvieron las gráficas del comportamiento de la presión máxima (línea roja) y mínima (línea azul) en metro y en psi, en un determinado tiempo a lo largo del sistema hidráulico.

Según las gráficas, las curvas características de elevación a lo largo de tramo muestran las curvas de presión y elevación del sistema en metros, donde:

Línea roja: máxima elevación en un determinado tiempo al momento del cierre de una determinada válvula.

Línea azul: mínima elevación en un determinado tiempo al momento del cierre de una determinada válvula.

Línea negra: elevación en el flujo dinámico.

Línea verde: elevación geodésica del sistema de tuberías.

Las curvas características de presión a lo largo del tramo muestran las sobrepresiones al momento del cierre de una determinada válvula de servicio.

Se muestran las gráficas del perfil hidráulico en metros, las presiones en psi y el volumen de aire/volumen de vapor. A continuación, se muestran las gráficas de las presiones más críticas y una tabla de resultados con las presiones más altas en los diferentes escenarios.

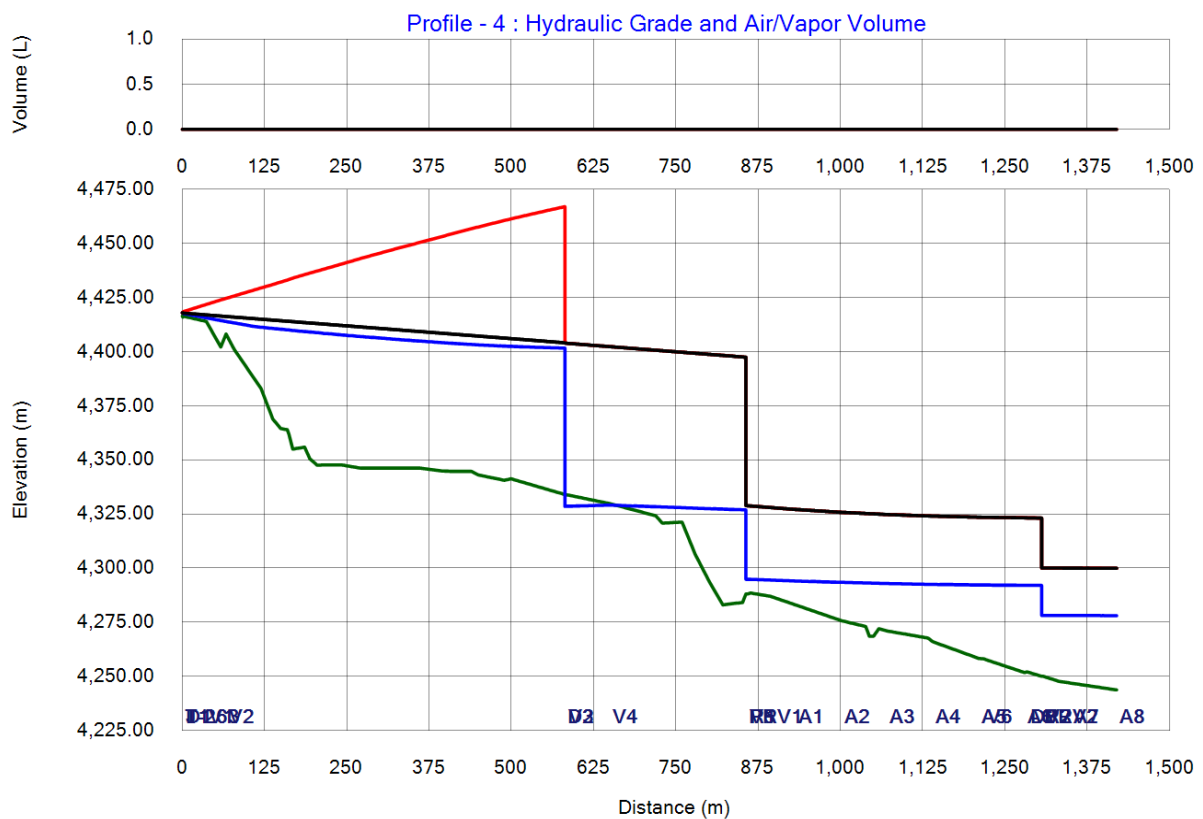
3.2.3.1. Curvas de presión y elevación

3.2.3.1.1. Escenario 1

La presión más alta se obtuvo en la simulación del cierre de la válvula de servicio 2, con 189 psi.

Figura 21

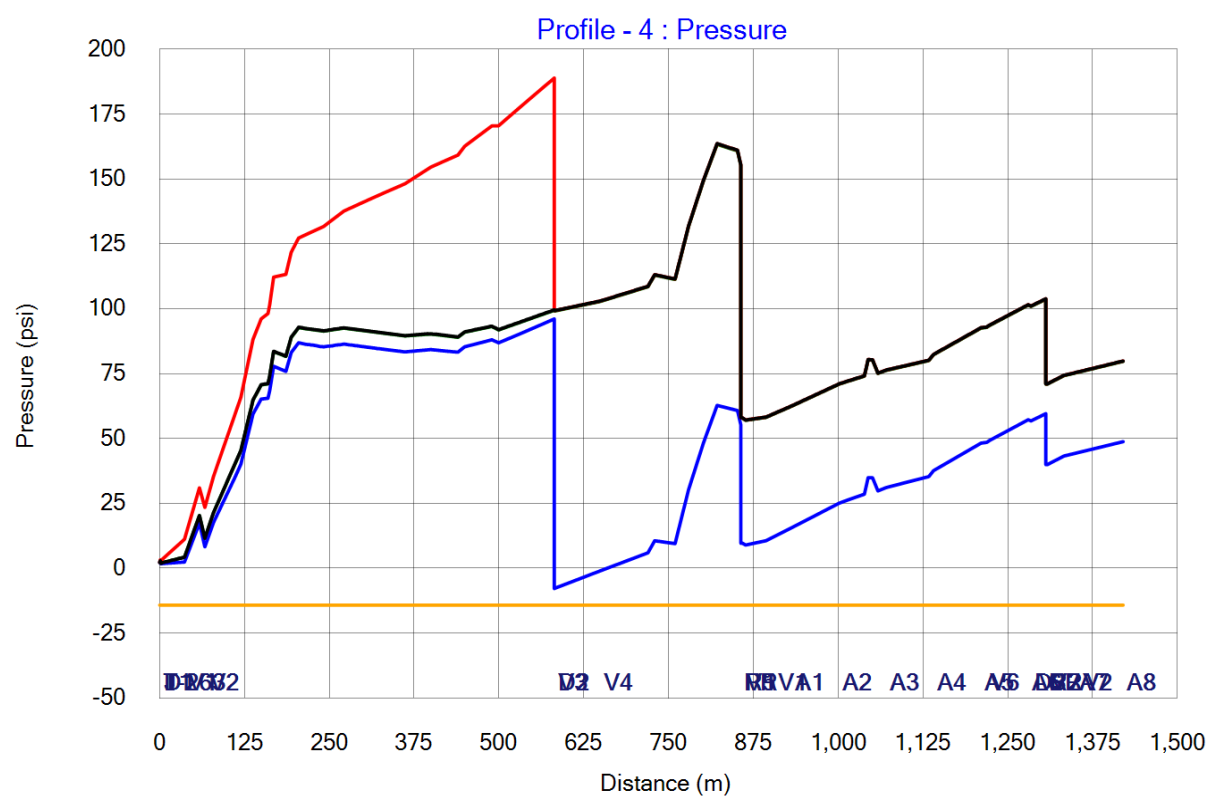
Grado hidráulico y volumen de aire/vapor, Escenario 1.



Nota: *Elaboración propia.*

Figura 22

Perfil de presión, Escenario 1.



