

Trabajo Fin de Máster
**MÓDULO DE CÁLCULO PARA EL
POSICIONAMIENTO, EL
DIMENSIONAMIENTO Y LA
SELECCIÓN DE VENTOSAS Y
DESAGÜES EN REDES DE
ABASTECIMIENTO**

Intensificación: *HIDÁULICA URBANA*

Autor:

DAVID EDUARDO GRISALES MORALES

Tutor:

DR. JORGE GARCÍA-SERRA GARCÍA

Cotutor/es:

ROMÁN PON CARCELÉN

SEPTIEMBRE, 2021



**UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA**

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma

Resumen del Trabajo de Fin de Máster

Datos del proyecto
Título del TFM en español: Módulo de cálculo para el posicionamiento, el dimensionamiento y la selección de ventosas y desagües en redes de abastecimiento
Título del TFM en inglés: Calculation module for the positioning, dimensioning and selection of suction cups and drains in supply networks
Título del TFM en Valenciano: Mòdul de càlcul per al posicionament, el dimensionament i la selecció de ventoses i desguassos en xarxes de proveïment
Alumno: David Eduardo Grisales Morales
Tutor: DR. Jorge García-Serra García
Cotutor/es: Román Ponz Carcelén
Director experimental:
Fecha de Lectura: Agosto, 2021

Resumen
En español
<p>Las operaciones de llenado y vaciado, el aire disuelto bajo condiciones normales de operación de una conducción o las roturas, crean bolsas de aire que producen problemas críticos a lo largo de la conducción capaces de generar daños o fatigas en la tubería y en los accesorios. El control de los fenómenos mencionados se hace con las ventosas y las válvulas de llenado y desagües.</p> <p>En la operación de llenado, es necesario controlar la expulsión adecuada de aire, ya que pueden producirse sobrepresiones capaces de fatigar la tubería o en casos extremos producir la rotura de esta. El vaciado de una conducción es posible tras abrir los desagües, y se debe garantizar la adecuada admisión de aire con el fin de evitar depresiones que pueden ocasionar el colapso de la tubería, la deformación de los elementos elásticos de las juntas o las intrusiones de agentes contaminantes. Sabiendo que el agua contiene aire disuelto, este puede liberarse y acumularse en puntos específicos de una conducción, por lo cual es necesario expulsar estas pequeñas burbujas de aire que se presentan en condiciones presurizadas de un sistema.</p> <p>Conociendo las consecuencias que las operaciones pueden causar en una conducción, es necesaria la correcta ubicación, el adecuado dimensionamiento, la precisa selección y la buena instalación de las ventosas y los desagües. Para ello, en el presente proyecto, se propone un programa que presenta una guía que posibilita al usuario algunas soluciones ante los fenómenos mencionados.</p> <p>El modelo de cálculo o programa, de momento, es aplicable a conducciones simples, no a redes de abastecimiento. En primer lugar, basado en un perfil suministrado por el usuario, el programa ubica de manera adecuada las válvulas de aire (purgadores), las válvulas de aire/vacío (ventosas</p>

bifuncionales), las válvulas combinadas (ventosas trifuncionales) y los desagües. Cabe mencionar que el posicionamiento adecuado de las ventosas y los desagües es tan importante como la dimensión adecuada, ya que su incorrecta ubicación puede disminuir la eficacia del elemento y que este no realice su función de manera correcta. En la primera fase, el programa presenta el perfil y la ubicación de los elementos propuestos, necesarios para el dimensionado, de manera gráfica. La metodología empleada por el programa para la ubicación de los elementos, se basa de los criterios recomendados en el manual práctico (M51:Air Valves: Air-Release, Air/Vacuum & Combination) de la American Water Works Association (AWWA).

En segundo lugar, el programa presenta los resultados del funcionamiento de los elementos. Para el purgador en condiciones normales presurizadas de operación (caudal de aire expulsado), para los desagües (caudal de vaciado), para las ventosas bifuncionales (caudal de aire admitido en operaciones de vaciado y caudal de aire expulsado en operaciones de llenado) y para las ventosas trifuncionales (la combinación de resultados de la ventosa bifuncional y purgador).

En tercer y último lugar, el programa presenta la posibilidad de selección de una serie de elementos adecuados basada en los cálculos de dimensionamiento, en curvas comerciales de fabricantes de ventosas comerciales y en una caracterización previa en banco de ensayo de ventosas comerciales y válvulas de desagüe (banco de ensayos de Global Omnium) con su capacidad real de funcionamiento.

