

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA HIDRÁULICA



**“MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE DOSIFICACIÓN DE
SUPRESOR DE POLVO CON EL USO DE INYECTOR VENTURI
DE FORMA AUTOMATIZADA EN MINERÍA”**

TESIS

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
HIDRÁULICO**

AUTOR:

Bach. FRANKLIN EDGARDO QUISPE SANGAY

ASESOR:

Dr. Ing. LUIS VÁSQUEZ RAMÍREZ

CAJAMARCA - PERÚ

2022

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de tesis a Dios y mi familia, un especial sentimiento de gratitud a mis amados padres, Alejandro y Zoila, cuyas palabras de aliento, empuje y tenacidad resuenan siempre en mis oídos. A mis hermanos Roberto, Hernán y Maribel quienes nunca se han separado de mi lado y son muy especiales.

AGRADECIMIENTO

Innumerables personas apoyaron mi esfuerzo con la implementación de este proyecto en el sector minero, brindándome comentarios invaluable para desarrollar la presente tesis, así como el soporte con la experiencia durante el proceso constructivo. Agradecer al ingeniero Alejandro y todo el personal que labora conmigo puesto que las observaciones e ideas hicieron de este proyecto sea exitoso. Así mismo quiero agradecer especialmente al ingeniero Luis Vásquez Ramírez, como mi asesor de tesis y el apoyo incondicional en el plan de investigación.

Por último, mi familia merece una gratitud infinita: mi padre por enseñarme la perseverancia, mi madre por enseñarme a la pasión por las matemáticas y a mis hermanos por apoyarme en todos mis proyectos. A mi familia le doy todo, incluso esto.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTO	iii
ÍNDICE.....	iv
LISTA DE TABLAS	vii
LISTA DE GRÁFICOS	ix
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE ECUACIONES	xiii
RESUMEN	xv
ABSTRACT.....	xvi
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	2
1.4. ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.5. LIMITACIONES	3
1.6. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
OBJETIVO GENERAL.....	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.7. HIPÓTESIS.....	4
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN	5
2.1.1. Métodos de inyección para dosificación	5
2.1.2. Instalación típica de abastecimiento de agua para riego en vías.....	16
A) Almacenamiento	16
a) Conceptos previos	16
b) Diseño y construcción.....	19
B) Conducción	20
• Tuberías HDPE y accesorios HDPE:	20
• Tubería acero inoxidable (INOX):	27

C)	Distribución.....	30
D)	Aplicación	31
•	Supresores de polvo	31
•	Tipos de supresores de polvo:	31
•	Supresores de polvo empleados en minería	33
•	Parámetros técnicos para su aplicación	34
2.1.3.	Recursos de una empresa	35
a)	Recursos Humanos	35
b)	Recursos financieros	35
c)	Recursos materiales.....	35
d)	Recursos informáticos	35
e)	Recursos intangibles.....	36
2.1.4.	Riesgos de mezclas en pozas.....	36
a)	Riesgo caída a fuentes de agua.....	36
b)	Riesgos con izajes	37
c)	Riesgos manipulación de productos químicos	38
2.2.	BASES TEÓRICAS	39
2.2.1.	Presiones, velocidades y pérdidas de carga en Venturi.....	39
A)	Sin inyección.....	39
B)	Con inyección:	42
2.2.2.	Diseño de inyector:	47
A)	Tipos de Venturi clásicos de acuerdo a Norma ISO 5167.	48
B)	Medidas geométricas.....	48
C)	Materiales y fabricación.....	49
D)	Pérdidas de carga.....	50
CAPITULO III. MATERIALES Y MÉTODOS		51
3.1.	Obtención de información clave de campo	51
3.2.	Cálculo de flujo en línea de conducción por gravedad	58
3.3.	Validación de datos de los tomados en campo (línea de conducción)	67
3.3.1.	Simulación por EPANET	67
3.3.2.	Toma de datos en tubería de conducción	67
3.3.3.	Comparación de resultados EPANET y datos de campo.	68
3.4.	Diseño de inyector Venturi.	68
3.5.	Elaboración de planos.	84

3.6.	Fabricación de Inyector Venturi.....	87
3.7.	Instalación de Inyector Venturi.....	89
3.8.	Instalación de manifold de contenedores de aditivo supresor de polvo.....	90
3.9.	Dosificación de supresor en inyector Venturi.....	93
CAPITULO IV. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....		97
4.	Mezcla en poza.....	97
4.1.	Capacidad de ingreso de agua a poza de abastecimiento:.....	97
4.2.	Capacidad de descarga hacia estación de abastecimiento.....	98
4.3.	Capacidad de almacenamiento.....	98
4.4.	Ratio de llenado y consumo de agua.....	98
4.5.	Frecuencia y tiempo de riego.....	98
4.6.	Resultados de mezcla en poza.....	102
5.	Mezcla con uso de inyector de Venturi.....	103
5.1.	Presión en succión de inyector.....	103
5.2.	Calibración de cantidad de supresor de polvo.....	104
5.3.	Proceso de funcionamiento.....	106
6.	Comparación de resultados durante proceso de llenado cisterna.....	108
6.1.	Identificación de recursos necesarios.....	110
CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		113
5.1.	Conclusiones.....	113
5.2.	Recomendaciones.....	114
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		115
ANEXOS.....		118
PLANOS.....		119
FIGURAS.....		120
TABLAS.....		121

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Espesores y especificaciones de resistencia de geomembrana HDPE	18
Tabla 2. <i>Valores de coeficiente para pérdidas locales</i>	22
Tabla 3. <i>Coeficiente para pérdidas locales considerando longitud equivalente</i>	23
Tabla 4. <i>Medidas de Flange Adapter</i>	25
Tabla 5. <i>Especificación estándar para la tubería (SDR-PR) de polietileno (PE) basada en el diámetro exterior. Norma ASTM F714</i>	26
Tabla 6. <i>Especificaciones tubería acero inoxidable. Norma ASTM A312</i>	28
Tabla 7. <i>Coeficiente de pérdidas menores en accesorios.</i>	29
Tabla 8. <i>Composición y propiedades físicas y químicas del producto DL10 Plus</i>	33
Tabla 9. <i>Dosis de aplicación supresor de polvo</i>	34
Tabla 10. <i>Propiedades del agua unidades del SI</i>	35
Tabla 11. <i>Coeficiente de pérdida para contracción local</i>	40
Tabla 12. <i>Relaciones de diámetros para fabricación de Venturi Clásicos</i>	48
Tabla 13. <i>Cotas de puntos topográficos para cálculo en EPANET</i>	61
Tabla 14. <i>Cuadro longitudes, rugosidad, materiales por tramos</i>	62
Tabla 15. <i>Cálculo de pérdidas locales por longitud equivalente de línea</i>	63
Tabla 16. <i>Dimensiones de las tuberías (diámetro externo e interno)</i>	64
Tabla 17. <i>Diámetros de tuberías HDPE e INOX.</i>	64
Tabla 18. <i>Coeficientes de pérdidas locales en la yee de INOX.</i>	65
Tabla 19. <i>Diámetros para tuberías de INOX.</i>	72
Tabla 20. <i>Viscosidad cinemática.</i>	73
Tabla 21. <i>Ángulos de relaciones geométricas.</i>	73
Tabla 22. <i>Cálculo de caudal en función de la presión en línea de abastecimiento EPANET</i>	75
Tabla 23. <i>Cálculo de pérdidas y presiones de sistema Venturi.</i>	75
Tabla 24. <i>Cálculo de pérdidas y presiones en garganta y difusor.</i>	76
Tabla 25. <i>Cálculo de caudal en función de la presión en línea de abastecimiento EPANET</i>	78
Tabla 26. <i>Cálculo de pérdidas y presiones de sistema Venturi.</i>	78
Tabla 27. <i>Cálculo de pérdidas y presiones en garganta y difusor.</i>	79
Tabla 28. <i>Relaciones de diámetros para diseño de Venturi.</i>	80
Tabla 29. <i>Coeficiente de pérdidas para la línea de succión.</i>	83
Tabla 30. <i>Diámetros de succión para inyector y sus pérdidas.</i>	84

Tabla 31. <i>Cálculo de presiones con poza a 100% de volumen.</i>	93
Tabla 32. <i>Cálculo de presiones con poza a 1% de volumen.</i>	94
Tabla 33. <i>Tabla de cálculo de volumen interno útil en manifold y tubería conducción</i>	95
Tabla 34. <i>Frecuencia de riego de vías.</i>	98
Tabla 35. <i>Frecuencia de riegos por día para año representativo.</i>	99
Tabla 36. <i>Agrupación con frecuencia de riegos por día para año representativo.</i>	100
Tabla 37. <i>Frecuencia relativa acumulada por meses.</i>	100
Tabla 38. <i>Frecuencia relativa acumulada por meses.</i>	101
Tabla 39. <i>Tabla comparativa de métodos de mezcla.</i>	110
Tabla 40. <i>Comparación reducción de recursos principales empleados para cada alternativa</i>	112
Tabla 41. <i>Modelo numérico de riego para mes de mayo.</i>	122
Tabla 42. <i>Modelo numérico de riego para mes de junio.</i>	123
Tabla 43. <i>Modelo numérico de riego para mes de julio.</i>	124
Tabla 44. <i>Modelo numérico de riego para mes de agosto.</i>	125
Tabla 45. <i>Modelo numérico de riego para mes de setiembre.</i>	126
Tabla 46. <i>Modelo numérico de riego para mes de octubre.</i>	127

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Evolución de pérdida de carga en función de la velocidad de ingreso y diferentes relaciones de diámetros para tuberías INOX con diámetros comerciales.....	74
Gráfico 2: Evolución de pérdida de carga en función del caudal de ingreso y diferentes relaciones de diámetros para tuberías INOX con diámetros comerciales	74
Gráfico 3: <i>Evolución de presiones en garganta y salida de Venturi para diámetro 4”.</i>	77
Gráfico 4: <i>Evolución de presiones en garganta y salida de Venturi para diámetro 6”.</i>	79
Gráfico 5: <i>Gráfico de pérdidas de carga para inyector Venturi instalado.</i>	104

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: <i>Corte interno de DOSATRON</i>	5
Figura 2: <i>Cuadro de características modelos proporcionados por DOSATRON</i>	6
Figura 3: <i>Esquema de instalación de un inyector tipo Dosatrón</i>	6
Figura 4: <i>Esquema de instalación inyección con bomba auxiliar</i>	7
Figura 5: <i>Instalación sistema de tanque a presión</i>	8
Figura 6: <i>Instalación bomba succión negativa</i>	8
Figura 7: <i>Diseño típico de inyector Venturi</i>	9
Figura 8: <i>Inyector montado en línea</i>	10
Figura 9: <i>Inyector montado en by-pass</i>	10
Figura 10: <i>Inyector Venturi con válvula reductora de presión</i>	10
Figura 11: <i>Esquema proceso de soldado por gas</i>	13
Figura 12: <i>Diagrama esquemático del equipo MIG</i>	13
Figura 13: <i>Esquema proceso de soldado MMAW</i>	14
Figura 14: <i>Esquema proceso de soldado MIG (Indura, pag. 82)</i>	14
Figura 15: <i>Diagrama esquemático del equipo MIG</i>	14
Figura 16: <i>Esquema proceso de soldado TIG</i>	15
Figura 17: <i>Tipos de unión, soldadura y bisel</i>	15
Figura 18: <i>Diseño típico de abastecimiento de agua para riego de vías</i>	17
Figura 19: <i>Longitud de traslape soldadura geomembrana</i>	19
Figura 20: <i>Detalle típico de zanjas de anclaje en pozas</i>	20

Figura 21:	<i>Comparación de tuberías expuesta y enterrada deflexión por material ...</i>	24
Figura 22:	<i>Diagrama conceptual de medidas para verificación de SDR.....</i>	24
Figura 23:	<i>Medidas de flange adapter.....</i>	25
Figura 24:	<i>Fotografía de estación de llenado de camiones gigantes.</i>	30
Figura 25:	<i>Fotografía de riego de vías de acarreo</i>	31
Figura 26:	<i>La posición H.E.L.P. reduce el efecto de la hipotermia</i>	37
Figura 27:	<i>Ejemplos de factores de riesgo – riesgos químicos en el lugar de trabajo.</i>	38
Figura 28:	<i>Sección de tobera Venturi.....</i>	39
Figura 29:	<i>Valores de $k't$ en función de $\alpha 1$ y $Lt/D2$</i>	40
Figura 30:	<i>Gráfico de contracción gradual.....</i>	40
Figura 31:	<i>Inyector Venturi con ingreso en sección estrangulada.....</i>	42
Figura 32:	<i>Sección de garganta con ingreso de caudal de manera rectilínea.</i>	42
Figura 33:	<i>Sección de ingreso de caudal inyectado.</i>	43
Figura 34:	<i>Función de cálculo para coeficiente de resistencia en la reunión de corrientes.</i>	45
Figura 35:	<i>Función de cálculo para coeficiente de resistencia en la reunión de corrientes.</i>	46
Figura 36:	<i>Coficiente de pérdidas para contracción súbita.</i>	46
Figura 37:	<i>Coficiente de pérdidas para expansión súbita.</i>	47
Figura 38:	<i>Perfil de medidas Venturi clásico.</i>	49
Figura 39:	<i>Pérdida de carga a través de un tubo Venturi clásico.....</i>	50
Figura 40:	<i>Fotografía de drone DJI Matrice 300 rtk</i>	51
Figura 41:	<i>Vuelo realizado en la zona, inicio de vuelo, en proceso de vuelo</i>	52
Figura 42:	<i>Captura de simulación de vuelo en PIX4D.....</i>	52
Figura 43:	<i>Archivo con fotografías tomadas por drone.</i>	53
Figura 44:	<i>Ortofoto de proyecto para realizar el perfil topográfico.....</i>	53
Figura 45:	<i>Croquis con alineamiento de tubería de conducción, ver croquis A1.</i>	54
Figura 46:	<i>Perfil de terreno y tubería hasta punto de abastecimiento, ver croquis A1.</i>	54
Figura 47:	<i>Imagen de un diseño típico de yee de 10 pulgadas SCH20</i>	55
Figura 48:	<i>Imagen de un diseño típico de yee de 10 pulgadas SCH20</i>	56
Figura 49:	<i>Fotografía de yee de acero inoxidable instalado en línea de conducción. ...</i>	56
Figura 50:	<i>Vista lateral y frontal de diseño típico de punto de abastecimiento de agua “Garza”</i>	57

Figura 51: Cisterna de riego de vías en el punto de abastecimiento de agua.	58
Figura 52: Opciones de cálculo hidráulico de programa EPANET	58
Figura 53: Gráfico conceptual de alineamiento de tubería en software EPANET	59
Figura 54: Captura de ventana EPANET – datos para embalse 1 (Poza de almacenamiento).....	60
Figura 55: Poza de almacenamiento de agua con salida en parte baja de poza.....	60
Figura 56: Ventana EPANET para introducción de cotas de nodos.	61
Figura 57: <i>Tubería N°3 de HDPE, longitud (m), Diámetro (mm), Rugosidad (mm) y coeficiente de pérdidas (K constante).</i>	65
Figura 58: <i>Tubería N°8 de INOX Yee, longitud (m), Diámetro (mm), Rugosidad (mm) y coeficiente de pérdidas (K constante).</i>	65
Figura 59: <i>Cálculos proporcionados por EPANET línea de conducción Poza- “Garza”</i>	66
Figura 60: <i>Fotografía de medición de caudal y presión en el punto de control n° 12.</i> ..	67
Figura 61: <i>Fotografía de zona inaccesible para ubicación de inyector</i>	69
Figura 62: <i>Fotografía de vista frontal de tubería de conducción.</i>	69
Figura 63: <i>Detalle de medidas de inyector Venturi sección convergente (tobera)</i>	70
Figura 64: <i>Detalle de medidas de inyector Venturi en cuello.</i>	71
Figura 65: <i>Detalle de medidas de inyector Venturi en sección divergente.</i>	71
Figura 66: <i>Áreas posibles para instalación de contenedores de supresor de polvo.</i>	81
Figura 67: <i>Canal de drenaje y cruce de tuberías en plataforma media de garza.</i>	81
Figura 68: <i>Vista frontal de diseño conceptual Venturi</i>	82
Figura 69: <i>Medidas de diseño Venturi para aplicación de supresor polvo, no considera tubería de ingreso de supresor.</i>	82
Figura 70: <i>Plano con medidas básicas de diseño Venturi.</i>	82
Figura 71: <i>Plano isométrico de Venturi tipo chapa.</i>	85
Figura 72: <i>Plano detalle de cortes y construcción para tobera.</i>	85
Figura 73: <i>Plano detalle de cortes y construcción para difusor</i>	86
Figura 74: <i>Plano detalle de cortes y construcción de garganta y entrada de succión</i> .	86
Figura 75: <i>Plano detalle de cortes y construcción de garganta y entrada de succión</i> .	87
Figura 76: <i>Sección de tobera soldada.</i>	87
Figura 77: <i>Venturi de chapa en acero inoxidable de 10 pulgadas con garganta de 6 pulgadas</i>	88
Figura 78: <i>Venturi de chapa de 10 pulgadas con nipples para medición de presión</i>	88

Figura 79: <i>Trabajos preliminares para instalación de Venturi.....</i>	89
Figura 80: <i>Venturi de chapa instalado con el ingreso de tubería de supresor de polvo</i>	89
Figura 81: <i>Soldadura en campo para implementación de más puntos de medición</i>	90
Figura 82: <i>Puntos de medición de presiones en línea aguas arriba y aguas debajo de Venturi</i>	90
Figura 83: <i>Isométrico de diseño conceptual manifold</i>	91
Figura 84: <i>Vista en planta y frontal de manifold.....</i>	91
Figura 85: <i>Proceso de fabricación de manifold</i>	92
Figura 86: <i>Instalación de contenedores a manifold</i>	93
Figura 87: <i>Aireador 4 pulgadas y visor de nivel con el uso de manguera transparente.</i>	94
Figura 88: <i>Ángulo de apertura de válvula tipo globo, calibrado para dosificación.....</i>	95
Figura 89: <i>Abastecimiento de camión cisterna con supresor de polvo</i>	96
Figura 90: <i>Vista de mezcla de supresor de polvo en camión cisterna.....</i>	96
Figura 91: <i>Curva de bombeo de electrobomba Flygt y punto de operación de bomba</i>	97
Figura 92: <i>Fotografía de mezcla en recipiente solo por ingreso de agua sin ningún tipo de agitador</i>	102
Figura 93: <i>Instalación de manómetros de acuerdo a norma ISO</i>	103
Figura 94: <i>Líneas de corriente de inyector Venturi.....</i>	104
Figura 95: <i>Visor de nivel de supresor de polvo de ¼”</i>	105
Figura 96: <i>Válvula calibrada con tope para evitar mayores salidas de supresor de polvo.</i>	106
Figura 97: <i>Proceso de llenado de cisterna con la dosificación de acuerdo a fabricante.</i>	106
Figura 98: <i>Ingreso de agua a cisterna.....</i>	107
Figura 99: <i>Vista de llenado de cisterna.</i>	107
Figura 100: <i>Rebose de cisterna y salida de espuma producido por la turbulencia. ..</i>	107
Figura 101: <i>Proceso de cierre de válvula culminado el llenado.....</i>	108
Figura 102: <i>Riego de vía de acarreo con cisterna gigante</i>	108
Figura 103: <i>Llenado con supresor de polvo aplicado en poza de almacenamiento ..</i>	109
Figura 104: <i>Llenado con supresor de polvo aplicado en inyector de Venturi.</i>	109
Figura 105: <i>Comparación de mezcla en poza versus inyector Venturi</i>	110

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1: Fórmula Hazen y William	21
Ecuación 2: Fórmula Darcy - Weisbach	21
Ecuación 3: Fórmula de Colebroo – White	21
Ecuación 4: Fórmula de Reynolds	21
Ecuación 5: Fórmula de pérdidas locales	22
Ecuación 6: Fórmula de longitud equivalente	22
Ecuación 7: Fórmula de SDR	24
Ecuación 8: Ecuación de Bernoulli – Tobera Venturi	39
Ecuación 9: Pérdida en la tobera de Venturi	39
Ecuación 10: Coeficiente de pérdidas localizadas en la tobera	39
Ecuación 11: Coeficiente de pérdidas continuas en la tobera.....	41
Ecuación 12: Ecuación de pérdidas en garganta de Venturi.....	41
Ecuación 13: Ecuación de pérdidas difusor	41
Ecuación 14: Ecuación de pérdidas totales en Venturi sin inyección	41
Ecuación 15: Presión de salida en difusor de Venturi sin inyección.....	41
Ecuación 16: Caudal total, incluye caudal de inyección	42
Ecuación 17: Pérdidas por reunión de corrientes	43
Ecuación 18: Coeficiente de reunión de corrientes con ingreso recto.....	43
Ecuación 19: Pérdidas en garganta incluye caudal inyectado	43
Ecuación 20: Ecuación de energía entre superficie solución y garganta Venturi.....	43
Ecuación 21: Ecuación de pérdidas en el tubo de aspiración	44
Ecuación 22: Ecuación de pérdidas de entrada al conducto de inyección.....	44
Ecuación 23: Ecuación de pérdidas en la unión con la garganta.....	44
Ecuación 24: Ecuación de coeficiente de pérdidas en la unión con la garganta.....	44
Ecuación 25: Ecuación de coeficiente de pérdidas en tobera.	45
Ecuación 26: Ecuación de coeficiente de pérdidas en difusor.....	45
Ecuación 27: Coeficiente de pérdidas locales por contracción súbita.	47
Ecuación 28: Coeficiente de pérdidas locales por contracción súbita.	47
Ecuación 29: Rugosidad de sección cónica de Venturi fabricado por chapas.....	49

Significado de palabras clave

Venturi, un tubo corto con un estrangulamiento en el medio que provoca un aumento en la velocidad de flujo de un fluido y una disminución correspondiente en la presión del fluido y que se usa especialmente para medir el flujo de fluido o para crear una succión.

Inyector Venturi, dispositivo hidráulico que utiliza el efecto Venturi para inyectar una pequeña cantidad de un fluido en el flujo de otro fluido.

Riego de vías, proceso de aplicación de agua u otros compuestos para mitigar la generación de polvo.

Dosificación, acto de determinar la proporción o cantidad de algo.

Supresor de polvo, producto cuya finalidad es la de disminuir o eliminar el polvo en suspensión producto del tránsito de vehículos

Estación de abastecimiento, estructura permanente que se utiliza para dispensar agua en un camión cisterna u otro recipiente de agua portátil.

Vías de acarreo, son caminos temporales provistos dentro del área del sitio de un contratista para permitir el movimiento de materiales de construcción, maquinaria de construcción y/o mano de obra de construcción alrededor del sitio.

Minería, se define como un agujero muy grande hecho en el suelo para sacar rocas, carbón, oro, plata, entre otros minerales.

Pozas, un área llena de cuerpos de agua dulce o salada. Pueden ser revestidas o en terreno natural.

Polietileno de alta densidad, (HDPE) un tipo de plástico comúnmente producido hecho de etileno y que tiene una densidad relativamente alta, usado principalmente para botellas de plástico, tuberías y reemplazo de madera.

Acero inoxidable, aleación de hierro que es resistente a la oxidación. Contiene al menos un 11 % de cromo y puede contener elementos como el carbono, otros no metales y metales para obtener otras propiedades deseadas.

RESUMEN

En la agricultura existen diversos procesos de dosificación de fertilizantes, así como el uso de dispositivos hidráulicos como el inyector Venturi, sin embargo no existen referencias de inyectores Venturi implementados en dosificación de supresores de polvo en minería con tuberías de grandes dimensiones, el propósito de esta investigación fue la de realizar el mejoramiento del proceso de dosificación de supresor de polvo haciendo uso de inyector Venturi de forma automatizada. Dicha implementación mejoró las condiciones de seguridad de las personas para su operación pues la dosificación se realizaba directamente en la poza de manera no adecuada, así mismo se eliminó la opción de implantación de sistema de bombeo adicional para la dosificación del supresor de polvo. El inyector de Venturi implementado aprovecha la energía hidráulica de la línea de conducción, el cual es por gravedad desde la fuente de almacenamiento hasta la estación de abastecimiento de camiones gigantes de veinte mil galones. Como resultado de esta implementación se pudo lograr la dosificación adecuada para el riego de vías de acarreo, sólo con el uso de válvula de operación. Se pudo demostrar que haciendo uso de dispositivos hidráulicos empleados en otros ámbitos como la agricultura también pueden ser implementados en minería, obteniendo un correcto proceso de dosificación de supresor de polvo y así mismo eliminando riesgos que conlleva otros procesos de mezcla.

Palabras clave: Venturi, inyector Venturi, riego de vías, dosificación, supresor de polvo, estación de abastecimiento, vías de acarreo, minería, pozas, polietileno de alta densidad, acero inoxidable.

ABSTRACT

In agriculture there are various fertilizer dosing processes, as well as the use of hydraulic devices such as the Venturi injector, however there are no references to Venturi injectors implemented in the dosing of dust suppressants in mining with large pipes, the purpose of which is investigation was to carry out the improvement of the dust suppressant dosing process using the Venturi injector in an automated way. Said implementation improved the safety conditions of the people for its operation since the dosage was carried out directly in the well in an inappropriate manner, likewise the option of implanting an additional pumping system for the dosage of the dust suppressor was eliminated. The Venturi injector takes advantage of the hydraulic energy of the driving line, which is by gravity from the storage source to the supply station for giant twenty thousand gallon trucks. As a result of this implementation, it was possible to achieve the adequate dosage for the irrigation of haulage roads, only with the use of an operating valve. It was possible to demonstrate that using hydraulic devices used in other environments such as agriculture, they can also be implemented in mining, obtaining a correct dust suppressant dosing process and also eliminating the risks involved in other mixing processes.

Key words: Venturi, Venturi injector, road irrigation, dosing, dust suppressor, water truck filling station, haul roads, mining, pond, high-density polyethylene, stainless steel.

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

En la presente tesis se desarrolló el diseño y la implementación de un inyector Venturi para el riego de vías en una unidad minera a tajo abierto. Durante época seca en los meses de mayo a setiembre se tiene poca o escasa presencia de lluvias, debido a ello se genera polvo por el tránsito de flota gigante en vías de acarreo. El control de polvo se realiza a través del riego con cañones pulverizadores de agua ubicados en camiones cisterna de gran capacidad. Debido a distancias largas de recorrido y tener pocas unidades para cubrir dichas áreas, es que se cuenta con pozas para abastecimiento de agua con el uso de sistemas de abastecimiento, el cual llamaremos “Garzas”, para el llenado correspondiente por gravedad. Adicional a ello se usan supresores de polvo para mejorar la calidad del riego.

El supresor de polvo es una resina polimérica cuya función principal es la de humectación de la superficie del suelo para evitar la generación de partículas de polvo. La ventaja del supresor de polvo es la de ahorro de consumo de agua, no genera superficies deslizantes que pondrían en riesgo la correcta conducción de los equipos de acarreo, en el mercado se pueden encontrar supresores de polvo biodegradables por lo que no tiene mayores impactos medioambientales. Sin embargo no se tienen referencias de dosificadores en minería como las empleadas en la agricultura el cual garantice la correcta dosificación en los camiones cisterna y que no requieran de energía eléctrica (sistema de bombeo) y muchas veces las realizan de forma manual en la poza. Por ello se plantea el desarrollo de un inyector Venturi para garantizar el correcto proceso de mezcla en cantidad y calidad de dosificación.

Con la finalidad de aportar los criterios técnicos para promover el uso del inyector Venturi no solo en la agricultura sino también en la minería resolviendo el problema de la dosificación de supresores de polvo que a su vez se traduce en menor frecuencia de riego, ahorro de consumo de agua, menor cantidad de recursos para mitigar impactos por presencia de polvo en vías de acarreo en minería.

La presente tesis se desarrolla de la siguiente manera: Capítulo I se plantea el problema, la justificación, alcances, limitaciones, antecedentes y objetivos de la investigación realizada. Capítulo II se presenta marco teórico el cual son las bases para el desarrollo de este trabajo, en el capítulo III se presenta los materiales y métodos que se

aplican donde se muestra el procedimiento de la investigación así mismo se describe el proceso seguido para la construcción, implementación y experimentación del inyector Venturi. En el capítulo IV se presenta el análisis y discusión de resultados de la implementación. Finalmente en el capítulo V se presenta las conclusiones y recomendaciones de la implementación realizada en campo y finalmente las referencias bibliográficas y anexos.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

No existe referencia de implementación de inyectores Venturi en la dosificación de supresores de polvo en minería donde se aproveche el funcionamiento particular del inyector para poder realizar la mezcla del mismo dentro de la tubería, donde se use la mínima cantidad de personal para su operación y se mejore en la confiabilidad de mezcla.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿De qué manera la implementación de inyector Venturi mejora el proceso de dosificación de supresor de polvo realizada en poza en la industria minera?

1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El riego de vías de acarreo en minería es fundamental debido a que se mitiga el impacto medio ambiental que se produce debido al tránsito de camiones el cual es una de las fuentes generadoras de polvo, tener una adecuada dosificación de supresores de polvo es de vital importancia. Actualmente el inyector Venturi se usa para dosificación de fertilizantes en el riego de cultivos sin embargo aún no se tiene implementaciones de inyectores Venturi en el riego de vías con el uso de supresores de polvo en minería, por ello la presente tesis pretende realizar el diseño e implementación del sistema robusto y efectivo para una correcta dosificación realizada de manera segura y de calidad garantizando de esta manera el riego adecuado de las vías de acarreo. Reduciendo la mano de obra empleada para su dosificación, reducción de uso de equipos y tiempo.

1.4. ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN

Implementación de inyector Venturi fabricado en acero inoxidable 304 de acuerdo a diseño para facilitar el ingreso de supresor de polvo el cual permite la correcta dosificación y mezcla para abastecer a cisternas de grandes dimensiones en minería, empleadas en el riego de vías de acarreo. Inyector Venturi no usa energía eléctrica para durante el proceso de dosificación, se puede usar cualquier tipo de supresor puesto que el Venturi se calibra de acuerdo a dosificación proporcionada por fabricante de supresor de polvo, la implementación de inyector Venturi se realizó en una línea de Polietileno de Alta Densidad (HDPE por sus siglas en inglés) de diez pulgadas de diámetro con SDR11 (Standar Dimension Ratio, relación de diámetro sobre espesor) instalada para conectar la poza de almacenamiento con la estación de carga de agua. Conducción de agua por gravedad desde poza de almacenamiento.

1.5. LIMITACIONES

No se realizó seguimiento de efectividad del supresor de polvo puesto que se cumple con las condiciones mínimas de dosificación de fabricante. La fuente de abastecimiento de la estación de carga es una poza de almacenamiento cuyo funcionamiento es por gravedad sin embargo el sistema Venturi funciona con diferencia de presiones por lo que funciona también con sistema de bombeo, para esta investigación el diámetro de tubería a la salida es de diez pulgadas hasta el punto de estación de carga, sin embargo aplica para cualquier diámetro.

1.6. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

OBJETIVO GENERAL

- Determinar las mejoras obtenidas con la implementación de un inyector Venturi para el proceso de dosificación de supresor de polvo en minería

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la reducción de cantidad de mano de obra empleada con la implementación de uso de inyector Venturi en comparación con la mezcla en poza.
- Determinar la reducción de cantidad de equipos empleada con la implementación de uso de inyector Venturi en comparación con la mezcla en poza.

1.7. HIPÓTESIS

El uso del inyector Venturi reduce en más del 50% la mano de obra y equipos empleados para la dosificación de supresor de polvo en comparación con mezcla en poza, puesto que la mezcla se realiza dentro de la tubería con mano de obra reducida en su operación.

CAPITULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. Métodos de inyección para dosificación

De acuerdo a lo indicado por Martínez, 1998. Se tienen cuatro métodos de inyección los cuales son:

- Uso de presión de agua en la red de cañerías (Venturi, Dosatrón).
- Uso de bombas auxiliares
- Uso de estanques herméticos a presión
- Uso de bombeo con succión positiva.

A) Dosatrón

Dispositivo de inyección llamado así debido a la marca comercial "Dosatrón" cuyo funcionamiento es a través de un pistón mecánico que se acciona mediante la fuerza del agua, y no requiere de energía eléctrica para su funcionamiento. (Martínez, 1998).

DOSATRON funciona sin electricidad, solo emplea el uso de presión de agua, aspirando la sustancias desde un recipiente, este dispositivo tiene un control para dosificar el porcentaje que se desea, esta mezcla se realiza en la cámara mezcladora, esta mezcla es enviada por la salida del dispositivo. La dosis de la sustancia es proporcional al volumen que pasa por el dispositivo, así exista una variación de caudal o presión. (Dosatron, 2016).

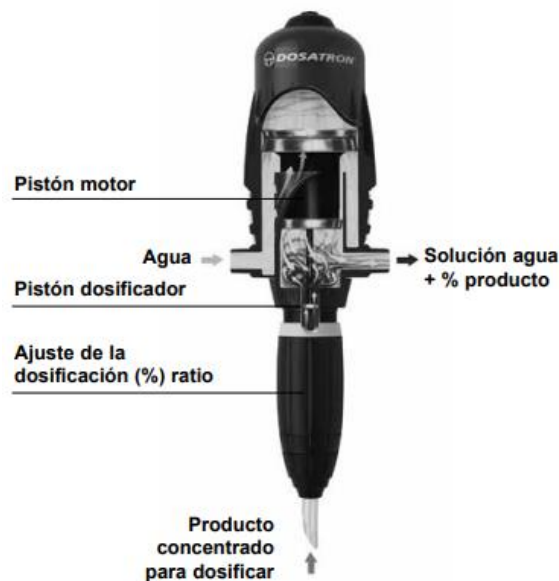


Figura 1: Corte interno de DOSATRON

(Fuente: Dosatron International, pag. 46)

CARACTERÍSTICAS			
	D14WL3000	D14WL3000IE	D14WL2
Caudal nominal de agua de funcionamiento: 10 l/h mini 3 m ³ /h maxi [1/3 US Pint/min - 14 US GPM].			
Temperatura máxima de funcionamiento:40 °C [104 °F]			
Presión de funcionamiento :			
bar	0.30 - 6	0.50 - 6	0.30 - 6
PSI	4.3 - 85	7.3 - 85	4.3 - 85
Dosificación ajustable exteriormente o fija :			
%	0.03 - 0.3	0.03 - 0.3	0.2 - 2
Ratio	1:3000 - 1:333	1:3000 - 1:333	1:500 - 1:50
Caudal de inyección del producto concentrado :			
Mini l/h - Maxi l/h	0.003 - 9	0.003 - 9	0.02 - 60
US Fl. oz/min - MINI	0.0017	0.0017	0.011
US GPM - MAXI	0.04	0.04	0.28
Conexión (NPT/BSP gas macho) :Ø 20x27 mm [3/4"].			
Cilindrada del motor hidráulico (cada dos pistonadas del pistón): environ 0.53 l [0.14 US Gallons]			

Figura 2: Cuadro de características modelos proporcionados por DOSATRON
(Fuente: Dosatron International, pag. 46)

Este dispositivo tiene como capacidad inyectar cantidades de soluciones muy precisas sin embargo solo se tienen tres modelos y para ello el proyectista tiene que seleccionar el modelo adecuado y la cantidad a instalar en serie para cubrir el requerimiento. Tiene que usarse filtros en el ingreso de la solución y el brazo secundario donde va ubicado el inyector (Martínez, 1998).

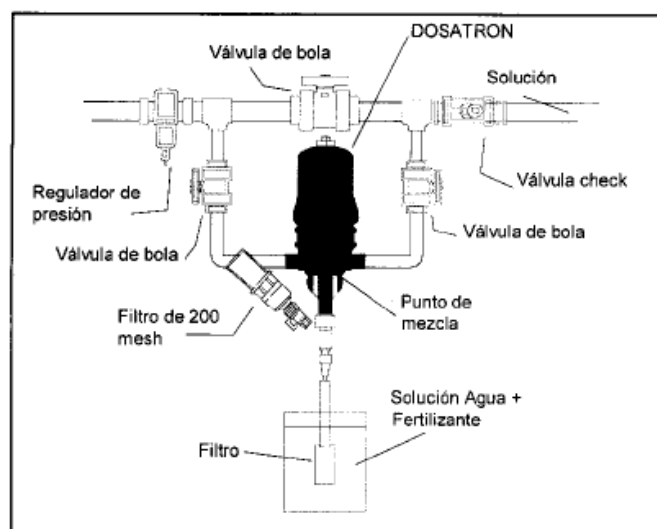


Figura 3: Esquema de instalación de un inyector tipo Dosatrón
(Fuente: Martínez, 1998, pag. 30)

B) Bombas inyectoras auxiliares

Método ampliamente utilizado en la fertiirrigación pues permite el control estricto de la dosificación (frecuencia y tiempo). Las bombas usadas tienen alta presión de trabajo y por lo general se puede encontrar de diferentes materiales y resistencias como acero, recubrimientos cerámicos, etc. (Martínez, 1998).

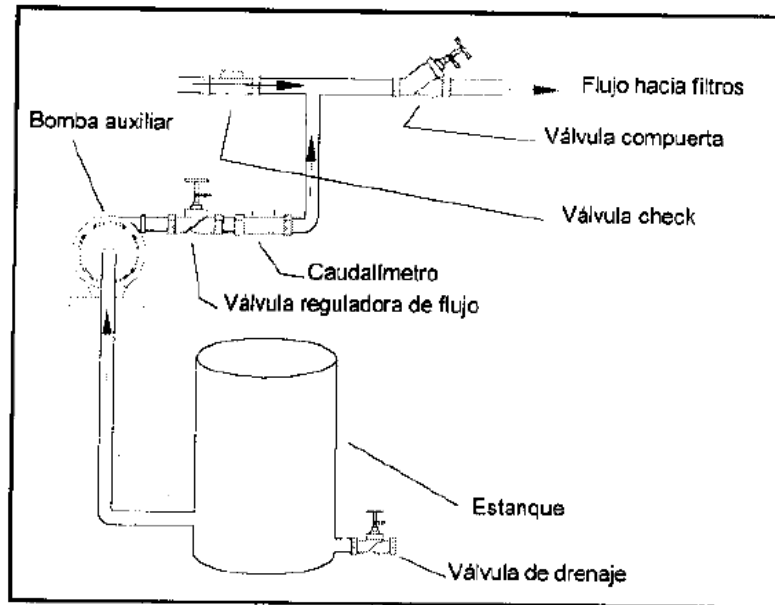


Figura 4: Esquema de instalación inyección con bomba auxiliar

(Fuente: Martínez, 1998, pag. 34)

C) Estanques presurizados

Consiste en derivar el agua hacia un tanque donde se tiene la sustancia previamente mezclada, dicho tanque se encuentra herméticamente cerrado, el ingreso de flujo de agua hacia el tanque produce la salida de la sustancia, disolviendo lentamente el componente produciendo una solución madre que se inyecta a la tubería matriz. Las principales ventajas es que no tiene partes móviles susceptibles al deterioro, sin embargo su operación es difícil debido al tiempo de duración para la aplicación pues está limitado al contenedor. (Martínez, 1998).