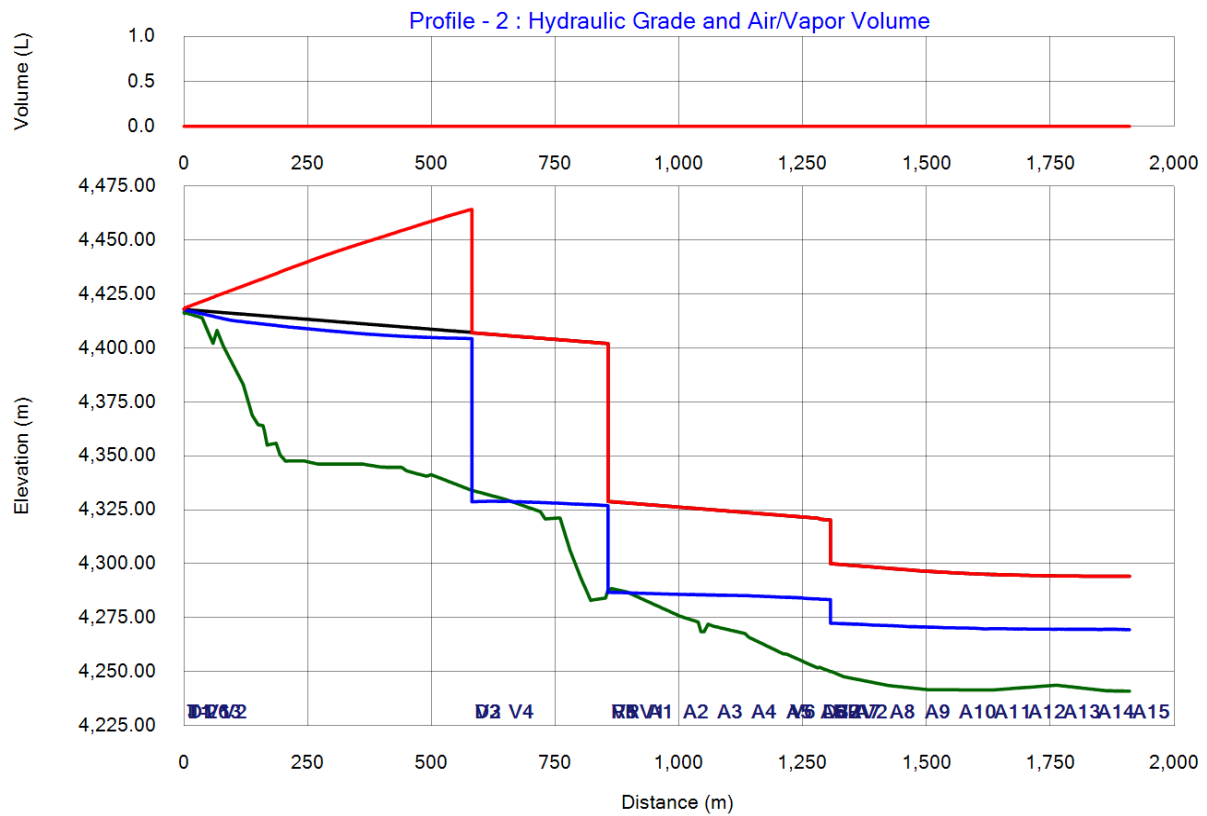
Nota: *Elaboración propia.*

3.2.3.1.2. Escenario 2

La presión más alta se obtuvo en la simulación del cierre de la válvula de servicio 2, con 185 psi.

Figura 23

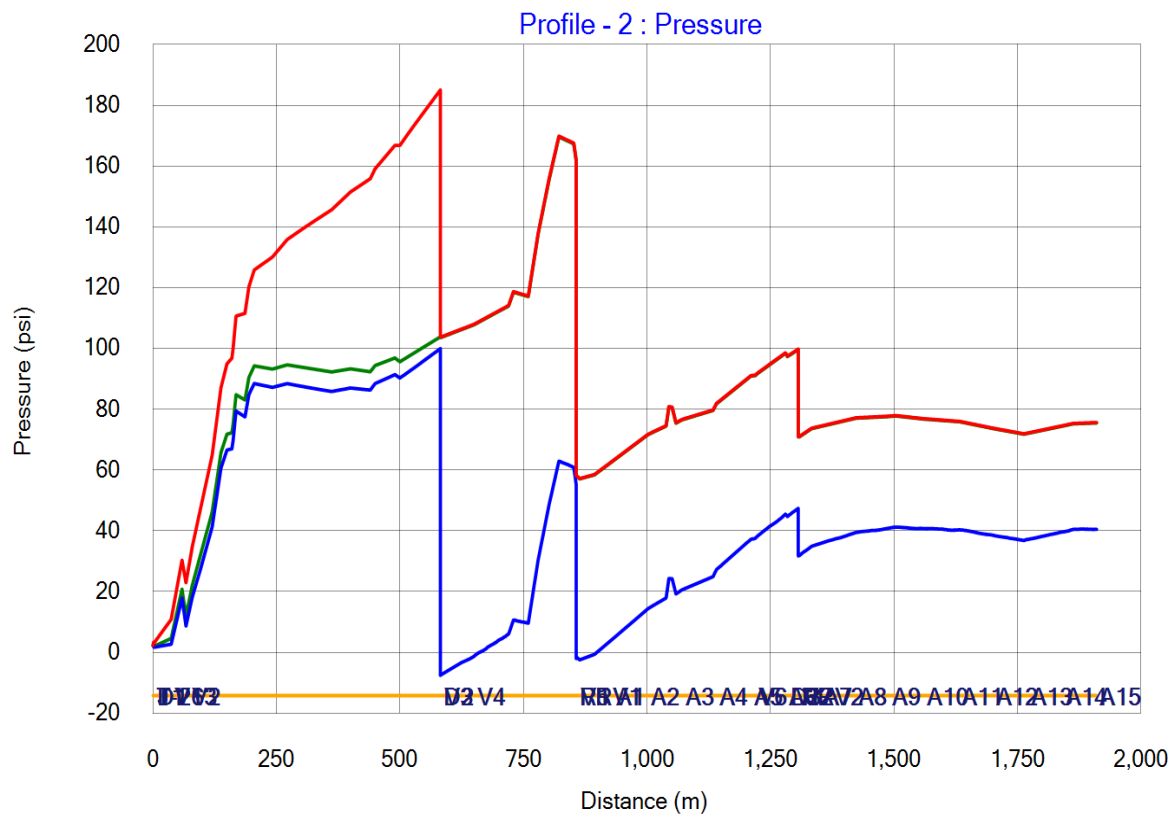
Grado hidráulico y volumen de aire/vapor, Escenario 2.



Nota: *Elaboración propia.*

Figura 24

Perfil de presión, Escenario 2.



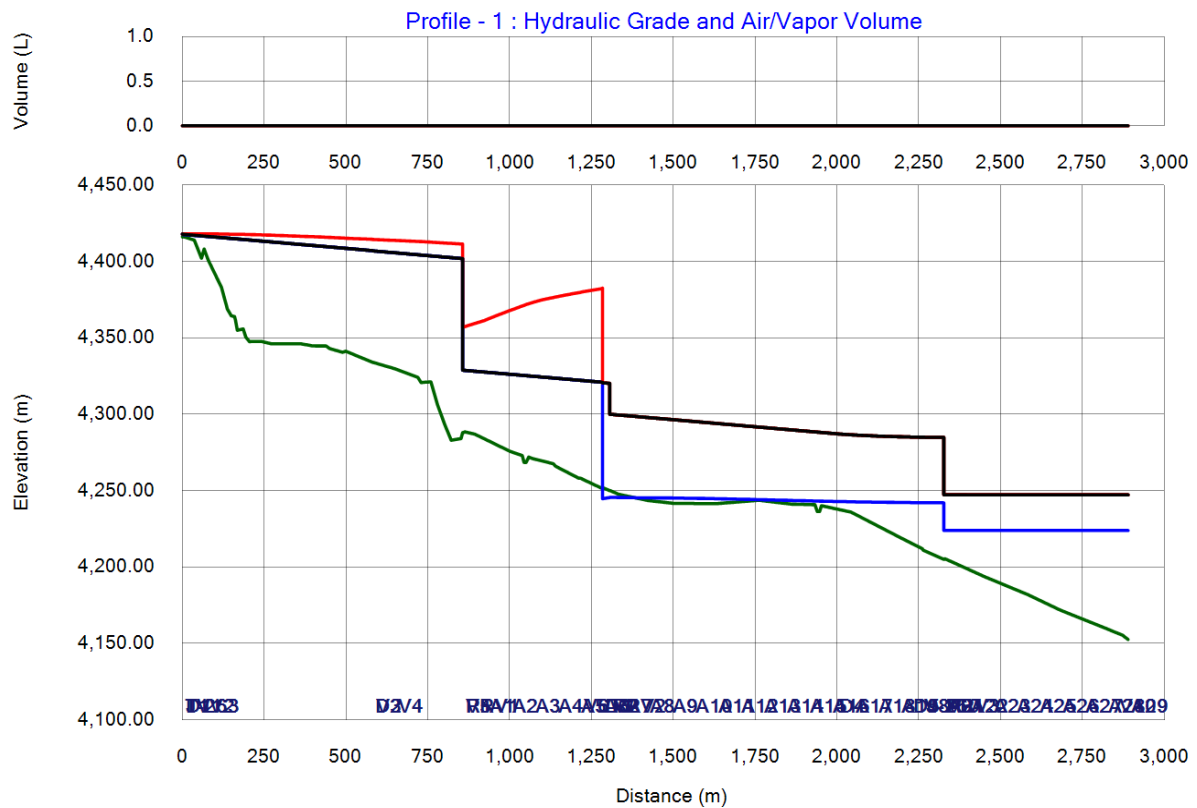
Nota: Elaboración propia.