En valenciano

Les operacions d'ompliment i buidatge, l'aire dissolt baix condicions normals d'operació d'una conducció o els trencaments, creen bosses d'aire que produeixen problemes crítics al llarg de la conducció capaces de generar danys o fatigues en la conducció i en els accessoris. El control dels fenòmens esmentats es fa amb les ventoses i les vàlvules d'ompliment i buidatge.

En l'operació d'ompliment, és necessari controlar l'expulsió adequada d'aire, ja que poden produir-se sobrepressions capaces de fatigar la conducció o en casos extrems produir el trencament d'aquesta. El buidatge d'una conducció és possible després d'obrir els desguassos, i s'ha de garantir l'adequada admissió d'aire amb la finalitat d'evitar depressions que poden ocasionar el colapse de la conducció, la deformació dels elements elàstics de les juntes o les intrusions d'agents contaminants. Sabent que l'aigua conté aire dissolt, aquest pot alliberar-se i acumular-se en punts específics d'una conducció, per la qual cosa és necessari expulsar aquestes xicotetes bombolles d'aire que es presenten en condicions pressuritzades d'un sistema.

Coneixent les conseqüències que les operacions poden causar en una conducció, és necessària la correcta ubicació, l'adequat dimensionament, la precisa selecció i la bona instal·lació de les ventoses i els dispositius de buidatge. Per a això, en el present projecte, es proposa un programa que presenta una guia que possibilita a l'usuari algunes solucions davant els fenòmens esmentats.

El model de càlcul o programa, de moment, és aplicable a conduccions simples, no a xarxes de **subministrament**. En primer lloc, basat en un perfil subministrat per l'usuari, el programa situa de manera adequada les vàlvules d'aire (purgadors), les vàlvules d'aire/buit (ventoses bifuncionals), les vàlvules combinades (ventoses trifuncionals) i els dispositius de buidatge. Cal esmentar que el

posicionament adequat de les ventoses i els dispositius de buidatgeés tan important com la dimensió adequada, ja que la seua incorrecta ubicació pot disminuir l'eficàcia de l'element i que aquest no realitze la seua funció de manera correcta. En la primera fase, el programa presenta el perfil i la ubicació dels elements proposats, necessaris per al dimensionament, de manera gràfica. La metodologia utilitzada pel programa per a la ubicació dels elements, es basa en els criteris recomanats en el manual pràctic (M51:Air Valves: Air-Release, Air/Vacuum & Combination) de la American Water Works Association (AWWA).

En segon lloc, el programa presenta els resultats del funcionament dels elements. Per al purgador en condicions normals pressuritzades d'operació (cabal d'aire expulsat), per als dispositius de buidatge (cabal de buidatge), per a les ventoses bifuncionals (cabal d'aire admès en operacions de buidatge i cabal d'aire expulsat en operacions d'ompliment) i per a les ventoses trifuncionals (la combinació de resultats de la ventosa bifuncional i purgador).

En tercer i últim lloc, el programa presenta la possibilitat de selecció d'una sèrie d'elements adequats basada en els càlculs de dimensionament, en corbes comercials de fabricants de ventoses comercials i en una caracterització prèvia d'assajos de ventoses comercials i vàlvules de buidatge (banc d'assajos de Global Omnium) amb la seua capacitat real de funcionament.

En anglés

The filling and emptying operations, the air dissolved in normal operating conditions of a pipe or breaks, create air pockets that produce critical problems along the pipeline capable of generating damage or fatigue in the pipe and fittings. The control of the mentioned phenomena is carried out with the air valves and the filling or draining valves.

During the filling operation, it is necessary to control the adequate expulsion of air, since overpressures may occur capable of fatigued the pipe or, in extreme cases, cause the pipe to rupture. The emptying of a pipe is possible after opening the drains, and adequate air intake must be guaranteed to avoid depressions that can cause the pipeline to collapse, the deformation of the elastic elements of the joints or the intrusion of pollutants agents. Knowing that water contains dissolved air, this can be released and collect at specific points in a pipeline, making it necessary to expel these little bubbles that occur under pressurized conditions in a system.

After knowing consequences that the operations can cause in a pipeline, the correct location, the suitable dimensioning, the precise selection and the correct installation of the air valves and the drainage valves are necessary. To do this, this project proposes a program that presents a guide that allows the user to find some solutions to the aforementioned phenomena.