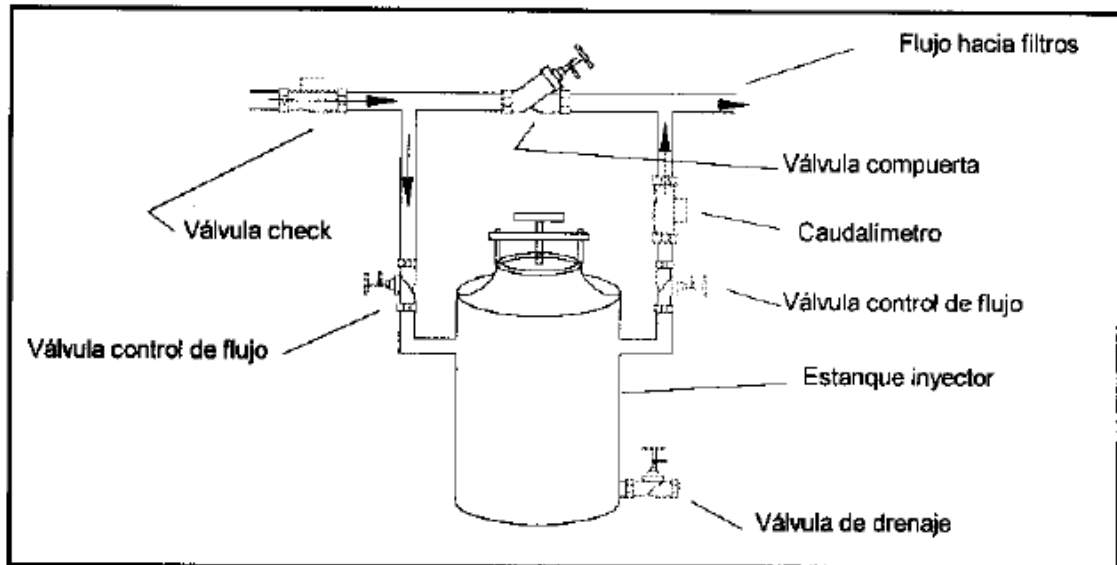


Figura 5: *Instalación sistema de tanque a presión*

(Fuente: Martínez, 1998, pag. 40)

D) Inyección por succión positiva

Consiste en conectar una línea adicional a la tubería de succión de una bomba, este tramo tiene una presión negativa el cual inyecta hacia dentro de la red la solución madre. Este método produce la corrosión prematura de todas las piezas metálicas e internas de la bomba debido a la concentración de las sustancias. (Martínez, 1998).

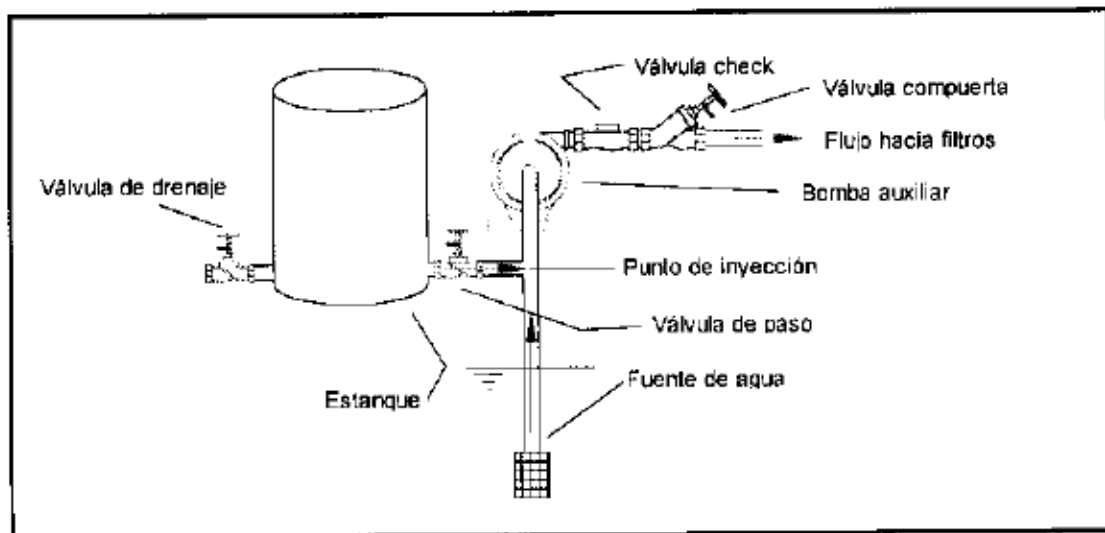
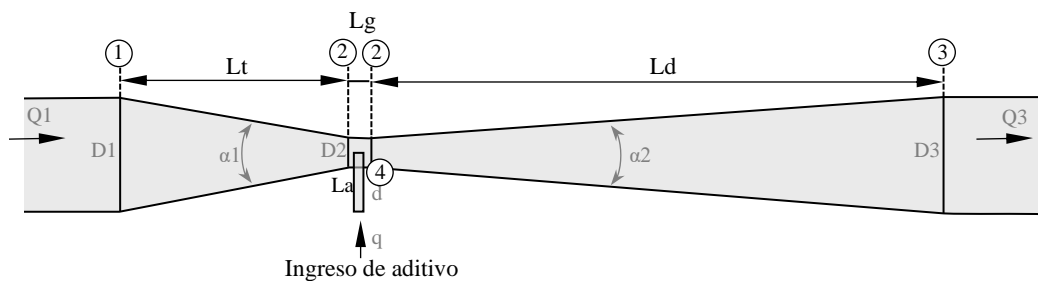


Figura 6: *Instalación bomba succión negativa.*

(Fuente: Martínez, 1998, pag. 44)

E) Inyector Venturi

Los inyectores Venturi se usan comúnmente para fines de fertirrigación en la agricultura, en los que extraen fertilizante de un tanque a la tubería principal de riego. El inyector Venturi asegura la cantidad de líquido inyectado por este dispositivo con ello se asegurar una adecuada dosificación y manejo de fertirrigación. El principio de funcionamiento del inyector Venturi se logra al reducir la sección media del dispositivo, llamada garganta (sección 2), logrando con ello un diferencial de presión entre el ingreso (sección 1) y la sección de salida (sección 3). La presión que se ejerce en la sección de ingreso (sección 1) se convierte en energía cinética al pasar a través de la garganta del inyector Venturi. La figura 07 nos muestra el corte transversal de un inyector tipo Venturi. (García, 2015, p.113).



*Q1: caudal de entrada
q: caudal inyectado
Q3: caudal de salida
D1: diámetro de tobera
Lt: longitud de tobera
Lg: longitud de garganta
La: longitud de aspiración
Ld: longitud de difusor
 $\alpha 1$: ángulo de la tobera
 $\alpha 2$: ángulo de difusor*

*Secciones:
1: entrada Venturi
2: garganta
3: salida Venturi
4: salida de aspiración*

Figura 7.: *Diseño típico de inyector Venturi*

(Fuente: García, 2015, p.113)

Clasificación

Un inyector Venturi de presión diferencial se clasificará de acuerdo con su instalación prevista según *Norma ISO 15873:2002*, de la siguiente manera:

- a) **Montado en línea**, con todo el flujo principal introducido como agua motriz en la entrada del inyector.

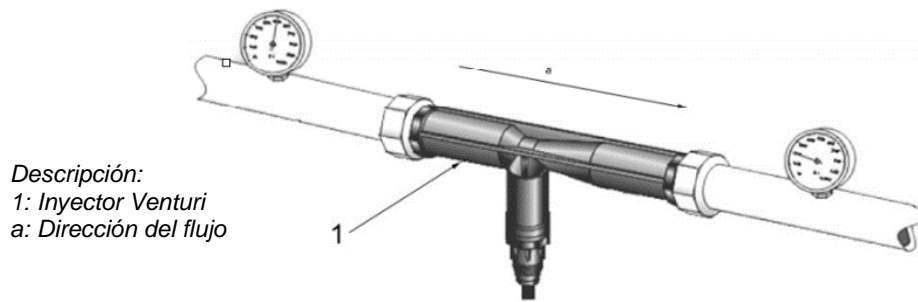


Figura 8: Inyector montado en línea

(Fuente: ISO, 2002)

- b) **Montado en un conjunto de derivación (by-pass)**, con solo una parte del flujo principal introducido como flujo de agua motriz a través la entrada del inyector.

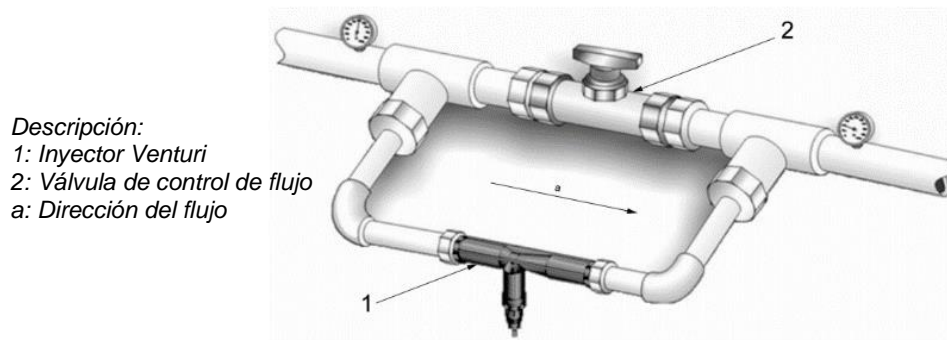


Figura 9: Inyector montado en by-pass

(Fuente: ISO, 2002)

- c) **Montado en una derivación alrededor de una válvula reductora**, con solo una parte del riego agua introducida como flujo de agua motriz en la entrada del inyector el flujo total de agua a través del by-pass El montaje está controlado por la válvula reductora de presión.

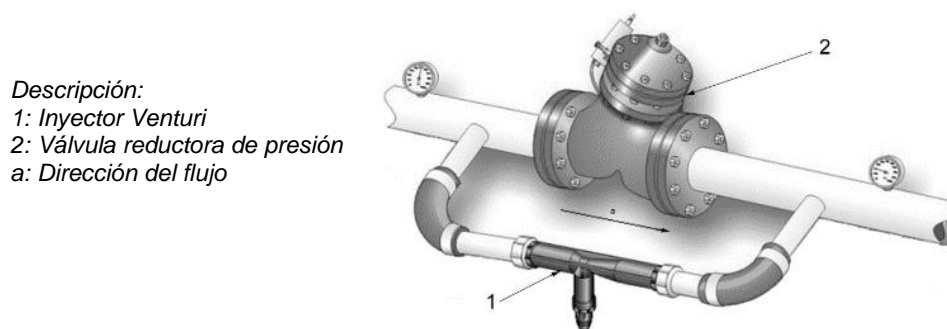


Figura 10: Inyector Venturi con válvula reductora de presión

(Fuente: ISO, 2002)

Materiales para construcción de accesorios hidráulicos en minería:

a) Acero inoxidable

Es una aleación no magnética de acero, que contiene hierro con un 18% de cromo, 8% de níquel y 0.03% de carbono, esto proporciona resistencia a la corrosión y ambientes adversos expuestos a cloruros, peróxidos, etc. (Corredor,2020). Para cumplir con un acero inoxidable debe contener como mínimo un 10.5% de cromo y carbono no mayor de 1.2% , la variabilidad y la proporción de otros elementos ayuda a tener un rango más amplio en las condiciones de trabajo.

Existen en el mercado diferentes tipos de acero inoxidable que se van a describir a continuación, los números son asignados por el AISI (American Iron & Steel Institute, por sus siglas en inglés) y no tienen relación con la composición, dentro de las familias de acero inoxidable se tienen a las principales: aceros inoxidables ferríticos, martensíticos, austeníticos y dúplex; los cuales se describirán a continuación.

b) Ferríticos

Por lo general este tipo de acero contiene una mayor cantidad de cromo en su composición el cual permite que sea resistente a la corrosión, no obstante al tener mayor cantidad de cromo genera una pérdida significativa en su resistencia mecánica (Calvo Sealing, s.f.).

Usos:

- Acero 409: Fabricación de escapes de automóviles, silenciadores y convertidores.
- Acero 430: Fabricación de cremalleras, adornos arquitectónicos interiores y electrodomésticos para la cocina y aparatos científicos.
- Acero 434: Usado en electrodomésticos por su resistencia a la corrosión
- Acero 446: Usado para resistir temperaturas entre 815°C y 1200°C

c) Martensíticos

Contiene un gran porcentaje de cromo en su composición por lo que le da una gran resistencia a la corrosión sin embargo no tiene aluminio, titanio, azufre o niobio. Se trata de materiales ferrosas con un gran límite elástico y dureza. Son complicadas de soldar (Calvo Sealing, s.f.).

Usos:

- Acero 410: Usado en fabricación de tuercas, tornillos, vajillas, partes de horno, etc.

- Acero 420: Usado en ortodoncia, herramientas quirúrgicas, hojas de cuchillos, moldes.
- Acero 420 F: Es una variación del 420 pero en su composición se añade fósforo y azufre para mejorar la maquinabilidad.
- Acero 440: Levas, engranajes, rodamiento de bolas, herramientas de alta calidad como los instrumentos quirúrgicos dentales.

d) Austeníticos

Resistentes a la corrosión y a diferencia de los martensíticos tienen la facilidad de soldar, se puede utilizar con temperaturas de hasta 1150°C. Compuesta por una solución sólida de carbono y hierro. Se usa en la industria química, petrolera, minería, alimentaria, médica, etc. (Calvo Sealing, s.f.).

Usos:

- Acero 301: Usado para fabricar piezas de aviones, cajas de trailers y ferrocarriles, cubiertas.
- Acero 303: Usado en fabricación de partes de bombas.
- Acero 304: Empleado en ambientes agresivos, fácil de soldar diseñado para soportar productos químicos.
- Acero 316: Muy resistentes a la corrosión sobre todo en ambientes químicos agresivos y ácidos.
- Acero 321: Contiene titanio en su composición, este tipo de acero es similar al acero 304 y se usa principalmente en la fabricación de recipientes a presión.

e) Dúplex

Acero más resistente a la corrosión, tracción y compresión superior a los austeníticos y ferríticos. Acero muy difícil de fracturar, de gran tenacidad, límite elástico el doble que otros aceros.

Usos: Fabricación de piezas industriales como rotores, ejes, impulsores, usado en refinería, plantas de tratamiento.

Fundamentos de soldadura

La definición de soldadura se considera como el proceso que se realiza para unir dos o más partes de metal o de materiales termoplásticos, existen diversas fuentes de energía que se emplean para poder realizar este procedimiento estos pueden ser mediante laser,

arco eléctrico, ultrasonido; para partes metálicas la energía más empleada para realizar la soldadura es el arco eléctrico.

Tipos de soldadura

a) Soldadura por gas

Llamada también soldadura autógena cuya técnica de soldadura usa gas acetileno para su funcionamiento mezclado con oxígeno. La fusión de estos dos elementos producen una fuente de calor que derrite a los metales expuestos, se emplea por lo general en la soldadura de aceros suaves, bronce, cobre y aluminio. Si bien es cierto puede realizar trabajos de soldadura su principal función es la de realizar cortes en diferentes metales.

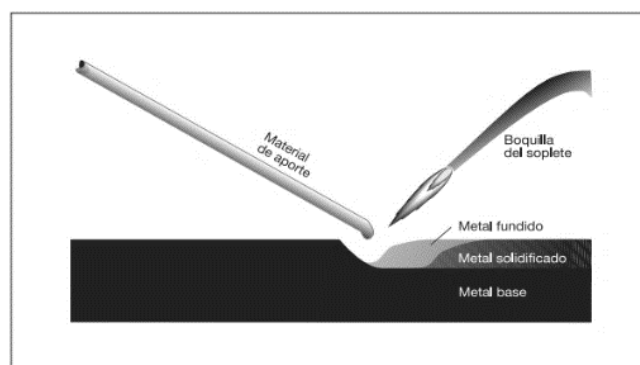
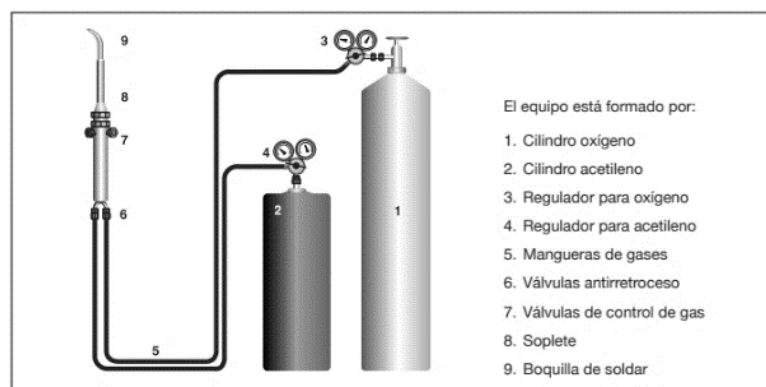


Figura 11: Esquema proceso de soldado por gas
(Fuente: Indura, pag. 129)



El equipo está formado por:

1. Cilindro oxígeno
2. Cilindro acetileno
3. Regulador para oxígeno
4. Regulador para acetileno
5. Mangueras de gases
6. Válvulas antirretroceso
7. Válvulas de control de gas
8. Soplete
9. Boquilla de soldar

Figura 12: Diagrama esquemático del equipo MIG
(Fuente: Indura, pag. 130)

b) Soldadura MMAW (Metal Manual Arc Welding)

Soldadura metálica manual por arco, se usan electrodos para lograr unir partes metálicas mediante fusión localizada. El electrodo tiene un recubrimiento que al fundirse genera una capa protectora que impide que el oxígeno llegue al punto de soldadura y se genere escorias o residuos sobre el trabajo realizado. El núcleo del electrodo es transferido hacia

el metal base a través generada por la corriente de soldadura. Es ampliamente utilizado en diferentes trabajos industriales y trabajos en el hogar.

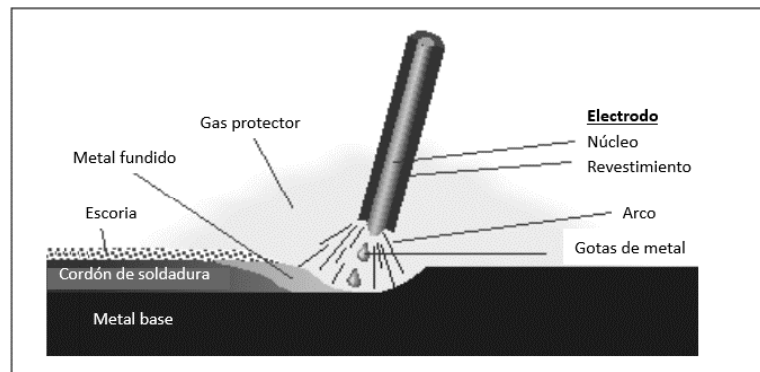


Figura 13: Esquema proceso de soldado MMAW
(Fuente: Indura, pag. 29)

c) Soldadura MIG

Se usa gas de metal inerte para realizar el fusinado, el proceso de soldadura es similar al MMAW requiere de un equipo más sofisticado con aplicación de gas. Se usa para trabajos complejos.

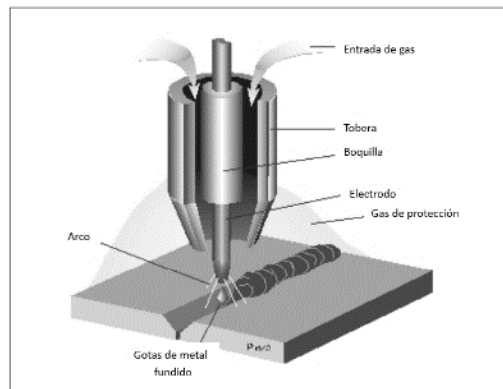


Figura 14: Esquema proceso de soldado MIG (Indura, pag. 82)

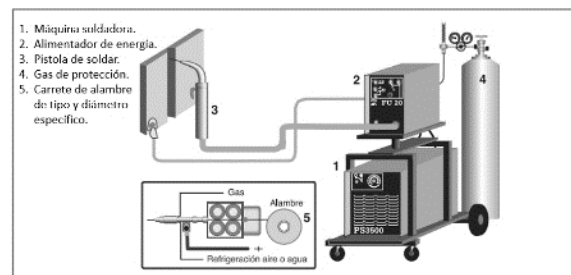


Figura 15: Diagrama esquemático del equipo MIG
(Fuente: Indura, pag. 83)

d) Soldadura TIG

Se usa gas inerte de tungsteno, se usa en trabajos delicados o de espesores menores de una precisión muy fina en el acabado.

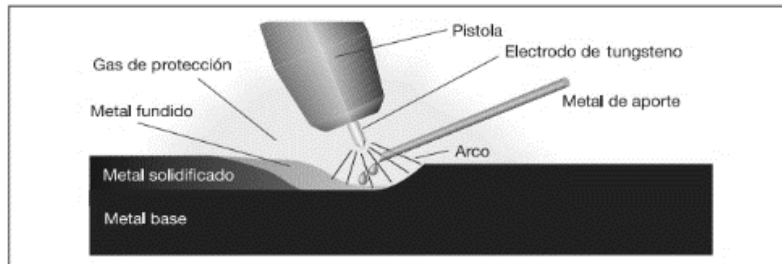


Figura 16: Esquema proceso de soldado TIG
(Fuente: Indura, pag. 121)

Esquemas básicos de soldadura:

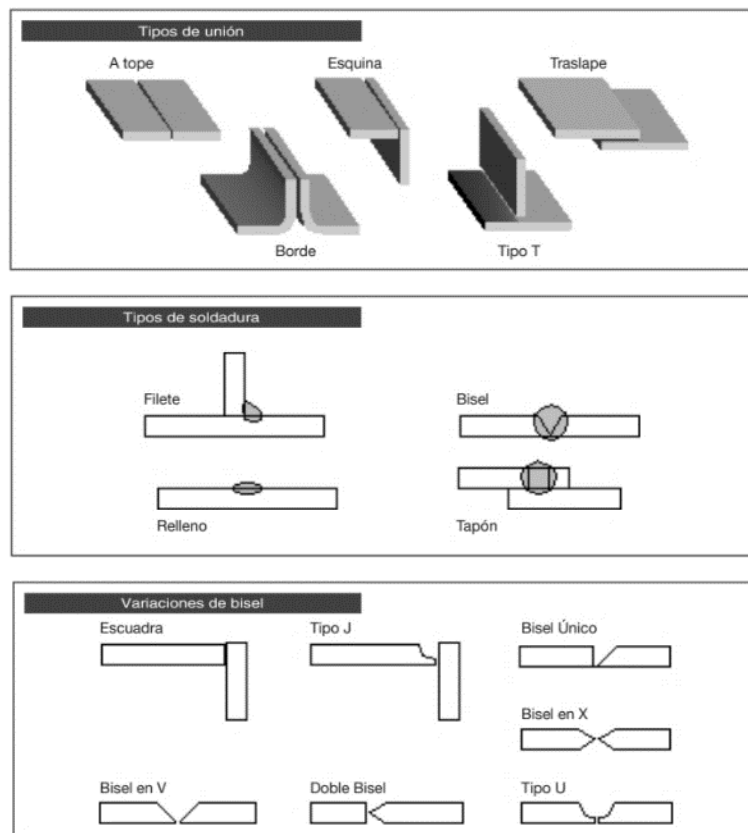


Figura 17: Tipos de unión, soldadura y bisel
(Fuente: Indura, pag. 121)

2.1.2. Instalación típica de abastecimiento de agua para riego en vías.

Existen dos tipos de abastecimiento para el riego de vías, ya sea por gravedad o por bombeo. Cada una cumple con el concepto básico de abastecimiento de agua para riego de vías cuyas partes fundamentales se considera lo siguiente:

- **Almacenamiento:** Por lo general se emplean pozas (reservorios) o tanques de almacenamiento de agua cuyo recubrimiento varía y podría ser geomembrana, concreto, acero, etc. Que cumplen con la característica fundamental de fuente de almacenamiento.
- **Conducción:** es común el uso de tuberías el cual puede ser de diferente tipo de materiales (Acero al carbono, acero inoxidable, Polietileno de Alta Densidad – HDPE, PVC, etc.)
- **Distribución:** Comúnmente en minería se denomina “garza” a las estaciones de abastecimiento de agua para el riego de vías, las cuales abastecen de agua a los camiones cisterna para su posterior aplicación de control de polvo.
- **Aplicación:** Se realiza con el uso de aspersores del camión cisterna para cubrir todo el ancho de la vía.

Cada uno de estos ítems se ven resumidos en la Figura 18.

A) Almacenamiento

a) Conceptos previos

- **Poza:** Depósito o estructura hidráulica impermeabilizada que sirve para almacenar de agua en un lugar determinado y su posterior aprovechamiento (MEFCCA,2018)

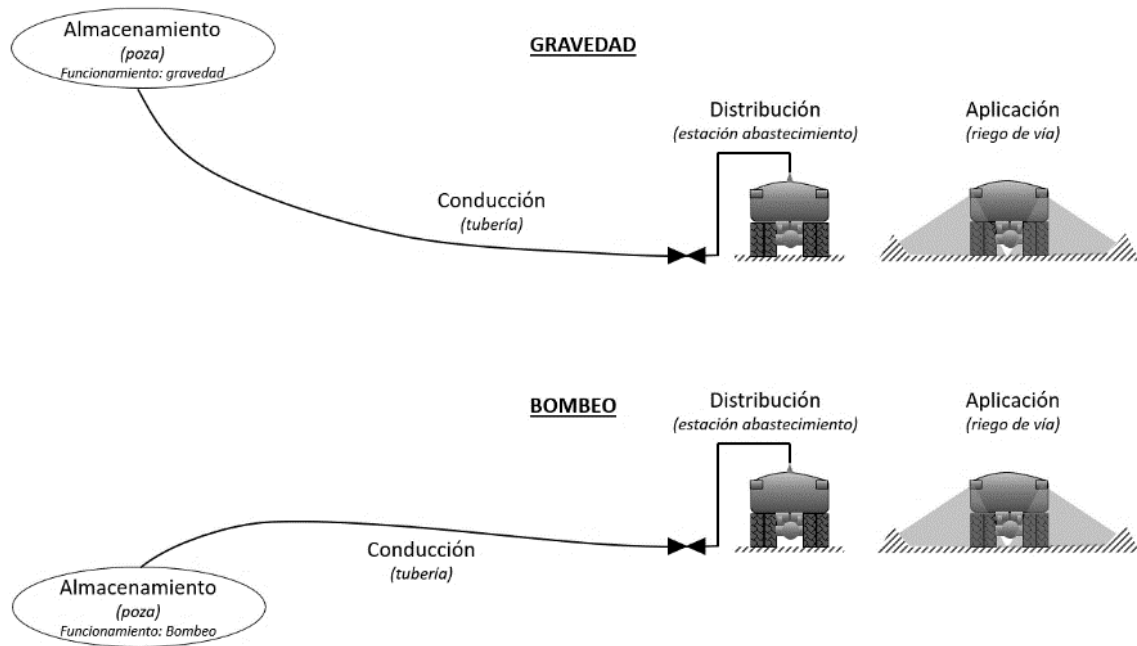


Figura 18: Diseño típico de abastecimiento de agua para riego de vías

- **Geomembrana:**

Las geomembranas son revestimientos o barreras de membranas sintéticas que se utilizan para controlar la migración de fluidos en un proyecto, estructura o sistema artificial. Están hechos de láminas poliméricas continuas relativamente delgadas que a veces están hechas de la infusión de geotextiles con asfalto, elastómero o aerosoles de polímero. Esto significa que sus aplicaciones a la ingeniería geotécnica, civil e hidráulica son infinitas. El tamaño de la geomembrana es completamente personalizable, por lo que pueden ser tan pequeños como un estanque de peces o tan grandes como un campo de fútbol si es necesario. (Wertern Environmental Liner, 2018).

- Estructura: homogénea o reforzada
- Acabado: Lisa o texturizada
- Componente:
 - Polietileno (HDPE, LLDPE, VLDPE)
 - Cloruro de Polivinilo (PVC, f-PVC)
 - Polipropileno (CSPE-R)
 - Terpolímero de Etileno Polipropileno Dieno (EPDM, EPDM-R)

- **Geomembrana de polietileno (HDPE, High Density Polyethylene)**

Cuya densidad es mayor a 0.940 gr/cm^3 , cuenta con numerosas ventajas de las cuales destacan su alta resistencia química, larga vida útil, bajo costo, mayor cobertura puesto que se proporciona en rollos y es más fácil de manipular.

- **Espesores de geomembrana:**

Propiedades	Espesores						
	30 mils	40 mils	50 mils	60 mils	80 mils	100 mils	120 mils
Espeor (mils)	30 mils	40 mils	50 mils	60 mils	80 mils	100 mils	120 mils
Espeor (mm)	0.75 mm	1.00 mm	1.25 mm	1.50 mm	2.00 mm	2.50 mm	3.00 mm
Resistencia al desgarro (mín. prom.) (N)	93	125	156	187	249	311	374
Resistencia perforación (mín. prom.) (N)	240	320	400	480	640	800	960

Tabla 1: *Espesores y especificaciones de resistencia de geomembrana HDPE*
Fuente: *Geosynthetic Institute, 2021*

- **Geotextil**

Es un geotextil no tejido formado por 100% polipropileno virgen, unido mecánicamente por un proceso de agujeteado. Debido a las altas prestaciones mecánicas de este geotextil de polipropileno de alta durabilidad es perfecto para la aplicación en separación de suelos, filtros de drenaje y protección de Geomembrana.

- **Soldadura geomembrana**

Existen dos tipos de soldadura aplicables a las geomembranas, a continuación se describirá cada una de ellas.

- Soldadura doble con cuña caliente: Este tipo de soldadura emplea un equipo de cuña cuya característica es la de crear un canal en medio de las soldaduras, dicho espacio también sirve para poder comprobar la calidad de la soldadura aplicando aire comprimido. El espacio de este canal debe ser mayor a 1.5 centímetros y el traslape de las geomembranas debe tener un ancho mínimo de 10 centímetros (Icochea, 2019).

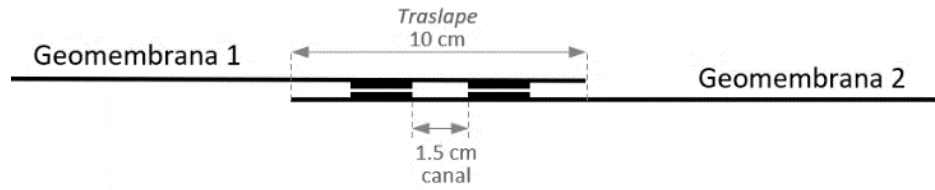


Figura 19: Longitud de traslape soldadura geomembrana

- Soldadura doble con cuña caliente: Se hace uso de una extrusora portátil que emplea cordón de HDPE calentado para unir tamaños reducidos de geomembrana, por lo general se emplea para trabajos especiales como ingreso de tuberías, parches pequeños o de control de calidad, etc. (Icochea, 2019).

b) Diseño y construcción

Para el diseño y construcción de las pozas de almacenamiento revestida se siguen los siguientes pasos:

- Ensayos y estudio de suelos para determinación de propiedades físico mecánicas donde se proyecta realizar el proyecto.
- Se realiza la excavación teniendo en cuenta el ángulo de reposo de los taludes, si después de perfilar la poza los taludes quedan muy irregulares, primero se colocará una capa de geotextil con la finalidad de proteger la geomembrana y evitar que se rompa por presión de agua, evitando de esta manera fallas en la estructura y posibles grandes filtraciones.
- Se colocará la lámina de revestimiento (liners) en taludes y fondo de pozas.
- Para fijar la geomembrana al terreno se usan zanjas de anclaje en todo el perímetro de la poza.
- Se realizan pruebas de control de calidad de la soldadura así como pruebas de filtraciones con acumulación de agua y medición de espejo de agua con equipos topográficos.

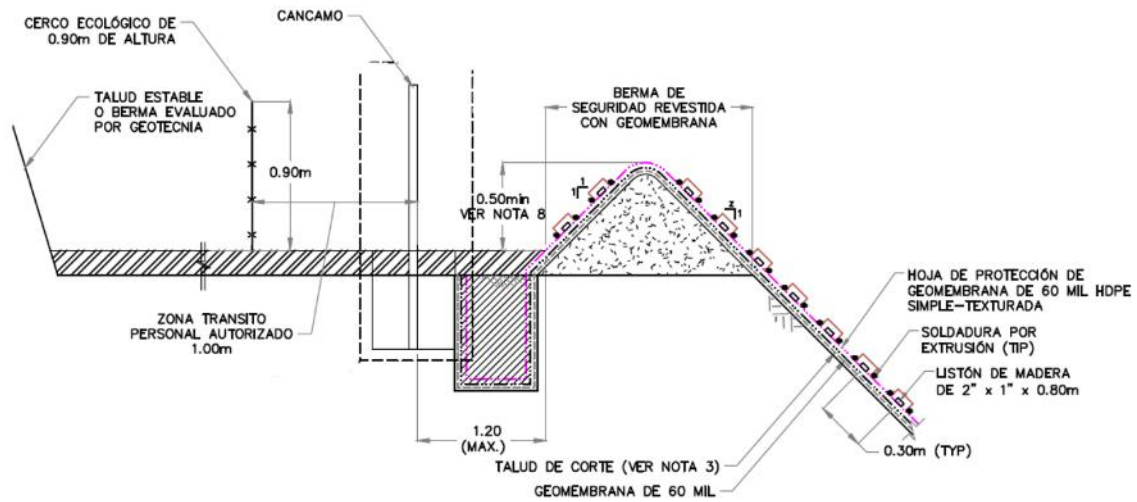


Figura 20: *Detalle típico de zanjas de anclaje en pozas*

B) Conducción

La conducción de fluidos a presión se realiza a través de tuberías, las cuales dependiendo del tipo de material de fabricación soportan diferentes presiones de trabajo. Para este estudio se verá el uso de tuberías de HDPE empleadas en la agricultura, minería y otros sectores industriales. Norma ASTM F714 para especificaciones tubería plástica de polietileno alta densidad, basada en el diámetro externo y requisitos que deben cumplir las resinas PE3608 y PE4710. Para las características de los accesorios empleados se van a considerar de acero inoxidable para el caso de yee, entre otros. Las válvulas para apertura y cierre en las líneas de conducción son del tipo mariposa.

- **Tuberías HDPE y accesorios HDPE:**

Las tuberías y accesorios de HDPE proporcionan un ahorro significativo en costos de instalación, se puede trabajar con mucha maniobrabilidad, bajo costo de mantenimiento y larga vida útil en comparación con otros materiales. (Plastiforte, 2011).

- Normas para materia prima: ASTM F714, especifica los requisitos que deben cumplir los compuestos, PE3608 y PE4710. (Pavco Wavin, 2020).
- Normas para tubos de Polietileno: ASTM F714, Esta norma se usa para la mayoría de aplicaciones con tubería HDPE de gran diámetro (4 a 63 pulgadas). (Pavco Wavin, 2020).

- Rugosidad de tubería HDPE: Se considera un factor de fricción constante de 150 para la metodología según fórmula de Hazen y William y para la metodología de Darcy – Weisbach se considera 0.007mm como rugosidad teórica para diseño de tuberías HDPE. (Pavco S.A., 2008). Sin embargo dicha rugosidad es para tuberías HDPE nuevas y sin rebaba producida por las pegas por termofusión, la rugosidad que más se acerca para agua 10°C usado en el cálculo basado en las fórmulas de Colebrook White y para tuberías de más de 200 mm es de 0.01mm y para medidas de menos o cercas a 200 mm es de 0.05mm. (Plastics Pipe Institute, 2009).

Fórmula Hazen y William

$$F = 0.2083 \left(\frac{100}{C} \right)^{1.85} \frac{Q^{1.85}}{D^{4.866}}$$

*F: Pérdida de presión
Q: Flujo en gal/min
D: Diámetro en pulgadas
C: Factor de fricción
constante = 150.*

Ecuación 1: *Fórmula Hazen y William*

Fórmula Darcy - Weisbach

$$h_f = f \frac{l V^2}{d 2g}$$

*hf: Pérdida a lo largo del tramo (m)
f: Facto de fricción de Darcy
l: Longitud de tramo de tubería (m)
d: Diámetro interno de tubería (m)
V: Velocidad media de flujo (m/s)
g: aceleración de la gravedad (m/s2)
Ks: Rugosidad absoluta de la tubería (m)
Re: Número de Reynolds
v: Viscosidad cinemática (m2/s)*

Ecuación 2: *Fórmula Darcy - Weisbach*

Fórmula de Colebroo – White

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left[\frac{Ks}{3.7d} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right]$$

Ecuación 3: *Fórmula de Colebroo – White*

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu}$$

Ecuación 4: *Fórmula de Reynolds*

- Pérdidas locales por accesorios: Las pérdidas son causadas por el paso de flujo a través de accesorios o válvulas el cual está en relación directa con la velocidad del fluido como se muestra en la siguiente fórmula.

$$h_l = K \frac{V^2}{2g}$$

h_l: Pérdida locales (m)
V: Velocidad media de flujo (m/s)
g: aceleración de la gravedad (m/s²)
K: Coeficiente accesorios

Ecuación 5: *Fórmula de pérdidas locales*

Tipo de accesorio	Valor K
Codo 90°	1
Codo 45°	0.4
Codo 22.5°	0.2
Tee 90° (en linea)	0.35
Tee 90° (por brazo)	1.2
Curva 90°	0.2
Curva 45°	0.4
Válvula compuerta abierta	0.12
Válvula compuerta 3/4 cerrada	24

Tabla 2. *Valores de coeficiente para pérdidas locales*

(Fuente: Plastics Pipe Institute, 2009)

Sin embargo muchas veces los valores no se asemejan a los reales por ello se tiene otra alternativa para poder aproximarse a las condiciones de campo, considerando para ello una asignación adicional de pérdidas fricción haciendo para ello uso de longitud equivalente de tubería puede obtenerse de la ecuación.

$$L_{Eq} = K'D$$

Ecuación 6: *Fórmula de longitud equivalente*

Donde los valores de K' se muestran en la tabla 03.