3.2.3.1.3. Escenario 3

La presión más alta se obtuvo en la simulación del cierre de la válvula de servicio 3, con 185 psi.

Figura 25

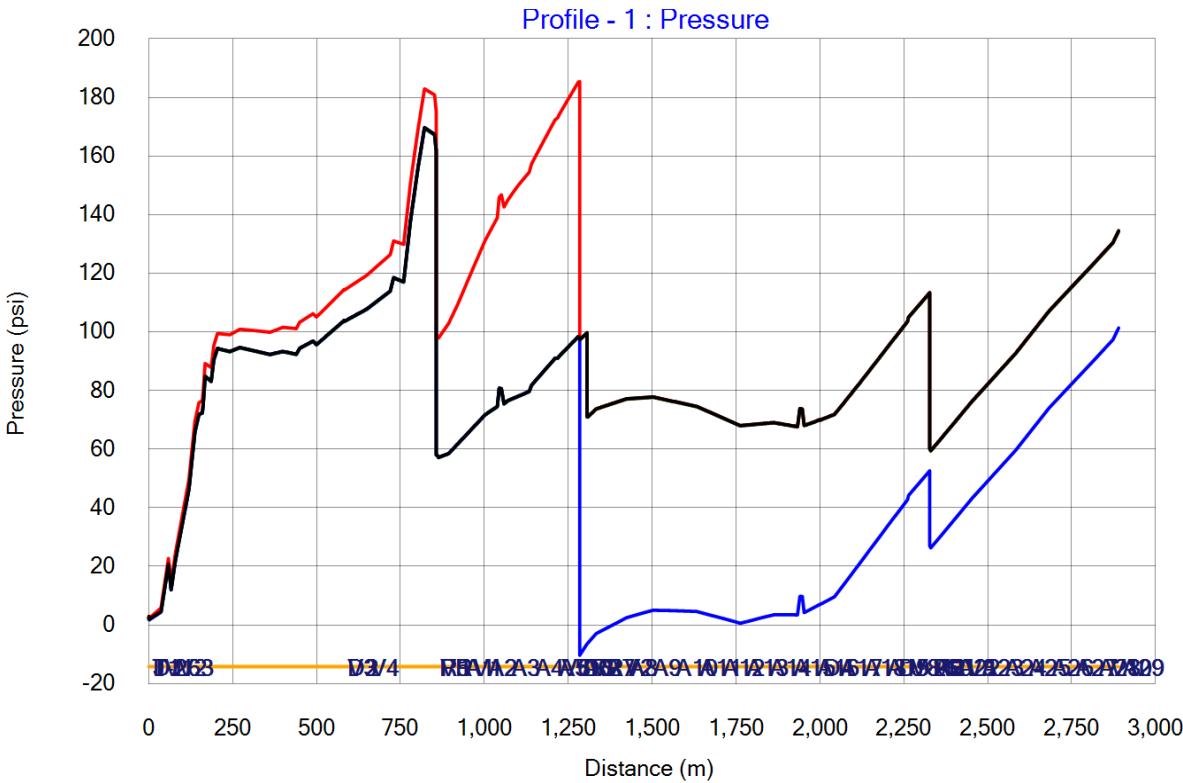
Grado hidráulico y volumen de aire/vapor, Escenario 3.



Nota: *Elaboración propia.*

Figura 26

Perfil de presión, Escenario 3.



Nota: *Elaboración propia.*

3.2.3.1.4. Escenario 4

LA presión más alta se obtuvo en la simulación del cierre de la válvula de servicio 5, con 211 psi.

Figura 27

Grado hidráulico y volumen de aire/vapor, Escenario 4.