The model or calculation program, for the moment, is applicable to simple pipes, not to supply networks. First, based on a user-supplied profile, the program appropriately locates the air valves (air-release valves or small orifice air valves), air / vacuum valves (bi-functional valves), combination valves (tri-functional valves), and drainage valves. It should be mentioned that the proper positioning of the air valves and drainage valves is as important as the proper dimension, since their incorrect location can reduce the effectiveness of the element and that it does not perform its function correctly.

In the first phase, the program presents the profile and location of the proposed elements, necessary for sizing, graphically. The methodology used by the program for the location of the elements is based on the criteria recommended in the practical manual (M51: Air Valves: Air-Release, Air / Vacuum & Combination) of the American Water Works Association (AWWA).

Second, the program presents the results of the operation of the elements. For the air-release valves or small orifice air valves in normal pressurized operating conditions (expelled air flow), for the drains (discharge flow), for bifunctional suction cups (admitted air flow in emptying operations and expelled air flow in filling operations) and for the tri-functional air valves (the combination of the results of the bifunctional air valves and the air-release valve or small orifice air valve).

Lastly, the program presents the possibility of selecting a series of suitable elements based on dimensioning calculations, on curves of commercial air valves supplied by manufacturers and on a previous characterization of the real operating capacity in test bench of commercial air valves and drainage valves (Global Omnium Test Bench for these valves)

Palabras clave español (máximo 5): Ventosas; modelo de cálculo; llenado de tuberías; vaciado de tuberías; desagües.

Palabras clave valenciano (máximo 5): Ventoses; model de càlcul; ompliment de conduccions; buidatge de conduccions; vàlvules de buidatge.

Palabras clave inglés (máximo 5): Air valves; calculation model; filling of pipelines, emptying of pipelines; drainage

Agradecimientos

Le agradezco enormemente a mis padres, Luz Mery Morales Pinzón y Carlos Eduardo Grisales Avendaño, y a mi hermana, Lady Carolina Grisales Morales, por ser mi mayor motivación, mis maestros y mi equipo fiel en el camino que emprendo día a día en mi vida. Mi sobrino, Jerónimo Bohórquez Grisales, ha sido el motor más potente que he llegado a tener para superar las dificultades que se han presentado.

Le agradezco a la Universitat Politècnica de València (UPV) por el conocimiento hidráulico adquirido, por el equipo de profesorado que disponen y por la oportunidad de admisión brindada. Le agradezco también a la Catedra Aguas de Valencia (CAV) por el proyecto compartido y por el apoyo económico ofrecido para aportar mis conocimientos y mi esfuerzo.

Le agradezco considerablemente a Jorge García-Serra García por compartir su tiempo, sus conocimientos, su dedicación y sus experiencias con el fin de resolver las dificultades que se presentaron en el proceso del proyecto y con el fin de aportarme mayores conocimientos en mi vida profesional y humana.

Finalmente, le agradezco a mis compañeros y profesores del máster, en especial hidráulica urbana, con los que compartí experiencias inolvidables, disfruté de los conocimientos adquiridos y surgió el nacimiento de una amistad.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	Introducción	1
1.1	El aire en las instalaciones.....	2
1.2	Fenómenos	3
1.2.1	Aire bajo presión.....	3
1.2.2	Llenado.....	3
1.2.3	Vaciado	4
1.2.4	Rotura	7
1.2.5	Transitorios con presencia de aire atrapado.....	7
1.3	Ventosas.....	8
1.3.1	Principio de funcionamiento.....	8
1.3.2	Tipos de ventosas.....	10
1.3.3	Curvas características.....	12
1.3.4	Instalación, operación, mantenimiento y seguridad.....	14
2.	Objetivos.....	15
3.	Antecedentes	16
3.1	Softwares existentes	16
3.1.1	BERMAD	16
3.1.2	VENT-O-MAT	20
3.1.3	ARI.....	28
3.1.4	Valmatic.....	30
3.2	Caracterización de válvulas y ventosas.....	31
3.2.1	Válvulas caracterizadas.....	31
3.2.2	Ventosas caracterizadas	34
4.	Fundamentos del Programa.....	37
4.1	Posicionamiento las ventosas y las válvulas de desagüe.....	38
4.1.1	Posicionar	39
4.1.2	Insertar Punto.....	43
4.1.3	Consolidar.....	43
4.1.4	Perfil.....	43
4.1.5	Eliminar	44