Tipo de accesorio	Valor K'
Codo 90° moldeado	40
Codo 45° moldeado	21
Codo 15° moldeado	6
Codo 90° fabricado (3 piezas)	24
Codo 90° fabricado (2 piezas)	30
Codo 90° fabricado (1 piezas)	60
Codo 60° fabricado (2 piezas ó más)	25
Codo 60° fabricado (1 piezas)	16
Codo 45° fabricado (2 piezas ó más)	15
Codo 45° fabricado (1 piezas)	12
Codo 30° fabricado (2 piezas ó más)	8
Codo 30° fabricado (1 piezas)	8
Codo 15° fabricado (1 piezas)	6
T de salida en tramo/derivación	60
T de salida en línea	20
Válvula globo convencional, completamente abierta	340
Válvula de ángulo, convencional, completamente abierta	145
Válvula mariposa, >8", completamente abierta	40
Válvula check convencional	135

Tabla 3. *Coeficiente para pérdidas locales considerando longitud equivalente*

(Fuente: Plastics Pipe Institute, 2009)

- Efectos de deflexión en tuberías HDPE enterradas.

Las fórmulas de flujo de tuberías generalmente asumen tuberías redondas. Sin embargo por su flexibilidad y al estar enterrado la tubería de HDPE se deformará ligeramente bajo la tierra así como la influencia de otras cargas para asumir algo de una forma elíptica que tiene un diámetro lateral ligeramente aumentado y un correspondiente diámetro vertical reducido. La deformación elíptica reduce ligeramente el flujo de la tubería (área). En términos prácticos, este fenómeno puede considerarse insignificante ya que se relaciona con la capacidad de flujo de la tubería. Los cálculos revelan que una deformación elíptica que reduce el diámetro vertical de la tubería en un 7% da como resultado una reducción del flujo de aproximadamente el 1%. (*Plastics Pipe Institute, 2009*)

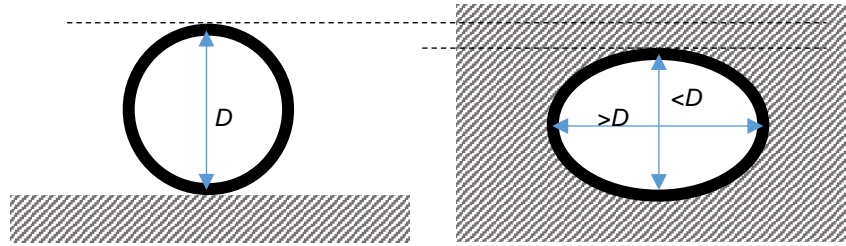


Figura 21:.. Comparación de tuberías expuesta y enterrada deflexión por material

El término SDR (Estándar Dimension Ratio) es la relación que existe entre el diámetro nominal el espesor de la tubería, en la tabla 4 se muestran las medidas de las tuberías de acuerdo a la Norma ASTM F714 y la resistencia a la presión que soporta de acuerdo a normativa.



Figura 22: Diagrama conceptual de medidas para verificación de SDR

$$SDR = \frac{D}{e}$$

Ecuación 7: Fórmula de SDR

- Flange adapter o stub end .

Los accesorios de HDPE como los flange adapter (adaptadores de brida), son por lo general moldeados por inyección o en algunos casos con torneados y fabricados con resina PE-4710 de acuerdo a clasificación y designación de la norma ASTM D-3350. Para tener un mejor operación de las válvulas que van entre los flange adapter HDPE se realiza un biselado en la parte delantera permitiendo de esta manera el giro normal del disco de la válvula mariposa.

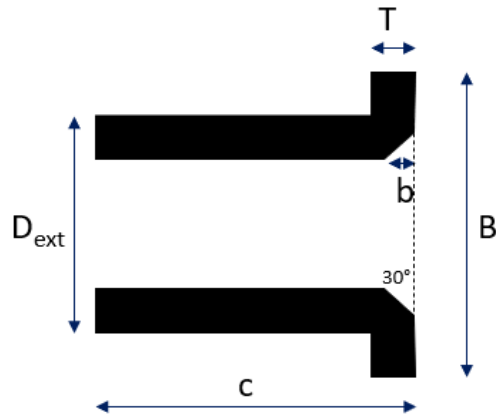


Figura 23: Medidas de flange adapter

Diám. Nominal (pulg)		Diám. Externo (mm)	SDR	Dimensiones de Flange Adapter			Peso Aprox. (Kg)
DN	Real			BxC (pulg)	T (pulg)	b (pulg)	
1-1/2	1.9	48.3	9	3 1/8 x 6	0.40		0.18
			11		0.30		0.14
2	2.375	60.3	7.3	3 3/4 x 6	0.40		0.21
			9				0.18
			11	3 3/4 x 6 1/8	0.30		0.15
			17				
3	3.5	88.9	7.3	4 3/4 x 6	0.60		0.53
			9				0.43
			11	4 5/8 x 6 1/8	0.40		0.38
			17				0.38
4	4.5	114.3	7.3	6 5/8 x 6	0.80		1.04
			9				0.95
			11	6 1/8 x 7 1/8	0.50		0.77
			17				0.59
6	6.625	168.3	7.3	8 5/8 x 8 1/8	1.10	0.65	3.08
			9			0.60	2.99
			11	8 1/8 x 8	0.70	0.50	2.27
			17			0.40	1.89
8	8.625	219.1	7.3	10 3/4 x 8 5/8	2.00	1.20	4.99
			9			1.00	4.54
			11	11 3/4 x 11	0.90	0.60	4.08
			17			0.50	2.27
10	10.75	273.1	7.3	12 3/4 x 8 3/4	1.70	1.70	7.71
			9			1.40	6.80
			11	12 3/4 x 12	1.10	0.90	4.99
			17			0.70	3.63

Tabla 4. Medidas de Flange Adapter

(Fuente: Cidelsa, 2013)

Material		Presión operación - PSI (bar)											
PE3608		40(2.8)		51(3.5)		64(4.4)		80(5.5)		100(6.9)		110(7.6)	
PE4710		50 (3.4)		63 (4.3)		80 (5.5)		100(6.9)		125(8.6)		138(9.5)	
DN (pulg)	Diámetro Exterior (mm)	SDR 41		SDR 32.5		SDR 26		SDR 21		SDR 17		SDR 15.5	
		e(mm)	W(Kg/m)	e(mm)	W(Kg/m)	e(mm)	W(Kg/m)	e(mm)	W(Kg/m)	e(mm)	W(Kg/m)	e(mm)	W(Kg/m)
3	88.9	2.2	0.61	2.7	0.77	3.4	0.95	4.2	1.17	5.2	1.42	5.7	1.44
4	114.3	2.8	1.01	3.5	1.26	4.4	1.57	5.4	1.93	6.7	2.36	7.4	2.37
6	168.3	4.1	2.20	5.2	2.75	6.5	3.41	8.0	4.17	9.9	5.11	10.8	5.14
8	219.1	5.3	3.71	6.7	4.65	8.4	5.78	10.4	7.09	12.9	8.64	14.1	8.72
10	273.1	6.7	5.77	8.4	7.24	10.5	8.96	13.0	11.01	16.1	13.43	17.6	13.57
12	323.8	7.9	8.09	10.0	10.17	12.4	12.61	15.4	15.47	19.1	18.89	20.9	19.08
14	355.6	8.7	9.78	10.9	12.28	13.7	15.20	16.9	18.67	20.9	22.79	22.9	22.99
16	406.4	9.9	12.78	12.5	16.02	15.6	19.86	19.4	24.38	23.9	29.75	26.2	30.02
18	457.2	11.2	16.18	14.1	20.29	17.6	25.14	21.8	30.84	26.9	37.66	29.5	38.00
20	508.0	12.4	19.99	15.6	25.03	19.5	31.04	24.2	38.07	29.9	46.47	32.8	46.91
22	558.8	13.6	24.19	17.2	30.30	21.5	37.57	26.6	46.09	32.9	56.25	36.0	56.77
24	609.6	14.9	28.75	18.7	36.04	23.4	44.71	29.0	54.84	35.9	66.95	39.3	67.56
26	660.4	16.1	33.76	20.3	42.32	25.4	52.48	31.4	64.35	38.8	78.55	42.6	79.28
28	711.2	17.3	39.17	21.9	49.12	27.4	60.87	33.9	74.62	41.8	91.11	45.9	91.95
30	762.0	18.6	44.97	23.4	56.34	29.3	69.88	36.3	85.71	44.8	104.61	49.1	105.56
32	812.8	19.8	51.12	25.0	64.13	31.3	79.51	38.7	97.50	47.8	118.99	52.5	120.15
34	863.6	21.1	57.73	26.6	72.36	33.2	89.77	41.1	110.05	50.8	134.35	55.7	135.64
36	914.4	22.3	64.73	28.1	81.16	35.2	100.64	43.5	123.36	53.8	150.65	59.0	152.06
42	1066.8	26.0	88.08	32.8	110.42	41.0	126.80	50.8	167.94	62.8	205.07	68.8	206.98

Material		Presión operación - PSI (bar)											
PE3608		128(8.8)		160(11.0)		193(13.3)		200(13.8)		219(15.1)		254(17.5)	
PE4710		160(11.0)		200(13.8)		241(16.6)		250(17.2)		274(18.9)		317(21.9)	
DN (pulg)	Diámetro Exterior (mm)	SDR 13.5		SDR 11		SDR 9.3		SDR 9		SDR 8.3		SDR 7.3	
		e(mm)	W(Kg/m)	e(mm)	W(Kg/m)	e(mm)	W(Kg/m)	e(mm)	W(Kg/m)	e(mm)	W(Kg/m)	e(mm)	W(Kg/m)
3	88.9	6.6	1.76	8.1	2.12	9.6	2.47	9.9	2.54	10.7	2.73	12.2	3.04
4	114.3	8.5	2.91	10.4	3.51	12.3	4.08	12.7	4.20	13.8	4.50	15.6	5.02
6	168.3	12.5	6.32	15.3	7.61	18.1	8.84	18.7	9.10	20.3	9.76	23.1	10.90
8	219.1	16.2	10.71	19.9	12.91	23.5	14.98	24.3	15.42	26.4	16.55	30.0	18.47
10	273.1	20.2	16.64	24.8	20.05	29.4	23.29	30.3	23.96	32.9	25.71	37.4	28.69
12	323.8	24.0	23.39	29.4	28.20	34.8	32.74	36.0	33.71	39.0	36.15	44.4	40.34
14	355.6	26.3	28.22	32.3	34.01	38.2	39.48	39.8	40.88	42.9	43.61	48.7	48.65
16	406.4	30.1	36.85	37.0	44.43	43.7	51.56	45.2	53.08	49.0	56.95	55.7	63.54
18	457.2	33.9	46.64	41.6	56.20	49.1	65.26	50.8	67.18	55.1	72.08	62.6	80.41
20	508.0	37.6	57.57	46.2	69.39	54.6	80.60	56.4	82.93	61.2	88.96	69.6	99.27
22	558.8	41.4	69.70	50.8	83.97	60.1	97.52	62.1	100.33	67.3	107.66	76.5	120.12
24	609.6	45.2	82.94	55.4	99.94	65.6	116.05	67.7	119.44	73.4	128.13	83.5	142.95
26	660.4	48.9	97.33	60.0	117.30	71.0	136.19	73.4	140.16	79.6	150.37	90.5	167.77
28	711.2	52.7	112.88	64.6	135.99	76.5	157.95	79.0	162.55	85.7	174.40	97.4	194.57
30	762.0	56.4	129.57	69.3	156.13	81.9	181.32	84.7	186.60	--	--	--	--
32	812.8	60.2	147.41	73.9	177.65	87.4	206.29	90.3	212.31	--	--	--	--
34	863.6	64.0	166.47	78.5	200.56	92.9	232.88	96.0	239.68	--	--	--	--
36	914.4	67.7	186.62	83.1	224.86	98.3	261.08	101.6	268.70	--	--	--	--
42	1066.8	79.0	253.97	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Medidas especiales, espesores calculados bajo la F714

Tabla 5. Especificación estándar para la tubería (SDR-PR) de polietileno (PE) basada en el diámetro exterior. Norma ASTM F714

(Fuente: Pavco Wavin, 2020)

Diám. nominal	Diám. Externo (mm)	CÉDULA DE TUBERÍA	SCH 5S	SCH 5	SCH 10S	SCH 10	SCH 20	SCH 30	SCH 40S & STD	SCH 40	SCH 60	SCH 80S & XH	SCH 80	SCH 100	SCH 120	SCH 140	SCH 160	SCH XXH
22	558.8	Espesor (mm)				6.35	9.53	12.70	9.53		22.23	12.70	28.58	34.93	41.28	47.63	53.98	
		Peso (Kg/m)				86.42	128.89	170.84	128.89		293.76	170.84	373.23	450.73	526.21	599.73	671.31	
		Diam. Interno (mm)				548.64	539.75	533.40	539.75		514.35	533.40	501.65	488.95	476.25	463.55	450.85	
		Presión rotura (psi)				1,591	2,386	3,182	2,386		5,568	3,182	7,159	8,760	10,341	11,932	13,523	
24	609.6	Espesor (mm)	5.54		6.35	6.35	9.53	14.27	9.53	17.48	24.61	12.70	30.96	38.89	46.02	52.37	59.54	
		Peso (Kg/m)	82.40		94.36	94.36	140.81	209.53	140.81	254.91	354.70	186.76	441.36	546.75	639.02	718.93	806.73	
		Diam. Interno (mm)	598.53		596.90	596.90	590.55	581.05	590.55	574.65	560.37	584.20	550.72	531.83	517.55	504.85	490.52	
		Presión rotura (psi)	1,272		1,458	1,458	2,188	3,278	2,188	4,013	5,653	2,917	7,111	8,931	10,570	12,028	13,673	
26	660.4	Espesor (mm)				7.92	12.70		9.53			12.70						
		Peso (Kg/m)				127.39	202.64		152.73			202.64						
		Diam. Interno (mm)				670.00	635.00		641.35			635.00						
		Presión rotura (psi)				1,680	2,692		2,019			2,692						
28	711.2	Espesor (mm)				7.92	12.70	15.88	9.53									
		Peso (Kg/m)				137.30	218.54	271.93	164.65									
		Diam. Interno (mm)				695.35	685.80	679.45	692.15									
		Presión rotura (psi)				1,560	2,500	3,125	1,875									
30	762.0	Espesor (mm)	6.35		7.92	7.92	12.70	15.88	9.53			12.70						
		Peso (Kg/m)	118.20		147.22	147.22	234.43	291.80	176.57			234.43						
		Diam. Interno (mm)	751.84		746.15	746.20	736.60	730.25	742.95			736.60						
		Presión rotura (psi)	1,167		1,456	1,456	2,333	2,917	1,750			2,333						
32	812.8	Espesor (mm)				7.92	12.70	15.88	9.53	17.48			12.70					
		Peso (Kg/m)				157.13	250.32	311.67	188.49	342.40			250.32					
		Diam. Interno (mm)				796.95	787.40	781.05	793.75	777.85			787.40					
		Presión rotura (psi)				1,365	2,188	2,734	1,641	3,010			2,188					
34	863.6	Espesor (mm)				7.92	12.70	15.88	9.53	17.48			12.70					
		Peso (Kg/m)				167.05	266.22	331.53	200.41	364.26			266.22					
		Diam. Interno (mm)				847.80	838.20	831.85	844.55	828.65			838.20					
		Presión rotura (psi)				1,285	2,059	2,574	1,544	2,833			2,059					
36	914.4	Espesor (mm)				7.92	12.70	15.88	9.53	19.05			12.70					
		Peso (Kg/m)				176.97	282.11	351.40	212.33	420.18			282.11					
		Diam. Interno (mm)				898.55	889.00	882.65	895.35	876.30			889.00					
		Presión rotura (psi)				1,213	1,944	2,431	1,458	2,917			1,944					
42	1066.8	Espesor (mm)							9.53			12.70						
		Peso (Kg/m)							248.08			329.78						
		Diam. Interno (mm)							1048.00			1041.40						
		Presión rotura (psi)							1,250			1,667						
48	1219.2	Espesor (mm)							9.53			12.70						
		Peso (Kg/m)							283.79			377.40						
		Diam. Interno (mm)							1200.15			1193.80						
		Presión rotura (psi)							1,094			1,458						

Tabla 6. Especificaciones tubería acero inoxidable. Norma ASTM A312

(Fuente: Unifield Alloys)

De acuerdo a estudios de rugosidad realizada por la Pipeline Simulation Interest Group (PSIG) donde emplearon un medidor de rugosidad Mitutoyo SJ-201. Las muestras que utilizaron fueron de diferentes diámetros, diferentes tipos de fabricación dentro de los que se incluyen tuberías por laminado en caliente sin costura, estirado en frío, expansión en caliente y HFIW soldado y otros procesos como DSAW. Los valores absolutos de rugosidad también fueron obtenidos para tuberías tratadas de manera diferente por: post-soldadura simulada tratamientos térmicos, arenado y limpieza ultrasónica. Los valores de rugosidad promedio registrados de la tubería variaron de 57 micropulgadas (0.0014mm) para tuberías de acero inoxidable a 1034 micropulgadas (0.0263mm) para tratamientos térmicos tubería de acero al carbono. Todos los valores medidos fueron menores que el generalmente se utiliza para diseños con un valor de 1800 micro - pulgadas (0.046 mm). (Bidmus H.,2019).

- **Válvulas**

Existen diferentes tipos de válvulas en el mercado que se emplean para cortar, derivar o modificar el paso de fluido a través de tuberías. A continuación se describirá brevemente los principales tipos de válvulas:

Válvula de compuerta: Válvula cuya principal función es la apertura o cierre de fluido, de acuerdo a su diseño solo permite ambas opciones, no es una válvula de regulación puesto que al trabajar parcialmente cerrado generaría cavitación, turbulencia. Al estar parcialmente abierto generaría problemas en su funcionamiento debido al golpeteo el eje del vástago (Válvulas Internacionales, 2018).

Válvula de bola: De diámetros pequeños usados en la industria debido a su efectividad en hermeticidad, dentro de su estructura llevan sellos dobles, al igual que las válvulas de compuerta, éstas pueden ser de apertura o cierre; así como de regulación cuyas características son las de tener una gran cantidad de pérdidas de carga (Válvulas Internacionales, 2018).

Válvulas de mariposa: Válvulas versátiles que sirven para cierre, apertura y regulación, dentro de su estructura de construcción se tiene un disco, cuerpo, vástago

Válvula de globo: Válvulas cuyas características son las de regular el flujo, de diseño unidireccional, el cual evita que se produzcan golpes de ariete.

Válvula de retención o válvulas check: Sirven para evitar el retorno de fluido en las líneas de impulsión o succión.

EPANET	
COEFICIENTES DE PÉRDIDAS MENORES	
Válvula de Globo, totalmente abierta	10.0
Válvula de Ángulo, totalmente abierta	5.0
Válvula de Retención de Clapeta, totalmente abierta	2.5
Válvula de Compuerta, totalmente abierta	0.2
Codo de radio pequeño	0.9
Codo de radio medio	0.8
Codo de radio grande	0.6
Codo a 45°	0.4
Codo cerrado con inversión del flujo	2.2
Te estándar - dirección de paso	0.6
Te estándar - dirección desvío	1.8
Entrada Recta	0.5
Salida brusca	1.0

Tabla 7. Coeficiente de pérdidas menores en accesorios.

(Fuente: De acuerdo al Software 'Epanet (2.0.12 vE)')

C) Distribución

Para la distribución de agua se emplea por lo general estaciones de llenado para cisternas gigantes (Water Truck Filling Station), utilizado en granjas, ranchos, sitios de construcción, minas, canteras y sitios industriales para aplicaciones de supresión de polvo. Los camiones cisterna gigantes se utilizan comúnmente en aplicaciones de minería , principalmente para el control del polvo. Estos camiones cisterna generalmente consisten en una serie de boquillas rociadoras equipadas con la mecánica para bombear y rociar agua en las vías de acarreo. Estos camiones son capaces de transportar un gran volumen de agua y volver a llenarlos puede ser un desafío en las minas , debido a su tamaño. Por ello es que se usan estructuras con la altura y los diámetros suficientes para abastecer los equipos de manera óptima y segura; estas estructuras se llaman comúnmente “Garzas” por la forma de una jota invertida.



Figura 24: Fotografía de estación de llenado de camiones gigantes.

D) Aplicación

• Supresores de polvo

En vista del fenómeno del polvo que ocurre en las carreteras de las minas, se requiere que los supresores de polvo tengan capacidades adecuadas de fijación de polvo. Por lo tanto, un supresor de polvo debe tener tanto un efecto humectante como un efecto de condensación para cubrir las capas de rodadura y lograr el propósito de eliminar el polvo. En los últimos años, con el desarrollo de tecnología, han aparecido muchos supresores de polvo, dentro de los principales se clasifican en tres tipos: de tipo adherido, de tipo húmedo y de tipo cohesivo (Sun,2020). Sin embargo existen varios tipos de supresores de polvo que veremos a continuación.



Figura 25: Fotografía de riego de vías de acarreo

• Tipos de supresores de polvo:

Aplicación directa de agua

La aplicación de agua es de uso común, evita la propagación de polvo en las vías, sin embargo tiene restricciones en la eficacia puesto que es limitado y en temporada seca se tiene una gran cantidad de radiación el cual afecta directamente en la calidad de su funcionamiento para evitar la liberación de polvo. De acuerdo a lo indicado por Minería Chilena (2013) el porcentaje de control de polvo del agua en caminos ha sido estimado en un 40% de eficacia comparado por otros supresores, a su vez su capacidad de controlar el polvo se ve reducida desde 100% a 0% en un periodo corto de tiempo en climas secos. Sin embargo la aplicación de solamente agua en vías de acarreo no es eficiente debido a

que se requiere gran cantidad de ciclos de regado, uso de camiones cisterna y zonas donde se cuenta con el agua suficiente se genera impactos visuales y al medio ambiente.

Aplicación de sales y cloruros

Tienen un uso particular dependiendo del lugar donde se desea aplicar dentro del uso más popular están el cloruro de magnesio ($MgCl_2$) y el cloruro de calcio ($CaCl_2$) cuya característica es la de absorber la humedad del ambiente. Sin embargo se tienen limitaciones con el cloruro de sodio ($NaCl$) en regiones de la costa debido a que absorbe agua cuando la humedad sobre pasa el 75%. Por otro lado el cloruro de magnesio incrementa la tensión superficial y genera una costra seca dura sin embargo requiere un 32% de humedad para absorber el agua que se encuentra en el medio ambiente independiente de la temperatura, esta absorción de agua genera una superficie inestable en las vías (Minería Chilena, 2013). Uno de los principales problemas del uso de sales y cloruros como supresores de polvo radica en el manejo de la humedad puesto que al presentar aumentos en la humedad no se genera una capa impermeable y por ende tienden a drenar por las vías modificando la calidad de los suelos haciéndolos más salinos y existiendo una variación en el pH del agua y suelo.

Polímeros sintéticos

Los polímeros sintéticos ayudan a la adherencia del polvo a la superficie con ello se forman capas de rodadura muy duras, en época seca funciona muy bien debido a la compactación formada, sin embargo no son efectivos en el control de generación de polvo además se tienen inconvenientes en ambientes con presencia de lluvia, neblina y temperaturas bajas provocando que se agrieten debido a la poca flexibilidad (Minería Chilena, 2013).

Productos orgánicos no bituminosos

-Los lignosulfonatos fijan las partículas de suelo hacia la capa de la vía, funciona muy bien en suelos arcillosos generando una excelente compactación; sin embargo esta compactación se ve dañada por la presencia de lluvias. Con las lluvias las partículas escurren por la solubilidad que tienen ante la presencia de agua.

-Los aceites vegetales provenientes de las semillas o frutos de la canola, soya y semillas de algodón generan una pequeña costra que impiden el desprendimiento de las partículas

de polvo sin embargo requieren de la aplicación de agua para continuar con el proceso por ende se tienen ciertas deficiencias.

-Las melazas (productos derivados de la caña de azúcar) funcionan muy bien en el control de polvo sin embargo es temporal, se requiere aplicaciones constantes, estos productos se ven afectados por la humedad del ambiente y las lluvias que se puedan producir.

Productos bituminosos

Son productos asfálticos que mantienen las partículas de suelo en su lugar, es muy similar al pavimento pero con las características de los caminos asfaltados. Teniendo las capas de suelo adecuadas en relleno y compactación ayuda a mantener el camino para permitir el tránsito adecuado para vehículos livianos por más de un año. Las características más importantes de los productos bituminosos son la resistencia y que no son solubles en agua por ende no llegan a evaporarse.

- **Supresores de polvo empleados en minería**

Supresor de polvo DL-10 Plus: Producto útil para la humectación de terrenos, vías y caminos sin pavimentar, controlando las emisiones de polvo. Actúa iónicamente sobre las partículas PM10 generando coalescencia de las mismas hasta formar una película que se configura como capa de rodadura. (Multinsa, 2018)

Supresor con mezcla de resina asfáltica elastoméricas y resinas vegetales, dicha mezcla proporciona una propiedad visco elástica haciéndola más resistente a los cambios de temperatura (rango de temperatura de -28°C a 58°C). DL-10 Plus es un producto amigable con el medio ambiente.

COMPOSICION					
COMPONENTES	# CAS	%W/W	ACGIH		UNIDAD
Resinas poliméricas modificadas	111-62-6	40	N/A	N/A	N/A
Excipientes	N/A	60	N/A	N/A	N/A

PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS			
Estado físico	Líquido viscoso.	Gravedad Específica	1.0 - 1.2
Solubilidad en Agua	100%	pH	8.0- 9.0
Color	Beige.	Olor	Característico.
Punto de ebullición	100°C		
*Los resultados descriptos representan los valores típicos de producción y no constituyen especificaciones.			

Tabla 8. Composición y propiedades físicas y químicas del producto DL10 Plus

(Fuente: Multinsa, 2018)

- **Parámetros técnicos para su aplicación**
- **Dosis de impacto:** Dosis aplicada para bajo la cual se diluye una alta proporción de DL10 durante 4 días consecutivos con el fin de lograr una rápida reacción del suelo con el supresor y obtener la mitigación del impacto generado por el material particulado, para vías sin ningún tratamiento previo.
- **Dosis estándar:** Dosis bajo la cual se llevan a cabo los riegos cuando ya se ha logrado controlar la generación de material particulado

La Aplicación del supresor de polvo DL10+ se realizará sobre las vías en las cuales se requiera el control del material particulado, ya que el uso del producto por su naturaleza no genera ninguna afectación al medio ambiente. Las aplicaciones mínimas sobre el área definida deben ser 4 riegos diurnos, de tal forma que permita el logro de los resultados perseguidos, de igual manera dicho número de riegos está definido en función del grado de control que se tenga como objetivo corporativo, por lo que puede optimizarse de acuerdo con dicho parámetro (Multinsa, 2018).

Dosis de aplicación	Dosis por riego		N° de riegos/día
	DL10 + (litros)	Agua (Galones)	
Dosis de impacto	60	20,000	4
Dosis de estándar	40	20,000	4

Tabla 9. Dosis de aplicación supresor de polvo
(Fuente: Multinsa, 2018)

Propiedades físicas del agua

Temperatura (°C)	Peso específico γ (kN/m ³)	Densidad ρ (kg/m ³)	Viscosidad dinámica η (Pa.s)	Viscosidad cinemática ν (m ² /s)	Viscosidad Relativa	Peso específico relativo
0	9.81	1000	1.75E-03	1.75E-06	1.716	1.002
5	9.81	1000	1.52E-03	1.52E-06	1.490	1.002
10	9.81	1000	1.30E-03	1.30E-06	1.275	1.002
15	9.81	1000	1.15E-03	1.15E-06	1.127	1.002
20	9.79	998	1.02E-03	1.02E-06	1.000	1.000
25	9.78	997	8.91E-04	8.94E-07	0.876	0.999
30	9.77	996	8.00E-04	8.03E-07	0.787	0.998
35	9.75	994	7.18E-04	7.22E-07	0.708	0.996
40	9.73	992	6.51E-04	6.56E-07	0.643	0.994
45	9.71	990	5.94E-04	6.00E-07	0.588	0.992
50	9.69	988	5.41E-04	5.48E-07	0.537	0.990
55	9.67	986	4.98E-04	5.05E-07	0.495	0.988

60	9.65	984	4.60E-04	4.67E-07	0.458	0.986
65	9.62	981	4.31E-04	4.39E-07	0.430	0.983
70	9.59	978	4.02E-04	4.11E-07	0.403	0.980
75	9.56	975	3.73E-04	3.83E-07	0.375	0.977
80	9.53	971	3.50E-04	3.60E-07	0.353	0.973
85	9.50	968	3.30E-04	3.41E-07	0.334	0.970
90	9.47	965	3.11E-04	3.22E-07	0.316	0.967
95	9.44	962	2.92E-04	3.04E-07	0.298	0.964
100	9.40	958	2.82E-04	2.94E-07	0.288	0.960

Tabla 10. *Propiedades del agua unidades del SI*

(Fuente: Mott, R. L. 2006, pag. 589)

2.1.3. Recursos de una empresa

Los recursos son factores que proveen a una organización de todos los medios para realizar una actividad, como maquinaria, dinero, tecnología, etc. Se dividen en cinco grupos: humanos, materiales, financieros, tecnológicos e intangibles. (Cajal, 2020).

a) Recursos Humanos

Compuesta por las personas que trabajan para una organización, no son de propiedad de la empresa sino ellos brindan sus conocimientos y habilidades a cambio de una remuneración económica. Así mismo ellos coordinan el resto de recursos, mientras más conocimientos mejor remunerados. Ejemplo: Es cualquier trabajador de una organización desde el practicante hasta el gerente (Cajal, 2020).

b) Recursos financieros

Capacidad económica de una organización el cual pone en marcha el resto de los recursos y provienen de diferentes fuentes como por ejemplo los financiamientos, inversiones, etc. (Cajal, 2020).

c) Recursos materiales

Bienes tangibles de los que dispone la organización los cuales forman parte del proceso de creación de valor, apoyando al proceso productivo como las maquinarias, vehículos, materias primas, etc. (Cajal, 2020).

d) Recursos informáticos

Desarrollo y uso de sistemas de gestión informática, servidores a disposición de la empresa, los cuales aumentan la efectividad de una organización. (Cajal, 2020).

e) **Recursos intangibles**

Estos recursos no pueden ser medidos o cuantificados sin embargo marcan la diferencia entre el éxito y el fracaso. Por ejemplo un equipo multidisciplinario y cohesionado. (Cajal, 2020).

2.1.4. **Riesgos de mezclas en pozas**

a) **Riesgo caída a fuentes de agua**

El principal riesgo al que está expuesto el personal al realizar la mezcla en poza es tener una fuente de agua cercana a la poza. Trabajadores corren el riesgo de caer en agua fría, además del riesgo de ahogarse, sufrir hipotermia o morir, para ello se requiere de procedimientos para personas en el agua (PIW , person in water). (OSHA 3890, 2016).

El empleador debe proporcionar los equipos necesarios para trabajos cerca a fuentes de agua como los estipulados en OSHA 3890.

- **Dispositivo de flotación:** Chalecos salvavidas para trabajadores expuestos a caer en el agua, deben estar en buen estado y de sufrir desperfectos deben ser retirados y no usarlos. Los chalecos deben ajustarse con las hebillas al cuerpo de la persona para evitar que se suelten.
- **Líneas de vida y aros flotadores:** Deben estar bien colocados en cantidad suficiente y fácil de acceder.
- **Escaleras fijas y portátiles:** Bien marcadas, en buen estado y accesibles.

Recomendaciones ante caída de agua según OSHA 3890:

- Cubrirse la nariz y la boca, no asustarse, mantener la calma.
- Cabeza y cuello por encima del nivel de agua.
- Buscar y agarrarse de un objeto flotante.
- Retirarse de objetos que pesen
- Asumir postura para reducir pérdida de calor para reducir efecto de hipotermia.

Los requisitos y planes mínimos que deben contar el personal que labora en fuentes de agua de acuerdo a OSHA 3890 son:

- Procedimientos para todos los colaboradores involucrados y un observador

- (ayudante) para el rescate.
- Atención médica y de rescate.
 - Simulacros periódicos.
 - Alarmas alternativas (podría incluirse medios de comunicación como radios en unidades mineras) para notificar de eventos.



Figura 26: *La posición H.E.L.P. reduce el efecto de la hipotermia*
(Fuente: OSHA 3890, 2016)

b) Riesgos con izajes

De acuerdo a Tamborero 2016, considera riesgos específicos y riesgos generales los cuales se detallan a continuación.

Riesgos específicos:

- Vuelco de grúa sobre objetos o personas.
- Caída de carga sobre personas
- Golpes contra objetos
- Atrapamientos
- Contactos eléctricos

Riesgos generales:

- Atrapamientos
- Caídas a distinto nivel y al mismo nivel

- Objetos que podrían ocasionar cortes debido al manejo de carga
- Caída de objetos
- Sobreesfuerzos por preparación de carga
- Quemaduras

c) Riesgos manipulación de productos químicos

La consistencia del producto influye directamente en cómo podría ingresar a nuestro organismo así como las consecuencias. A continuación se enumeran los riesgos de manipulación de productos químicos según Instituto Sindical de Trabajo, Ambiente y Salud, 2008.

Riesgo	Factores de riesgo
Riesgos de incendio y/o explosión	Concentración ambiental elevada de sustancias que pueden inflamarse. Presencia de focos de ignición. Presencia simultánea de sustancias incompatibles.
Riesgos de reacciones químicas	Mezcla manual de sustancias. Presencia no controlada de subproductos. Falta de procedimientos de trabajo adecuados en operaciones peligrosas (toma de muestras, carga de aditivos).
Riesgos por inhalación del agente	Presencia en el ambiente de trabajo. Tiempo diario de exposición. Sistemas de ventilación general y local insuficientes. Procedimientos de trabajo inadecuado. Personas especialmente sensibles.
Riesgos por absorción a través de la piel	Duración y frecuencia del contacto. Contacto simultáneo con varias sustancias. Personas especialmente sensibles. Cantidad o concentración del agente. EPI inadecuado.
Riesgos por ingestión	Hábitos higiénicos personales inadecuados como comer o fumar en el lugar de trabajo.
Riesgos por contacto de la piel o los ojos con el agente químico	Procedimiento de trabajo inadecuado. Utilización de envases inadecuados. Sistema de trasvase incorrecto. EPI inadecuado.
Riesgos para el medio ambiente	Envases de productos o residuos abiertos, rotos, mal etiquetados y/o no segregados adecuadamente. Riesgos químicos derivados de fallos en las instalaciones. Existencia de fugas, derrames o vertidos. Vertidos de sustancias o productos a vías de agua (alcantarillado, ríos, mar, suelo). Residuos no controlados. Emisiones al aire a través de chimeneas, sistemas de ventilación o fugitivas. Depósito de residuos en suelo, infiltraciones o vertidos.
Riesgos para la salud de las mujeres	Posibilidad de exposición de mujeres en edad reproductiva. Posibilidad de exposición de mujeres embarazadas o lactantes. Doble exposición: laboral y en el hogar.

Figura 27: Ejemplos de factores de riesgo – riesgos químicos en el lugar de trabajo.

(Fuente: Instituto Sindical de Trabajo, Ambiente y Salud, 2008, pág. 34)

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Presiones, velocidades y pérdidas de carga en Venturi

A) Sin inyección

Para las pérdidas de carga dentro del Venturi se tiene que tener en consideración el teorema de Bernoulli, considerando que no existe un caudal de inyección ($q=0$), aplicando la ecuación de Bernoulli entre las secciones aguas arriba y aguas abajo de la tobera, queda definido bajo la siguiente expresión. (Manzano, 2008).

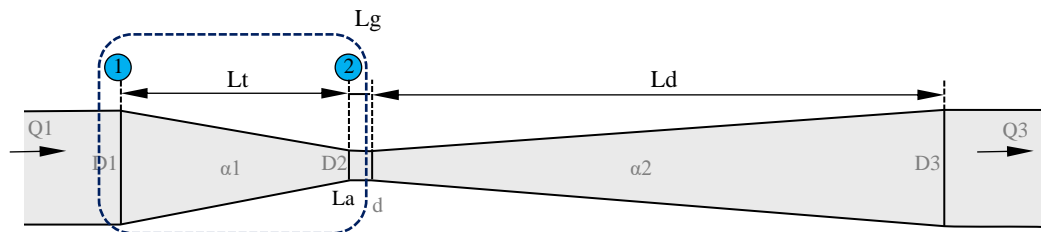


Figura 28: Sección de tobera Venturi

Ecuación de Bernoulli:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta h_t = \frac{P_2}{\gamma} + (1 + k_t) \frac{V_2^2}{2g}$$

Ecuación 8: Ecuación de Bernoulli – Tobera Venturi

donde:

k_t : Coeficiente de resistencia de pérdidas totales en la tobera.

a) Las pérdidas correspondientes a la tobera (Δh_t), pueden evaluarse según Manzano (2008), con la expresión,

$$\Delta h_t = k_t \frac{V_2^2}{2g} = [k'_t(1 - \beta^2) + k''_t] \frac{V_2^2}{2g}$$

Ecuación 9: Pérdida en la tobera de Venturi

Donde β es igual a la relación que existe entre el diámetro interno en 2 y el diámetro interno de la sección en 1. Y que k'_t afecta a las localizadas y k''_t a las continuas. Para k'_t se tiene :

$$k'_t = \varphi\left(\alpha_1, \frac{L_t}{D_2}\right)$$

Ecuación 10: Coeficiente de pérdidas localizadas en la tobera

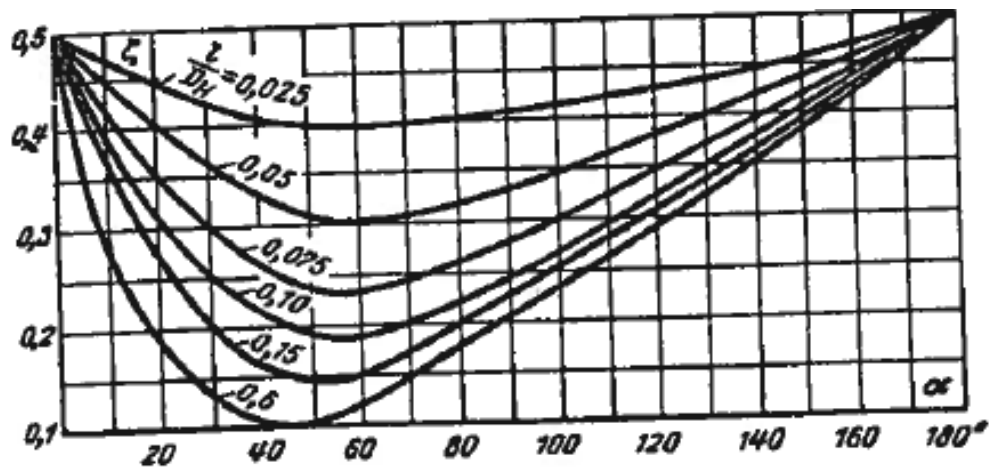


Figura 29: Valores de $k't$ en función de $\alpha 1$ y $Lt/D2$

(Fuente: Idel'cik, 1960, pag. 93)

Sin embargo como se puede apreciar de la figura 29 no cubre todos los rangos de las pérdidas locales por ello se usarán las siguientes consideraciones.