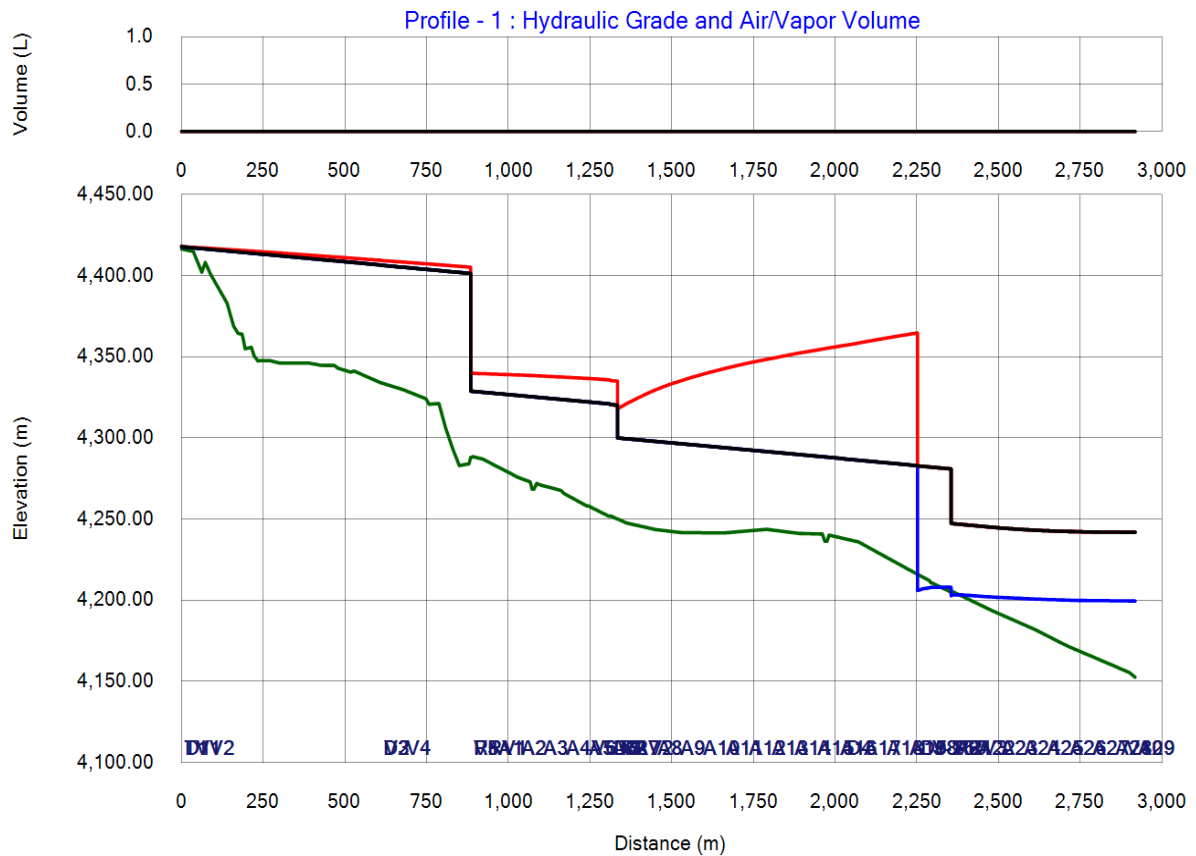
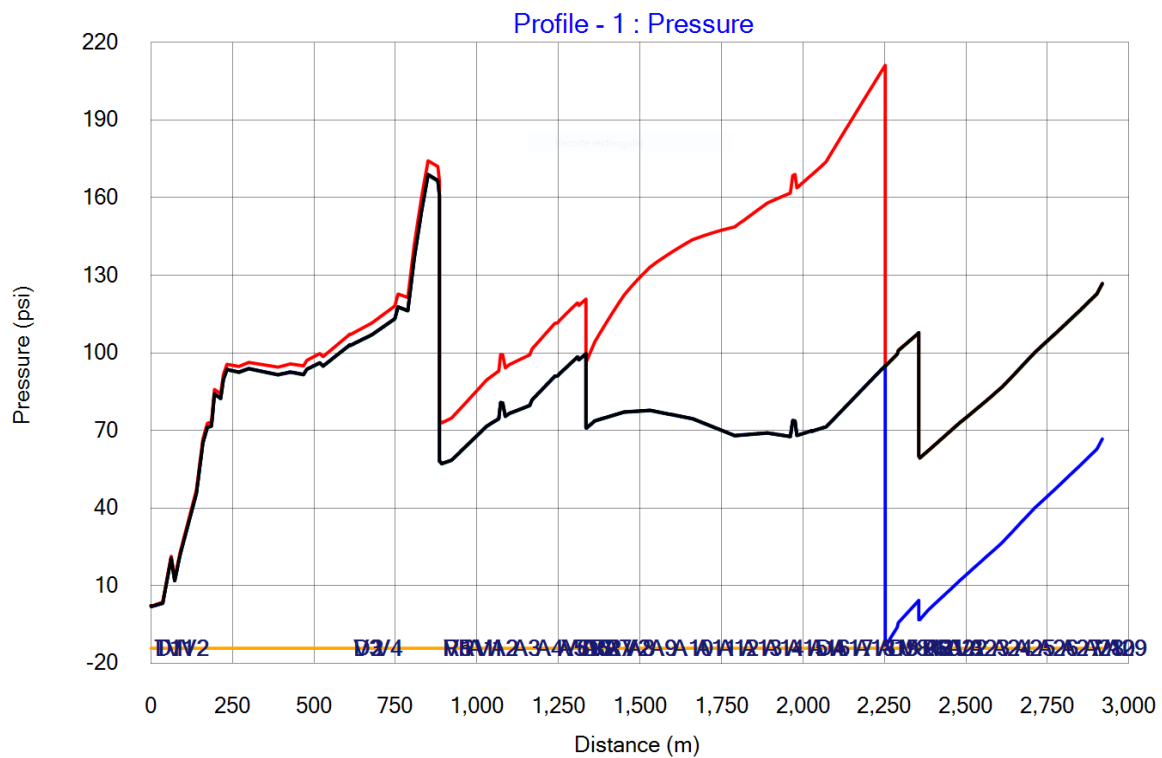


Figura 28

Perfil de presión, Escenario 4.



Nota: *Elaboración propia.*

Las presiones máximas en las válvulas de servicio al momento de cierre en los distintos escenarios se muestran en la **Tabla 16**.

Tabla 16

Presiones máximas en válvulas de servicio.

Válvula de servicio cerradas	Presiones máximas (psi)			
	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
1	150	150	150	150
2	189	185	181	186
3	176	183	185	208
4	-	-	170	186
5	-	-	175	211

Nota: *Elaboración propia.*

3.2.4. Cálculo de tiempo crítico de cierre

Debido a que la mayor presión en condiciones de flujo transitorio se presenta en la válvula de servicio 5, esta será tomada como referencia para determinar el tiempo de cierre correspondiente.

El coeficiente de elasticidad utilizado en el cálculo de la celeridad de onda se determina a partir del módulo de elasticidad del material de la tubería, que en este caso corresponde al HDPE. Por lo tanto, se considera el siguiente valor:

$$E = 101971621.298 \text{ kg/m}^2$$

Considerando que el fluido de trabajo es el agua, se conoce los valores de densidad, módulo de elasticidad, diámetro interior (D_i) y espesor de tubería (e) por lo que dicha ecuación se puede reducir a:

$$k_c = \frac{10^{10}}{E} = \frac{10^{10}}{101971621.298} = 98.066$$

$$D_i = 198.22 \text{ mm}$$

$$e = 37.4 \text{ mm}$$

$$c = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + (k_c) * \frac{D_i}{e}}} = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + (98.066) * \frac{198.22}{37.4}}} = 415.376 \text{ m/s}$$

3.2.4.1. Cerrando la válvula de servicio 5

Para calcular el tiempo critico se usará la ecuación 19 teniendo una longitud hasta la válvula de servicio de 2226 m.

$$T_c = \frac{2(2226)}{415.376} = 10.718 \text{ s}$$

Según estándares de la minera el tiempo de cierre de válvulas de servicio es no menor a 30 segundos, por ende, dicho tiempo de cierre crítico cumple con lo solicitado.

Capítulo IV. Resultados, Contrastación de Hipótesis y Discusión de Resultados

4.1. Resultados

Se identificó que el tramo de diseño posee un desnivel de 265 m entre el punto de alimentación (tanque a 4418 m.s.n.m.) y el último aspersor (a 4152.52 m.s.n.m.), con una longitud aproximada de 3000 m. Este gradiente natural permitió proyectar un sistema de aspersión por gravedad sin necesidad de equipos de bombeo. Se confirmó que la pendiente del camino es descendente, favoreciendo el aprovechamiento de la energía potencial del agua.

Se seleccionaron tuberías de HDPE PE-4710 de 10 pulgadas con SDR 7.3 y una presión de trabajo de 317psi. Los aspersores trabajan con un caudal de 33.6 m³/h y presión óptima y máxima recomendada por el fabricante entre 58 psi y 126 psi, con un radio de cobertura de 40 m. Se determinó una separación de 70 m entre aspersores, y se agruparon en 4 escenarios teniendo para el primer escenario un caudal de 268.8 m³/h, mientras que los escenarios restantes con un caudal de 235.2 m³/h. Se eligieron válvulas reductoras de presión y ventosas según las condiciones hidráulicas del sistema.

Se desarrollaron simulaciones hidráulicas en condiciones permanentes y transitorias. A través de AFT Fathom se modelaron las presiones, caudales y pérdidas de carga a lo largo del sistema. Las pérdidas de carga fueron calculadas usando la ecuación de Hazen-Williams (C=150). Se identificaron presiones máximas cercanas a los 300 psi, especialmente en los últimos tramos del sistema, lo cual excede los valores de operación de los aspersores. Posteriormente, con Bentley Hammer se realizó el análisis del golpe de ariete, evidenciando una presión máxima de hasta 211 psi en el cuarto escenario de cierre de válvulas.

Como medida de protección, se implementaron válvulas reductoras de presión en zonas donde la presión superaba la admisible por los aspersores, para mantener la operación segura de los aspersores, así como también los seteos de estas válvulas reductoras de

presión fueron ajustados para evitar superar los 230 psi, límite de presión máxima de operación de las válvulas de servicio. Asimismo, se identificaron puntos altos con presiones negativas, donde se propuso la instalación de válvulas ventosas para prevenir la cavitación y acumulación de aire. Así también se comprueba que el tiempo de cierre estándar de 30 segundos es suficiente para prevenir el golpe de ariete. Estas decisiones de ingeniería permiten un funcionamiento estable del sistema en todo el recorrido

Se aplicó una encuesta a 15 trabajadores del área operativa de la unidad minera para validar la efectividad del sistema en campo. La encuesta estuvo compuesta por siete preguntas cerradas en escala tipo Likert (Siempre, Frecuentemente, A veces, Casi nunca, Nunca), orientadas a medir la percepción respecto al impacto del nuevo sistema de mitigación de polvo. A continuación, los resultados se presentan en la **Tabla 17**.