4.2	Cálculo.....	44
4.2.1	Importar perfil.....	45
4.2.2	Vaciado	46
4.2.3	Rotura	57
4.2.4	Llenado.....	62
4.2.5	Purgador.....	64
4.3	Selección	67
5.	Manual de uso.....	73
5.1	Hoja "Posición"	73
5.1.1	Ayuda.....	74
5.1.2	Posicionar	74
5.1.3	Insertar punto.....	75
5.1.4	Consolidar.....	75
5.1.5	Perfil.....	75
5.1.6	Eliminar	75
5.2	Hoja "Cálculo".....	76
5.2.1	Importar.....	76
5.2.2	Calcular Vaciado	77
5.2.3	Calcular Rotura	79
5.2.4	Calcular Purga.....	80
5.2.5	Calcular Llenado.....	80
5.3	Hoja "Selección".....	81
5.3.1	Importar.....	81
5.3.2	Seleccionar	81
5.4	Hoja "Curvas"	82
6.	Resultados.....	83
6.1	Posicionamiento.....	83
6.2	Calculo.....	85
6.2.1	Resultados de vaciado	85
6.2.2	Resultados de rotura.....	95
6.2.3	Resultados de llenado.....	99
6.2.4	Resultados de purgador	101

7.	Análisis de resultados	101
7.1	Comparación con los softwares existentes	102
7.1.1	Vent-O-Mat	103
7.1.2	BERMAD	106
7.1.3	ARI	107
7.1.4	ValMatic	108
8.	Conclusiones y Desarrollos Futuros	109
9.	Referencias bibliográficas	112

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de una impulsión para el cálculo del vaciado de la tubería Fuente: (Espert & García, 2007)	6
Figura 2. Esquema de estructura de descarga. Fuente: (García-Serra García et al., n.d.)	7
Figura 3. Fases de la ventosa: a. Ventosa cerrada ($p_t > 0$), b. Ventosa expulsando aire, c. Ventosa cerrando y d. Ventosa cerrada (depresión). Fuente: (V. S. Fuertes, 1990)	9
Figura 4. Purgadores. Fuente: (V. S. Fuertes, 1990)	11
Figura 5. Ventosas bifuncionales. Fuente: (V. S. Fuertes, 1990)	11
Figura 6. Ventosas trifuncionales. Fuente: (V. S. Fuertes, 1990)	12
Figura 7. Curva característica de la ventosa (gran orificio) Fuente: (V. S. Fuertes, 1989)	13
Figura 8. Curva característica del purgador. Fuente: (V. S. Fuertes, 1990)	14
Figura 9. Datos generales VENT-O-MAT. Fuente: (AVENG, 2013)	21
Figura 10 Datos del perfil. Fuente: (AVENG, 2013)	23
Figura 11 Resultados del análisis económico. Fuente: (AVENG, 2013)	27
Figura 12 Esquema de los componentes del manco de ensayo. Fuente: (EMIMET, 2017)	32
Figura 13 Esquema de instalación para ensayos de admisión. Fuente: (ITA (Grupo de Ingeniería y Tecnología del Agua), n.d., p. 9)	35
Figura 14 Esquema de instalación para ensayos de expulsión. Fuente: (ITA (Grupo de Ingeniería y Tecnología del Agua), n.d., p. 8)	36
Figura 15 Clasificación de puntos en el perfil. Fuente: (BERMAD, 2013)	40
Figura 16 Instalación de elementos aguas arriba y aguas abajo de la válvula de seccionamiento (VS)	41
Figura 17 Criterios de posicionamiento de ventosas y desagües- Fuente: (VALMATIC, 2018, p. 5)	42
Figura 18. Kv de diferentes grados de apertura y DN de válvulas mariposa. Fuente: (García-Serra, 2010, p. 46)	61
Figura 19 botones de ejecución de hoja "Posición"	74
Figura 20 botones de ejecución de la hoja "Cálculo"	76
Figura 21 criterios a definir, hoja "Cálculo"	77
Figura 22 botones de ejecución de la hoja "Selección"	81
Figura 23 criterios a definir, hoja "Selección"	82
Figura 24 grafico resultado de la conducción simple	85
Figura 25 criterios definidos en Vent-O-Mat. Fuente: captura de (AVENG, 2013)	103
Figura 26 perfil resultado de Vent-O-Mat. Fuente: captura de (AVENG, 2013)	103
Figura 27 caudales drenados Vent-O-Mat. Fuente: captura de (AVENG, 2013)	104
Figura 28 propuesta de dimensión de Vent-O-Mat (rotura y vaciado). Fuente: captura de (AVENG, 2013)	105
Figura 29 propuesta de dimensión de Vent-O-Mat (vaciado). Fuente: captura de (AVENG, 2013)	105
Figura 30 velocidad crítica. Fuente: captura de (AVENG, 2013)	105
Figura 31 criterios definidos en BERMAD. Fuente: captura de (BERMAD, 2013)	106
Figura 32 Perfil resultado de BERMAD. Fuente: (BERMAD, 2013)	107
Figura 33 cantidad y dimensión de ventosas en el perfil. Fuente: (BERMAD, 2013)	107
Figura 34 perfil resultado del software ARI. Fuente: (ARIAVCAD, n.d.)	108
Figura 35 perfil resultado del software ValMatic. Fuente: (VALMATIC, n.d.-a)	<u>108</u>