Para contracción gradual el coeficiente por reducción gradual de ángulo θ , según Kisieliev es de acuerdo a la tabla adjunta, y teniendo en cuenta la figura 30.

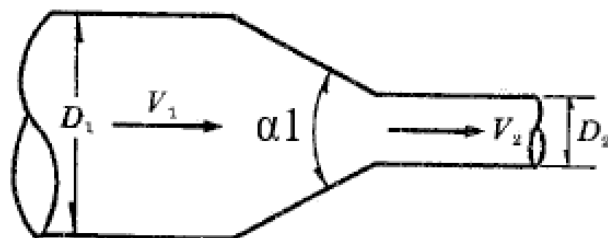


Figura 30: Gráfico de contracción gradual

(Fuente: Sotelo A. G., 1982, pag. 301)

$\alpha 1$	4 a 5°	7°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	60°	75°	80°
$k't$	0.060												
	0.005	0.16	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.35

Tabla 11. Coeficiente de pérdida para contracción local

(Fuente: Sotelo A. G., 1982, pag. 301)

Para k_t'' se da la expresión

$$k_t'' = \frac{f}{8 \operatorname{sen}\left(\frac{\alpha_1}{2}\right)} (1 - \beta^2)$$

Ecuación 11: *Coefficiente de pérdidas continuas en la tobera*

siendo f el coeficiente de fricción a la sección aguas abajo. De acuerdo a lo indicado por Manzano, 2008; en muchos manuales de Hidráulica se da como coeficiente único para ambos el valor de **0.04**.

b) Las pérdidas en la garganta (Δh_g), son sólo continuas y pueden deducirse con la expresión de *Darcy-Weisbach*:

$$\Delta h_g = f \frac{L_g}{D_2} \frac{V_2^2}{2g}$$

Ecuación 12: *Ecuación de pérdidas en garganta de Venturi*

c) Las pérdidas en difusor (Δh_d), dichas pérdidas locales como por fricción, se puede considerar la ecuación 13, teniendo en cuenta que el ángulo α_2 debe estar comprendido entre 0° y 40° de acuerdo a lo indicado por Manzano, 2008.

$$\Delta h_d = k_d \frac{V_2^2}{2g} = \left[3.2 \left(\tan \frac{\alpha_2}{2} \right)^{\frac{5}{4}} (1 - \beta^4)^2 + f \frac{(1 - \beta^4)}{8 \operatorname{sen} \frac{\alpha_2}{2}} \right] \frac{V_2^2}{2g}$$

Ecuación 13: *Ecuación de pérdidas difusor*

Para encontrar las pérdidas totales (Δh_v) en un Venturi sin inyección se sumarán las pérdidas producidas en la tobera, garganta y difusor, se tiene la siguiente ecuación:

$$\Delta h_v = \Delta h_t + \Delta h_g + \Delta h_d$$

Ecuación 14: *Ecuación de pérdidas totales en Venturi sin inyección*

La presión a la salida del difusor, sección 3 en relación a la presión de ingreso, es de

$$\frac{P_3}{\gamma} = \frac{P_1}{\gamma} - \Delta h_v$$

Ecuación 15: *Presión de salida en difusor de Venturi sin inyección*

B) Con inyección:

Cuando se produce inyección desde el depósito, a igualdad del caudal de entrada, variarán la velocidad, el caudal y la pérdida en garganta y difusor.

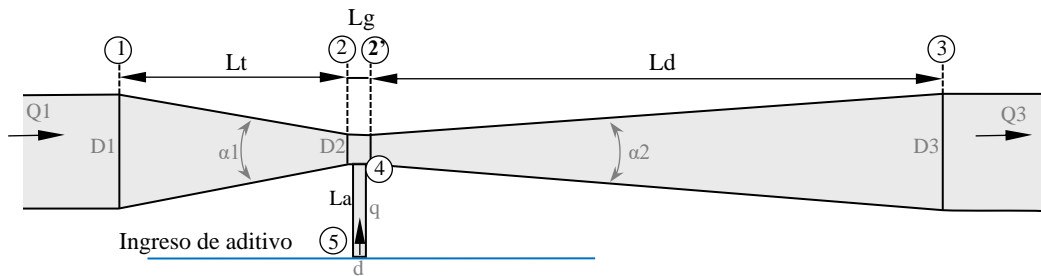


Figura 31: *Inyector Venturi con ingreso en sección estrangulada.*

(Fuente: Adaptado de Manzano, 2008)

Si q es el caudal inyectado a través del tubo de diámetro interior d , el caudal en la sección 2' será la suma de los caudales que pasan por la sección 1 y el caudal inyectado. los nuevos valores son:

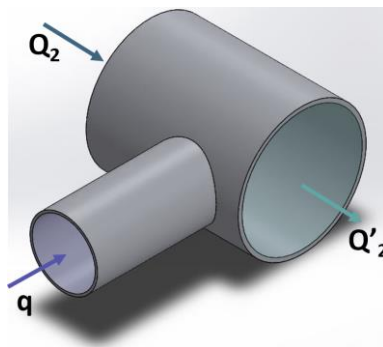


Figura 32: *Sección de garganta con ingreso de caudal de manera rectilínea.*

$$Q'_2 = Q_2 + q$$

Ecuación 16: *Caudal total, incluye caudal de inyección*

y a las pérdidas deducidas en la ecuación 12, Δh_g , se añadirá las pérdidas producidas por el encuentro de corrientes (h_{sg}) de acuerdo a ecuación 17, y el coeficiente de pérdidas locales se puede calcular de acuerdo a la ecuación 18 (Idel'cik, 1960, pag. 249).

$$h_{sg} = k_g \frac{V_2'^2}{2g}$$

Ecuación 17: Pérdidas por reunión de corrientes

$$k_g = \varphi \left(\frac{q}{Q_2'} \right) = 1.54 \frac{q}{Q_2'} - \left(\frac{q}{Q_2'} \right)^2$$

Ecuación 18: Coeficiente de reunión de corrientes con ingreso recto

de manera que las pérdidas totales en la garganta, si f y f' son los coeficientes de fricción aguas arriba y abajo del punto de inyección, resultan

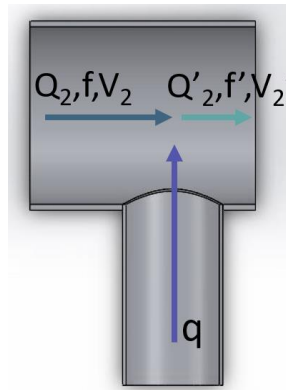


Figura 33: Sección de ingreso de caudal inyectado.

$$\Delta h_g = f \frac{L_g}{2D_2} \frac{V_2^2}{2g} + h_{sg} + f' \frac{L_g'}{2D_2} \frac{V_2'^2}{2g}$$

Ecuación 19: Pérdidas en garganta incluye caudal inyectado

Para una presión dada en la garganta puede obtenerse el caudal inyectado, aplicando el teorema de Bernoulli entre la superficie libre de la solución madre y la sección de salida de la garganta.

$$\frac{P_0}{\gamma} + z_0 + \frac{V_0^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2'^2}{2g} + \Delta h_a$$

Ecuación 20: Ecuación de energía entre superficie solución y garganta Venturi

Las pérdidas del tubo de aspiración, Δh_a , sin accesorios en el tramo de aspiración, ocurren en la entrada del conducto, h'_{sa} ; por rozamiento, h_{ra} y en la unión con la garganta, h''_{sa} :

$$\Delta h_a = h'_{sa} + h_{ra} + h''_{sa} = h'_a + f \frac{L_a}{d} \frac{v^2}{2g} + h''_a$$

Ecuación 21: Ecuación de pérdidas en el tubo de aspiración

h'_{sa} : entrada del conducto.

h_{ra} : por rozamiento.

h''_{sa} : en la unión con la garganta.

Para el cálculo de las pérdidas se tienen las ecuaciones 22, 23 y 24 los cuales nos las proporciona Idel'cik (Idel'cik, 1960, pag. 249).

$$h'_{sa} = \frac{v^2}{2g}$$

Ecuación 22: Ecuación de pérdidas de entrada al conducto de inyección

$$h''_{sa} = k''_a \frac{v^2}{2g}$$

Ecuación 23: Ecuación de pérdidas en la unión con la garganta

La constante de las pérdidas en la unión con la garganta se usará la ecuación 24 y la función φ de acuerdo a figura 34.

$$k''_a = \frac{\varphi\left(\frac{q}{Q_2}, \left(\frac{d}{D_2}\right)^2\right)}{\left(\frac{q}{Q_2}, \left(\frac{D_2}{d}\right)^2\right)^2}$$

Ecuación 24: Ecuación de coeficiente de pérdidas en la unión con la garganta.

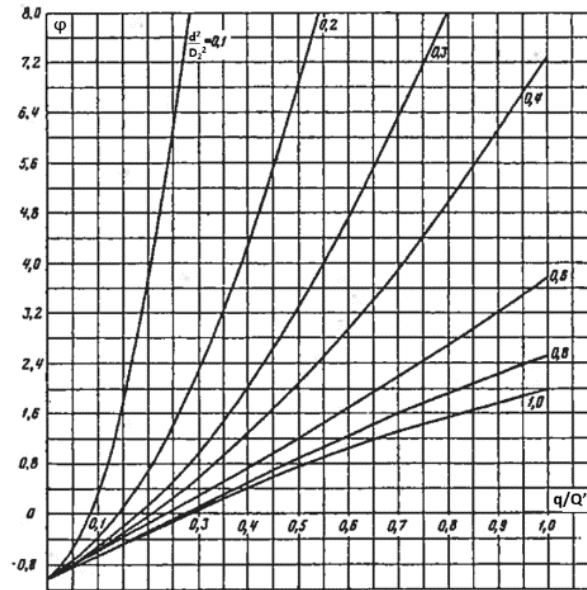


Figura 34: Función de cálculo para coeficiente de resistencia en la reunión de corrientes.

(Fuente: adaptado de Idel'cik, 1960, pag. 249)

Otros fórmulas que nos proporciona Crane Co. (1990) en el apéndice A-26 para los valores de coeficiente de pérdidas en la tobera y difusor respectivamente.

Coeficiente de pérdidas para la tobera con el ingreso de contracción gradual, con ángulo menor o igual a 45°.

$$k_t = 0.8 \operatorname{sen} \left(\frac{\alpha_1}{2} \right) (1 - \beta^2)$$

Ecuación 25: Ecuación de coeficiente de pérdidas en tobera.

Coeficiente de pérdidas para el difusor con salida de ampliación gradual, con ángulo menor o igual a 45°.

$$k_d = 2.6 \operatorname{sen} \left(\frac{\alpha_2}{2} \right) (1 - \beta^2)^2$$

Ecuación 26: Ecuación de coeficiente de pérdidas en difusor

Pérdidas por ingreso de agua en tubería sobresaliente de acuerdo a Sotelo, 1982.

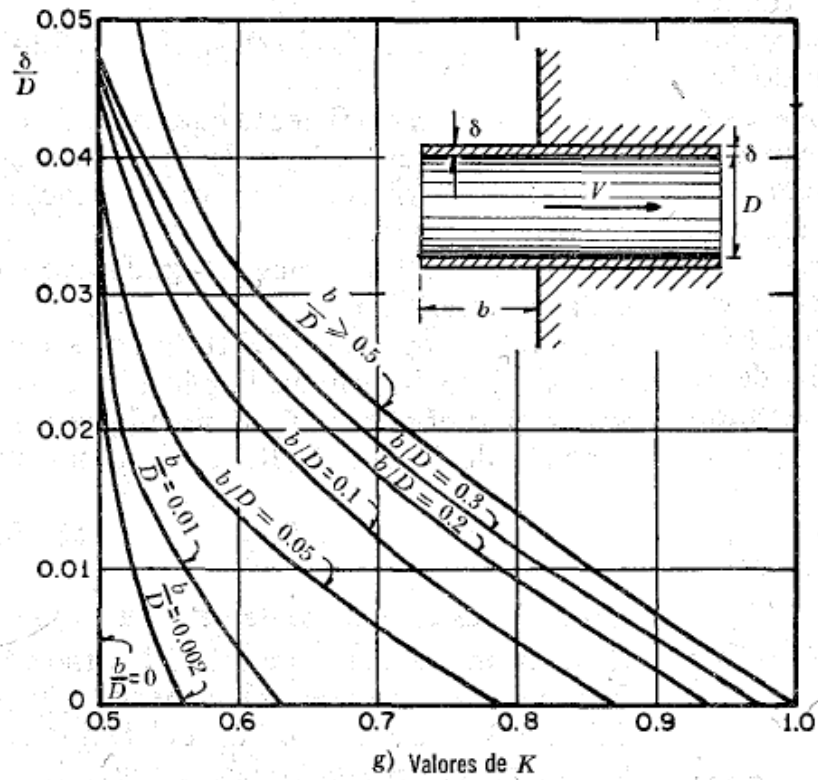


Figura 35: Función de cálculo para coeficiente de resistencia en la reunión de corrientes.

(Fuente: Sotelo, 1982, pag. 298)

Para las pérdidas de contracción y expansión súbita se muestran las figura 36 y figura 37, de acuerdo a Munson, 2009.

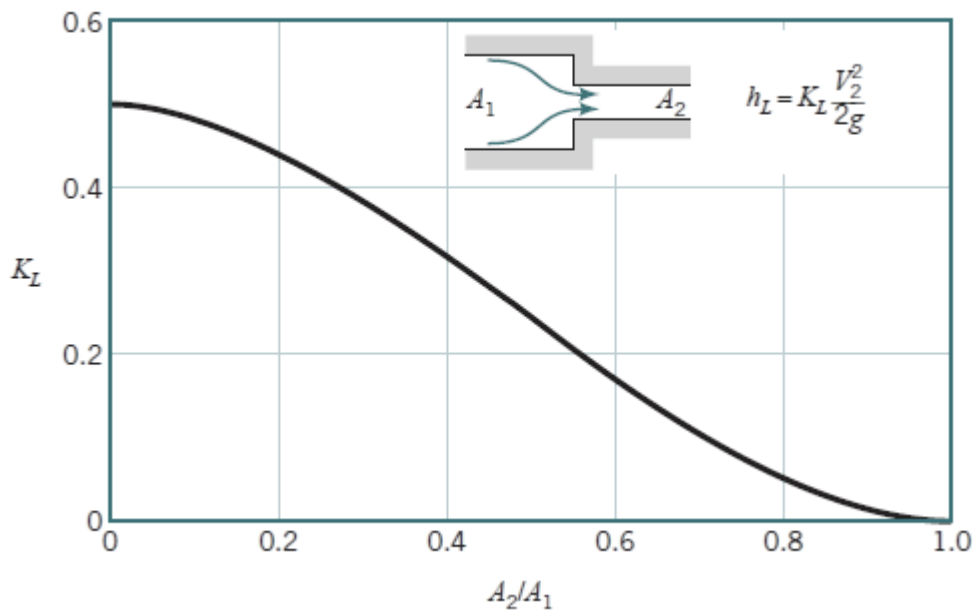


Figura 36: Coeficiente de pérdidas para contracción súbita.

(Fuente: Munson, 2009, pag. 298)

Realizando una regresión a la curva mostrada en la Figura 36 se puede obtener la siguiente ecuación para el cálculo respectivo del coeficiente de pérdida local

$$K_L = 0.9144 * \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^3 - 1.3671 * \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 - 0.0473 * \left(\frac{A_2}{A_1}\right) + 0.5$$

$$K_L = 0.9144 * \left(\frac{D_2^2}{D_1^2}\right)^3 - 1.3671 * \left(\frac{D_2^2}{D_1^2}\right)^2 - 0.0473 * \left(\frac{D_2^2}{D_1^2}\right) + 0.5$$

Ecuación 27: Coeficiente de pérdidas locales por contracción súbita.

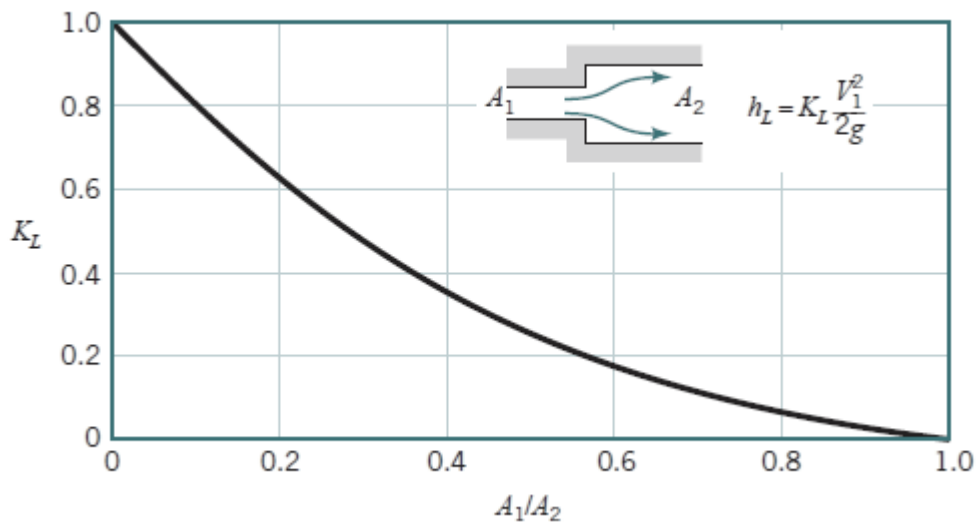


Figura 37: Coeficiente de pérdidas para expansión súbita.
(Fuente: Munson, 2009, pag. 419)

De la figura 37 se tiene la siguiente ecuación para el cálculo respectivo del coeficiente de pérdida local por expansión.

$$K_L = \left(1 - \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2\right)^2$$

$$K_L = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2$$

Ecuación 28: Coeficiente de pérdidas locales por contracción súbita.

2.2.2. Diseño de inyector:

Para el diseño del inyector Venturi se considera la Norma ISO 5167 donde se brindan lineamientos respecto a geometría y condiciones de instalación para su correcto funcionamiento. Dicha norma no incluye a tuberías menores de 50 mm o mayores a 1200 mm, o Reynolds inferiores a 2×10^5 (ISO 5167, 2003).

A) Tipos de Venturi clásicos de acuerdo a Norma ISO 5167.

a) Fundidos

Fabricado por fundición de un molde de arena u otros métodos que aseguren el correcto acabado de la superficie de las secciones convergente y divergente, el cuello o garganta es mecanizado y las uniones entre los conos (sección de tobera y difusor) se redondean. Los diámetros para este tipo de Venturi clásicos están comprendidos entre 100 mm y 800 mm; y las relaciones de diámetros (β) están entre 0.3 y 0.75.

b) Mecanizados

Fabricado en su totalidad como la tobera, garganta o cuello y el difusor. Las uniones pueden o no ser redondeadas. Los diámetros comprendidos para su fabricación de acuerdo a norma están entre los 50 mm y 250 mm; y las relaciones de diámetros (β) están entre 0.4 y 0.75.

c) Chapa de hierro en bruto soldada

Las toberas y el difusor son fabricadas mediante soldadura, esto debido a las grandes dimensiones los cuales no pueden ser mecanizados. Los diámetros están comprendidos entre los 200 mm y 1200 mm; y las relaciones de diámetros (β) están entre 0.4 y 0.70.

VENTURI CLÁSICO							
Rangos	Descripción	Recién fundido		Mecanizada		Chapa soldada	
		(mm)	(pulgadas)	(mm)	(pulgadas)	(mm)	(pulgadas)
D_{\min}	<i>Diámetro mínimo</i>	100	4	50	2	200	8
D_{\max}	<i>Diámetro máximo</i>	800	31	250	10	1200	47
β_{\min}	<i>Relación mínima</i>	0.3		0.4		0.4	
β_{\max}	<i>Relación máxima</i>	0.75				0.7	

Tabla 12. Relaciones de diámetros para fabricación de Venturi Clásicos

(Fuente: ISO 5167-4, 2003, pág. 8)

B) Medidas geométricas.

a) Sección convergente (tobera)

Esta sección debe ser cónica y el ángulo (α_1) debe estar comprendido entre los $21^\circ \pm 1^\circ$.
(ISO 5167-4, 2003, pág. 11)

b) Sección divergente (difusor)

Esta sección debe ser cónica y tener un ángulo (α_2) comprendido entre los lados de entre 7° y 15° . Sin embargo se recomienda elegir un ángulo entre los 7° y 8° . (ISO 5167-4, 2003, pag. 11)

c) Otras consideraciones

Las medidas mínimas que se requiere para los Venturi con una sección convergente de chapa soldada de acuerdo a ISO 5167-4, 2003.

- La longitud mínima del cilindro de entrada A debe ser igual a D.
- No debe haber otra curvatura de unión, entre el cilindro de entrada A y la sección convergente B, que la resultante de la soldadura.
- No debe haber otra curvatura de unión, entre la sección convergente B y el cuello o garganta C, que la resultante de la soldadura.
- No debe haber curvatura de unión entre el cuello C y la sección divergente E.
- La superficie interna del cilindro de entrada A y la sección convergente B, deben estar limpias y libres de incrustaciones y depósitos de soldadura. Su criterio de rugosidad R_a debe ser alrededor de $5 \times 10^{-4} * D$.

$$Rugosidad = 5 \times 10^{-4} * D$$

Ecuación 29: *Rugosidad de sección cónica de Venturi fabricado por chapas*

- Las costuras de soldadura internas deben estar a ras con las superficies de alrededor. No deben estar situadas en la proximidad de las tomas de presión.

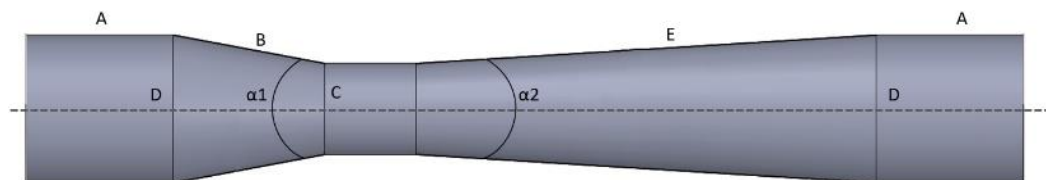


Figura 38: *Perfil de medidas Venturi clásico.*

C) Materiales y fabricación

El tubo Venturi clásico puede fabricarse considerando cualquier material sin embargo las consideraciones geométricas deben prevalecer. Se recomienda que la sección convergente

B y el cuello C estén unidos como una parte, si se fabrican en dos partes separadas, deben montarse ante. Se debe tenerse especial cuidado en el centrado de la sección divergente E en el cuello, no debe existir ningún desfase en los diámetros concéntricos entre las dos partes. (ISO 5167-4, 2003, pag. 13)

D) Pérdidas de carga

La pérdida de carga originada por un tubo Venturi clásico puede determinarse mediante mediciones de presión realizadas anterior y posteriormente a la instalación del tubo Venturi en un conducto con un caudal dado. Si $\Delta p'$ es la diferencia de presión, medida antes de la instalación del tubo Venturi, entre dos tomas de presión, una de las cuales está situada a al menos D aguas arriba de las bridas donde se ha intercalado el tubo Venturi, y la otra está $6D$ aguas abajo de las mismas bridas, y si $\Delta p''$ es la diferencia de presión, medida entre las mismas tomas de presión después de la instalación del tubo Venturi entre esas bridas, entonces la pérdida de carga originada por el tubo Venturi viene dada por: $\Delta p'' - \Delta p'$. (ISO 5167-4, 2003, pag. 16).

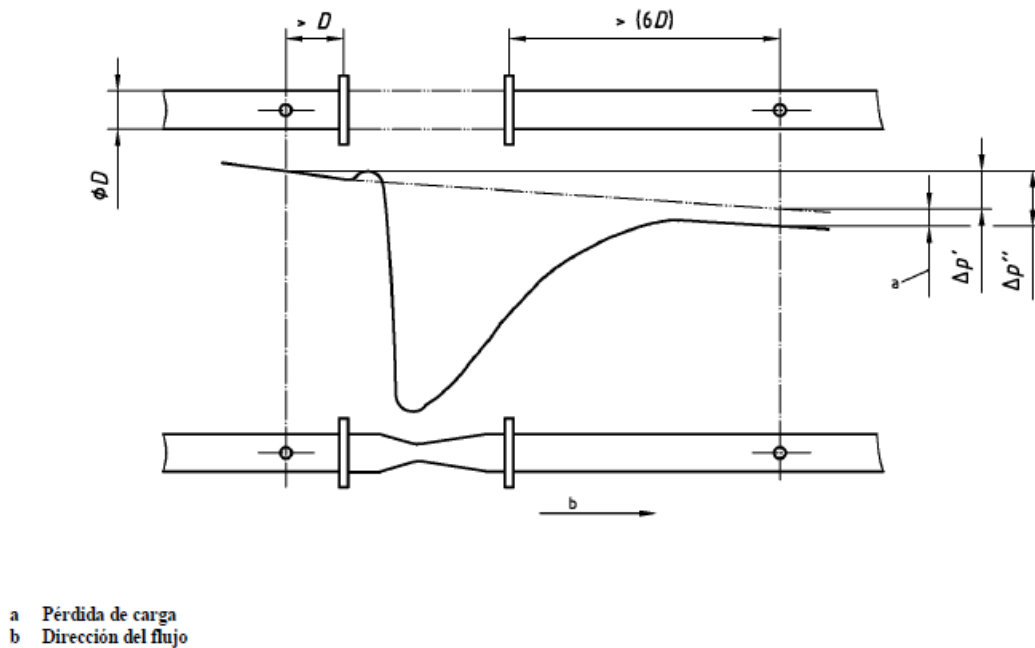


Figura 39: Pérdida de carga a través de un tubo Venturi clásico

(Fuente: ISO 5167-4, 2003, pag. 17)

CAPITULO III. MATERIALES Y MÉTODOS

La etapa de mejoramiento e implementación del sistema Venturi como dosificador de supresor de polvo, inicia con el detalle de las condiciones del lugar (topografía), para ello se realiza vuelo de drone de la zona; conocer la topografía a detalle de la zona y los trazos de la estructura implementada (Estación de abastecimiento de agua – llamada “Garza”). Se realiza levantamiento de información de tubería, diámetros, accesorios, punto de abastecimiento, características de agua. Luego de obtener la información se realizan los cálculos para determinar las dimensiones del inyector Venturi y los resultados para su calibración.

3.1. Obtención de información clave de campo

A. Levantamiento topográfico con Drone:

a) Vuelo de drone

Equipo usado: DJI Matrice 300 rtk

Aplicativo: PIX4D Capture.

Se realizó vuelo de drone del área de influencia para realizar levantamiento topográfico y determinar las cotas, se cubrió toda la zona. Para el determinar el tiempo de vuelo con el modelo de drone se usó el aplicativo móvil PIX4D Capture pues es de vital importancia conocer el tiempo de vuelo para poder repartir el área ya sea en uno, dos o más vuelos. El vuelo se realizó a 150 metros de altura con un tiempo aproximado de 10 minutos para cubrir un área de 314 m x 316 m.



Figura 40: *Fotografía de drone DJI Matrice 300 rtk*



Figura 41: *Vuelo realizado en la zona, inicio de vuelo, en proceso de vuelo*



Figura 42: *Captura de simulación de vuelo en PIX4D*

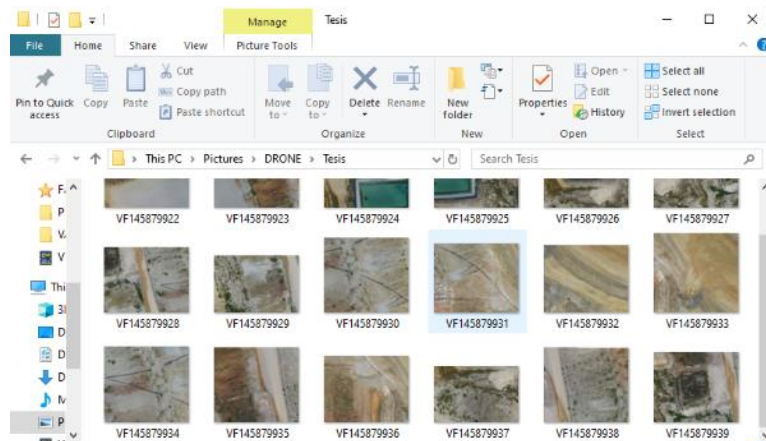


Figura 43: Archivo con fotografías tomadas por drone.

b) Procesamiento de información

Para el procesamiento de las imágenes se usó un Software libre llamado VisualSFM en Windows, donde realiza el procesamiento de asociar los puntos comunes de cada una de las imágenes generando un archivo con el detalle de puntos para poder generar la ortofoto y el modelo digital de elevación.



Figura 44: Ortofoto de proyecto para realizar el perfil topográfico.

B. Elaboración de planos planta perfil

Los planos fueron elaborados en Civil 3D Autodesk, cuyo objetivo es determinar la longitud de tubería, cotas de puntos clave como las válvulas instaladas. El volumen de embalse de poza es de 1,500 m³ revestida con geomembrana el cual se encuentra conectado por tubería de HDPE con un diámetro de 10 pulgadas SDR11, con norma ASTM F714 y resina PE4710. Luego del levantamiento topográfico se determinó una longitud total de 256 metros lineales de tubería tendidos desde el punto de almacenamiento poza hasta el punto de abastecimiento y la

diferencia de cotas desde el nivel de poza hasta el punto más bajo de la garza es de 50 metros de diferencia en altura, la tubería en su recorrido tiene tramos enterrados por un cruce de vía, el resto de tramo se encuentra expuesto (Ver plano A1 en anexo 01)



PLANTA: TUBERÍA DE CONDUCCIÓN DE AGUA HACIA ESTACIÓN DE LLENADO

Figura 45: Croquis con alineamiento de tubería de conducción, ver croquis A1.

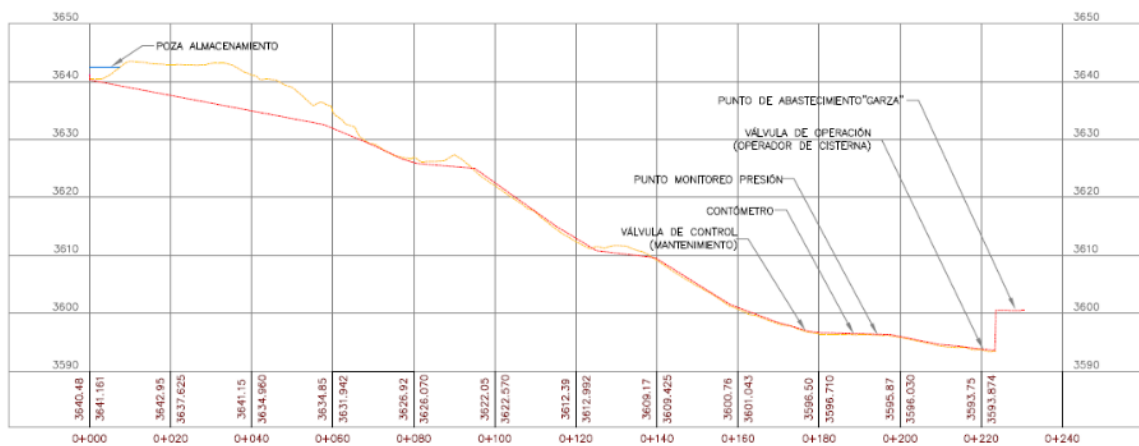


Figura 46: Perfil de terreno y tubería hasta punto de abastecimiento, ver croquis A1.

C. Accesorios de tubería instalados en línea de abastecimiento

La tubería de conducción de agua hacia el punto de abastecimiento (“Garza”) es de un diámetro 10 pulgadas SDR11 HDPE norma ASTM F714, en la progresiva 0+176 se ubica una válvula de regulación y de despresurización de la línea cuyas principales funciones son para realizar mantenimiento de la estructura aguas abajo. En la figura 47, se observa el detalle de la instalación típica de una yee de acero inoxidable de 10 pulgadas con cédula 20 (SCH20), las válvulas instaladas son del tipo mariposa tipo LUG activado con engranaje y volante. Todas las bridas son del tipo SLIP ON de clase 150 acero inoxidable en los extremos del accesorio y de

acero al carbono para unión tubería con válvulas u otros accesorios (válvulas, reducciones, etc.) que se acoplan haciendo uso de flange adapter y termofusión de los materiales de HDPE.

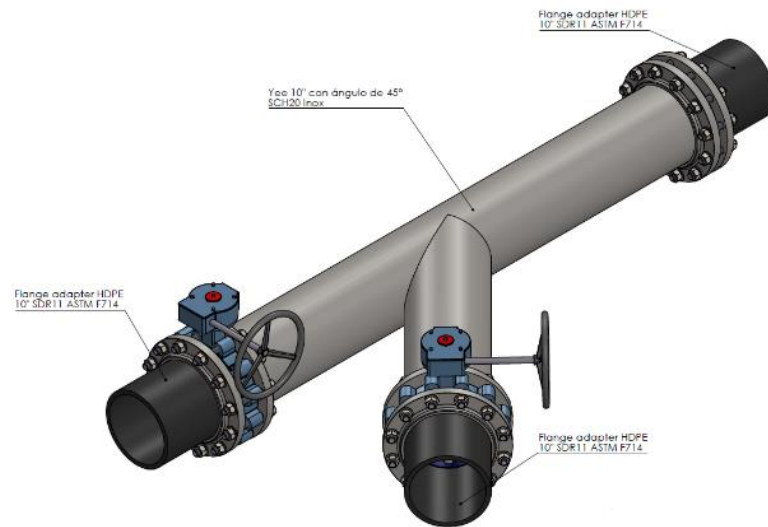


Figura 47:. Imagen de un diseño típico de yee de 10 pulgadas SCH20

La principal función de este accesorio es el de cierre o apertura para mantenimiento u operación, cuando se realiza mantenimiento de la tubería o cambio de las válvulas de operación se procede a cerrar la válvula N° 1 de la figura 48 y posteriormente se realiza la apertura progresiva de la válvula de despresurización, válvula N°2 de la figura 48. Se debe tener en cuenta que para intervenir en la línea o realizar un cambio de accesorios de la tubería, debe estar completamente vacía y realizar el bloqueo de las válvulas para evitar eventos con energía hidráulica proveniente de la acumulación de agua en la línea. De la sección J-J presentada en la figura 48, para realizar los cálculos de pérdidas de carga, se va a considerar los diámetros internos de la tubería INOX SCH10 y las tuberías HDPE de 10 pulgadas con SDR11. Se considerará las pérdidas locales de acuerdo a tablas para la válvula mariposa, considerando para ello la pérdida producida por la válvula N°1 de la figura 48. Como criterios adicionales de pérdidas locales se tomará el ingreso y salida por el cambio de diámetros internos de los dos materiales involucrados (acero inoxidable SCH 20 y tubería HDPE SDR 11) para un diámetro de 10 pulgadas.

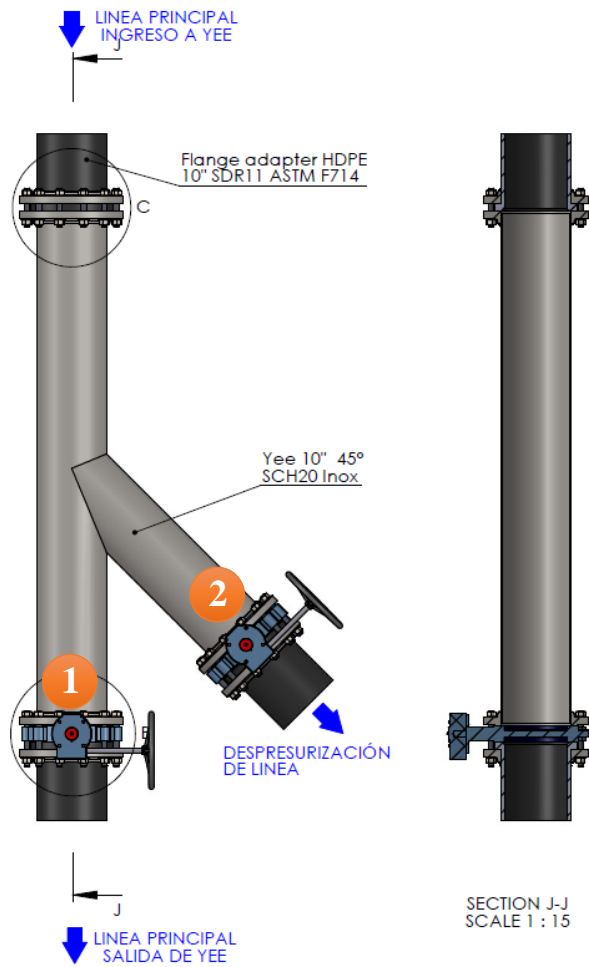


Figura 48: Imagen de un diseño típico de yee de 10 pulgadas SCH20

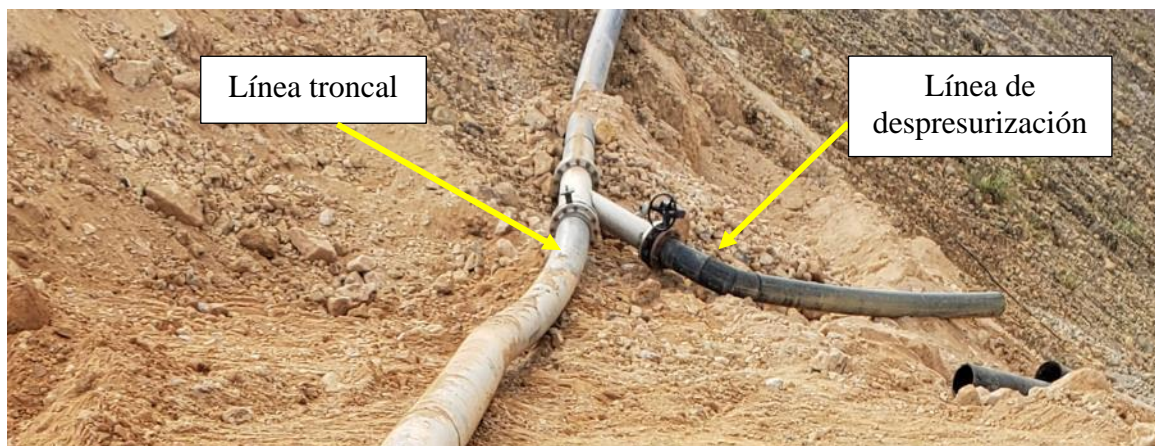


Figura 49: Fotografía de yee de acero inoxidable instalado en línea de conducción.