Tabla 17

Resultado de la encuesta a personal operativo (n=15).

Pregunta	Siempre	Frecuentemente	A veces	Casi nunca	Nunca
1. Mejora de visibilidad	10	5	0	0	0
2. Disminución significativa del polvo	9	6	0	0	0
3. Incremento en la seguridad durante la conducción	8	6	1	0	0
4. Menos incidentes relacionados con la visibilidad	9	5	1	0	0
5. Reducción del mantenimiento del camino por menor acumulación de polvo	6	7	2	0	0
6. Recomendación de ampliar el sistema	11	4	0	0	0

Nota: *Elaboración propia.*

Los resultados muestran una percepción ampliamente positiva entre los trabajadores. El 100% de los encuestados indicaron que la visibilidad ha mejorado de manera frecuente

desde la implementación del sistema de aspersión. Asimismo, se identificó una disminución notoria en los niveles de polvo en suspensión y una mejora en la seguridad durante el tránsito en los caminos mineros. Estos datos confirman que el diseño hidráulico implementado no solo cumple con los objetivos técnicos, sino que también contribuye al bienestar del personal y a la sostenibilidad de la operación.

La encuesta completa se adjunta en el Anexo 5 de este documento.

4.1.1. Contrastación de hipótesis

4.1.1.1. Ho: Hipótesis Nula

El diseño de un sistema hidráulico de aspersión no influye en la mitigación de polvos en suspensión en el camino de acarreo de una unidad minera en Ancash.

4.1.1.2 Hi: Hipótesis de Investigación

El diseño de un sistema hidráulico de aspersión influye en la mitigación de polvos en suspensión en el camino de acarreo de una unidad minera en Ancash.

4.1.1.3. Decisión

El diseño del sistema de riego por aspersión a gravedad muestra un funcionamiento satisfactorio en todos los escenarios analizados. De acuerdo con los resultados obtenidos se corrobora que la hipótesis de investigación se comprueba, ya que el sistema cumple con los valores de presión requeridos por los aspersores, así como con la cobertura deseada, lo que permite una operación efectiva para la mitigación de polvo en la unidad minera evaluada. Además, que según la encuesta efectuada a los operarios mostrada en la **Tabla 17** demuestra una percepción positiva de más del 90% hacia la mitigación del polvo en los caminos de acarreo.

4.2. Discusión

Los resultados obtenidos en la presente investigación guardan concordancia con los hallazgos de Quispe (2022), quien planteó un sistema de aspersión autónomo como solución

eficiente para la mitigación de polvo en vías mineras. Al igual que en su estudio se identificó que el uso tradicional de camiones cisterna representa una alternativa costosa, ineficiente y dependiente del recurso hídrico y energético. En el caso de la unidad minera objeto de análisis de esta investigación, se comprobó que la implementación de un sistema de aspersión por gravedad, con diseño hidráulico adaptado a la topografía del camino de acarreo, permitió una notable mejora en la visibilidad, además de también reducir las partículas en suspensión y disminución de interrupciones en la operación minera.

Asimismo, se evaluó la aceptación del sistema a través de una encuesta aplicada a 15 trabajadores del área operativa, cuyos resultados evidenciaron que el 100% de los encuestados afirmó que la visibilidad ha mejorado de manera frecuente, y el 100% observó una disminución significativa del polvo en suspensión. Asimismo, el 93% manifestó que la seguridad durante la conducción se ha incrementado, y el 93% también indicó que han disminuido los incidentes relacionados con la baja visibilidad.

Respecto al mantenimiento del camino, un 87% señaló que la acumulación de polvo se ha reducido, lo que ha disminuido la frecuencia de reparaciones y nivelación. Finalmente, el 100% de los encuestados manifestó que recomendaría ampliar el sistema de aspersión a otras rutas internas de la unidad minera. Estos resultados confirman no solo la efectividad técnica del sistema diseñado, sino también su aceptación operativa, validando su replicabilidad y sostenibilidad como solución integral para el control de polvo en contextos mineros.

Conclusiones

El análisis del perfil altimétrico confirmó que las condiciones geográficas de la unidad minera son adecuadas para operar un sistema de distribución de agua sin requerir equipos de bombeo, aprovechando eficientemente el desnivel natural del camino de acarreo.

La compatibilidad entre los elementos seleccionados – tuberías, aspersores y válvulas – con los parámetros hidráulicos calculados garantiza la operación del sistema dentro de los rangos de presión y caudal necesario para cumplir su propósito.

La simulación en régimen permanente y transitorio evidenció la necesidad de aplicar medidas de control como válvulas reductoras de presión y ventosas. Su implementación permite mantener condiciones de operación seguras, previniendo sobrepresiones, cavitación y fallos en la red.

La opinión del personal operativo respecto al funcionamiento del sistema refleja una mejora clara en la visibilidad y una reducción de polvo en el camino, así como una mayor seguridad durante las labores de conducción. Esto respalda la efectividad del diseño desde la perspectiva práctica

El diseño de un sistema hidráulico de aspersión por gravedad ha demostrado ser una alternativa viable y eficiente para la mitigación de polvo en el camino de acarreo de la unidad minera. A partir del análisis topográfico del terreno, la adecuada selección de componentes, las simulaciones hidráulicas bajo condiciones permanentes y transitorias, así como la validación operativa mediante la percepción del personal en campo, se evidencia que la propuesta cumple con los requisitos técnicos, operativos y funcionales esperados. Este sistema no solo mejora la visibilidad y seguridad en las rutas de acarreo, sino que también representa una solución sostenible al no requerir fuentes de energía adicional.

Recomendaciones

Realizar un monitoreo periódico de las presiones operativas del sistema, especialmente en las zonas cercanas a las válvulas reductoras, con el fin de verificar que los dispositivos mantengan los valores de presión establecidos y detectar a tiempo posibles desviaciones o fallos en los equipos.

Implementar válvulas reductoras de presión con capacidad de regulación fina y lectura de presión incorporada, lo que permitirá realizar ajustes de campo con mayor precisión y mejorar el control del sistema, especialmente ante variaciones del caudal por condiciones operativas de la mina.

Instalar válvulas ventosas en puntos altos del sistema, para garantizar una adecuada expulsión de aire en el llenado inicial, ingreso de aire en vaciado y alivio de sobrepresión ante golpes de ariete. Se recomienda realizar mantenimientos periódicos a estas válvulas.

Considerar la instalación de sensores de presión y caudal conectados a un sistema de monitoreo remoto, especialmente en unidades mineras donde el acceso al sistema es limitado. Esto permitirá mejorar el control operativo y la toma de decisiones en tiempo real.

Revisar periódicamente el estado del material de las tuberías (HDPE), en especial en los tramos con presiones cercanas al límite de diseño, a fin de prevenir posibles deformaciones o fallas por fatiga hidráulica.

Evaluar la posibilidad de automatizar el encendido y apagado de los aspersores por zonas (escenarios), para optimizar el uso del recurso hídrico, reducir desgaste en los componentes y adaptar el sistema a las necesidades operativas de la unidad minera.

Realizar una verificación en campo del perfil topográfico real, mediante levantamiento con estación total o equipo GPS diferencial, ya que pequeñas variaciones de nivel pueden afectar significativamente las presiones en un sistema a gravedad.