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Nodos tipo bermad. Fuente: (BERMAD, 2013)	17
Tabla 2 Rugosidad absoluta (ks) de materiales. Fuente: Elaboración propia a partir de: (AVENG, 2013)	22
Tabla 3 coeficiente de caudal Kv de la válvula de 200 mm. Fuente: (EMIMET, 2018)	33
Tabla 4 coeficiente de caudal Kv de la válvula de 400 mm. Fuente: (EMIMET, 2018)	33
Tabla 5 coeficiente de caudal Kv de la válvula de 600 mm. Fuente: (EMIMET, 2018)	33
Tabla 6. Coeficientes de la ecuación (5) para los diámetros de válvulas de 100 mm y 150 mm. Fuente: (EMIMET, 2018)	34
Tabla 7 Opciones de componentes y siglas definidas.	38
Tabla 8 Resumen de componente posicionado según condición de punto y siglas de tipo de punto y sigla de tipo de componente	40
Tabla 9 Propuesta de ubicación del perfil de la Figura 17.	42
Tabla 10 diámetro automático de las válvulas de desagüe. Fuente: Experiencia práctica de Global Omnium. 45	45
Tabla 11. Curvas características de diámetros de ventosas comerciales de admisión disponibles	68
Tabla 12. Curvas características de diámetros de ventosas ensayadas de admisión	69
Tabla 13. Curvas características de diámetros de ventosas comerciales de expulsión	69
Tabla 14. Curvas características de diámetros de ventosas ensayadas de expulsión	70
Tabla 15 Cierre dinámico de las ventosas ensayadas en expulsión	70
Tabla 16 identificación de curvas	71
Tabla 17 conducción ejemplo	83
Tabla 18 Resultado de posicionamiento del programa	84
Tabla 19 dimensión de tubería y estado de VS y VD	85
Tabla 20 Resultados en función de la VelVaciadoDesg = 3,00 m/s	86
Tabla 21 dimensión de las ventosas de curvas comerciales de admisión (VelVD=3 m/s)	87
Tabla 22 dimensión de las ventosas de curvas ensayadas de admisión (VelVD=3 m/s)	87
Tabla 23 resultados en función de la velocidad de vaciado en la tubería 0,40 m/s	89
Tabla 24 dimensión de las ventosas de curvas comerciales de admisión (VelTub=0,4 m/s)	89
Tabla 25 dimensión de las ventosas de curvas ensayadas de admisión (VelTub=0,4 m/s)	90
Tabla 26 resultados en función del caudal de vaciado en las válvulas de desagüe de 0,50 m ³ /s	90
Tabla 27 dimensión de las ventosas de curvas comerciales de admisión (QVD=0,5 m/s)	91
Tabla 28 dimensión de las ventosas de curvas ensayadas de admisión (QVD=0,5 m/s)	92
Tabla 29 resultados en función del caudal de vaciado en la tubería 0,50 m ³ /s	92
Tabla 30 dimensión de las ventosas de curvas comerciales de admisión (QTub=0,8 m/s)	93
Tabla 31 dimensión de las ventosas de curvas ensayadas de admisión (QTub=0,8 m/s)	93
Tabla 32 resultados en función del coeficiente del caudal Kv, automático (sin contrapresión, 10 vueltas las válvulas de DN400)	94
Tabla 33 dimensión de las ventosas de curvas comerciales de admisión (Kv)	94
Tabla 34 dimensión de las ventosas de curvas comerciales de admisión (Kv)	95
Tabla 35 resultados de rotura con respecto al porcentaje de rotura (P.K. 1200 m)	96
Tabla 36 dimensión de las ventosas de curvas comerciales de admisión por rotura (%Rotura)	96
Tabla 37 dimensión de las ventosas de curvas comerciales de admisión por rotura (%Rotura)	96
Tabla 38 resultados de rotura simulando una VM (250mm y GA 80) (P.K. 850 m)	97
Tabla 39 dimensión de las ventosas de curvas comerciales de admisión por rotura (Kv)	97
Tabla 40 dimensión de las ventosas de curvas ensayadas de admisión por rotura (Kv)	98
Tabla 41 resultados de rotura simulando AWWA (P.K. 850 m)	98
Tabla 42 dimensión de las ventosas de curvas comerciales de admisión por rotura (AWWA)	98