D. Estructura de abastecimiento de agua (“Garza”)

La línea de abastecimiento “Garza” está construida enteramente con tubería de 10 pulgadas SDR 11 con norma ASTM F714 con resina PE4710, el SDR de la línea de conducción se cambia

de SDR 17 a SDR11 debido a que una parte de la tubería suspendida no tiene soporte por ello se requiere un espesor mayor para evitar flexiones en la tubería horizontal. Las medidas se especifican en la figura 50, se tiene una altura de 6.7 metros de altura y una distancia horizontal de 5.8 metros hasta la salida de agua para abastecimiento de cisternas. El punto de abastecimiento cuenta con una válvula mariposa tipo LUG de clase 150 con engranaje y volante manual, el cual es usada por el operador del cisterna para apertura, regulación y cierre de válvula de acuerdo a las necesidades que re requieran. La estructura soporte está construida en acero inoxidable de 12 pulgadas, tiene una cimentación de concreto simple con una profundidad de 2.5 metros, ver plano B2 en anexos

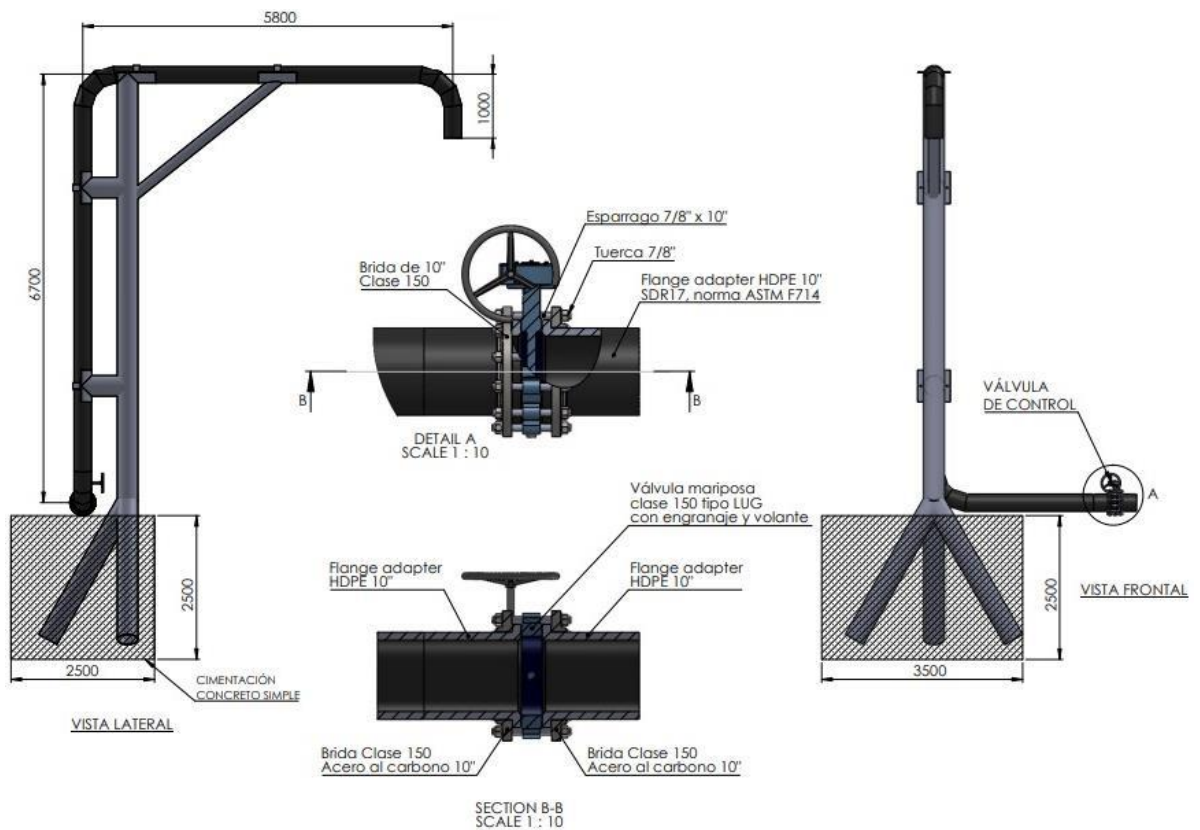


Figura 50: Vista lateral y frontal de diseño típico de punto de abastecimiento de agua “Garza”



Figura 51: Cisterna de riego de vías en el punto de abastecimiento de agua.

3.2. Cálculo de flujo en línea de conducción por gravedad

Para el cálculo de presión y caudal de abastecimiento desde poza de almacenamiento hacia el punto abastecimiento de agua “Garza”, se usó el programa EPANET con el uso de fórmula de Darcy Weisbach, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones y usando la tabla 10 de propiedades de agua trabajando a 15°C. En el programa EPANET se realizó los cambios de las “Opciones de Hidráulica” (Figura 52).

- Caudal: litros/segundo (**LPS**)
- Ecuación de pérdidas: Darcy Weisbach (**D-W**).
- Peso específico: 1.002 (10°C) de acuerdo a tabla 10.
- Viscosidad Relativa: 1.275 (10°C) de acuerdo a tabla 10.

Propiedad	Valor
Unidades de Caudal	LPS
Ecuación de Pérdidas	D-W
Peso Específico	1.002
Viscosidad Relativa	1.275
Iteraciones Máx.	40
Precisión	0.001

Figura 52: Opciones de cálculo hidráulico de programa EPANET

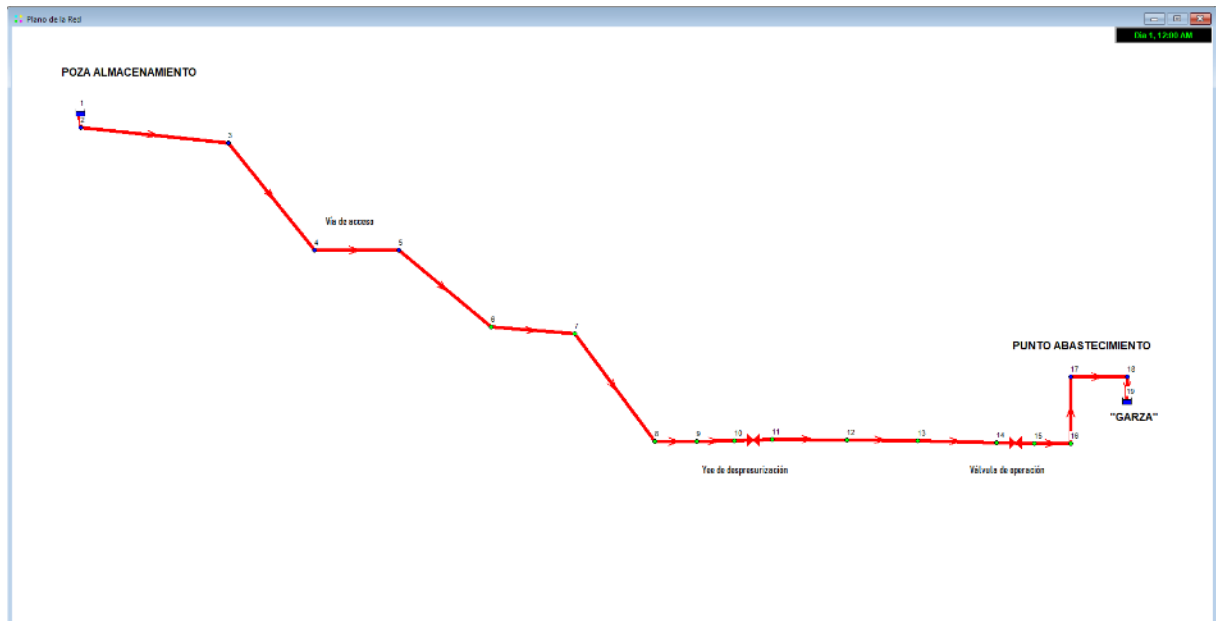






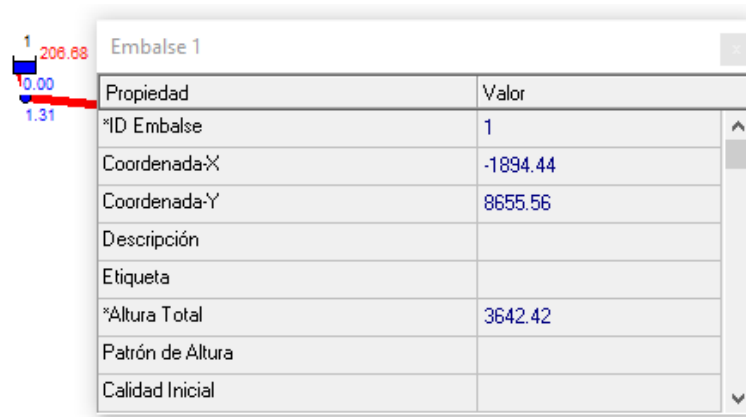
Figura 53: Gráfico conceptual de alineamiento de tubería en software EPANET

En la pantalla principal se realiza el dibujo conceptual de la estructura (poza, tubería, accesorios, garza, etc) figura 46, para el caso de la poza de almacenamiento y la salida en el punto de abastecimiento (“Garza”) se usará el icono de “añadir embalse” ; los puntos de quiebres significativos de acuerdo a topografía (figura 46) se agregaran desde el icono “añadir conexión” ; las válvulas se inserta con el icono “añadir válvula”  y las tuberías desde el icono “añadir tubería” . A continuación se detallará los datos ingresados para el cálculo respectivo en cada uno de los puntos dibujados.

a) **Poza de almacenamiento**

La poza de almacenamiento se ubica a una altitud de **3643 m.s.n.m.**, la poza tiene una capacidad de 1,500 m³, la tubería de salida es de HDPE de 10” SDR11 de acuerdo a norma ASTM F714 (Figura 55). Esta tubería está conectada por la parte inferior de la poza y recubierta con geomembrana soldada por extrusión para evitar filtraciones por las paredes de la tubería exterior.

Para las pérdidas locales producida por la tubería de salida se empleará el coeficiente de pérdidas local por entrada de agua hacia tubería (**K=0.5**), este coeficiente lo podemos encontrar en la bibliografía proporcionada por Sotelo, 1982 y también en el brindado por EPANET para ingreso de agua en entrada recta de acuerdo a tabla 7.



Propiedad	Valor
*ID Embalse	1
Coordenada-X	-1894.44
Coordenada-Y	8655.56
Descripción	
Etiqueta	
*Altura Total	3642.42
Patrón de Altura	
Calidad Inicial	

Figura 54: Captura de ventana EPANET – datos para embalse 1 (Poza de almacenamiento)



Figura 55: Poza de almacenamiento de agua con salida en parte baja de poza.

b) Puntos topográficos:

Luego de graficar los puntos topográficos en EPANET (figura 56), se introduce los valores de las cotas de acuerdo a tabla 13, haciendo doble click en cada uno de los nodos

Punto	Cota	Descripción
1	3643.00	Poza de almacenamiento
2	3640.27	Punto topográfico
3	3632.60	Punto topográfico
4	3625.93	Punto topográfico
5	3625.04	Punto topográfico
6	3610.90	Punto topográfico
7	3609.65	Punto topográfico
8	3597.06	Inicio de yee
9	3597.06	Bifurcación de yee

10	3597.06	Lado aguas arriba de válvula de despresurización
11	3597.06	Lado aguas abajo de válvula de despresurización
12	3596.55	Punto topográfico
13	3596.43	Punto topográfico
14	3593.83	Lado aguas arriba de válvula de operación
15	3593.83	Lado aguas abajo de válvula de operación
16	3593.64	Punto topográfico (curva de "Garza")
17	3600.34	Punto topográfico (curva de "Garza")
18	3600.34	Punto topográfico (curva de "Garza")
19	3599.14	Punto descarga

Tabla 13. Cotas de puntos topográficos para cálculo en EPANET

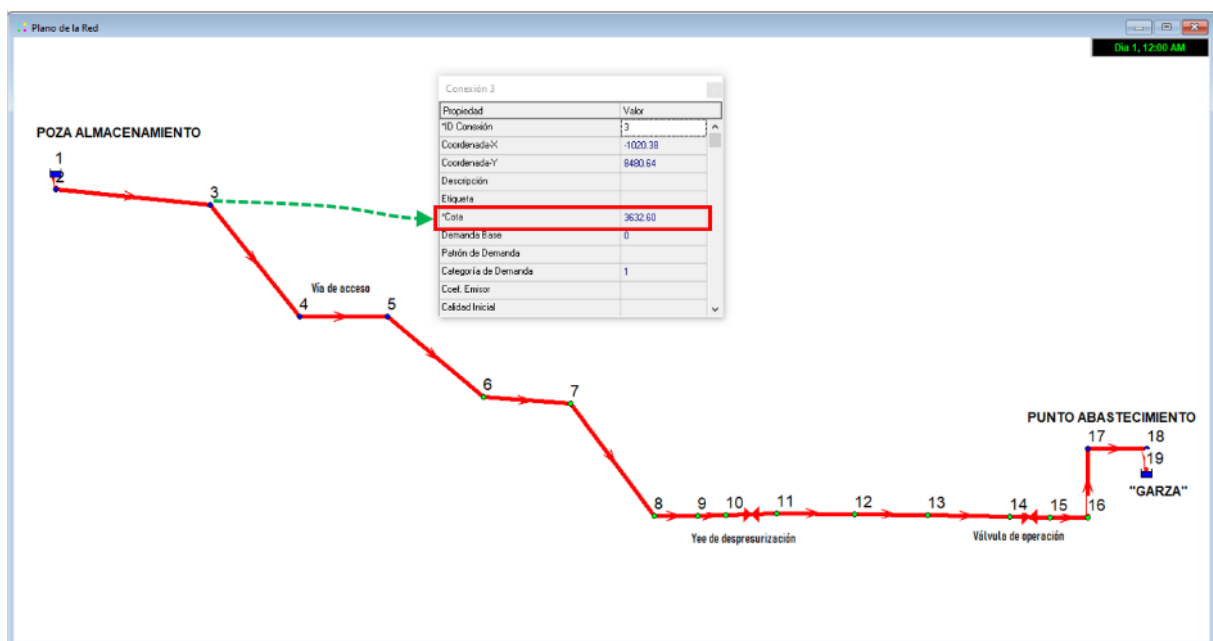


Figura 56: Ventana EPANET para introducción de cotas de nodos.

c) Tuberías:

Cada uno de los tramos dibujados en EPANET se introduce la información de longitud de cada tramo, dicha información se obtuvo del croquis A1 (figura 46), los diámetros internos están de acuerdo a tabla 2 y tabla 3 donde se especifica el diámetro interno de cada tubería, ya sea de HDPE con el SDR correspondiente o la cédula para el caso de las tuberías de acero inoxidable – INOX.

- Longitud (m)

Dicha información se proporciona en el croquis de perfil de la tubería (figura 46) cuyas unidades están en metros, detallados en la tabla 14.

- **Diámetro (mm)**

Dicha información se obtiene de las tablas 5 y tabla 6 de acuerdo a los SDR y/o cédula (SCH) de las tuberías correspondiente (tubería HDPE y/o INOX). Las unidades están especificadas en milímetros.

Tramos	Diámetro Nominal	Diámetro Int. Real	Material	SDR o SCH	Accesorios	Coefficiente de rugosidad*	Longitud tramos
	(Pulgadas)	(mm)				(mm)	(m)
1-2	10"	224	HDPE	11	-	0.05	1.30
2-3	10"	224	HDPE	11	-	0.05	59.00
3-4	10"	224	HDPE	11	-	0.05	25.00
4-5	10"	224	HDPE	11	-	0.05	14.00
5-6	10"	224	HDPE	11	-	0.05	36.00
6-7	10"	224	HDPE	11	-	0.05	15.00
7-8	10"	224	HDPE	11	-	0.05	42.00
8-9	10"	260	INOX	20	Yee	0.046	1.00
9-10	10"	260	INOX	20	Yee	0.046	0.80
10-11	10"	250	-	-	Válvula	-	-
11-12	10"	224	HDPE	11	Contómetro	0.05	12.00
12-13	10"	224	HDPE	11	-	0.05	6.00
13-14	10"	224	HDPE	11	-	0.05	27.00
14-15	10"	250	-	-	Válvula	-	-
15-16	10"	224	HDPE	11	-	0.05	3.00
16-17	10"	224	HDPE	11	-	0.05	6.70
17-18	10"	224	HDPE	11	-	0.05	5.80
18-19	10"	224	HDPE	11	-	0.05	1.20
Suma							255.80

Tabla 14. Cuadro longitudes, rugosidad, materiales por tramos

- **Rugosidad (mm)**

La rugosidad depende del tipo de material, para el presente estudio se está utilizando dos tipos de materiales, como son el Polietileno de Alta Densidad (HDPE) y acero inoxidable (INOX), para la tubería HDPE el coeficiente de Rugosidad para Darcy Weisbach es de 0.05 de acuerdo a Plastics Pipe Institute, 2009. Para las tuberías de acero inoxidable el coeficiente de rugosidad es de 0.046 de acuerdo a Bidmus H.,2019. Estos valores se muestran por tramos en la tabla 14.

- **Coefficiente de pérdidas locales (constante)**

Los datos han sido calculados en la información proporcionada en las tablas 16 y 19, siguiendo los siguientes criterios: Pérdidas producidas en el ingreso de la tubería en la poza de

almacenamiento según Sotelo, 1982, para ingreso de tuberías 0.5 y para salida se considera 1. Para las pérdidas producidas en los radios de curvatura de 15°, 45° y 90° (en el punto de abastecimiento) se empleará el diámetro equivalente de la tabla 3 los cuales incluyen las válvulas. Así mismo también se incluyen las pérdidas locales producidas por cambios en la geometría o la transición de la tubería HDPE y la tubería de INOX, para ello se aplican las fórmulas de coeficiente de pérdidas (K) para expansión brusca y contracción brusca proporcionada por Munson, 2009. Todos estos cálculos se detallan en las tablas 17,18 y 20 líneas abajo. Estos valores son introducidos en la ventada de cada una de las líneas y válvulas como se evidencia en las figuras 57 y 58.

Tramos	Coeficiente de pérdidas locales										LEE (m)					
	Codo 45° moldeado		Codo fabricado 90° (1P)		Codo 90° moldeado		Codo 15° moldeado		Tee salida en línea			Válvula mariposa		Contómetro		
	Cant.	(K')	Cant.	(K')	Cant.	(K')	Cant.	(K')	Cant.	(K')		Cant.	(K')	Cant.	(K')	
1-2															0.0	
2-3	2	21	1	60											22.7	
3-4	1	21													4.7	
4-5	1	21													4.7	
5-6	2	21													9.4	
6-7	1	21													4.7	
7-8	2	21					1	6							10.7	
8-9															0.0	
9-10									1	20						4.5
10-11											1	40				8.9
11-12													1	145	32.3	
12-13															0.0	
13-14															0.0	
14-15							1	6			1	40				10.3
15-16							1	6								1.3
16-17						1	40								8.9	
17-18						1	40								8.9	
18-19						1	40								8.9	

Diámetro interno de
tubería

223 mm

Tabla 15. Cálculo de pérdidas locales por longitud equivalente de línea

Tramos	Longitud tramos	LEE	Long. Total
	(m)	(m)	(m)
1-2	1.30	0.0	1.3
2-3	59.00	22.7	82
3-4	25.00	4.7	30
4-5	14.00	4.7	19
5-6	36.00	9.4	45
6-7	15.00	4.7	20
7-8	42.00	10.7	53
8-9	1.00	0.0	1
9-10	0.80	4.5	5.3
10-11	-	8.9	
11-12	12.00	32.3	53
12-13	6.00	0.0	6
13-14	27.00	0.0	27
14-15	-	10.3	
15-16	3.00	1.3	15
16-17	6.70	8.9	16
17-18	5.80	8.9	15
18-19	1.20	8.9	10.1

Tabla 16. Dimensiones de las tuberías (diámetro externo e interno)

TUBERÍAS	Diámetro externo	Espesor	Diámetro interno
	(mm)	(mm)	(mm)
Tubería HDPE 10" SDR11	273	28.4	216.2
Tubería INOX 10" SCH 10	273.1	4.19	264.72

Tabla 17. Diámetros de tuberías HDPE e INOX.

Para el cálculo de las pérdidas locales en la yee de inox en el ingreso y salida se tiene una contracción y expansión debido a la diferencia de diámetros por el material (HDPE e INOX) para ello se usó las ecuaciones 27 y 28.

YEE DE INOX	K
Expansión brusca (Tubería HDPE - Tubería INOX)	0.11
Contracción brusca (Tubería INOX - Tubería HDPE)	0.35
Suma de coeficientes en Yee	0.46

Tabla 18. Coeficientes de pérdidas locales en la yee de INOX.

Tubería 3	
Propiedad	Valor
*ID Tubería	3
*Nudo Inicial	3
*Nudo Final	4
Descripción	
Etiqueta	
*Longitud	30
*Diámetro	223
*Rugosidad	0.05
Coef. de Pérdidas	0
Estado Inicial	Abierto
Coef. Flujo	

Figura 57: Tubería N°3 de HDPE, longitud (m), Diámetro (mm), Rugosidad (mm) y coeficiente de pérdidas (K constante).

Tubería 8	
Propiedad	Valor
*ID Tubería	8
*Nudo Inicial	8
*Nudo Final	9
Descripción	
Etiqueta	
*Longitud	1
*Diámetro	264
*Rugosidad	0.046
Coef. de Pérdidas	0.46
Estado Inicial	Abierto
Coef. Flujo	

Figura 58: Tubería N°8 de INOX Yee, longitud (m), Diámetro (mm), Rugosidad (mm) y coeficiente de pérdidas (K constante).

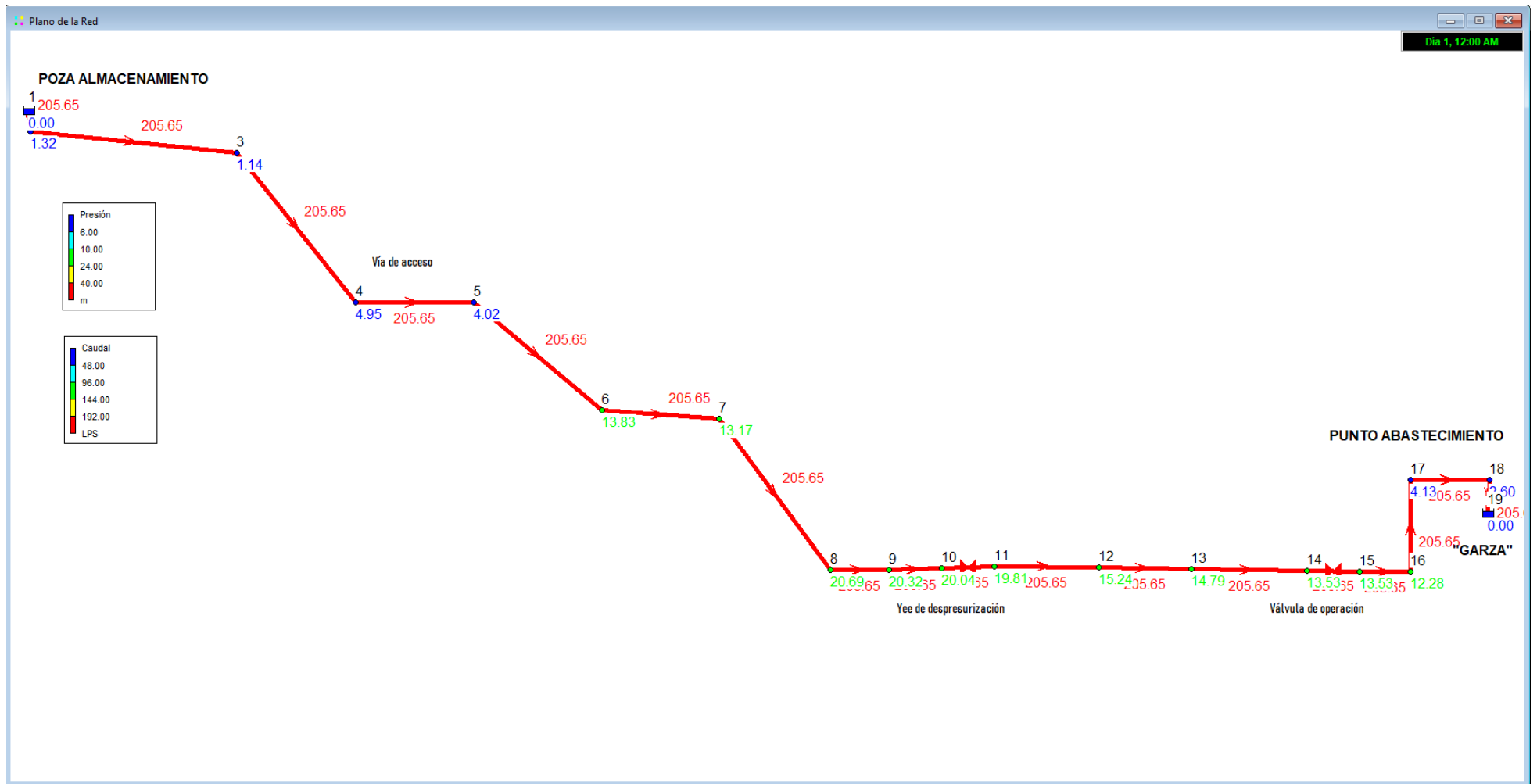


Figura 59: Cálculos proporcionados por EPANET línea de conducción Poza- "Garza"

3.3. Validación de datos de los tomados en campo (línea de conducción)

3.3.1. Simulación por EPANET

El punto de control n° 12 de la figura 59 nos arroja los siguientes resultados para poder realizar el cálculo de la tubería de inyección hacia Venturi.

Resultados de análisis por EPANET (Punto de control)

- Presión punto n° 12: 15.24 m.c.a.
- Caudal en tubería de conducción: 205.65 l/s

3.3.2. Toma de datos en tubería de conducción

Para la toma de muestras en el punto de monitoreo se usó manómetro de muelle tubular en acero inoxidable de la marca WIKA y para la medición del caudal se empleó un flujómetro ultrasónico de la marca EUROSONIC modelo 2000 HH, teniendo los siguientes resultados (Ver figura 60).

- Presión punto N° 12: 22 Psi (15.46 m.c.a.)
- Caudal en tubería de conducción: 195.24 l/s



Figura 60: Fotografía de medición de caudal y presión en el punto de control n° 12.

3.3.3. Comparación de resultados EPANET y datos de campo.

Como se puede evidenciar los cálculos en EPANET vs los medidos en campo tiene una variación de 2% correspondiente a la presión, y un caudal con una variación del 5%. Se puede concluir que los cálculos y los valores reales se aproximan por ello el modelo en EPANET está muy próximo a las condiciones reales, puesto que las mediciones con el flujómetro también nos arroja valores de variación de 0.5% de acuerdo a manual Se tomarán como referencia ambos valores para poder realizar los cálculos de diseño de Inyector Venturi.

3.4. Diseño de inyector Venturi.

Luego de realizar el perfil hidráulico de la línea de conducción de acuerdo a la figura 59, se tendrá las siguientes consideraciones para el diseño del sistema de inyección a través del Venturi:

A) Condiciones de ubicación

- a) Válvula de regulación de inyector Venturi debe estar muy próxima a la válvula de operación, debido a que no siempre se abastece de aditivo supresor de polvo; ante temas de emergencia se abastece de solo agua tratada (sin aditivo) para apagar posibles incendios que se puedan presentar en los equipos dentro de la operación o alguna otra facilidad.
- b) Tramos de 1-3 inaccesible (ver figura 61)
- c) Tramos 4-5 vía de acceso, en caso de realizarse la instalación al costado se acceso estaría expuesto a robos, tránsito de vehículos. (ver figura 61).
- d) Además los ítems b y c no serían los más óptimos y esto se puede apreciar en el perfil hidráulico de la figura 59, donde los tramos del 1 al 5 tienen presiones menores a 5 m.c.a. y para un correcto funcionamiento se debe tener presiones mayores y generar un presión menor para la succión correspondiente.
- e) De acuerdo a Norma ISO 5167-1:2003 ítem 7.2 las longitudes deben ser rectas aguas arriba y aguas abajo. Con ello la única zona para ser implementada sería en la zona verde de acuerdo a la figura 62.



Figura 61: *Fotografía de zona inaccesible para ubicación de inyector*

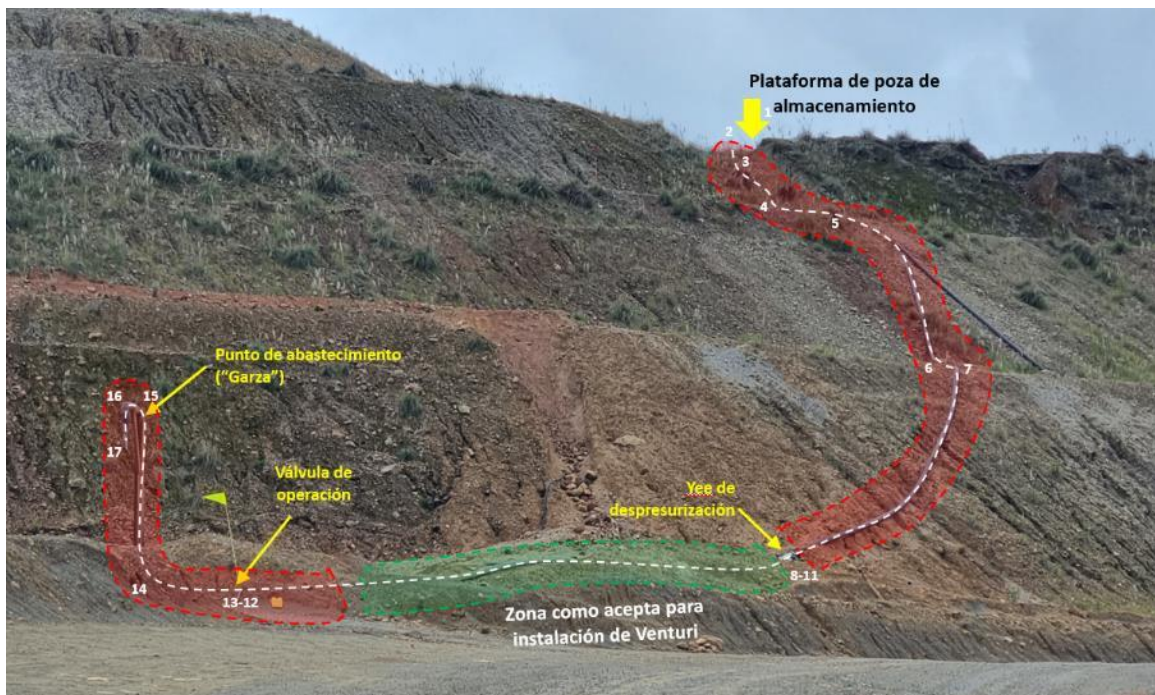


Figura 62: *Fotografía de vista frontal de tubería de conducción.*

B) Condiciones constructivas

- El diseño del inyector Venturi será en 10 pulgadas del mismo diámetro de la tubería de conducción.
- El material para la fabricación será de tubería acero inoxidable (INOX), Norma ASTM 312, para las uniones se usará soldadura de acuerdo a Norma ISO 5167-1:2003 para

fabricación de tubo de Venturi especificados en ítem 7 (Requisitos de instalación) y 7.1.4. de dicha Norma.

- Se usarán bridas ANSI clase 150 de 10 pulgadas de diámetro de acuerdo a Norma ISO 5167-1:2003 especificado en el ítem 7.1.3.
- Se instalarán manómetros para verificación de presión a lo largo del inyector Venturi, para su construcción se empleará tubería de inox de ½ pulgada, para hacer uso de este diámetro se va a verificar con el diámetro máximo para orificios de acuerdo a Norma ISO 5167-1:2003 ítem 7.1.6 el cual especifica que los orificios de drenaje menores a $0.08D$, con ello nos aseguramos que no interfiera en las mediciones o funcionamiento puesto que los manómetros no se usarán como orificios de drenaje y de esta manera estaría cumpliendo con la Norma.

C) Condiciones generales para diseño de inyector Venturi

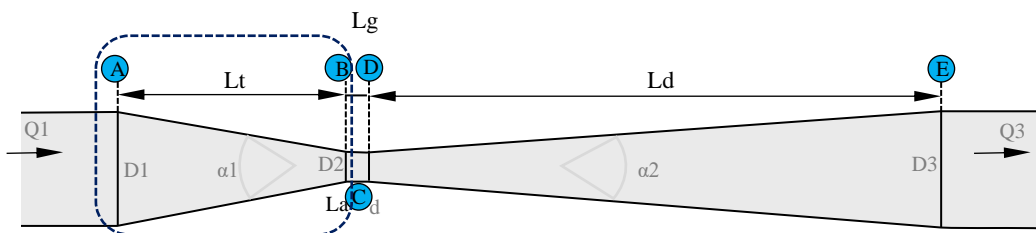


Figura 63: Detalle de medidas de inyector Venturi sección convergente (tobera)

La sección convergente de los Venturi clásicos de acuerdo a Norma ISO 5167-1:2003 ítem 5.2.3, tiene las siguientes características geométricas (especificadas en marco teórico en diseño de Inyector Venturi – Geometría) los cuales se detallan a continuación:

- α_1 : el ángulo debe ser comprendido entre $21^\circ \pm 1^\circ$.
- L_t : la longitud convergente debe ser $2.7 (D_1 - D_2)$.
- La longitud del cilindro previo a la sección A debe ser igual al diámetro D_1 .
- No debe existir ninguna curvatura previo al ingreso de la sección A.
- Las uniones deben estar limpias y libres de soldadura para su correcto funcionamiento.

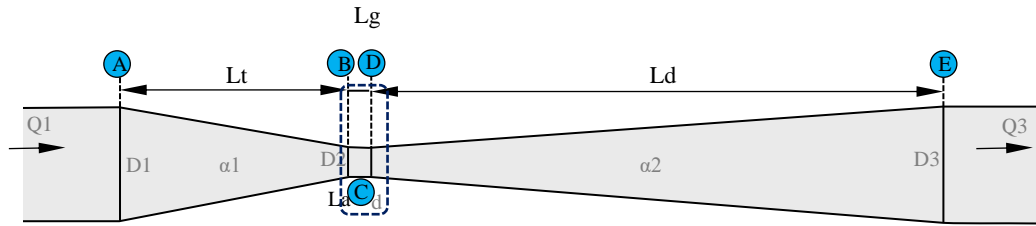


Figura 64: *Detalle de medidas de inyector Venturi en cuello.*

El cuello C debe ser cilíndrico con un diámetro D_2 , y cuya longitud debe ser de $D_2 \pm 0.03 * D_2$. Así mismo el diámetro de interno del cuello no debe diferenciarse en más de 0.1% del valor del diámetro medio (Organización Internacional de Normalización [ISO 5167-4], 2003). Para la construcción del cuello de Venturi se considera una tubería de acero inoxidable de 6 pulgadas con Norma ASTM A312 que cumple con los valores establecidos en la construcción de inyector Venturi. Y la rugosidad de acuerdo a Norma ISO 5167-4 estable que debe ser menor a $10^{-4} * D_2$ (del diámetro del cuello de garganta de acuerdo a ítem 5.2.7 de Norma ISO 5167-4) haciendo una comparación de la rugosidad para una tubería de acero inoxidable 6 pulgadas tiene lo siguiente:

- De acuerdo a Norma ISO 5167-4 = $10^{-4} * (6'') = 10^{-4} * (264.67\text{mm}) = \mathbf{0.026467\text{mm}}$
- De acuerdo a Hamid Bidmus, 2019= 57 micropulgadas = $\mathbf{0.0014\text{mm}}$

Como se puede verificar que la tubería de acero inoxidable Norma ASTM A312 tiene una rugosidad de 0.0014 mm. para la tubería de 6 pulgadas, cumple con la Norma ISO 5167-4 cuya rugosidad mínima requerida es de 0.026467mm.

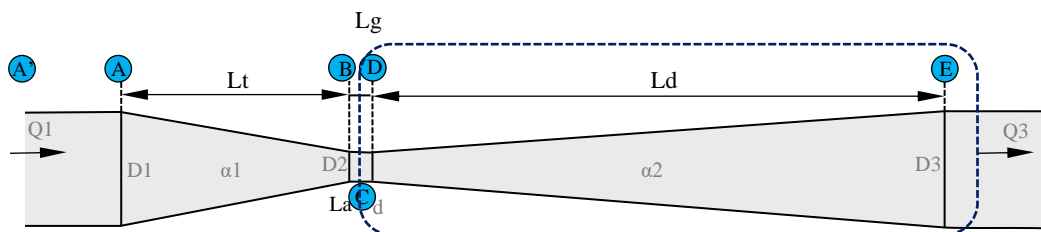


Figura 65: *Detalle de medidas de inyector Venturi en sección divergente..*

La sección divergente debe tener un ángulo α_2 comprendido entre 7° y 8° de acuerdo a la recomendación de la Norma ISO 5167-4 ítem 5.2.8. Para la presente tesis se considera el diseño

de un inyector Venturi con la sección convergente y divergente de chapa de hierro en bruto soldada y de acuerdo a Norma ISO 5167-4 ítem 5.2.10 se tiene las siguientes consideraciones:

- Longitud mínima de A' - A debe ser igual a D1.
- No existen curvaturas en las uniones convergentes y divergentes con el cuello o garganta (para el caso de Venturi maquinado o fundido si se considera los radios de curvatura), sino solo se dejarán con la soldadura que sirve para unir ambos extremos.