Referencias bibliográficas

- Antezano, T. (2015). *Control de polvo en los caminos de acarreo en minas de superficie*. Instituto de Ingenieros de Minas del Perú. Lima, Perú. Recuperado de https://iimp.org.pe/pptjm/jm20150514_control-de-polvo.%20.
- ASTM International. (2013). *ASTM f714-13: Standard specification for polyethylene (PE) plastic pipe (SDR-PR) based on outside diameter*. ASTM International. <https://www.astm.org>
- Brauer, D. A., Giubergia, A. A., & Gil-Costa, V. (2019). *Evaluación de productos para el control de polvo ambiental en caminos mineros*. Universidad Nacional de San Luis. San Luis, Argentina. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/332853824_Evaluacion_de_productos_para_el_control_de_polvo_ambiental_en_caminos_mineros.
- Cengel, Y. y Cimbala J. (2019) *Mecánica de Fluidos. Fundamentos y Aplicaciones*. (4ta ed.). McGraw-Hill Education Global Holdings LLC.
- Chaudhry, M. H. (2013). *Applied hydraulic transients* (3ª ed.). Springer.
- Dirección Regional de Energía y Minas de Lima. (2023). *Informe Técnico N° 030-2023-GRL/DREM/DTAA/DTM/OAL*.
- Fox, R. W., McDonald, A. T., & Pritchard, P. J. (2015). *Introduction to fluid mechanics* (9th ed.). John Wiley & Sons.
- Gonzales, H. (2022). *Cálculo hidráulico de sistema a gravedad de riego por aspersión para control de polvo en unidad minera ubicada en Ancash, Perú*. [Monografía técnica de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Ministerio de Energía y Minas del Perú. (2023). *Resolución Directoral N° 190-2023-MINEM-DGAAM*. Lima, Perú.

Mott, R. L. (2014). *Applied fluid mechanics* (7th ed.). Pearson Education.

Munson, B. R., Young, D. F., Okiishi, T. H., & Huebsch, W. W. (2017). *Fundamentals of fluid mechanics* (8th ed.). John Wiley & Sons.

Pérez, M. (2023). *Diseño de un sistema inteligente de riego por aspersión para la gestión eficiente del agua en las rutas de acarreo en pequeña y mediana minería*.

Universidad Católica de Santa María Recuperado de <https://repositorio.ucsm.edu.pe>

Plastics Pipe Institute. (2018). *Handbook of polyethylene pipe* (2nd ed.). Plastics Pipe Institute.

Quispe, J. (2022). *Diseño de un sistema de aspersión autónomo para las vías de las minas*

[Tesis de titulación, Universidad Nacional de San Agustín].

<https://repositorio.unsa.edu.pe>.

Streeter, V. L., Wylie, E. B., & Bedford, K. W. (2010). *Mecánica de fluidos* (9.a ed.). McGraw-Hil.

Ventura, L. (2024). *Diseño de un sistema automatizado de riego por aspersión con generación fotovoltaica para optimizar el consumo del recurso hídrico* [Tesis de

titulación, Universidad Continental]. <https://repositorio.continental.edu.pe>.

Anexos

	Pág.
Anexo 1 Tabla de matriz de consistencia.....	1
Anexo 2 Plano del Sistema de Riego por Aspersión Fase IV	2
Anexo 3 Datos técnicos de Aspersor	3
Anexo 4 Perfil Hidráulico.....	4
Anexo 5 Encuesta sobre la implementación del sistema de aspersión	5
Anexo 6 Percepción del personal operativo sobre la visibilidad y el control de polvo en los caminos de acarreo.	6
Anexo 7 Dimensiones de tuberías de HDPE según ASTM-F714.	7

Anexo 1

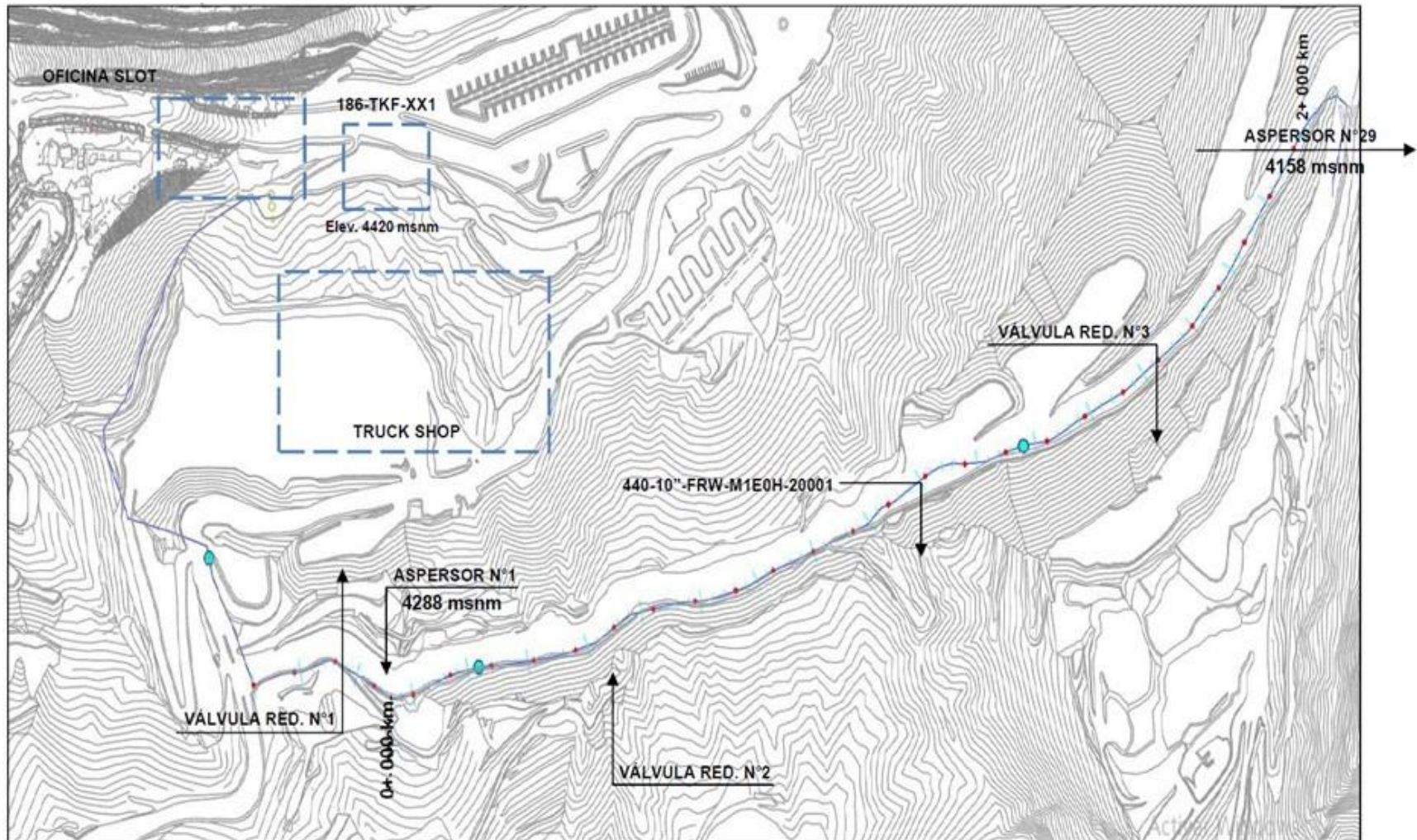
Tabla de matriz de consistencia

Problemática	Objetivo	Hipótesis	Variables		Indicadores	Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos
Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Dependiente	Independiente		
¿De qué manera se realiza la mitigación de los polvos en suspensión en el camino de acarreo de una unidad minera ubicada en la región de Ancash?	Diseñar un sistema hidráulico de aspersión por gravedad para mitigar los polvos en suspensión en el camino de acarreo de una unidad minera en Ancash.	El diseño de un sistema hidráulico de aspersión influye en la mitigación de polvos en el camino de una unidad minera en la región Ancash.	Mitigar los polvos en suspensión	Diseño de un sistema hidráulico de aspersión a gravedad.	-Caudal de operación (m3/h). - Presión en puntos estratégicos (Psi). -Pérdidas de carga en la red. -Configuración de aspersores.	- Análisis técnico de datos proporcionados por el cliente. -Simulación hidráulica con AFT Fathom y Bentley Hammer. -Planos topográficos del camino minero. -Aplicación y revisión de normativas y estándares técnicos aplicables.