Tabla 43 dimensió de las ventosas de curvas ensayadas de admisi3n por rotura (AWWA)	99
Tabla 44 Resultado de llenado de 0,4 m/s	99
Tabla 45 dimensió de las ventosas de curvas comerciales de expulsión por llenado (VII=0,3 m/s)	100
Tabla 46 dimensió de las ventosas de curvas ensayadas de expulsión por llenado (VII=0,3 m/s)	100
Tabla 47 resultado del purgador	101

1. Introducción

El presente proyecto propone un programa que se encarga de posicionar, dimensionar y seleccionar las ventosas y desagües en un perfil de conducción simple suministrado por el usuario. Con el presente Trabajo Fin de Máster (TFM) se culminan los estudios del Máster de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente en la Universitat Politècnica de València (UPV).

El trabajo se ha llevado a cabo gracias a la colaboración de la Cátedra Aguas de Valencia con la UPV. Dicha cátedra está adscrita al departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad. El objetivo de la iniciativa es fomentar el desarrollo de las tecnologías involucradas en la gestión del ciclo integral del agua.

El proyecto surge ante la necesidad de contar con una herramienta que posicione y dimensione correctamente las ventosas y los desagües en una conducción simple. También, con el fin de evaluar la capacidad de los componentes existentes instalados en una conducción existente.

El cálculo de las válvulas de desagüe se basa de unos ensayos de caracterización hidráulica de válvulas de desagüe realizados en estudios anteriores elaborados por la empresa EMIMET en las instalaciones al depósito de Albalat dels Sorell (Valencia). Mientras que el dimensionamiento de las ventosas se basa de curvas características comerciales de ventosas y resultados de unas curvas características de algunas ventosas ensayadas. Los ensayos de las ventosas se llevaron a cabo en tres laboratorios: ARI Flow Control Accesories Ltd., en Kfar Charuv (Israel); CSA, en Salsomaggiore Terme (Italia); y Bermad, en Kibbutz Evron (Israel).

El trabajo está compuesto por dos archivos principales: la memoria y el programa. La memoria presenta los conceptos teóricos necesarios para interpretar y entender el programa, integra las caracterizaciones previas, presenta los fundamentos matemáticos, menciona las guías utilizadas, las simplificaciones y los criterios que se tomaron durante la ejecución el programa, presenta el manual de uso, los resultados del programa, por medio de un ejemplo, y finalmente unas recomendaciones para su mejora y su aplicación.

El segundo y último componente del trabajo es el programa. La herramienta utilizada para la ejecución del programa fue VB (Visual Basic), se trata de un lenguaje de programación que permite ampliar la funcionalidad de Microsoft Excel. El tipo archivo del programa es un libro de Excel habilitado para macros (PV_CAV_DGM_JG.xlsm).

El programa cuenta con cuatro hojas, la primera corresponde a la ventana que posiciona las ventosas y los desagües en un perfil suministrado por el usuario, el resultado se puede observar de manera gráfica. La segunda ventana presenta el cálculo del vaciado, rotura, llenado y el diámetro del orificio del purgador, de la conducción simple. La tercera ventana presenta la propuesta de dimensión de las ventosas, basado en el cálculo realizado previamente, y en las curvas ensayadas y comerciales disponibles. La cuarta y última ventana presenta las curvas utilizadas para el dimensionado y el usuario puede agregar curvas de ventosas ensayadas o comerciales que disponga. Es necesario aclarar que se trata de un programa de cálculo y no de un programa de simulación.