D) Medidas de diámetros máximos y relación aceptada por Norma

Para la construcción del inyector Venturi se considera como chapa soldada para sección convergente y divergente, para los tubos de ingreso y salida se considera como tuberías sin costura que cumplan con Norma ASTM A312 en acero inoxidable 304L.

Aplicando la ecuación 14 en función de velocidades de ingreso (V_1), considerando como datos fijos el diámetro de la tubería de ingreso (10" SCH20) el cual tiene un diámetro interno de 260.35 mm, para la rugosidad de las paredes se considera la ecuación 29 para construcción de tubos Venturi con chapas soldadas, brindada por la ISO 5167-4, 2003. Realizando los cálculos de rugosidad en función del diámetro resulta 0.103 como mínimo, este valor al ser comparado con el valor de 0.046 proporcionado por Bidmus H.,2019, el valor es menor por lo que el material estaría cumpliendo para la fabricación del Venturi.

Para poder definir el diámetro se consideran los diámetros nominales menores a 10" considerando la Norma ASTM A312 en acero inoxidable 304L de acuerdo a tabla 17. Donde se muestran los diámetros internos de las tuberías, así como la relación de diámetros en relación a el diámetro de troncal principal (10" SCH20)

Descripción	Diámetro Nominal	Diámetro Interno (mm)	Rugosidad* (mm)	Relación diámetros (β)
D1 Diámetro de troncal (D1)	10" SCH20	260.35	0.103	
D2	Diámetro propuesto 1	8" SCH20	206.38	0.79
	Diámetro propuesto 2	6" SCH20	157.96	0.61
	Diámetro propuesto 3	4" SCH10	108.20	0.42
	Diámetro propuesto 4	3" SCH10	82.80	0.32

Tabla 19. Diámetros para tuberías de INOX.

El cálculo se realiza considerando el agua a una temperatura de 15°C, y las consideraciones geométricas del diseño para tubos Venturi ($\alpha_1=21^\circ$, $\alpha_2=7^\circ$, $D_1=260.35\text{mm}$, $\varepsilon=0.103$, $T=10^\circ\text{C}$)

Temperatura (°C)	Viscosidad cinemática (m ² /s)
10	1.30E-06

Tabla 20. *Viscosidad cinemática.*

Geometría	Símbolo	Valor
Ángulo de tobera	α_1	21 °
Ángulo de difusor	α_2	7 °

Tabla 21. *Ángulos de relaciones geométricas.*

En el gráfico 1, se observa las pérdidas de carga producidas por el diámetro de la garganta como es lógico y se puede evidenciar las mayores pérdidas de carga se producen por el diámetro de 3” y las de menores pérdidas con el diámetro de 8”. Es importante considerar el diámetro de la garganta puesto que va a limitar el caudal de abastecimiento hacia los cisternas gigantes, al tener mayores pérdidas se tendrá menor caudal de abastecimiento como se puede observar en el gráfico 2, con la tubería de 3”. Los cisternas riegan toda la operación y las demoras significan menores áreas de riego sin cubrir o incluir un camión cisterna adicional el cual involucran costos de operación y mantenimiento. Así mismo de acuerdo a las mediciones en campo sin aún tener el Venturi instalado se tiene un caudal de 195 l/s y una presión de 14.79 m.c.a (EPANET) y 15.46 m.c.a. El gráfico 1 y gráfico 2 nos muestran que los diámetros más óptimos de acuerdo a las necesidades operativas se podría considerar entre 4 pulgadas y 8 pulgadas sin embargo para poder reducir la presión en la garganta se tendrá que optar por el diámetro menor, así mismo tener en cuenta que la relación de diámetros con 8 pulgadas es de 0.79, dicho valor excede al máximo permitido para un Venturi clásico construido en chapa cuyo valor es de 0.70 y el diámetro de 3 pulgadas tampoco cumple por tener un valor de 0.32 cuando el menor valor en relación es de 0.4 (ver tabla 12). Realizando el cálculo de presiones en la garganta (P_2/γ) y en la salida del difusor (P_3/γ) para los dos diámetros considerados como aceptables (diámetro de 6 pulgadas y 4 pulgadas), y haciendo uso de los cálculos en EPANET para las presiones y caudal de todo el sistema y los mostrados en ítem 3.3 como datos iniciales se tiene las siguientes consideraciones especificadas en los ítems a y b.

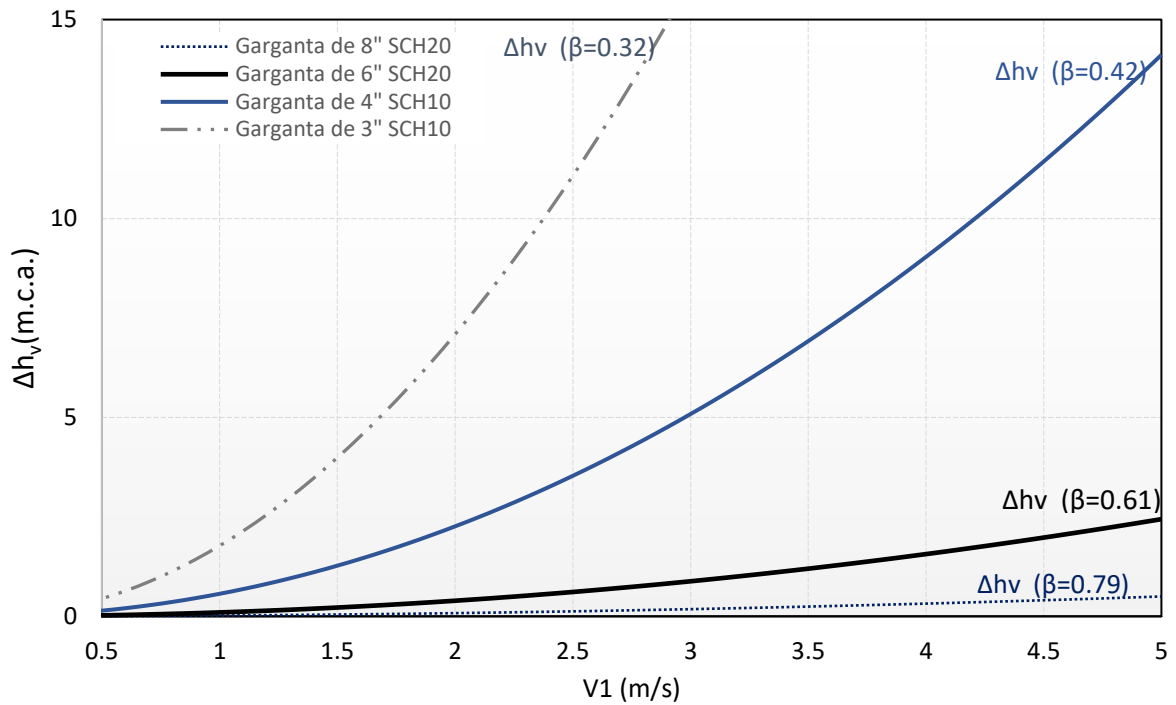


Gráfico 1: Evolución de pérdida de carga en función de la velocidad de ingreso y diferentes relaciones de diámetros para tuberías INOX con diámetros comerciales

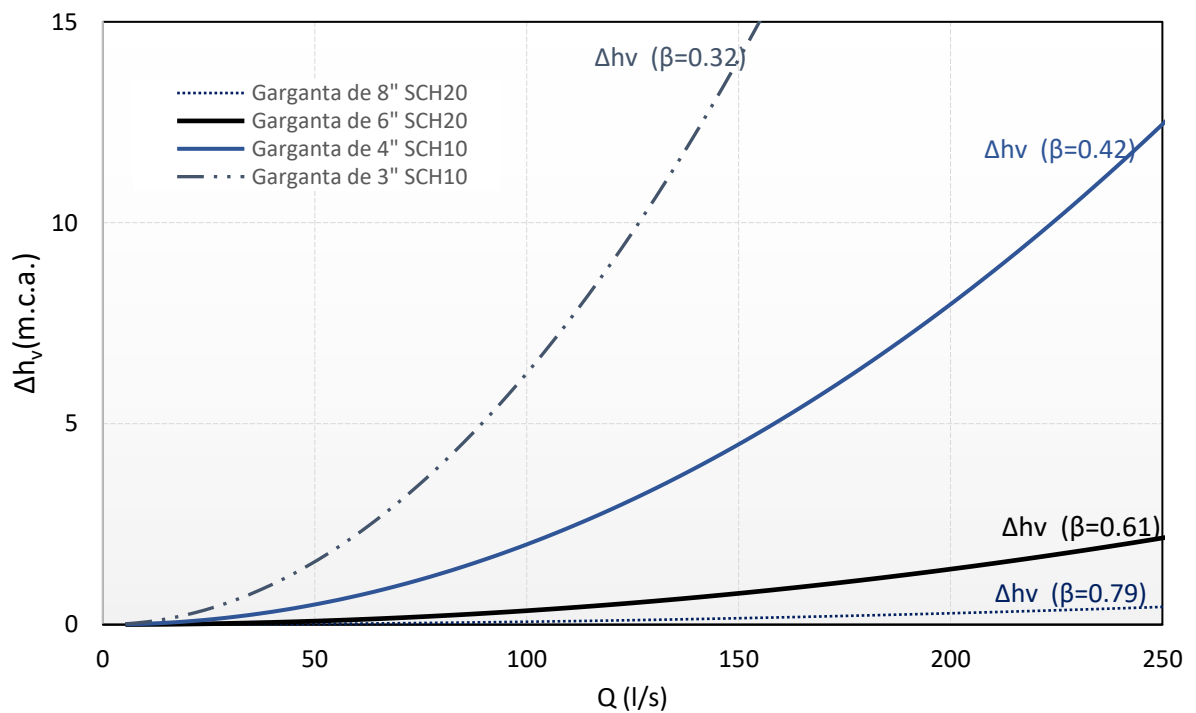


Gráfico 2: Evolución de pérdida de carga en función del caudal de ingreso y diferentes relaciones de diámetros para tuberías INOX con diámetros comerciales

a) Para diámetro de 4 pulgadas

De la información mostrada en el punto 12, la presión inicial de 15.24 m.c.a. con un caudal de 205 l/s, así como los diámetros fijos $D1=260.35\text{mm}$ y $D2=108.2\text{ mm}$ (diámetro de 4 pulgadas nominal), temperatura del agua 10°C , $\alpha_1=21^{\circ}\text{C}$, $\alpha_2=7^{\circ}\text{C}$. Se tiene la relación de diámetros de 0.42 ($\beta=0.42$). Aplicando las ecuaciones 9, ecuación 12 y ecuación 13 se tiene los cálculos de pérdidas especificados en la tabla 24, así mismo las presiones en la garganta y el difusor. Realizando el ajuste para de pérdidas de carga con el caudal que pasaría por el sistema de Venturi con un diámetro de garganta de 4 pulgadas se tiene los valores especificados en la tabla 24. La tabla 22 nos muestra la cantidad de aproximaciones realizadas y con ello tener el ajuste de carga en el ingreso Venturi ($P1/\gamma$), la carga en la sección de la garganta ($P2/\gamma$) y la presión de salida.

Con la implementación del Venturi de 10" SCH20 y una garganta de 4" SCH10 de acuerdo a normativa ISO se tendría una presión de -4 m.c.a. (ver tabla 23). Como se puede mostrar en el gráfico 03 se requiere de al menos un caudal de 170 l/s y una presión superior a 20.35 m.c.a. para asegurar la succión por la garganta del Venturi. Sin embargo dada las condiciones de la poza y la línea de bombeo se tiene una presión de 20.35 m.c.a y un caudal de 188 l/s con ello se asegura la succión del supresor de polvo (las pérdidas producidas en la tubería de succión del supresor se calculan en el item G.)

EPANET				
Aproximaciones	$P1/\gamma$	$P3/\gamma$	$P1/\gamma-P3/\gamma$	Caudal
1	15.24 mca	15.25 mca	-0.01 mca	205 l/s
2	21.41 mca	12.76 mca	8.65 mca	184 l/s
3	20.06 mca	13.31 mca	6.75 mca	189 l/s
4	20.35 mca	13.21 mca	7.14 mca	188 l/s

Tabla 22. Cálculo de caudal en función de la presión en línea de abastecimiento EPANET.

Aproximaciones	Caudal	$P1/\gamma$	$P2/\gamma$	$P3/\gamma$	$P1/\gamma-P3/\gamma$
1	205 l/s	15.24 mca	-13.60 mca	7.08 mca	8.16 mca
2	184 l/s	21.41 mca	-1.92 mca	14.69 mca	6.72 mca
3	189 l/s	20.06 mca	-4.64 mca	12.94 mca	7.12 mca
4	188 l/s	20.35 mca	-4.07 mca	13.31 mca	7.04 mca

Tabla 23. Cálculo de pérdidas y presiones de sistema Venturi.

Para diámetro propuesto 4 pulgadas							
Caudal	D1	D2	Pérdida tobera	Pérdida garganta	Pérdida difusor	(β)-1	
	260.35 mm	108.2 mm				0.42	
	V1	V2	Δht	Δhg	Δhd	P2/Y	P3/Y
	(l/s)	(m/s)	(m/s)	(m)	(m)	(m)	P2/Y - 4" SCH20
5.3	0.1	0.6	0.003065573	0.000	0.00	20.33	20.34
10.6	0.2	1.2	0.012193503	0.002	0.01	20.27	20.33
16.0	0.3	1.7	0.02737445	0.003	0.02	20.17	20.30
21.3	0.4	2.3	0.04860714	0.006	0.04	20.04	20.26
26.6	0.5	2.9	0.075891163	0.009	0.06	19.86	20.21
31.9	0.6	3.5	0.109226352	0.013	0.08	19.64	20.15
37.3	0.7	4.1	0.148612625	0.018	0.11	19.39	20.07
42.6	0.8	4.6	0.194049935	0.023	0.15	19.10	19.99
47.9	0.9	5.2	0.245538253	0.029	0.18	18.76	19.89
53.2	1	5.8	0.303077563	0.036	0.23	18.39	19.78
58.6	1.1	6.4	0.366667852	0.043	0.28	17.98	19.66
63.9	1.2	6.9	0.436309113	0.052	0.33	17.53	19.53
69.2	1.3	7.5	0.512001339	0.061	0.38	17.04	19.39
74.5	1.4	8.1	0.593744527	0.070	0.45	16.51	19.24
79.9	1.5	8.7	0.681538673	0.080	0.51	15.94	19.08
85.2	1.6	9.3	0.775383774	0.091	0.58	15.33	18.90
90.5	1.7	9.8	0.87527983	0.103	0.66	14.69	18.71
95.8	1.8	10.4	0.981226838	0.115	0.74	14.00	18.52
101.1	1.9	11.0	1.093224797	0.128	0.82	13.27	18.31
106.5	2	11.6	1.211273706	0.142	0.91	12.51	18.09
111.8	2.1	12.2	1.33537354	0.157	1.00	11.71	17.86
117.1	2.2	12.7	1.465524348	0.172	1.10	10.86	17.61
122.4	2.3	13.3	1.601726105	0.188	1.20	9.98	17.36
127.8	2.4	13.9	1.743978809	0.204	1.31	9.06	17.09
133.1	2.5	14.5	1.892282461	0.222	1.42	8.10	16.82
138.4	2.6	15.1	2.046637059	0.240	1.53	7.10	16.53
143.7	2.7	15.6	2.207042604	0.258	1.65	6.06	16.23
149.1	2.8	16.2	2.373499096	0.278	1.78	4.98	15.92
154.4	2.9	16.8	2.546006534	0.298	1.91	3.87	15.60
159.7	3	17.4	2.724564918	0.319	2.04	2.71	15.27
165.0	3.1	17.9	2.909174248	0.340	2.18	1.51	14.92
170.4	3.2	18.5	3.099834523	0.362	2.32	0.28	14.57
175.7	3.3	19.1	3.296545745	0.385	2.47	-0.99	14.20
181.0	3.4	19.7	3.499307911	0.409	2.62	-2.31	13.82
186.3	3.5	20.3	3.708121024	0.433	2.78	-3.66	13.43
191.6	3.6	20.8	3.922985081	0.458	2.94	-5.05	13.03
197.0	3.7	21.4	4.143900084	0.484	3.10	-6.48	12.62
202.3	3.8	22.0	4.370866032	0.510	3.27	-7.95	12.20
207.6	3.9	22.6	4.603882926	0.537	3.45	-9.46	11.76
212.9	4	23.2	4.842950764	0.565	3.63	-11.01	11.32
218.3	4.1	23.7	5.088069548	0.594	3.81	-12.60	10.86
223.6	4.2	24.3	5.339239276	0.623	4.00	-14.22	10.39
228.9	4.3	24.9	5.596459949	0.653	4.19	-15.89	9.91

Tabla 24. Cálculo de pérdidas y presiones en garganta y difusor.

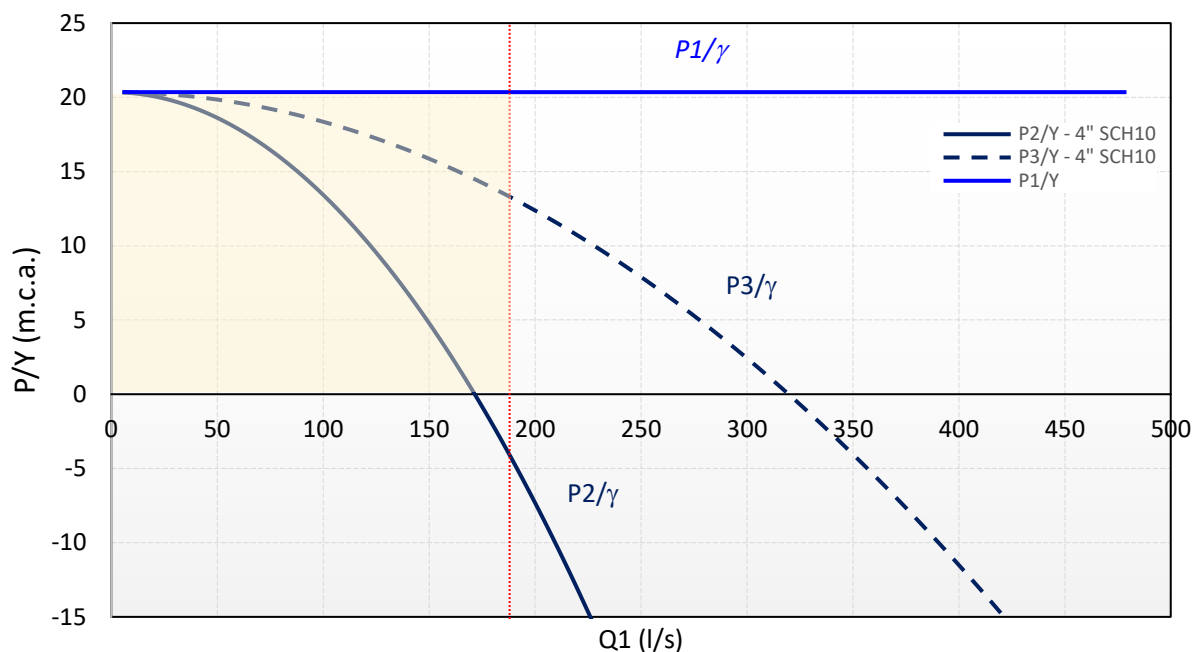


Gráfico 3: Evolución de presiones en garganta y salida de Venturi para diámetro 4”.

b) Para diámetro de 6 pulgadas

Se realizó los cálculos similares para el diámetro de 4 pulgadas, partiendo de como presión inicial de 15.24 m.c.a. con un caudal de 205 l/s, y diámetros fijos $D_1=260.35\text{mm}$ y $D_2=158\text{mm}$ (diámetro de 6 pulgadas nominal), temperatura del agua 10°C , $\alpha_1=21^\circ\text{C}$, $\alpha_2=7^\circ\text{C}$. Se tiene la relación de diámetros de 0.61 ($\beta=0.61$). Aplicando las ecuaciones 9, ecuación 12 y ecuación 13 se tiene los cálculos de pérdidas especificados en la tabla 27, así mismo las presiones en la garganta y el difusor. Realizando el ajuste para de pérdidas de carga con el caudal que pasaría por el sistema de Venturi con un diámetro de garganta de 6 pulgadas se tiene los valores especificados en la tabla 27. La tabla 26 nos muestra la cantidad de aproximaciones realizadas y con ello tener el ajuste de carga en el ingreso Venturi (P_1/γ), la carga en la sección de la garganta (P_2/γ) y la presión de salida.

Con la implementación del Venturi de 10” SCH20 y una garganta de 6” SCH20 de acuerdo a normativa ISO se tendría una presión de 10.93 m.c.a. (ver tabla 26). Como se puede mostrar en el gráfico 4 se requiere de al menos un caudal de 350 l/s y una presión superior a 16.36 m.c.a. para asegurar la succión por la garganta del Venturi. Sin embargo dada las condiciones de la poza y la línea de bombeo se tiene un caudal de 203 l/s, por ello para el funcionamiento del sistema de Venturi con una garganta de 6 pulgadas se baja la presión de 15.45 m.c.a. a 10.39

m.c.a. con una presión superior a la indicada es suficiente para iniciar la inyección del supresor de polvo (las pérdidas producidas en la tubería de succión del supresor se calculan en el ítem G.)

EPANET

Aproximaciones	P1/γ	P3/γ	P1/γ-P3/γ	Caudal
1	15.45 mca	15.25 mca	0.20 mca	205 l/s
2	16.36 mca	14.87 mca	1.49 mca	201 l/s
3	16.27 mca	14.91 mca	1.36 mca	203 l/s
4	16.36 mca	14.87 mca	1.49 mca	203 l/s

Tabla 25. Cálculo de caudal en función de la presión en línea de abastecimiento EPANET.

Aproximaciones	Caudal	P1/γ	P2/γ	P3/γ	P1/γ-P3/γ
1	205 l/s	15.47 mca	9.86 mca	13.98 mca	1.49 mca
2	201 l/s	16.36 mca	11.22 mca	15.02 mca	1.34 mca
3	203 l/s	16.27 mca	10.55 mca	14.78 mca	1.49 mca
4	203 l/s	16.36 mca	10.93 mca	14.94 mca	1.42 mca

Tabla 26. Cálculo de pérdidas y presiones de sistema Venturi.

Para diámetro propuesto 6 pulgadas							
Caudal	D1	D2	Pérdida tobera	Pérdida garganta	Pérdida difusor	(β)-1	
	260.35 mm	158.0 mm				0.61	
	V1	V2	Δht	Δhg	Δhd	P2/Y	P3/Y
(l/s)	(m/s)	(m/s)	(m)	(m)	(m)	P2/Y - 6" SCH20	P3/Y - 6" SCH20
5.3	0.1	0.3	0.000520283	0.000	0.00	16.36	16.36
10.6	0.2	0.5	0.00205994	0.000	0.00	16.34	16.36
16.0	0.3	0.8	0.004614039	0.001	0.00	16.33	16.35
21.3	0.4	1.1	0.008181285	0.001	0.01	16.30	16.34
26.6	0.5	1.4	0.012761105	0.002	0.01	16.27	16.33
31.9	0.6	1.6	0.018353198	0.003	0.01	16.22	16.32
37.3	0.7	1.9	0.024957387	0.004	0.02	16.18	16.31
42.6	0.8	2.2	0.03257356	0.005	0.03	16.12	16.30
47.9	0.9	2.4	0.041201644	0.006	0.03	16.06	16.28
53.2	1	2.7	0.050841588	0.008	0.04	15.98	16.26
58.6	1.1	3.0	0.061493359	0.009	0.05	15.91	16.24
63.9	1.2	3.3	0.07315692	0.011	0.06	15.82	16.22
69.2	1.3	3.5	0.085832257	0.013	0.07	15.72	16.19
74.5	1.4	3.8	0.099519353	0.015	0.08	15.62	16.17
79.9	1.5	4.1	0.114218197	0.017	0.09	15.51	16.14
85.2	1.6	4.3	0.129928778	0.019	0.10	15.40	16.11
90.5	1.7	4.6	0.14665109	0.021	0.12	15.27	16.07
95.8	1.8	4.9	0.164385126	0.024	0.13	15.14	16.04
101.1	1.9	5.2	0.18313088	0.027	0.15	15.00	16.00
106.5	2	5.4	0.202888349	0.029	0.16	14.86	15.97
111.8	2.1	5.7	0.223657528	0.032	0.18	14.70	15.93
117.1	2.2	6.0	0.245438415	0.036	0.20	14.54	15.88
122.4	2.3	6.2	0.268231007	0.039	0.21	14.37	15.84
127.8	2.4	6.5	0.292035303	0.042	0.23	14.20	15.79

133.1	2.5	6.8	0.316851299	0.046	0.25	14.01	15.75
138.4	2.6	7.1	0.342678994	0.049	0.27	13.82	15.70
143.7	2.7	7.3	0.369518388	0.053	0.29	13.62	15.64
149.1	2.8	7.6	0.397369478	0.057	0.32	13.41	15.59
154.4	2.9	7.9	0.426232264	0.061	0.34	13.20	15.53
159.7	3	8.1	0.456106745	0.065	0.36	12.98	15.48
165.0	3.1	8.4	0.48699292	0.070	0.39	12.75	15.42
170.4	3.2	8.7	0.518890788	0.074	0.41	12.51	15.36
175.7	3.3	9.0	0.551800348	0.079	0.44	12.27	15.29
181.0	3.4	9.2	0.5857216	0.084	0.46	12.02	15.23
186.3	3.5	9.5	0.620654544	0.089	0.49	11.76	15.16
191.6	3.6	9.8	0.656599178	0.094	0.52	11.49	15.09
197.0	3.7	10.1	0.693555503	0.099	0.55	11.22	15.02
202.3	3.8	10.3	0.731523517	0.104	0.58	10.93	14.94
207.6	3.9	10.6	0.770503222	0.110	0.61	10.64	14.87

Tabla 27. Cálculo de pérdidas y presiones en garganta y difusor.

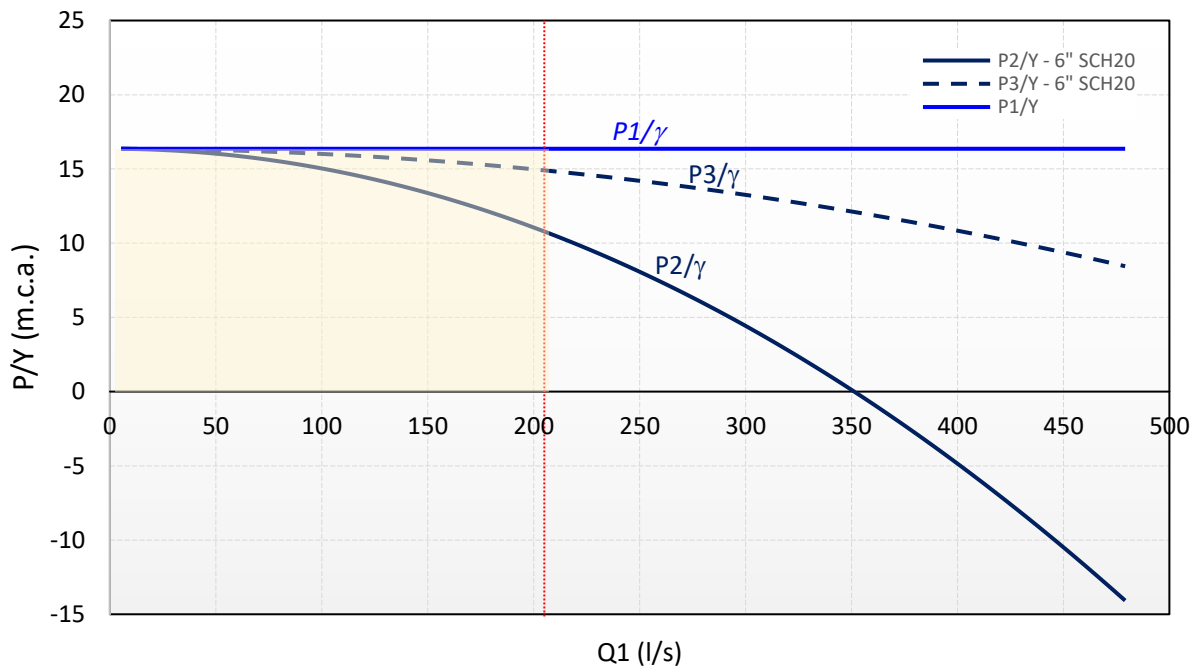


Gráfico 4: Evolución de presiones en garganta y salida de Venturi para diámetro 6”.

La tubería de conducción principal es de 10 pulgadas y la reducción se va a considerar en 6 pulgadas, en el siguiente cuadro se realiza el cálculo de relaciones de diámetros tanto internos como externos para cumplir de acuerdo a Norma ISO de fabricación de Venturi de acuerdo a tabla 12, haciendo una relación de diámetros se tiene los siguientes resultados de la tabla 28.

Descripción	Tubería principal	Tubería cuello
	10" SCH 20	6" SCH 20
Diámetro Nominal	10"	6"
Diámetro real externo	273.1 mm	168.3 mm
Espesor	6.35 mm	5.16 mm
Diámetro real interno	260.4 mm	157.98 mm
Relación (β) - Nominal	0.60	
Relación (β) - Real _{ext}	0.62	
Relación (β) - Real _{int}	0.61	

Tabla 28. Relaciones de diámetros para diseño de Venturi.

E) Criterio de selección de Venturi (detalle de condiciones)

Se requiere que al menos se instalen 08 contenedores de supresor de polvo conectados mediante un manifold para ello se requiere un área de 10 m x 20 m para ubicación de contenedores y espacio para maniobras de izaje para reposición y/o mantenimiento de acuerdo a croquis A3, figura 66 (ver plano en anexo). En la figura 67 se muestra el poco espacio que se tiene en la plataforma 01 para colocar los contenedores por la presencia de canal de drenaje, así mismo se recomienda tener una plataforma amplia para cambio de contenedores.

- Como se puede evidenciar de la información mostrada el espacio en la parte baja a nivel de la plataforma de la instalación del sistema Venturi es reducida por ello se recomienda realizar el diseño del sistema Venturi con una garganta de 6 pulgadas el cual requiere una altura mayor a 10.93 m.c.a. especificado en la tabla 26.
- La plataforma superior se encuentra a una diferencia de cotas de 15 metros desde la cota propuesta como instalación para el inyector Venturi. Por lo que funcionaría sin mayor problema para la inyección del supresor de polvo, así mismo se tienen menores pérdidas en el Venturi y la reducción de flujo es mínima de 205 l/s a 203 l/s. No se requiere cálculos adicionales para la presión de vapor en la succión.

En el ítem G se realiza el cálculo de las pérdidas producidas en la tubería de succión de tal manera de que no sean menores a 10.93 m.c.a.

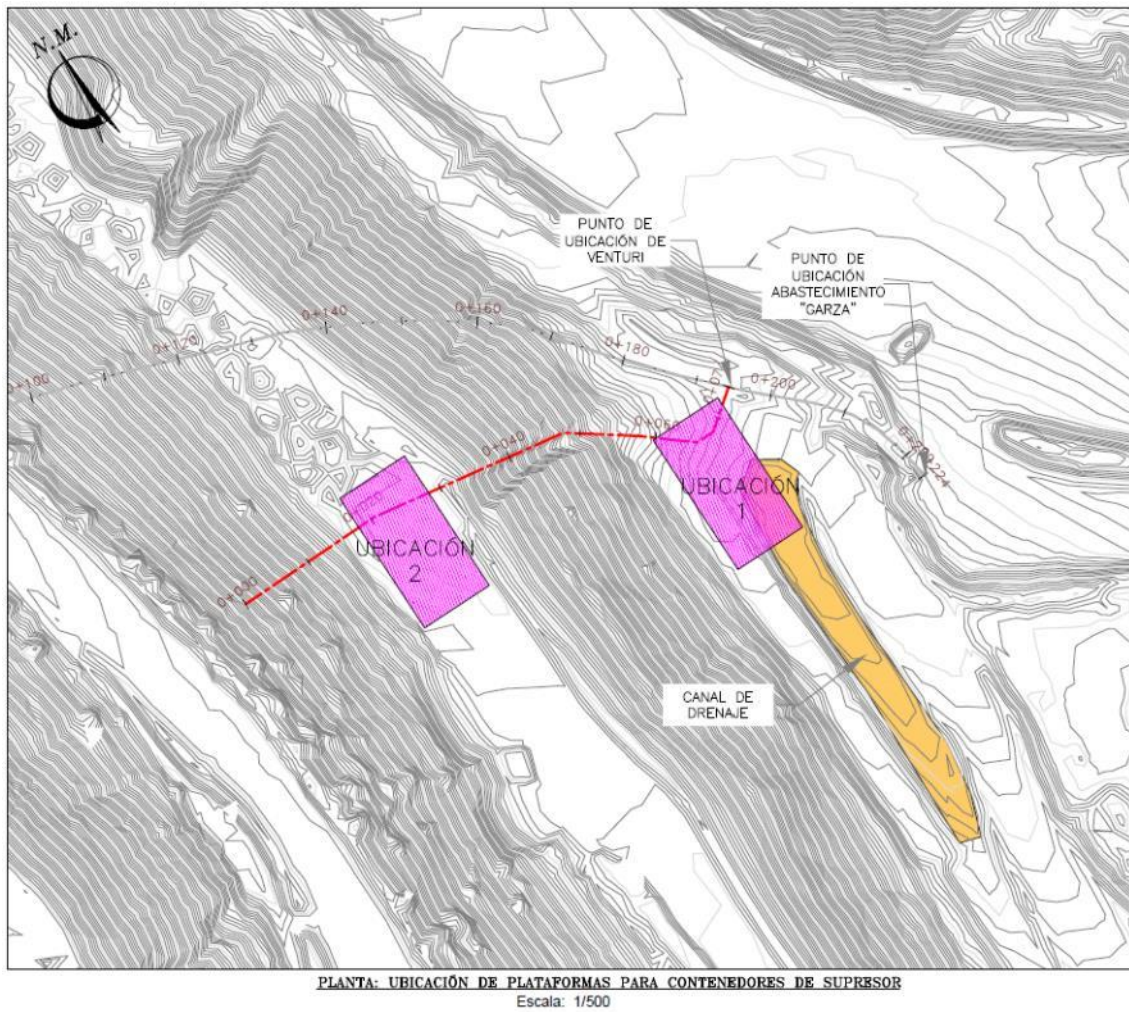


Figura 66: Áreas posibles para instalación de contenedores de supresor de polvo.



Figura 67: Canal de drenaje y cruce de tuberías en plataforma media de garza.

F) Diseño conceptual

A continuación se presenta el diseño conceptual de acuerdo a las condiciones de diseño aplicadas por los ítems anteriores (ver anexo, croquis C0, diseño conceptual de Venturi).

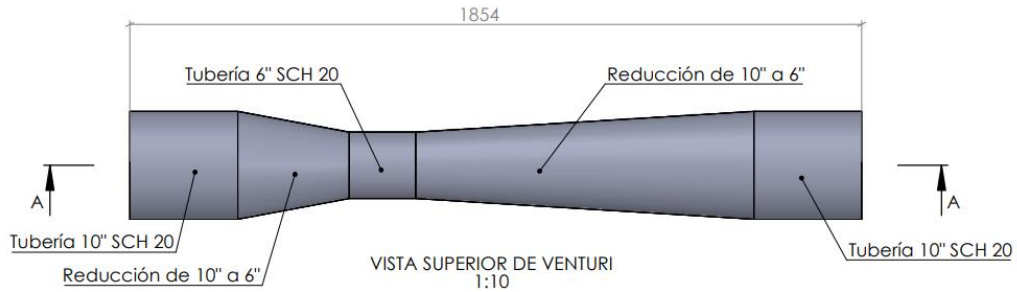


Figura 68: Vista frontal de diseño conceptual Venturi

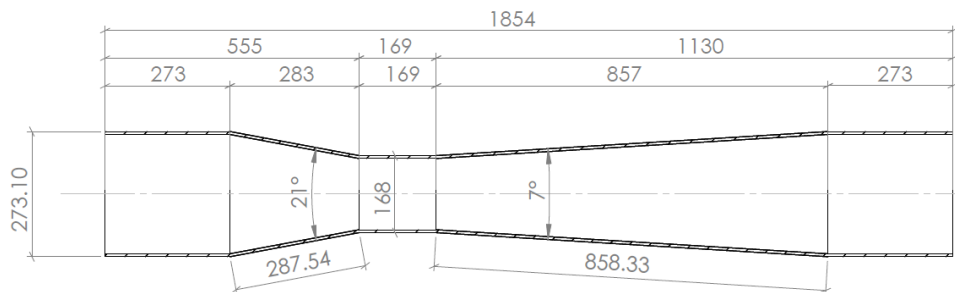


Figura 69: Medidas de diseño Venturi para aplicación de supresor polvo, no considera tubería de ingreso de supresor.