Nota: *Elaboración propia.*

Anexo 2

Plano del Sistema de Riego por Aspersión Fase IV



Nota: *Elaboración propia.*

Anexo 3

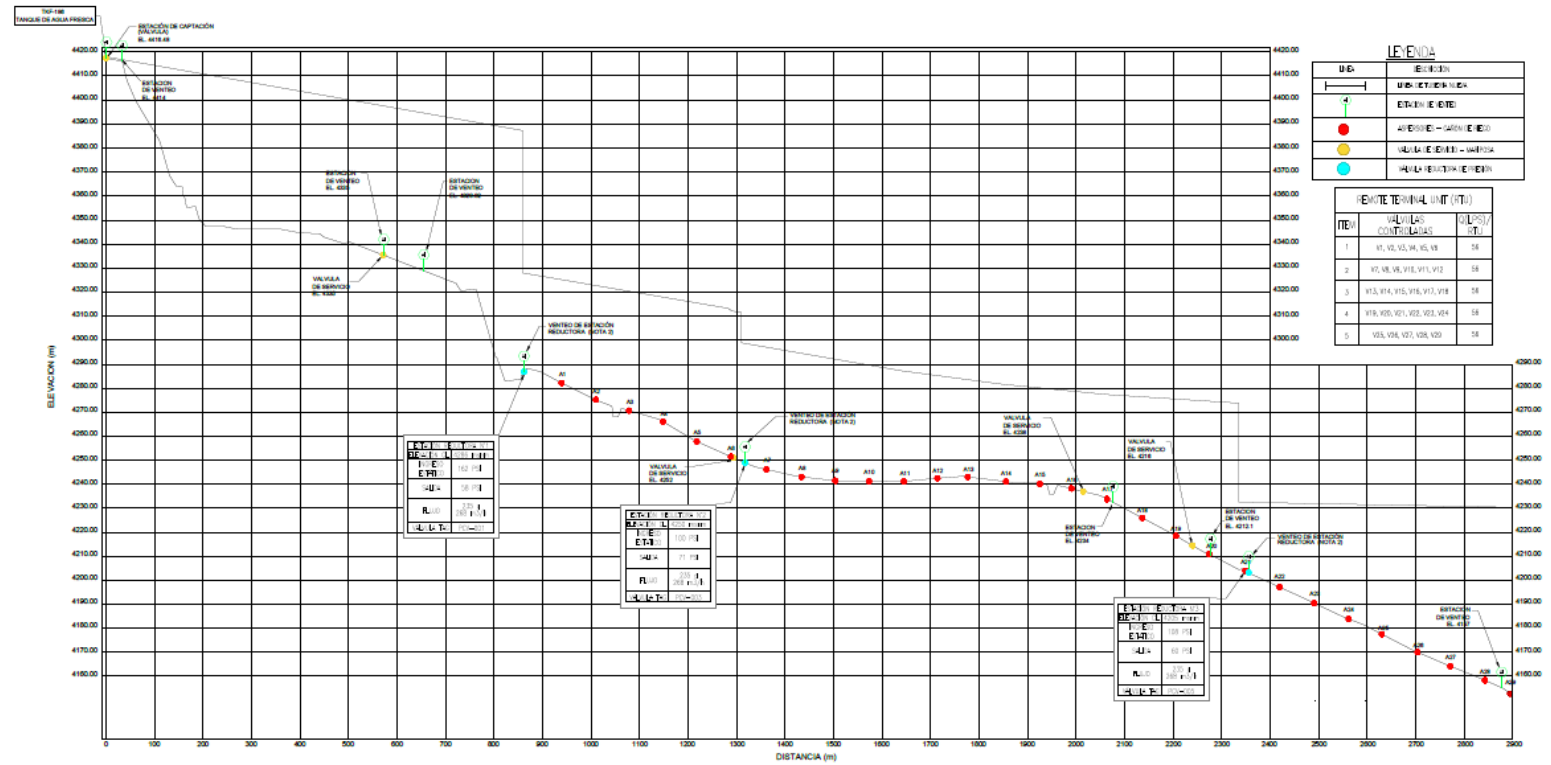
Datos técnicos de Aspersor

U	P	G	Q		○ Dati relativi ad 1 irrigatore Values for a single sprinkler Données pour 1 arros. tout seul Datos para cada rociador technische Daten für Einzelberegner		□ Disposizione in quadrato Square pattern Arroseur en carré Aspersores en cuadrado Quadratische Disposition			△ Disposizione in triangolo Triangular pattern Arroseur en triangle Aspersores en triángulo Rechteckposition			
					S Superficie irrigata Irrigated area Surface arrosée Superficie irrigada Beregnete Fläche	I Intensità oraria Rainfall per hour Pluviométrie horaire Intensidad horaria Wassermenge pro Stunde	D Distanza fra 2 ali piovane contigue Distance between 2 contiguous pipelines Distance entre 2 conduites de pluie Distancia entre 2 alas de lluvia contiguas max. Distanz zwischen zwei nebeneinanderliegenden Rohren	S Superficie irrigata Irrigated area Surface arrosée Superficie irrigada Beregnete Fläche	I Intensità oraria Rainfall per hour Pluviométrie horaire Intensidad horaria Wassermenge pro Stunde	D Distanza irrigatori sull'ala piovana Distance of the sprinklers on the pipeline Distance des arroseurs sur la conduite de pluie Distancia de los aspersores sobre el ala de lluvia max. Distanz zwischen den Beregnerauf einem Rohr	D ₁ Distanza fra 2 ali piovane contigue Distance between 2 contiguous pipelines Distance entre 2 conduites de pluie Distancia entre 2 alas de lluvia contiguas max. Distanz zwischen zwei nebeneinanderliegenden Rohren	S Superficie irrigata Irrigated area Surface arrosée Superficie irrigada Beregnete Fläche	I Intensità oraria Rainfall per hour Pluviométrie horaire Intensidad horaria Wassermenge pro Stunde
mm	atm	m	l/min	m³/h	m²	mm/h	m	m²	mm/h	m	m	m²	mm/h
12 8	1,5	20	159	9,5	1256	7,5	28	784	12,1	34	30	1020	9,3
	2	23	184	11,0	1662	6,6	32	1024	10,7	40	34	1360	8,0
	3	27	224	13,4	2289	5,8	38	1444	9,3	46	40	1840	7,3
	4	30	259	15,5	2826	5,4	42	1764	8,8	52	45	2340	6,6
14 8	2	25	230	13,8	1962	7,0	35	1225	11,2	43	37	1591	8,7
	3	29	280	16,8	2640	6,3	41	1681	9,9	50	43	2150	7,8
	4	32	325	19,5	3217	6,0	45	2025	9,6	55	48	2640	7,4
	5	34	364	21,8	3629	6,0	48	2304	9,5	59	51	3009	7,2
16 8	2	27	282	16,9	2289	7,3	38	1444	11,7	46	40	1840	9,2
	3	31	344	20,6	3017	6,8	43	1849	11,1	53	46	2438	8,4
	4	34	399	23,9	3629	6,5	48	2304	10,4	59	51	3009	7,9
	5	37	446	26,7	4298	6,2	52	2704	9,9	64	55	3520	7,6
18 8	2	28	343	20,6	2461	8,3	39	1521	13,5	48	42	2016	10,2
	3	33	434	26,0	3419	7,6	46	2116	12,3	57	49	2793	9,3
	4	36	506	30,3	4069	7,4	51	2601	11,6	62	54	3348	9,0
	5	40	561	33,6	5024	6,7	56	3136	10,7	69	60	4140	8,1
20 8	2	29	411	24,6	2640	9,3	41	1681	14,6	50	43	2150	11,4
	3	34	520	31,2	3629	8,5	48	2304	13,5	59	51	3009	10,3
	4	38	606	36,3	4534	8,0	53	2809	12,9	65	57	3705	9,8
	5	43	657	39,4	5805	6,7	60	3600	10,9	74	64	4736	8,3
22 8	3	34,5	580	35,4	3737	9,5	48	2304	15,3	60	52	3120	11,3
	4	39	682	40,9	4775	8,6	55	3025	13,5	67	58	3886	10,5
	5	44	766	45,9	6079	7,6	62	3844	12,0	76	66	5016	9,1
	6	46,5	839	50,3	6789	7,4	65	4225	11,9	80	70	5600	9,0