El programa es innovador en la fase de dimensionamiento, debido a que presenta alternativas de selección basadas en curvas de ventosas previamente ensayadas o basadas en curvas comerciales

ofrecidas por los fabricantes. Es decir, el programa cuenta con las curvas características de ventosas ensayadas y curvas características de ventosas ofrecidas por fabricante, tanto en admisión como en expulsión. Además, dispone de coeficientes de caudal (K_v) de algunas válvulas de desagüe ensayadas (DN100, DN150, DN200 y DN400).

1.1 El aire en las instalaciones

El aire en el interior de una tubería presurizada tiene tres fuentes principales. Primero, antes de la puesta en marcha del sistema, la conducción está llena de aire. En el momento en que la línea se llena de agua, gran parte del aire es empujado y alguna parte de este es liberado por hidratos, grifos, etc. pero gran parte del aire quedará acumulado en los puntos altos o en puntos estratégicos. La segunda fuente de aire es el agua propiamente, el agua contiene aproximadamente dos por ciento de aire disuelto en su volumen, dicho aire logra salir por aumento de temperatura o por una caída de presión, generalmente esto ocurrirá en los puntos altos del perfil. Por último, el aire puede ingresar por los equipos mecánicos como bombas, accesorios o válvulas cuando ocurren efectos de condiciones de vacío (VALMATIC, 2018).

Las bolsas de aire creadas pueden producir una serie de problemas que afectan la operación normal de una instalación. Pueden producir sobrepresiones que afectan la tubería hasta el punto de llegar a producir fatigas o en casos extremos producir la rotura, dependiendo del material, de la tubería de la instalación. Pueden reducir la sección de la tubería o, hasta cierta magnitud, impedir la circulación del agua, esto se produce cuando la velocidad de remoción no es suficiente para arrastrar el tapón producido por la acumulación de las bolsas de aire, también puede producir mediciones incorrectas de los caudalímetros que, a diferencia de medir únicamente agua, puede existir exceso de medición por el volumen de aire. Además, sobre muchas cosas más que se pueden presentar, se puede reducir la eficiencia en el sistema y el gasto energético innecesario (García -Consuegra et al., 2020).

La presencia del aire en la tubería no siempre es un problema, es más, es necesario incorporar aire en la instalación cuando se hace el vaciado de la conducción o se presenta una rotura en algún punto. Cuando se vacía un tramo de conducción se produce un vacío interior, con presiones inferiores a la presión atmosférica, y esto ocasiona depresiones interiores capaces de producir el colapso de la conducción. Cuando la presión atmosférica es superior a la presión interior de la tubería, el colapso de la conducción es posible. En este caso es necesario incorporar aire en la conducción con el fin de equilibrar las diferencias de presiones y contrarrestar el vacío que se produce internamente por las operaciones de vaciado o vaciado incontrolado (rotura).

Una posible solución para impedir las sobrepresiones, las depresiones y los demás efectos que el aire produce en la tubería es el empleo de ventosas. Su función básica es, admitir aire para mitigar las depresiones, expulsar aire en la función de llenado, así como también expulsar pequeñas cantidades de aire en el comportamiento normal de la instalación (Castillo et al., 2014).

1.2 Fenómenos

1.2.1 Aire bajo presión

Ya es sabido que el agua contiene al menos el dos por ciento de aire disuelto en el volumen, hablando de condiciones estándar (1 atm y 15,16 °C), aunque puede contener más dependiendo de la temperatura y la presión en el interior de la tubería. La capacidad del agua presurizada para retener aire es enorme (AWWA, 2001).

Los efectos perjudiciales de las pequeñas burbujas de aire que se presentan en el agua es que son capaces de juntarse y producir grandes bolsas de aire que pueden producir la reducción de sección de la tubería o en casos extremos, producir el atascamiento del conducto.

1.2.2 Llenado

Se trata de la primera operación a la cual la conducción se expone, el llenado. En las operaciones de llenado se debe garantizar la expulsión total y correcta de aire contenido en la conducción (Arrué Burillo et al., 2019). Las consecuencias de una incorrecta expulsión de las bolsas de aire acumuladas en la instalación producen sobrepresiones en el interior de la conducción capaces de fatigar o en casos externos causar la rotura de los accesorios o de la propia tubería. La evacuación de aire se facilita a través de las ventosas y grifos de purga, el parámetro clave es controlar la velocidad de llenado mediante las válvulas de llenado, si la velocidad no se controla se puede presentar cierres prematuros y cierres bruscos de las ventosas que provocan transitorios hidráulicos.