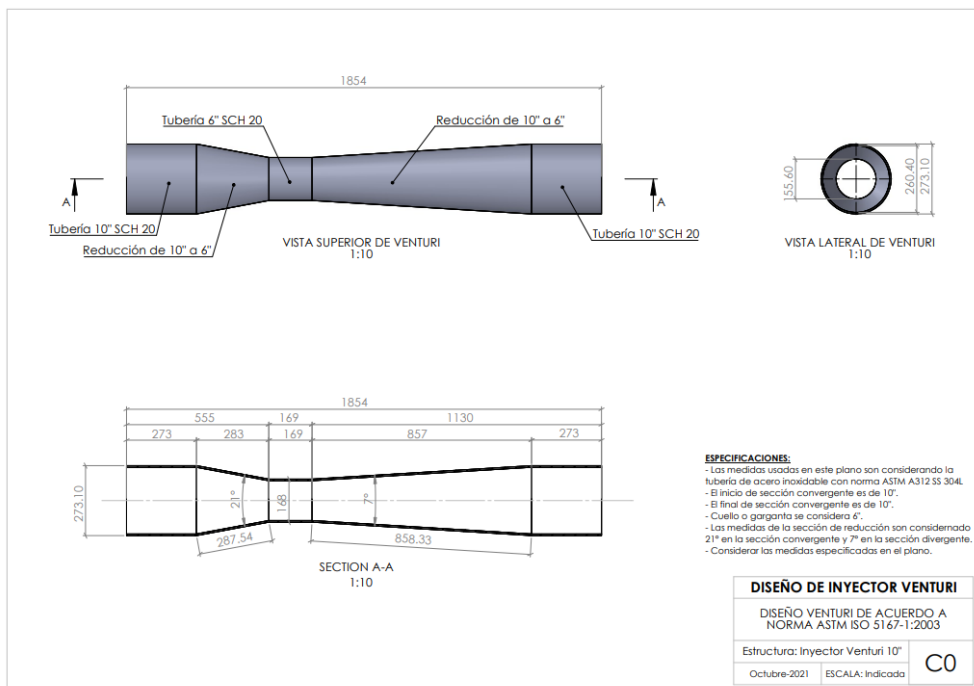


Figura 70: Plano con medidas básicas de diseño Venturi.

G) Diseño de tubería de ingreso para supresor de polvo

Para el diseño del diámetro de inyector de supresor de polvo se considera la presión en la garganta y por lo especificado ítem E se tiene una presión de 10.93 m.c.a. con la válvula abierta al 100% por lo que se requiere una altura mayor a 10.93 m para poder iniciar la succión desde los contenedores. Se tiene una plataforma en la parte superior en la cota 3612 con una diferencia de cotas de 15.47 m. desde la ubicación del inyector proyectado (3596.55). Se realiza el perfil de tubería de inyección para conocer la longitud de tubería necesaria hasta llegar al Venturi (ver croquis A2 (ver en anexo, croquis perfil planta de línea de inyección de supresor de polvo).

- Cota de instalación de Venturi: 3596.55 m.s.n.m.
- Plataforma de instalación de contenedores supresor de polvo: 3612.02 m.s.n.m.
- Diferencia de cota: 15.47 m.
- Volumen de cisterna: 20 000 galones
- Volumen de dosificación para cisterna 60 litros
- Relación de volumen 0.000791889

Con la longitud de 52 metros aproximadamente se realizan los cálculos con el menor diámetro y comparación de diámetros comerciales superiores para poder construir la tubería de inyección, los resultados se muestran en la tabla 30, para ello se consideran las pérdidas por el ingreso, salida y las pérdidas por los accesorios mínimos (válvula de regulación y de retención) especificados en la tabla 29. De los resultados se puede deducir que para que empiece la succión se requiere al menos un diámetro superior a 16.2 mm de diámetro interno. Por ello se considera un diámetro de 3 pulgadas por temas constructivos relacionados a calidad y durabilidad.

Accesorio	Coficiente
Ingreso	1
Salida	1
Válvula globo	10
Válvula check	2.5
Suma	14.5

Tabla 29. *Coficiente de pérdidas para la línea de succión.*

Caudal Venturi	D1	Para garganta 6"		Diámetro de tubería de succión 3"					Diámetro de tubería de succión 16 mm				
		(β)-1		Ls	Re (s)	fs	vs	d	Ls	Re (s)	fs	vs	d
	260 mm	0.61	82.8 mm					16.2 mm					
	V1	P2/γ	P3/γ	Z0	Z0								
(l/s)	(m/s)	(m)	(m)	(m)			(m/s)	(m)	(m)			(m/s)	(m)
5.3	0.1	16.36	16.36	52.0	49.86	1.28	0.001	16.356	52	254.87	0.25	0.020	16.374
16.0	0.3	16.33	16.35	52.0	149.59	0.43	0.002	16.326	52	764.61	0.08	0.061	16.381
26.6	0.5	16.27	16.33	52.0	249.32	0.26	0.004	16.266	52	1274.36	0.05	0.102	16.361
37.3	0.7	16.18	16.31	52.0	349.05	0.18	0.005	16.176	52	1784.10	0.04	0.143	16.314
47.9	0.9	16.06	16.28	52.0	448.77	0.14	0.007	16.056	52	2293.84	0.03	0.184	16.250
58.6	1.1	15.91	16.24	52.0	548.50	0.12	0.009	15.905	52	2803.59	0.03	0.225	16.234
69.2	1.3	15.72	16.19	52.0	648.23	0.10	0.010	15.725	52	3313.33	0.04	0.266	16.289
79.9	1.5	15.51	16.14	52.0	747.96	0.09	0.012	15.515	52	3823.07	0.05	0.307	16.353
90.5	1.7	15.27	16.07	52.0	847.68	0.08	0.013	15.274	52	4332.81	0.05	0.348	16.305
101.1	1.9	15.00	16.00	52.0	947.41	0.07	0.015	15.004	52	4842.56	0.05	0.389	16.268
111.8	2.1	14.70	15.93	52.0	1047.14	0.06	0.016	14.703	52	5352.30	0.04	0.430	16.223
122.4	2.3	14.37	15.84	52.0	1146.87	0.06	0.018	14.373	52	5862.04	0.04	0.470	16.172
133.1	2.5	14.01	15.75	52.0	1246.59	0.05	0.020	14.012	52	6371.78	0.04	0.511	16.112
143.7	2.7	13.62	15.64	52.0	1346.32	0.05	0.021	13.621	52	6881.53	0.04	0.552	16.046
154.4	2.9	13.20	15.53	52.0	1446.05	0.04	0.023	13.201	52	7391.27	0.04	0.593	15.972
165.0	3.1	12.75	15.42	52.0	1545.78	0.04	0.024	12.750	52	7901.01	0.04	0.634	15.890
175.7	3.3	12.27	15.29	52.0	1645.50	0.04	0.026	12.269	52	8410.76	0.04	0.675	15.801
186.3	3.5	11.76	15.16	52.0	1745.23	0.04	0.027	11.758	52	8920.50	0.04	0.716	15.704
197.0	3.7	11.22	15.02	52.0	1844.96	0.03	0.029	11.217	52	9430.24	0.04	0.757	15.599
203.0	3.81	10.89	14.93	52.0	1901.80	0.03	0.030	10.895	52	9720.79	0.04	0.780	15.537
218.3	4.1	10.04	14.71	52.0	2044.41	0.03	0.032	10.045	52	10449.73	0.04	0.839	15.368

Tabla 30. Diámetros de succión para inyector y sus pérdidas.

3.5. Elaboración de planos.

Los planos fueron elaborados de acuerdo a los cálculos realizados, sin embargo del diseño conceptual varía debido a que se considera la Norma ISO para su construcción, por ello para un Venturi clásico con chapa se brindará las medidas necesarias para formar las reducciones de las tuberías de inox de 10" a 6" (diámetros nominales), a continuación se presentan los planos finales para construcción (ver planos C1, C2, C3 y C4 en anexo, diseño de Venturi tipo chapa)

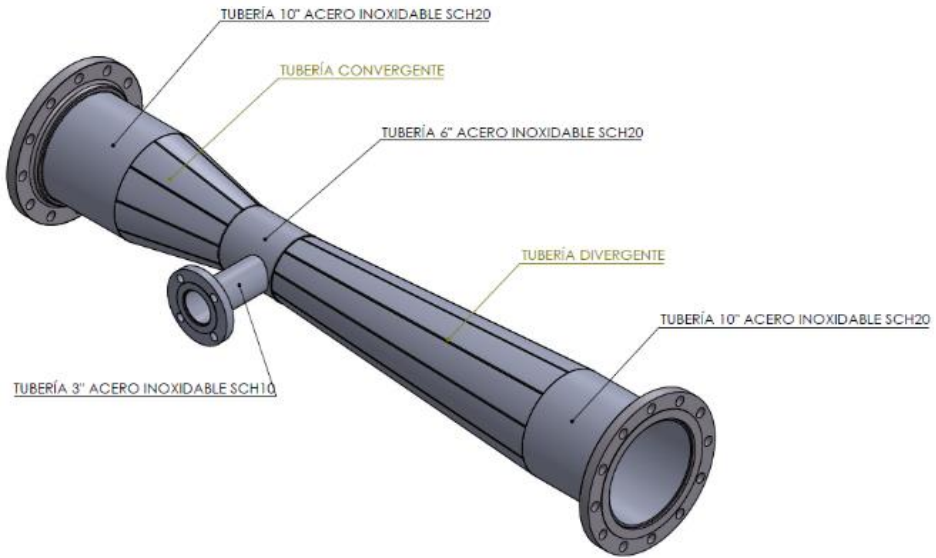


Figura 71: Plano isométrico de Venturi tipo chapa.

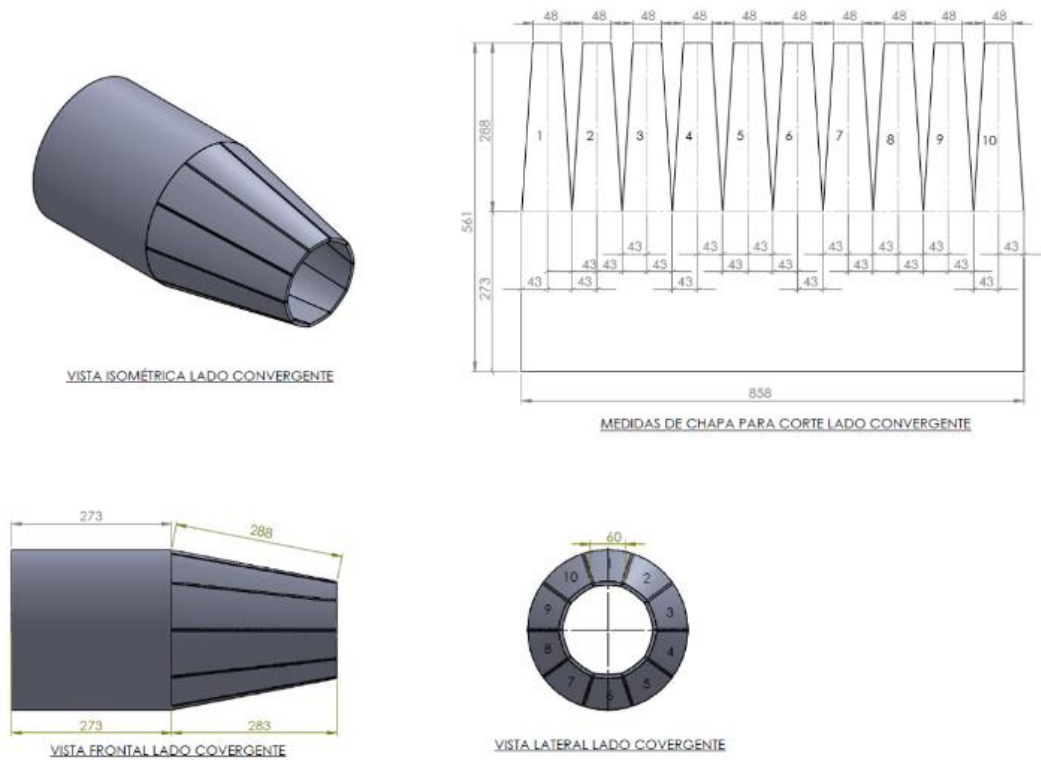


Figura 72: Plano detalle de cortes y construcción para tobera.

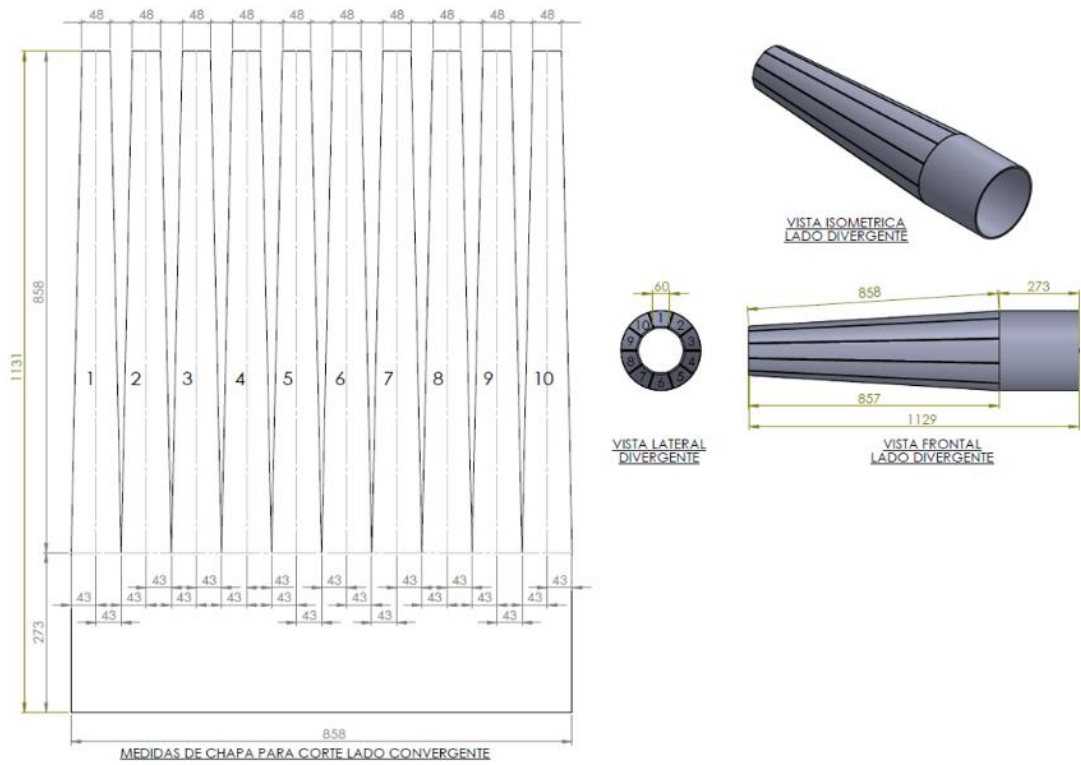


Figura 73: Plano detalle de cortes y construcción para difusor

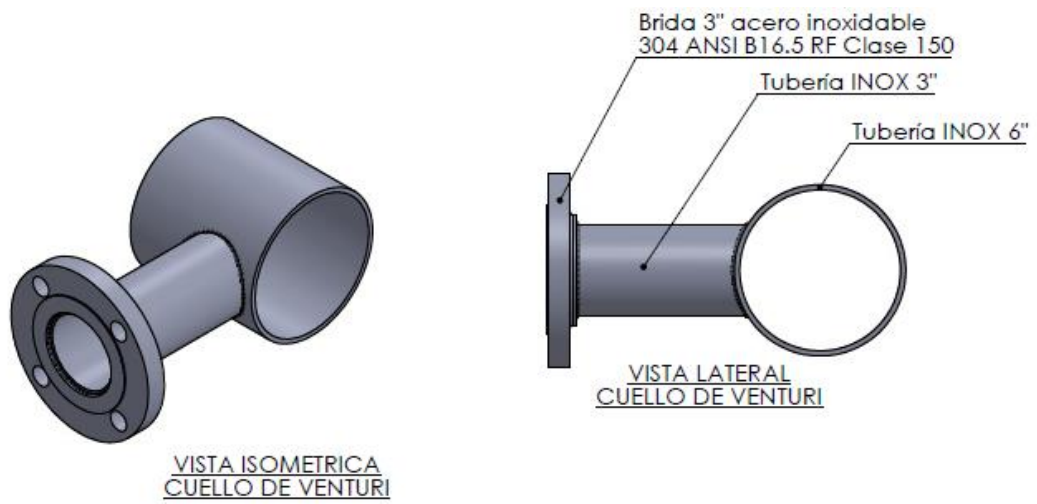


Figura 74: Plano detalle de cortes y construcción de garganta y entrada de succión

3.6. Fabricación de Inyector Venturi.

La fabricación se realizó de acuerdo a planos especificados en el ítem 3.5 cumpliendo con las medidas solicitadas. El proceso consistió en trazar la chapa mostrada en los planos en la tubería de inox, para luego con el uso de amoladora se realice el cortes longitudinales, los cortes luego son moldeados con el uso de anillos como se muestra en la figura 75.



Figura 75: Plano detalle de cortes y construcción de garganta y entrada de succión

Los cortes son unidos mediante soldadura con doble cordón (interior y exterior) en la figura 76 se puede mostrar los cordones de soldadura de la tobera.



Figura 76: Sección de tobera soldada.

El centrado de la garganta se realizó en piso con las medidas correspondientes al plano de diseño, para luego colocar la tubería de inyección muy próxima a la unión de la garganta con el difusor. En la figura 77 se muestra la construcción final del inyector Venturi con bridas de 10 pulgadas clase 150.



Figura 77: *Venturi de chapa en acero inoxidable de 10 pulgadas con garganta de 6 pulgadas*

Para realizar las mediciones de presiones en el sistema Venturi se instalan niples de media pulgada para realizar las mediciones mediante el uso de manómetro.



Figura 78: *Venturi de chapa de 10 pulgadas con niples para medición de presión*

3.7. Instalación de Inyector Venturi.

Se habilitó la plataforma para nivelación del terreno e instalación del sistema Venturi como se observa en la figura 79, luego del proceso de habilitación de flange adapter para la tubería HDPE se colocó en su posición final asegurándose con el uso de espárragos, así mismo se colocó el sistema de ingreso del supresor de polvo en tubería de 3 pulgadas, en la llegada solo se cuenta con válvula check para evitar el ingreso del agua por la presión al cerrar la válvula, además de ello cuenta con una válvula tipo globo para la regulación del ingreso de supresor, toda la línea cumplen con los estándares de acuerdo a normativa ASTM F714 para la tubería HDPE y ASTM A312 para el acero inoxidable, figura 80.



Figura 79: *Trabajos preliminares para instalación de Venturi*



Figura 80: *Venturi de chapa instalado con el ingreso de tubería de supresor de polvo*

Para obtener la medición correcta de las presiones se instalaron en campo más puntos de medición con la finalidad de validar el correcto funcionamiento de lo planteado en el diseño y el funcionamiento del Venturi instalado en la línea de estación de abastecimiento de agua. En la figura 75 se muestran seis puntos de medición donde se instalaron manómetros para verificar la presión del sistema.



Figura 81: Soldadura en campo para implementación de más puntos de medición



Figura 82: Puntos de medición de presiones en línea aguas arriba y aguas debajo de Venturi

3.8. Instalación de manifold de contenedores de aditivo supresor de polvo

Se realizó la instalación de los contenedores supresores de polvo haciendo el uso de un manifold que conecta de manera unificada, se tiene un volumen útil de 421 litros. Teniendo una capacidad de abastecimiento sin reemplazo de hasta 20 días con 6 ciclos diarios. Para ello todo el sistema se encuentra expuesto a presión atmosférica para evitar la aspiración de los contenedores y su deterioro. Para la construcción se usó tubería de inox 304 con soportes para evitar el volteo, el reemplazo de los contenedores se realiza con grúa o se logra vaciar de un contenedor a otro. Además de ello cada contenedor tiene válvula para operación durante el reemplazo y evitar el derrame de los mismos hacia la plataforma. En la figura 83 y figura 84 se muestra el diseño de manifold, la figura 85 muestra el proceso de fabricación de manifold en taller y la figura 86 nos muestra el proceso de instalación de los contenedores.

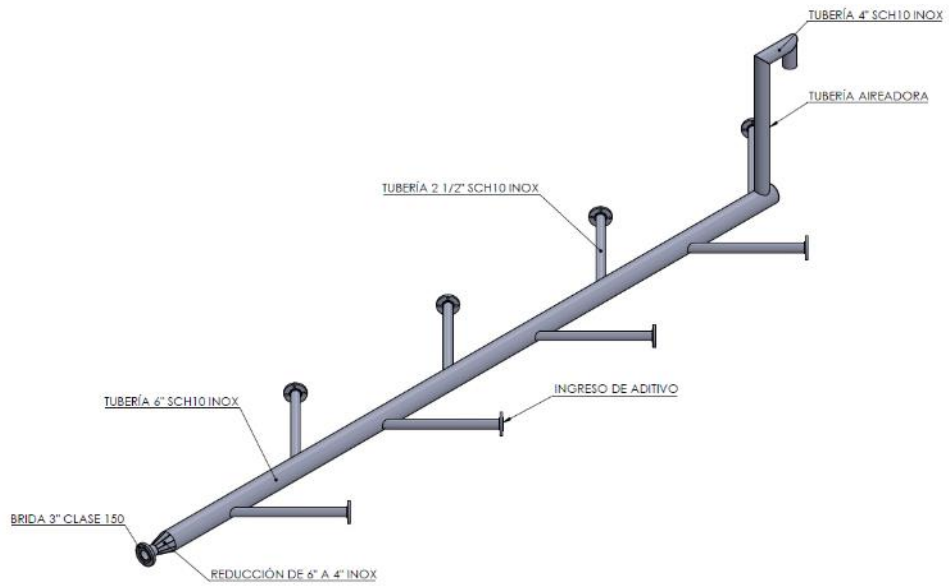


Figura 83: *Isométrico de diseño conceptual manifold*

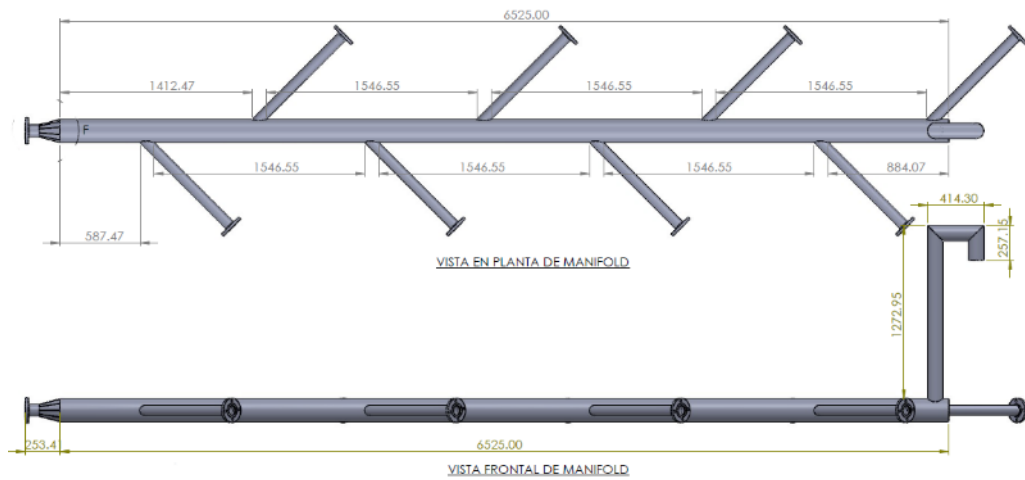


Figura 84: *Vista en planta y frontal de manifold*



Figura 85: *Proceso de fabricación de manifold*



Figura 86: *Instalación de contenedores a manifold*

3.9. Dosificación de supresor en inyector Venturi

La cantidad de supresor de polvo a ser utilizada en el riego de vías está estipulada de acuerdo a fabricante en tabla 9, donde se requiere entre 60 l/s a para un cisterna de 20 mil galones (76 mil litros aproximadamente). Altura de poza de almacenamiento es de 3 metros desde hombro de poza hacia salida de tubería (fondo de poza), por ello el rango de variación de presiones son calculados en la tabla 31 para la poza al 100% y la tabla 32 para la poza con un 1% de agua (a nivel de tubería de rebose).

Aproximaciones	Caudal	P1/γ	P2/γ	P3/γ	P1/γ-P3/γ
1	205 l/s	15.47 mca	9.86 mca	13.98 mca	1.49 mca
2	201 l/s	16.36 mca	11.22 mca	15.02 mca	1.34 mca
3	203 l/s	16.27 mca	10.55 mca	14.78 mca	1.49 mca
4	203 l/s	16.36 mca	10.93 mca	14.94 mca	1.42 mca

Tabla 31. *Cálculo de presiones con poza a 100% de volumen.*

Aproximaciones	Caudal	P1/γ	P2/γ	P3/γ	P1/γ-P3/γ
1	199 l/s	14.42 mca	9.28 mca	13.08 mca	1.34 mca
2	196 l/s	15.06 mca	9.92 mca	13.72 mca	1.34 mca

Tabla 32. Cálculo de presiones con poza a 1% de volumen

Con la poza a 100% se tiene un caudal de 203 l/s y una presión de 16.36 m.c.a. en el ingreso a Venturi, así como una presión en la garganta de 10.93 m.c.a. y considerando un nivel mínimo de operación 1% en el volumen de la poza se tiene un flujo de 196 l/s con una presión de ingreso de 15.06 m.c.a. y en la garganta se tendrá una presión de 9.92 m.c.a. Como se puede observar el tener la poza a un 100% a tenerla casi vacía 1% (una diferencia de cota de 3 metros aproximadamente en el espejo de agua) la variación en la presión en la garganta es de 1.01 m.c.a. esto se debe al caudal que transporta cuya variación es de 7 l/s el cual representa una variación de +3% y en 60 litros proporcionados a cada cisterna podríamos tener una variación de 2 litros como variación máxima.



Figura 87: Aireador 4 pulgadas y visor de nivel con el uso de manguera transparente.

La influencia de nivel de contenedores IBC no es significativa puesto que en el diseño usado es a través del uso de un manifold que ayuda como almacén de aditivo y para conectar a todos los contenedores. Esta configuración permite tener una capacidad útil dentro del manifold y la tubería de conducción del supresor de polvo. En la tabla 33 se muestra los volúmenes dentro del manifold y la tubería de conducción que se tendrían como almacenamiento para proporcionar una rápida dosificación. Sin embargo esta configuración no funcionaría si no se cuenta con el aireador necesario para evacuar todo el contenido, por ello se diseñó el aireador en tubería de 4 pulgadas como se muestra en la figura 87.

Estructura	Sección	Cantidad	Unidad	Longitud	Diámetro interno	Volumen
Manifold	Tubería principal	1	Und	6.8 m	161 mm	139 L
	Brazos de ingreso	6	Und	0.9 m	72 mm	22 L
	Reducción	1	Und	0.15 m	83 mm	7.3 L
	Tubería salida	1	Und	0.1 m	83 mm	1 L
Tubería de conducción	Tubería 3"	1	Und	52 m	79 mm	252 L
TOTAL						421 L

Tabla 33. *Tabla de cálculo de volumen interno útil en manifold y tubería conducción*



Figura 88: *Ángulo de apertura de válvula tipo globo, calibrado para dosificación*

Con estos parámetros y pruebas realizadas, haciendo uso del visor de manguera transparente durante el llenado en campo se determinó el ángulo de apertura de válvula tipo globo como se muestra en la figura 88 el sistema de inyector Venturi quedó calibrado para los 60 litros por cada 20 mil galones para el uso correcto.



Figura 89: *Abastecimiento de camión cisterna con supresor de polvo*



Figura 90: *Vista de mezcla de supresor de polvo en camión cisterna*

CAPITULO IV. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo, se presenta el análisis, discusión e interpretación de los resultados obtenidos en el desarrollo de la investigación del inyector Venturi. El análisis parte de la comparación de los dos procesos de mezcla y a través de la observación es que se evalúa su efectividad, así mismo se analiza la frecuencia de mezcla de ambos procesos de mezcla.

En el presente estudio se busca analizar si los resultados obtenidos con la implementación del inyector Venturi para la dosificación de supresor de polvo es más efectivo y seguro que el método de mezcla en poza de almacenamiento de agua.

4. Mezcla en poza

4.1. Capacidad de ingreso de agua a poza de abastecimiento:

Poza de almacenamiento con capacidad de 1,500 m³ abastecida por un sistema de bombeo cuya operación es de manera manual, esto es de acuerdo a requerimiento de riego y nivel de poza. Luego de hacer el análisis en la figura 91 se presenta la curva de electrobomba Flygt HT 2400.402 y el punto de operación, teniendo un flujo de abastecimiento de 52 l/s (187 m³/h).

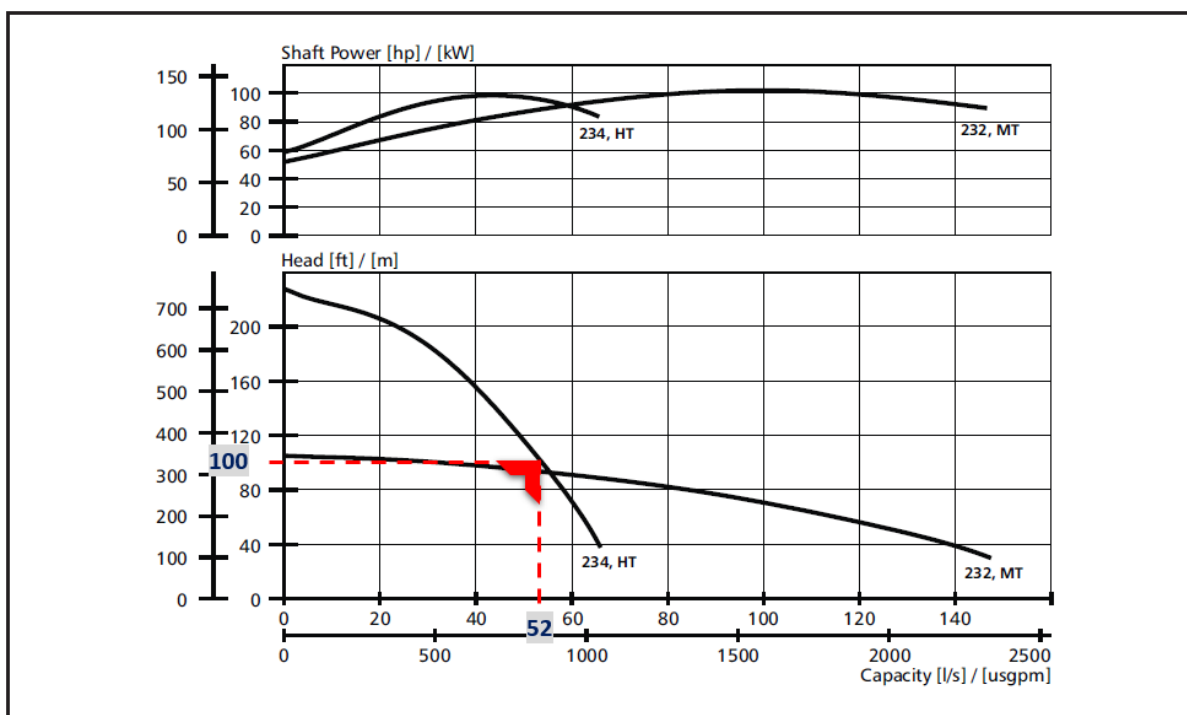


Figura 91: Curva de bombeo de electrobomba Flygt y punto de operación de bomba

(Fuente: Xylem, 2012)

4.2. Capacidad de descarga hacia estación de abastecimiento

De los cálculos realizados en el apartado 3.3 se determinó que el caudal de descarga por gravedad es de 195 l/s (702 m³/h) como capacidad máxima, considerando la tubería HDPE 10 pulgadas y válvula mariposa de operación abierta al cien por ciento.

4.3. Capacidad de almacenamiento

Considerando un volumen de 1,500 m³ y una descarga de 702 m³/h, tendrá una capacidad de disponibilidad de agua hasta por 2 horas 13 minutos con un abastecimiento constante. Sin embargo el número de veces que un cisterna gigante se abastece no es continuo, sino es de acuerdo a necesidad operativa, cantidad de riegos por día y considerando condiciones climáticas como días soleados, nublado en turno día; así mismo también se tiene riego en turno noche.

4.4. Ratio de llenado y consumo de agua

Cisterna gigante de 20 mil galones (76 mil litros) de capacidad, considerando el volumen de la poza de 1,500 m³; La poza podría abastecer cerca de 20 cisternas de 20 mil galones.

4.5. Frecuencia y tiempo de riego

Debido a los recorridos de los vías de acarreo se tiene en promedio las siguientes frecuencias de riego las cuales dependen de condiciones climáticas y distancias, la distancia asociada a pendientes y velocidad del cisterna al momento de transitar por las zonas que se requiere el riego. Esta condición es particular para esta estructura y no se debe considerar como algo mandatorio, solo sirve para determinar si el abastecimiento y mezcla en poza es el adecuado.

El tiempo de riego depende de las zonas por donde transita un camión gigante y se requiera el uso de supresor de polvo para ahorro de agua y evitar contaminación ambiental producido por partículas de polvo. Para este análisis solo se considera los tiempos de riego máximos y mínimos.

Condiciones	Frecuencia día
Soleado	6
Nublado	2
Lluvia y llovizna	0
Noche (sin lluvia ni llovizna)	4
Noche (con lluvia o llovizna)	0

Tabla 34. Frecuencia de riego de vías.

A continuación se muestra el histórico de un año representativo de riego de vías en zona de operaciones de desde mayo a octubre.

Número de riegos por día												
Días	Mayo		Junio		Julio		Agosto		Setiembre		Octubre	
	Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche
1	0	0	0	0	6	4	5	3	0	0	6	4
2	0	0	0	0	6	4	6	4	0	0	6	4
3	0	0	0	0	6	4	6	4	0	0	6	4
4	0	0	0	0	1	1	6	4	0	0	6	4
5	0	0	0	0	5	3	6	4	6	4	6	4
6	0	0	0	0	6	4	5	3	6	4	6	4
7	0	0	0	0	6	4	6	4	6	4	6	4
8	0	0	0	0	1	1	6	4	6	4	6	4
9	6	4	0	0	6	4	6	4	6	4	2	1
10	6	4	0	0	6	4	6	4	6	4	0	0
11	4	3	0	0	5	4	6	4	6	4	0	0
12	0	0	2	2	6	4	3	2	6	4	0	0
13	3	2	6	4	4	3	0	0	6	4	0	0
14	0	0	6	4	0	0	6	4	6	4	0	0
15	0	0	6	4	0	0	6	4	6	4	0	0
16	6	4	6	4	0	0	6	4	6	4	0	0
17	1	1	6	4	0	0	5	3	6	4	0	0
18	5	4	6	4	0	0	4	3	6	4	1	1
19	6	4	1	1	6	4	4	3	6	4	6	4
20	3	2	1	1	6	4	6	4	3	2	6	4
21	6	4	0	0	3	2	6	4	6	4	6	4
22	6	4	6	4	3	2	6	4	3	2	6	4
23	6	4	6	4	0	0	6	4	6	4	6	4
24	4	3	4	3	0	0	6	4	6	4	6	4
25	0	0	0	0	0	0	6	4	6	4	6	4
26	0	0	0	0	3	2	6	4	0	0	1	1
27	0	0	3	2	6	4	6	4	1	1	0	0
28	0	0	6	4	6	4	6	4	6	4	6	4
29	0	0	6	4	6	4	6	4	6	4	1	1
30	0	0	6	4	6	4	6	4	6	4	0	0
31	0	0			5	3	6	4			0	0

Tabla 35. Frecuencia de riegos por día para año representativo.

Frecuencia (número de riegos)												
Días	Mayo		Junio		Julio		Agosto		Setiembre		Octubre	
	Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche
0	18	18	14	14	8	8	1	1	5	5	11	11
1	1	1	2	2	2	2	0	0	1	1	3	4
2	0	2	1	2	0	3	0	1	0	2	1	0
3	2	2	1	1	3	3	1	5	2	0	0	0
4	2	8	1	11	1	15	2	24	0	22	0	16
5	1		0		3		3		0		0	
6	7		11		14		24		22		16	

Tabla 36. Agrupación con frecuencia de riegos por día para año representativo.

Agrupando la cantidad de riegos se realiza el cálculo de las frecuencias acumuladas

Frecuencia relativa (FR)												
Días	Mayo		Junio		Julio		Agosto		Setiembre		Octubre	
	Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.58	0.58	0.47	0.47	0.26	0.26	0.03	0.03	0.17	0.17	0.35	0.35
2	0.61	0.61	0.53	0.53	0.32	0.32	0.03	0.03	0.20	0.20	0.45	0.48
3	0.61	0.68	0.57	0.60	0.32	0.42	0.03	0.06	0.20	0.27	0.48	0.48
4	0.68	0.74	0.60	0.63	0.42	0.52	0.06	0.23	0.27	0.27	0.48	0.48
5	0.74		0.63		0.45		0.13		0.27		0.48	
6	0.77		0.63		0.55		0.23		0.27		0.48	

Tabla 37. Frecuencia relativa acumulada por meses.

Realizando el modelo numérico con números aleatorios para cada mes con 9,999 números aleatorios en el modelo (ver anexo tablas 41 al 46) se realizó el análisis estadístico considerando la operación de la poza de abastecimiento el cual se vuelve a llenar cuando se tiene un 40% de nivel de agua. Además de ello se considera como inicios de guardia en turno día a las 8 a.m. y en turno noche las 8 p.m. cuya jornada laboral es de 12 horas. Condiciones de operación en poza:

- Horario de trabajo de 12 horas.
- No se tiene personal en el punto durante toda la guardia puesto que se tiene otras funciones adicionales.
- No se cuenta con medidores de volumen para estimar la cantidad a vaciar en poza.

En la tabla 39 se realizó el análisis estadístico de la variación de volumen de agua al término de una guardia con el objetivo de identificar la variabilidad y la poca probabilidad de realizar una mezcla correcta de supresor de polvo.

<i>Volumen de poza</i>	<i>Mayo</i>	<i>Junio</i>	<i>Julio</i>	<i>Agosto</i>	<i>Setiembre</i>	<i>Octubre</i>
Mean	992.92	956.51	893.93	794.44	838.37	923.79
Standard Error	3.47	3.52	3.47	3.19	3.46	3.66
Median	982	982	908	760	760	908
Mode	1500	1500	1204	760	760	760
Standard Deviation	346.51	352.00	346.71	319.34	345.93	365.95
Sample Variance	120,070.8	123,907.1	120,205.6	101,981.2	119,669.7	133,918.3
Kurtosis	-0.82	-0.84	-0.89	-1.05	-0.96	-0.98
Skewness	-0.16	-0.14	-0.05	-0.02	0.03	-0.11
Range	1,332	1,332	1,332	1,332	1,332	1,332
Minimum	168	168	168	168	168	168
Maximum	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500
Sum	9,928,168	9,564,162	8,938,418	7,943,636	8,382,826	9,236,934
Count	9,999	9,999	9,999	9,999	9,999	9,999
Confidence Level(95.0%)	6.79	6.90	6.80	6.26	6.78	7.17
Coefficiente de variabilidad (CV)	0.35	0.37	0.39	0.40	0.41	0.40
Límite inferior (Lii)	986	950	887	788	832	917
Límite superior (Lis)	1000	963	901	801	845	931

Tabla 38. *Frecuencia relativa acumulada por meses.*

Como se puede identificar el coeficiente de variabilidad es medio en los meses de mayo y a junio, sin embargo existe una variación mayor en los meses de agosto y setiembre considerados como meses críticos debido a la poca presencia de lluvias, debido a ello se requiere mantener las vías en buenas condiciones para evitar la contaminación medio ambiental.