Nota: *Elaboración propia.*

Anexo 4

Perfil Hidráulico



ASPERORES		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19	A20	A21	A22	A23	A24	A25	A26	A27	A28	A29	
TAG		ASP-01	ASP-02	ASP-03	ASP-04	ASP-05	ASP-06	ASP-07	ASP-08	ASP-09	ASP-10	ASP-11	ASP-12	ASP-13	ASP-14	ASP-15	ASP-16	ASP-17	ASP-18	ASP-19	ASP-20	ASP-21	ASP-22	ASP-23	ASP-24	ASP-25	ASP-26	ASP-27	ASP-28	ASP-29	
ELEV (mm)		4289.140	4275.130	4271.280	4266.850	4258.960	4252.370	4246.840	4243.680	4241.920	4241.250	4241.480	4241.620	4243.500	4241.700	4240.900	4138.880	4235.190	4227.450	4219.710	4212.100	4205.420	4198.660	4192.000	4185.780	4179.200	4172.060	4166.000	4160.000	4152.520	
ESC. 1	PRES. STAT (psi)	62.000	71.000	76.000	82.000	92.000	101.000	75.000	79.000																						
	FLUID (m3/h)	33.600	33.600	33.600	33.600	33.600	33.600	33.600	33.600																						
	PRES. STAT (psi)									77.000	76.000	76.000	73.000	72.000	74.000	75.000															
ESC. 2	FLUID (m3/h)									33.600	33.600	33.600	33.600	33.600	33.600	33.600															
	PRES. STAT (psi)																														
ESC. 3	FLUID (m3/h)																46.000	72.000	82.000	93.000	103.000	59.000	69.000								
	PRES. STAT (psi)																33.600	33.600	33.600	33.600	33.600	33.600	33.600								
ESC. 4	FLUID (m3/h)																								74.000	82.000	90.000	99.000	108.000	116.000	126.000
	PRES. STAT (psi)																														

Nota: Elaboración propia.

Anexo 5

Encuesta sobre la implementación del sistema de aspersión

ENCUESTA SOBRE LA IMPLEMENTACION DEL SISTEMA DE ASPERSIÓN

Objetivo de la encuesta

Evaluar la percepción del personal operativo respecto a la eficacia del sistema de aspersión por gravedad implementado para la mitigación del polvo en los caminos de acarreo de la unidad minera en Áncash.

Instrucciones

Marque con una **X** la alternativa que mejor represente su experiencia desde la implementación del nuevo sistema de aspersión.

Escala de respuesta

- x Siempre
- x Frecuentemente
- x A veces
- x Casi nunca
- x Nunca

Nº	Pregunta	Siempre	Frecuentemente	A veces	Casi nunca	Nunca
1	¿Desde la implementación del sistema, la visibilidad ha mejorado en los caminos de acarreo?					
2	¿Ha notado una reducción significativa en la cantidad de polvo en suspensión durante el turno?					
3	¿Considera que la conducción de vehículos es ahora más segura gracias a una mejor visibilidad?					
4	¿Se han reducido los incidentes o casi incidentes relacionados con la falta de visibilidad?					
5	¿Percibe una mejora en su salud respiratoria o menor malestar por exposición al polvo?					
6	¿Se ha notado una menor necesidad de mantenimiento en los caminos debido a la reducción del polvo?					
7	¿Considera recomendable extender este sistema de aspersión a otras zonas de la operación minera?					

Nota: *Elaboración propia.*

Anexo 6

Percepción del personal operativo sobre la visibilidad y el control de polvo en los caminos de acarreo.

Ítem	Frecuencia
¿Con qué frecuencia experimenta baja visibilidad por polvo?	
-Siempre	42%
-A veces	38%
-Rara vez	15%
-Nunca	5%
¿Considera que el sistema actual de control de polvo es eficiente?	
-Sí	22%
-No	78%
¿Ha presenciado incidentes causados por falta de visibilidad?	
-Sí	57%
-No	43%
¿Cree que se desperdicia agua en los actuales métodos de mitigación?	
-Sí	64%
-No	36%

Nota: *Elaboración propia.*

Anexo 7

Dimensiones de tuberías de HDPE según ASTM-F714.

			ESPECIFICACIONES PARA TUBOS SEGÚN ASTM F714											
Presión de Trabajo			SDR 13.5		SDR 11		SDR 9.3		SDR 9		SDR 7.3		SDR 7	
			128 PSI		160 PSI		193 PSI		200 PSI		254 PSI		267 PSI	
			160 PSI		200 PSI		241 PSI		250 PSI		317 PSI		333 PSI	
Diam. Nominal mm	Diam. Prom. pulg	Diam. Exterior mm	Diám. Int. mm	Esp. mm	Diám. Int. mm	Esp. mm	Diám. Int. mm	Esp. mm	Diám. Int. mm	Esp. mm	Diám. Int. mm	Esp. mm	Diám. Int. mm	Esp. mm
Ø pulg (mm)	Promedio	Promedio	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN
1/2"	0.840"	21.34	17.1	1.57	16.4	1.93	15.6	2.29	15.5	2.36	14.4	2.92	14.1	3.05
3/4"	1.050"	26.70	21.6	1.98	20.8	2.41	19.8	2.87	19.6	2.97	18.3	3.66	18.0	3.81
1"	1.315"	33.40	27.3	2.46	26.2	3.05	25.1	3.58	24.8	3.71	23.0	4.57	22.6	4.78
1 1/4"	1.660"	42.20	34.8	3.12	33.4	3.84	32.0	4.52	31.6	4.67	29.2	5.77	28.6	6.02
1 1/2"	1.900"	48.30	40.0	3.58	38.3	4.39	36.5	5.18	36.2	5.36	33.4	6.60	32.7	6.88
2"	2.375"	60.30	50.2	4.47	47.9	5.49	45.6	6.48	45.1	6.71	41.7	8.26	40.9	8.61
3"	3.500"	88.90	73.8	6.58	70.4	8.08	67.1	9.55	66.3	9.88	61.2	12.17	60.1	12.70
4"	4.500"	114.30	94.8	8.46	90.5	10.39	86.3	12.29	85.3	12.70	78.7	15.65	77.2	16.33
6"	6.625"	168.28	139.6	12.47	133.3	15.29	127.0	18.08	125.7	18.69	115.9	23.06	113.7	24.03
8"	8.625"	219.08	181.7	16.23	173.5	19.91	165.3	23.55	163.6	24.33	150.8	30.02	148.0	31.29
10"	10.750"	273.05	226.5	20.22	216.3	24.82	206.1	29.36	203.9	30.33	188.0	37.41	184.5	39.01
12"	12.750"	323.85	268.7	23.98	256.5	29.44	244.4	34.82	241.8	35.99	223.0	44.37	218.8	46.25
14"	14.000"	355.60	295.0	26.34	281.6	32.33	268.3	38.23	265.5	39.52	244.9	48.72	240.2	50.80
16"	16.000"	406.40	337.2	30.10	321.8	36.96	306.7	43.69	303.4	45.16	279.8	55.68	274.5	58.06
18"	18.000"	457.20	379.3	33.86	362.1	41.55	345.1	49.15	341.4	50.80	314.8	62.64	308.8	65.30
20"	20.000"	508.00	421.4	37.62	402.3	46.18	383.3	54.64	379.3	56.44	349.8	69.60	343.2	72.57
22"	22.000"	558.80	463.5	41.40	442.5	50.80	421.7	60.10	417.2	62.08	384.8	76.56	377.5	79.83
24"	24.000"	609.60	505.7	45.16	482.7	55.42	460.0	65.56	455.1	67.74	419.8	83.52	411.8	87.10
26"	26.000"	660.40	547.8	48.92	522.9	60.05	498.4	71.02	-	-	-	-	-	-
28"	28.000"	711.20	590.0	52.68	563.2	64.64	536.7	76.48	-	-	-	-	-	-
30"	30.000"	762.00	632.1	56.44	603.4	69.27	575.0	81.94	-	-	-	-	-	-
32"	32.000"	812.80	674.3	60.20	643.6	73.89	-	-	-	-	-	-	-	-
34"	34.000"	863.60	716.4	63.98	683.9	78.51	-	-	-	-	-	-	-	-
36"	36.000"	914.40	758.5	67.74	724.1	83.13	-	-	-	-	-	-	-	-

Nota: Recuperado de ASTM-f714.