Se puede identificar que existe una variabilidad considerable por ello no siempre se mantiene el mismo nivel al término de la guardia para poder abastecer de supresor de polvo, puesto que se tendría que llevar un control adecuado de la cantidad remanente al término de cada turno para abastecer solo lo necesario; sin embargo cuando el problema se presenta cuando los cisternas gigantes empiezan abastecerse se pierde el control y la mezcla completa porque existiría un volumen adicional de ingreso agua con una cantidad menor de supresor de polvo proporcionada a inicio de guardia.

Además de no tener un buen control de volumen de poza ni la cantidad adecuada para iniciar la mezcla en la poza, se tienen riesgos a la seguridad puesto que el personal podría caer a la poza.

4.6. Resultados de mezcla en poza.

Adicional al análisis de calidad de mezcla en poza y su variabilidad expuesta en el ítem 4.5 se realizó simulando el proceso de mezcla en poza, observándose que el supresor de polvo es soluble al agua



Figura 92: *Fotografía de mezcla en recipiente solo por ingreso de agua sin ningún tipo de agitador*

Como se puede verificar en la figura 92 se evidencia que al momento de llenado de recipiente se genera espuma, una vez llenado al nivel en proporción a la aplicación de supresor de polvo se puede evidenciar que en el transcurso de llenado se llega a disolver por completo el supresor de polvo. Por lo que se concluye que el proceso de mezcla se podría dar sin embargo se genera un impacto visual por tener una poza con supresor de polvo y espuma en la superficie. Además de ello es poco probable que se realice la mezcla en la proporción recomendada por el fabricante.

5. Mezcla con uso de inyector de Venturi.

5.1. Presión en succión de inyector

La implementación del sistema Venturi cumple de acuerdo al diseño propuesto pues se genera una presión inferior a los 15 m.c.a. como presión estática útil, llegando a tener una presión de 11.24 m.c.a. en el ingreso al inyector Venturi por lo que se produce la succión necesaria de pasar a una presión superior a una de menor presión.

Así mismo se colocaron manómetros con las distancias de medida recomendadas por la ISO 5167-4, 2003 en la página 16, en la fotografía se muestran las medidas tomadas cuando la garza se encuentra en funcionamiento con un caudal de salida de 195 l/s. Los manómetros instalados son la marca Wika, para corroborar la correcta información se instalaron manómetros digitales CPG1500 con capacidad de medir con dos décimas y una presión de hasta 10,000 psi con una variación de 0,025%, temperatura de agua así mismo cuenta con conexión bluetooth y en los otros puntos se instalaron manómetros de muelle tubular rellenos con líquido con capacidad de hasta 300 psi.

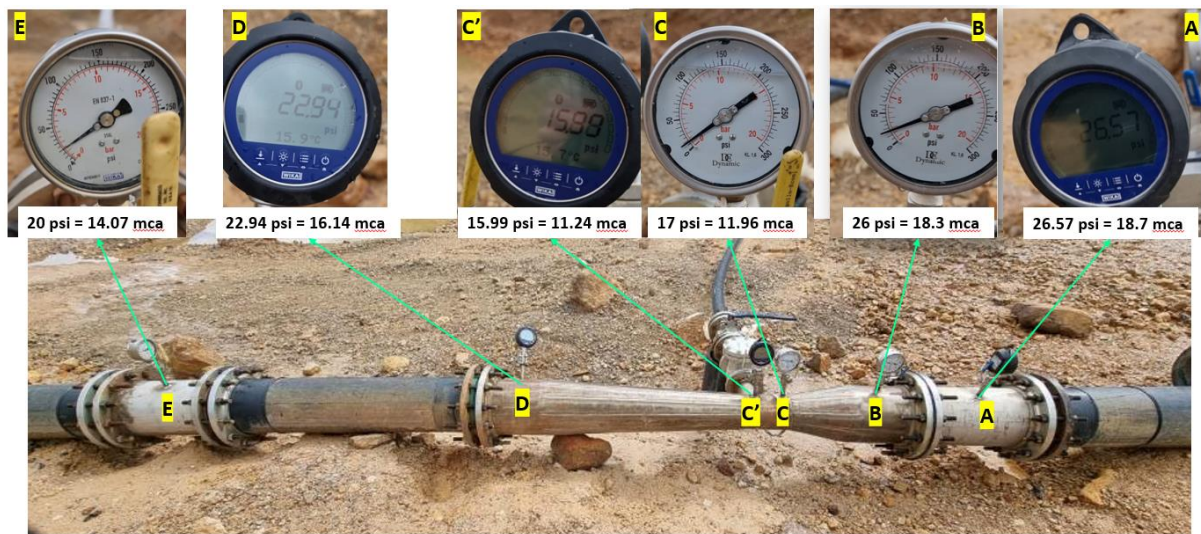


Figura 93: Instalación de manómetros de acuerdo a norma ISO

Se puede evidenciar que el diseño planteado para la inyección de supresor de polvo si funciona, como muestra de ello se grafica el perfil de pérdidas de carga de los datos tomados en los manómetros instalados, en los manómetros tubulares se tomó como medida un número entero pudiendo existir cierta variación debido al ángulo de visión en la toma de datos, ver gráfico 5. Del gráfico se puede verificar la caída de presión producida en la garganta del inyector Venturi

de 10 pulgadas en la troncal y de 6 pulgadas en la garganta, produciéndose la inyección hacia dentro del inyector Venturi y su posterior transporte por tubería hacia el camión cisterna.

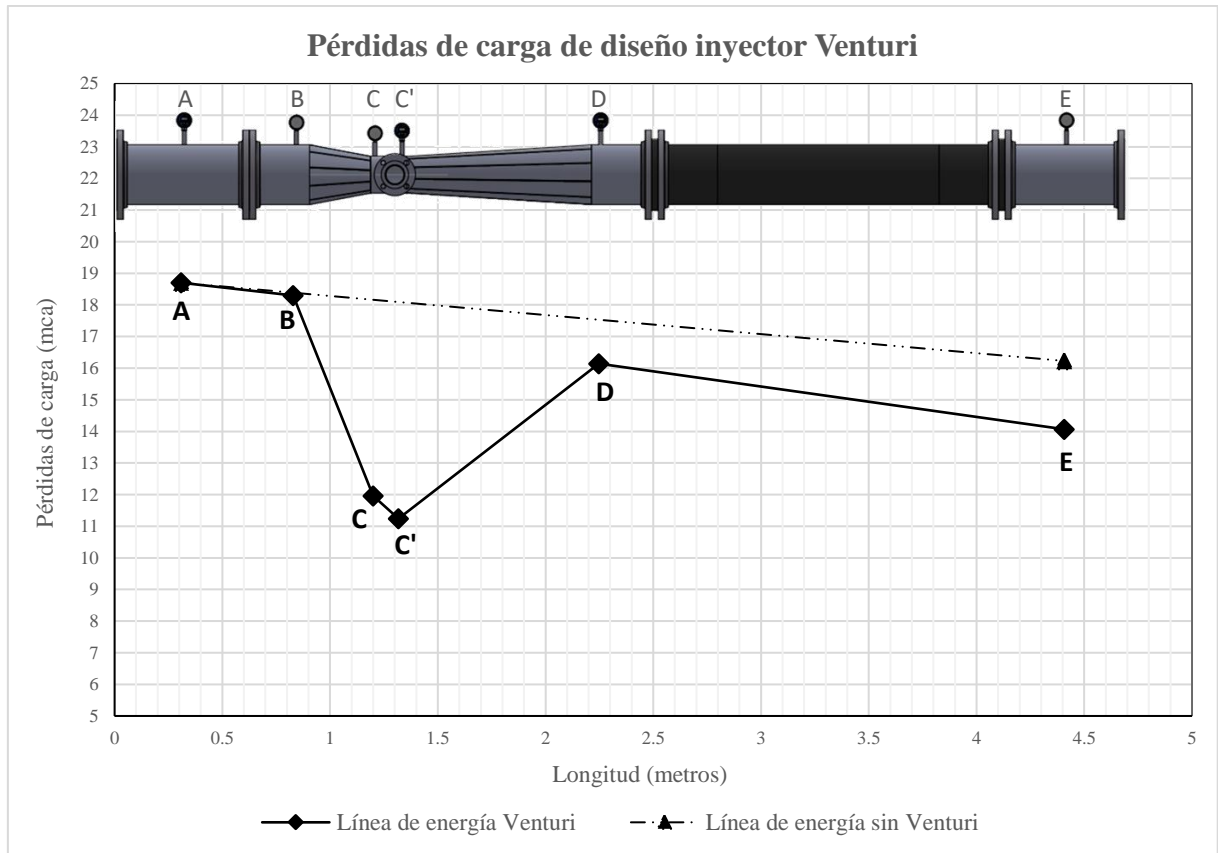


Gráfico 5: Gráfico de pérdidas de carga para inyector Venturi instalado.

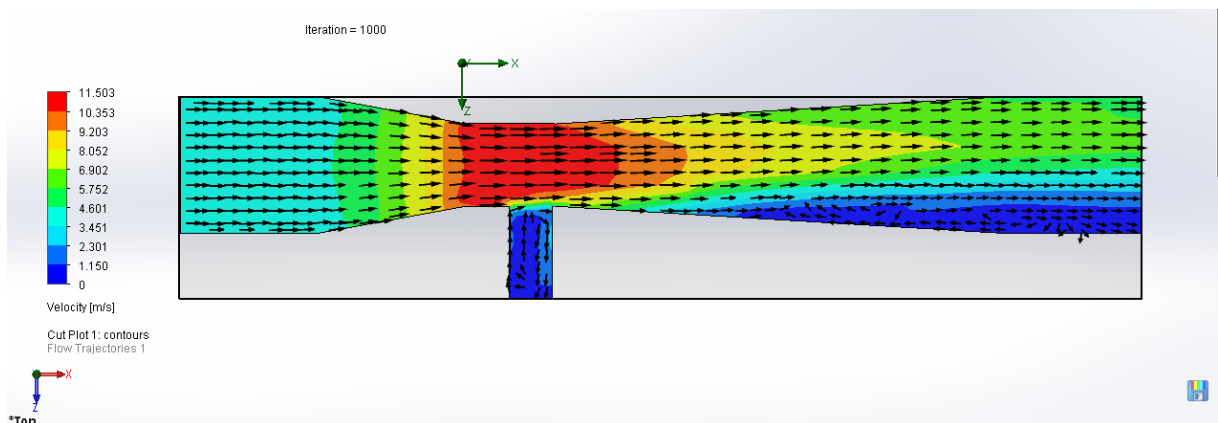


Figura 94: Líneas de corriente de inyector Venturi

5.2. Calibración de cantidad de supresor de polvo.

El supresor de polvo a ser de una consistencia viscosa y ser succionada por el inyector de Venturi inicialmente provocaba un presión negativa en los contenedores por lo que se tuvo que

realizar un acomodamiento al diseño instalando un aireador suficientemente adecuado para evitar las presiones negativas que conllevaban a un error en la lectura del visor conectado a los tanques. Se instaló un visor de nivel en la columna de aireador para identificar fácilmente el nivel de descenso por cada cisterna de 20 mil galones para tener una adecuada medida del supresor de polvo a inyectar. Para ello se realizó una calibración inicial con un cisterna y luego una calibración con una acumulación de 4 viajes del mismo cisterna, teniendo como referencia el área total de 08 contenedores por el nivel de descenso en cada cisterna.



Figura 95: *Visor de nivel de supresor de polvo de ¼”.*

Sacando el área de cada contenedor se tiene un aproximado de 1.38 m³ por cada metro de altura, considerando un consumo de 60 l/s por cada 20,000 galones el nivel en la regleta calibrada tiene un descenso de 0.55 centímetros. Con esta aproximación se calibra la válvula para evitar mayores ingresos de supresor de polvo hacia garza de abastecimiento, ver figura 96.



Figura 96:. *Válvula calibrada con tope para evitar mayores salidas de supresor de polvo.*

De esta manera se pudo observar que la cantidad recomendada por fabricante de supresor de polvo es el adecuado y muestra de ello es la cantidad de espuma que se genera dentro del tubo Venturi debido a la turbulencia y se ve reflejada cuando se tiene el cisterna completamente lleno como se muestra en la figura 97.



Figura 97:. *Proceso de llenado de cisterna con la dosificación de acuerdo a fabricante.*

5.3. Proceso de funcionamiento.

El diseño inyector Venturi funciona mezclando el supresor de polvo de manera adecuada y uniforme como se evidencia en la imagen 89. Así mismo solo requiere la apertura de una sola válvula que es manipulada por el mismo operador del camión cisterna gigante como se puede ver en las figuras 98 - 102.



Figura 98: *Ingreso de agua a cisterna.*



Figura 99: *Vista de llenado de cisterna.*



Figura 100: *Rebose de cisterna y salida de espuma producido por la turbulencia.*



Figura 101: *Proceso de cierre de válvula culminado el llenado.*



Figura 102: *Riego de vía de acarreo con cisterna gigante*

6. Comparación de resultados durante proceso de llenado cisterna

En la figura 103 se puede verificar el proceso de llenado del cisterna con supresor aplicado en poza, claramente no se evidencia la producción de espuma durante el proceso de abastecimiento de cisterna, debido a las desviaciones en la proporción de mezcla del supresor, ver detalle en ítem 4.5. En cambio en la figura 104 se aprecia la producción de espuma en el rebose de cisterna el cual es una evidencia clara del proceso de mezcla que se realiza en la tubería por la turbulencia en el inyector Venturi y el paso de la mezcla por la tubería de la garza de abastecimiento y también durante el proceso de llenado dentro del camión cisterna.



Figura 103: *Llenado con supresor de polvo aplicado en poza de almacenamiento*



Figura 104: *Llenado con supresor de polvo aplicado en inyector de Venturi.*

Realizando la comparación de mezcla por caída de agua en poza versus la mezcla producida debido a la turbulencia dentro de tubería se presenta la figura 105, donde se logra visualizar el supresor de polvo en proporciones recomendadas por fabricante y al existir un proceso de mezcla con bastante turbulencia se produce espuma en la superficie.



Figura 105:. Comparación de mezcla en poza versus inyector Venturi

Características	Mezcla en poza		Inyector Venturi	
Calidad de mezcla	Baja		Muy buena	
Calidad en dosificación	Baja		Muy buena	

Tabla 39. Tabla comparativa de métodos de mezcla.

Como se puede evidenciar en los datos obtenidos y registrados en fotografías las diferencias entre las mezcla en poza versus la mezcla con inyector Venturi son claramente notorias, y esto es debido a que las proporciones de ratio de mezcla no son las adecuadas en la poza porque no se tiene con certeza los niveles adecuados para realizar las mezclas proporcionales. En cambio en inyector Venturi se calibró luego de realizar varias pruebas de carga de los camiones cisterna.

6.1. Identificación de recursos necesarios

Se pudo identificar que la frecuencia de cambio de contenedores era cada 02 días para el caso de mezcla en poza donde se tiene que destinar una grúa para realizar el cambio de contenedores,

sin embargo la implementación del inyector Venturi también contempla la implementación de un manifold para unir más contenedores (8 en total) en serie.

- El tiempo empleado para estabilización de una grúa en promedio cumpliendo procedimientos de seguridad es de 30 minutos aproximadamente, incluye pasos previos de señalización de la zona de trabajo.
- El tiempo en ubicar el contenedor desde desestibar la carga, enganchar hasta su posicionamiento en el sitio es de 30 minutos aproximadamente.
- El tiempo empleado para desestabilización de una grúa en promedio cumpliendo procedimientos de seguridad es de 30 minutos aproximadamente.

Para el caso de mezcla en poza el cual se realiza de manera individual se emplea en promedio 1.5 horas de grúa.

Para el caso de mezcla con inyector de Venturi se tiene 08 contenedores ubicados para cambio el sistema de desconexión simple se realiza en el mismo día por ello para 08 contenedores se emplea 4 horas incluyendo la estabilización y desestabilización se emplea en total 05 horas.

Recursos	Mezcla en poza	Inyector Venturi
Humanos	<p>Total personas: 08</p> <ul style="list-style-type: none"> - 02 supervisores (Supervisor de grúa y supervisor de campo) - 02 operadores para apertura y cierre de válvulas de contenedores - 01 observador como línea de primer auxilio - 01 Operador de grúa - 01 Rigger - 01 Vientero <p>Total horas hombre: 8 x 1.5 x (30/2) = 180 HH</p>	<p>Total personas: 04</p> <ul style="list-style-type: none"> - 01 supervisor de grúa. - 01 Operador de grúa - 01 Rigger - 01 Vientero <p>Total horas hombre: 4 x 5 x (30/20) = 30 HH</p>

Materiales	Uso de 01 grúa para instalación con frecuencia de 2 días, 1.5 horas empleadas en estabilización, maniobra de izaje y desestabilización. - Hora máquina grúa: 1.5 x (30/2)= 22.5 horas	Uso de 01 grúa para instalación con frecuencia de 20 días, 5 horas empleadas en estabilización, maniobra de izaje y desestabilización. - Hora máquina grúa: 5 x (30/20)= 7.5 horas
-------------------	---	--

Tabla 40. *Comparación reducción de recursos principales empleados para cada alternativa*

De los datos obtenidos de la tabla 40, se puede evidenciar que los recursos humanos se reducen de 180 HH a 30 HH lo que significa una reducción de 83%, debido principalmente a la reducción de personal involucrado en el proceso de mezcla, y la reducción de frecuencia de cambio de contenedores con la implementación de un manifold de 8 unidades.

Los recursos materiales referente a equipos se ve reducido de 22.5 horas máquina a 7.5 horas máquina el cual representa un 67% de reducción en equipos empleados para el proceso de dosificación.

El sistema de implementación inyector Venturi reduce el uso de recursos por más del 50% tanto en mano de obra y equipos debido principalmente a la implementación de un sistema dosificador sólo accionado con tan solo una válvula, permitiendo dosificar la cantidad correcta de supresor de polvo.

La poza tiene una diferencia de cotas de 3 metros sin embargo se mantiene por encima del 40% para su operación, lo que significa una variación en la presión de menos de 4% en el ingreso a Venturi lo que no impacta a la cantidad inyectada en durante la dosificación o existiría una variación mínima, este estudio no forma parte de la presente tesis.

CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- El inyector Venturi diseñado, fabricado e implementado en la unidad minera funciona de la manera correcta inyectando la dosificación correcta de supresor de polvo de acuerdo a especificaciones de fabricante. Todo el proceso de mezcla se realiza dentro de la tubería sin necesidad de controlar la válvula de salida del contenedor y solo se opera con la válvula de apertura y cierre de la estación de abastecimiento funcionando de manera automática.
- Los recursos humanos como el personal involucrado en la tarea se reduce de 8 personas a sólo 4 personas con reducción de la frecuencia de cambio de contenedores de supresor de polvo de 15 veces al mes a solo 1.5 veces. Esto se logró con la implementación de un manifold de captación de 08 contenedores funcionando en paralelo, teniendo una gran cantidad de volumen almacenada, teniendo una mezcla de mejor calidad como se evidencia claramente en los resultados obtenidos. Así mismo se redujo el recurso material en este caso con el uso de las horas efectivas de la grúa para cambio de contenedores, de intervenir 15 veces al mes con un total de 22.5 horas de uso del equipo a 7.5 horas al mes con la implementación realizada.
- El costo de energía para su funcionamiento es nulo puesto que aprovecha la energía hidráulica para inyectar el supresor de polvo dentro de la tubería de manera controlada.
- Se hubiese optado por incluir un sistema de bombeo dosificador controlado por un sistema automatizado y considerando los tiempos de bombeo, sin embargo estos sistemas requieren de un mantenimiento periódico, cambio de componentes. Esta propuesta no hubiese resultado factible operativamente ni económicamente debido a que en la zona no se cuenta con punto de energía eléctrica para el funcionamiento de del sistema dosificador, así mismo la zona está expuesta a robos. Existen en el mercado otros dispositivos conectados en la misma línea que no requieren de energía eléctrica como el Dosatron sin embargo para abastecer a un camión cisterna gigante el cual requiere ser llenado en el menor tiempo con un ratio de 12 l/min, requiriendo 12 de estos dispositivos conectados en paralelo.
- La implementación de inyectores Venturi no solo pueden ser usados en agricultura sino también en minería y con una escala mucho mayor, como en este caso con un diámetro de 10" que traslada grandes cantidades de agua.

- El dispositivo funciona correctamente sin embargo los rangos de variabilidad no se analizaron al detalle, puesto que varía en función de la altura de poza.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda hacer uso de las especificaciones de la Norma ISO 5167 para diseño y construcción de inyector Venturi puesto que nos brinda los parámetros y lineamientos generales para el correcto funcionamiento una vez construido.
- Se recomienda realizar pruebas de simulación CFD para describir el proceso de mezcla a la salida del difusor y verificar la calidad de mezcla a una menor longitud de conducción.
- Se recomienda evaluar la construcción de inyectores Venturi en otro tipo de materiales como el HDPE para la minería debido al bajo costo.
- Se recomienda analizar diferentes ángulos de la tubería conectada a la garganta del Venturi, en este caso se analizó a noventa grados.
- Se recomienda analizar diferentes opciones de conexión de la tubería de inyección, como podrían ser la parte superior o inferior, para la presente investigación se realizó el ingreso de manera lateral.
- Se recomienda instalar un sistema de limpieza en reversa cuando se deje completamente vacío todo el manifold para evitar posible acumulación de supresor de polvo dentro de las paredes del manifold y tenerlo operativo para cuando se requiera.
- Se recomienda analizar la eficiencia de inyectores Venturi a escala para implementación por bombeo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrés Brauer, D., Alejandra Giubergia, A., & Gil-Costa, V. (2019). Evaluación de productos para el control de polvo ambiental en caminos mineros. *Minería y Geología*, 35(2), 113–125.
- Bidmus H., Chau J., Dechant K., (2019), Absolute Roughness of Pipes from Different Manufacturing and Treatment Methods and Impact on Pipeline Design, *Pipeline Simulation Interest Group*, England.
- Calvo Sealing. (s.f.). Clasificación ACEROS INOXIDABLES [Folleto].
- Corredor Acuña, J., Chaparro Chaparro, D. E., & Yanza Hurtado, E. G. (2020). OXIDACION CICLICA A 800°C DE ACERO INOXIDABLE AISI 304L SENSIBILIZADO A LA CORROSIÓN INTERGRANULAR Y RECUBIERTO CON Ni-P, Ni-P-W Y Ni-P-WMAGNETITA. *La Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, RLMM, 40(1), 36–48.
- Dosatron International S.A.S. (2016). Manual de utilización.
- Epanet (2.0.12vE) [software]. *Water Supply and Water Resources Division, National Risk Management Research Laboratory. U.S. Environmental Protection Agency*, Cincinnati, Ohio.
- García-Saldaña, Arturo & Landeros-Sánchez, Cesáreo & Arturo, Pérez-Vazquez & Castañeda-Chávez, María & Martínez-Dávila, Juan & Eugenio, Carrillo & Veracruz, Campus. (2015). Inyectores de fertilizante tipo Venturi Aplicación, diseño y simulación.
- Geosynthetic Institute (2021), *GRI - GM13 Standard Specification: Test Methods, Test Properties and Testing Frequency for High Density Polyethylene (HDPE) Smooth and Textured Geomembranes*. Folsom.
- GPS PE Pipe Systems (2011), Installation and Technical Guidelines, *Glynwed Pipe Systems Ltd. Company*.
- Idel'cik, I.E. (1960). Memento des pertes de charge. Eyrolles.
- INDURA. (2013). Manual de aceros inoxidable. *Indura*.
- Instituto Sindical de Trabajo, Ambiente y Salud (2008), La prevención del riesgo químico en el lugar de trabajo, Editorial Paralelo Edición S.A. Segunda edición, España.
- Jin, H., Zhang, Y., Chen, K., Niu, K., Wu, G., Wei, X., & Wang, H. (2020). Preparation and Characterization of a Composite Dust Suppressant for Coal Mines. *Polymers* (20734360), 12(12), 2942.

- MANZANO, R. Análisis del inyector Venturi y mejora de su instalación en los sistemas de riego localizado. 2008. 248f. Tesis (Doctoral) - Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria, Universitat Politècnica de València, Valencia, 2008.
- Martínez, L. (1998) Manual de Fertirrigación, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Chile, 1998.
- Manzano, Juan et al. Diseño y alternativas en la instalación de inyectores Venturi en riego localizado1. Revista Ciência Agronômica [online]. 2015.
- MEFCCA, COSUDE, CATIE (2018). *Uso de agua del reservorio en labores agropecuarias*, Nicaragua
- Minería Chilena. (2013). Prácticas para suprimir el polvo. *Minería Chilena*. <https://www.mch.cl/reportajes/practic-as-para-suprimir-el-polvo/>
- Mott, R. L. (2006). Mecánica de Fluidos (6a. ed., 1a. reimp.). México: Pearson Educación.
- Organización Internacional de Normalización. (2002). *Irrigation equipment — Differential pressure Venturi-type liquid additive injectors* (ISO 15873).
- Organización Internacional de Normalización. (2003). *Medición del caudal de fluidos mediante dispositivos de presión diferencial intercalados en conductos en carga de sección transversal circular, Parte 4: Tubos Venturi* (ISO 5167-4:2003)).
- Organización Internacional de Normalización. (2003). *Medición del caudal de fluidos mediante dispositivos de presión diferencial intercalados en conductos en carga de sección transversal circular, Parte 1: Principios y requisitos generales*, (ISO 5167-1:2003)).
- Seguridad Ocupacional & la Administración de la Salud [OSHA]. (2016). *Person in Water* (OSHA 3890-09-2016).
- Tamborero, J. (2016), *Grúas móviles autopropulsadas: seguridad*, Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT)
- Plastics Pipe Institute (2009), Design of PE Piping Systems, Plastics Pipe Institute.
- Pastiforte. (2011). Manual Técnico de Tuberías HDPE Minería e Industria, Bolivia.
- Pavco Wavin. (2020). Catálogo Técnico comercial Minero: Soluciones Integrales para Minería.
- Pavco S.A. (2008). Manual técnico: Tubosistemas PEAD para conducción de agua potable.
- Rosadio Colonia, R. M. (2007). *Aplicación de geomembranas en pozas de almacenamiento de agua: Control de costos*.
- Sotelo A., G. (1982), Hidráulica general. Volumen I, Editorial LIMUSA S.A. Sexta edición, México.

- Sun, J., Zhou, G., Gao, D., Wei, Z., & Wang, N. (2020). Preparation and performance characterization of a composite dust suppressant for preventing secondary dust in underground mine roadways. *Chemical Engineering Research & Design: Transactions of the Institution of Chemical Engineers Part A*, 156, 195–208.

Lincografía

- All Pumps Sales & Services. (2015). Estudios de caso [Photograph]. *All Pumps*. Australia. <https://allpumps.com.au/filling-water-trucks-mines-diesel-driven-transfer-pumpset/>
- Cajal, A. (2020), *Recursos de una empresa*. <https://www.lifeder.com/recursos-empresa/>
- Icochea S. (2019), Conoce dos técnicas de soldadura de geomembranas, *Innovación en Geosintéticos y Construcción*. <https://igc.com.pe/tecnicas-soldadura-de-geomembranas/>
- Mengíbar, L. (2017). Tipos de soldadura y para qué sirve cada una. <https://ferreteriasandiego.es/blog/tipos-de-soldadura-y-para-que-sirve-cada-una/>
- Minería Chilena. (2013). Polvo [Photograph]. *Minería Chilena*. <https://www.mch.cl/2013/06/28/exponen-tecnologias-para-el-control-de-polvo-en-faenas-mineras/>
- <https://www.unifiedalloys.com/p/stainless-steel-pipe-data>
- <https://www.multinsa.com/dl-10/>
- Válvulas Internacionales (2018), Válvulas: Conocimientos básicos sobre sus 5 principales diseños, *Válvulas Internacionales*, <http://valvulasinternacionales.com.pe/blog/valvulas-conocimientos-basicos/>.
- Xylem, Inc (2012), *Flygt 2400.402 Dewatering Pump*. <https://www.xylem.com/siteassets/brand/flygt/flygt-resources/flygt-resources/xylem-flygt-2400-402-datasheet-50hz.pdf>
- Wertern Environmental Liner (2018), *What Is a Geomembrane and How Are They Used?*. <https://www.westernliner.com/blog/what-is-a-geomembrane-2/>

ANEXOS

PLANOS

FIGURAS

TABLAS

Mayo						
Número	Frecuencia	Hora	Volumen de poza	Volumen de poza remanente	Abastecimiento	Nivel
1	0	08:00	1500	1500	0	100%
2	4	20:00	1500	1204	0	80%
3	0	08:00	1204	1204	0	80%
4	0	20:00	1204	1204	0	80%
5	1	08:00	1204	1130	0	75%
6	1	20:00	1130	1056	0	70%
7	5	08:00	1056	686	0	46%
8	2	20:00	686	538	962	36%
9	0	08:00	1500	1500	0	100%
10	0	20:00	1500	1500	0	100%
11	0	08:00	1500	1500	0	100%
12	0	20:00	1500	1500	0	100%
13	0	08:00	1500	1500	0	100%
14	0	20:00	1500	1500	0	100%
9984	4	20:00	1500	1204	0	80%
9985	6	08:00	1204	760	0	51%
9986	0	20:00	760	760	0	51%
9987	6	08:00	760	316	1184	21%
9988	0	20:00	1500	1500	0	100%
9989	0	08:00	1500	1500	0	100%
9990	0	20:00	1500	1500	0	100%
9991	0	08:00	1500	1500	0	100%
9992	0	20:00	1500	1500	0	100%
9993	6	08:00	1500	1056	0	70%
9994	0	20:00	1056	1056	0	70%
9995	0	08:00	1056	1056	0	70%
9996	0	20:00	1056	1056	0	70%
9997	0	08:00	1056	1056	0	70%
9998	4	20:00	1056	760	0	51%
9999	0	08:00	760	760	0	51%

Tabla 41. Modelo numérico de riego para mes de mayo.

Junio						
Número	Frecuencia	Hora	Volumen de poza	Volumen de poza remanente	Abastecimiento	Nivel
1	0	08:00	1500	1500	0	100%
2	4	20:00	1500	1204	0	80%
3	0	08:00	1204	1204	0	80%
4	0	20:00	1204	1204	0	80%
5	6	08:00	1204	760	0	51%
6	4	20:00	760	464	1036	31%
7	0	08:00	1500	1500	0	100%
8	2	20:00	1500	1352	0	90%
9	0	08:00	1352	1352	0	90%
10	2	20:00	1352	1204	0	80%
11	0	08:00	1204	1204	0	80%
12	0	20:00	1204	1204	0	80%
13	2	08:00	1204	1056	0	70%
14	0	20:00	1056	1056	0	70%
9984	0	20:00	1500	1500	0	100%
9985	0	08:00	1500	1500	0	100%
9986	4	20:00	1500	1204	0	80%
9987	6	08:00	1204	760	0	51%
9988	0	20:00	760	760	0	51%
9989	0	08:00	760	760	0	51%
9990	3	20:00	760	538	962	36%
9991	0	08:00	1500	1500	0	100%
9992	0	20:00	1500	1500	0	100%
9993	6	08:00	1500	1056	0	70%
9994	4	20:00	1056	760	0	51%
9995	0	08:00	760	760	0	51%
9996	0	20:00	760	760	0	51%
9997	0	08:00	760	760	0	51%
9998	0	20:00	760	760	0	51%
9999	6	08:00	760	316	1184	21%

Tabla 42. Modelo numérico de riego para mes de junio.

Julio						
Número	Frecuencia	Hora	Volumen de poza	Volumen de poza remanente	Abastecimiento	Nivel
1	1	08:00	1500	1426	0	95%
2	4	20:00	1426	1130	0	75%
3	1	08:00	1130	1056	0	70%
4	1	20:00	1056	982	0	65%
5	0	08:00	982	982	0	65%
6	4	20:00	982	686	0	46%
7	6	08:00	686	242	1258	16%
8	4	20:00	1500	1204	0	80%
9	5	08:00	1204	834	0	56%
10	1	20:00	834	760	0	51%
11	1	08:00	760	686	0	46%
12	4	20:00	686	390	1110	26%
13	0	08:00	1500	1500	0	100%
14	2	20:00	1500	1352	0	90%
9984	4	20:00	1500	1204	0	80%
9985	6	08:00	1204	760	0	51%
9986	3	20:00	760	538	962	36%
9987	6	08:00	1500	1056	0	70%
9988	0	20:00	1056	1056	0	70%
9989	6	08:00	1056	612	0	41%
9990	4	20:00	612	316	1184	21%
9991	0	08:00	1500	1500	0	100%
9992	4	20:00	1500	1204	0	80%
9993	0	08:00	1204	1204	0	80%
9994	4	20:00	1204	908	0	61%
9995	0	08:00	908	908	0	61%
9996	4	20:00	908	612	0	41%
9997	6	08:00	612	168	1332	11%
9998	4	20:00	1500	1204	0	80%
9999	0	08:00	1204	1204	0	80%

Tabla 43. *Modelo numérico de riego para mes de julio.*

Agosto						
Número	Frecuencia	Hora	Volumen de poza	Volumen de poza remanente	Abastecimiento	Nivel
1	6	08:00	1500	1056	0	70%
2	4	20:00	1056	760	0	51%
3	0	08:00	760	760	0	51%
4	4	20:00	760	464	1036	31%
5	6	08:00	1500	1056	0	70%
6	3	20:00	1056	834	0	56%
7	6	08:00	834	390	1110	26%
8	4	20:00	1500	1204	0	80%
9	4	08:00	1204	908	0	61%
10	4	20:00	908	612	0	41%
11	6	08:00	612	168	1332	11%
12	3	20:00	1500	1278	0	85%
13	6	08:00	1278	834	0	56%
14	3	20:00	834	612	0	41%
9984	4	20:00	1500	1204	0	80%
9985	6	08:00	1204	760	0	51%
9986	3	20:00	760	538	962	36%
9987	6	08:00	1500	1056	0	70%
9988	4	20:00	1056	760	0	51%
9989	5	08:00	760	390	1110	26%
9990	3	20:00	1500	1278	0	85%
9991	6	08:00	1278	834	0	56%
9992	4	20:00	834	538	962	36%
9993	0	08:00	1500	1500	0	100%
9994	4	20:00	1500	1204	0	80%
9995	6	08:00	1204	760	0	51%
9996	4	20:00	760	464	1036	31%
9997	5	08:00	1500	1130	0	75%
9998	0	20:00	1130	1130	0	75%
9999	5	08:00	1130	760	0	51%

Tabla 44. *Modelo numérico de riego para mes de agosto.*

Setiembre						
Número	Frecuencia	Hora	Volumen de poza	Volumen de poza remanente	Abastecimiento	Nivel
1	6	08:00	1500	1056	0	70%
2	4	20:00	1056	760	0	51%
3	6	08:00	760	316	1184	21%
4	4	20:00	1500	1204	0	80%
5	6	08:00	1204	760	0	51%
6	4	20:00	760	464	1036	31%
7	6	08:00	1500	1056	0	70%
8	4	20:00	1056	760	0	51%
9	6	08:00	760	316	1184	21%
10	4	20:00	1500	1204	0	80%
11	0	08:00	1204	1204	0	80%
12	0	20:00	1204	1204	0	80%
13	6	08:00	1204	760	0	51%
14	4	20:00	760	464	1036	31%
9984	0	20:00	612	612	0	41%
9985	6	08:00	612	168	1332	11%
9986	4	20:00	1500	1204	0	80%
9987	6	08:00	1204	760	0	51%
9988	4	20:00	760	464	1036	31%
9989	6	08:00	1500	1056	0	70%
9990	4	20:00	1056	760	0	51%
9991	0	08:00	760	760	0	51%
9992	0	20:00	760	760	0	51%
9993	6	08:00	760	316	1184	21%
9994	4	20:00	1500	1204	0	80%
9995	6	08:00	1204	760	0	51%
9996	4	20:00	760	464	1036	31%
9997	3	08:00	1500	1278	0	85%
9998	2	20:00	1278	1130	0	75%
9999	6	08:00	1130	686	0	46%

Tabla 45. Modelo numérico de riego para mes de setiembre.

Octubre						
Número	Frecuencia	Hora	Volumen de poza	Volumen de poza remanente	Abastecimiento	Nivel
1	0	08:00	1500	1500	0	100%
2	0	20:00	1500	1500	0	100%
3	6	08:00	1500	1056	0	70%
4	4	20:00	1056	760	0	51%
5	6	08:00	760	316	1184	21%
6	4	20:00	1500	1204	0	80%
7	2	08:00	1204	1056	0	70%
8	1	20:00	1056	982	0	65%
9	6	08:00	982	538	962	36%
10	4	20:00	1500	1204	0	80%
11	1	08:00	1204	1130	0	75%
12	1	20:00	1130	1056	0	70%
13	6	08:00	1056	612	0	41%
14	4	20:00	612	316	1184	21%
9984	4	20:00	760	464	1036	31%
9985	6	08:00	1500	1056	0	70%
9986	4	20:00	1056	760	0	51%
9987	1	08:00	760	686	0	46%
9988	1	20:00	686	612	0	41%
9989	0	08:00	612	612	0	41%
9990	0	20:00	612	612	0	41%
9991	1	08:00	612	538	962	36%
9992	1	20:00	1500	1426	0	95%
9993	2	08:00	1426	1278	0	85%
9994	1	20:00	1278	1204	0	80%
9995	0	08:00	1204	1204	0	80%
9996	0	20:00	1204	1204	0	80%
9997	0	08:00	1204	1204	0	80%
9998	0	20:00	1204	1204	0	80%
9999	0	08:00	1204	1204	0	80%

Tabla 46. *Modelo numérico de riego para mes de octubre.*