El aire voluntariamente admitido durante la parada de una instalación debe ser expulsado cuando se realiza el llenado, si la operación no se hace de manera controlada se pueden presentar sobrepresiones en el choque violento entre las láminas de agua o el choque de la lámina transportada con las ventosas de la instalación. Sin la presencia de las ventosas o sin la correcta ubicación y dimensión de estas, las sobrepresiones no las podrá soportar la tubería, el aire atrapado entre dos columnas de agua es un motivo de preocupación importante que se debe evaluar, analizar y por consiguiente mitigar (V. Fuertes et al., 1997).

Si no se controla el llenado de una tubería, los excesos de presión que se producen pueden fatigar la tubería o causar la rotura, si es que la sobrepresión ocasionada supera la resistencia mecánica del tubo.

Por lo cual se debe expulsar el caudal de aire a la misma tasa volumétrica de llenado, sin embargo, se debe hacer a un ritmo gradual para evitar sobrecargas o cierres prematuros en la ventosa, por lo tanto, se recomienda una velocidad de llenado de 0,3 m/s (AWWA, 2001).

Las ventosas Non-Slam son necesarias en ocasiones en las que no hay control en la operación de llenado (caudal de llenado incontrolado). En los casos en los que la operación de llenado es controlada, se recomienda posicionar una ventosa Non-Slam en el lugar de la última ventosa que debe de cerrarse, usualmente en el punto más alto de la conducción. El posicionar una mayor cantidad de ventosas Non-Slam genera una ralentización del llenado, dado que su cierre se produce con presiones y caudales muy bajos, por lo que los caudales de aire que se expulsan son muy bajos.

Como ya se ha explicado, en la operación de llenado la expulsión de aire supone la sustitución de agua, se debe tener en cuenta el caudal de condiciones interiores de la tubería y el caudal en condiciones normales del aire.

La ubicación de las ventosas tiene que ser en puntos estratégicos en donde se acumulen las bolsas de aire. El dimensionado adecuado en la fase de expulsión es una tarea complicada. Si el orificio de salida de la ventosa es pequeño, el elemento no expulsara la cantidad de aire requerida y estas bolsas retenidas se comprimirán y producirán sobrepresiones que ocasionaran la fatiga o afectación de la tubería. Por el contrario, si el orificio es sobredimensionado, la cantidad de aire expulsada será la requerida, pero se expulsará el aire con gran rapidez, por consiguiente, la lámina de agua consigue una gran velocidad. Al llegar la lámina a la ventosa, ésta se cierra de manera abrupta y se genera un golpe de ariete, perjudicial para la instalación (V. S. Fuertes, 1990).

Lo ideal, en cualquier caso, es controlar la velocidad de llenado desde origen de llenado, sea una válvula o una estación de bombeo.

Cabe mencionar que el tamaño de conexión de la ventosa a la tubería no se debe seleccionar en función del tamaño de la conducción. Se deben consultar las curvas características de las ventosas, es usual encontrar que, para diámetros nominales de conexión iguales entre ventosas, se expulsan o admiten cantidades de aire muy diferentes en función del tamaño del orificio de cada una de las ventosas. En conclusión, el tamaño del orificio de la ventosa es el que determina su capacidad de admisión o expulsión, no el tamaño nominal de conexión de las ventosas.

1.2.3 Vaciado

En el mantenimiento, las incidencias o la reparación de ciertos elementos, se requiere la operación de vaciado de algunos tramos de una red. Los elementos que originan esta operación son los desagües, son de menor tamaño con respecto a la tubería principal, se posicionan en puntos bajos y las ventosas en puntos altos de un perfil de conducción, generalmente los puntos bajos y normalmente se vierte el agua desaguada en una poceta, que posteriormente se extrae por medio de una bomba de achique (García -Consuegra et al., 2020).

Aguas abajo de la válvula de desagüe se tiene la presión atmosférica, al abrirse, si en la tubería no se admite el aire atmosférico no se podrá vaciar la tubería, además, se producirán depresiones que ocasionarán el colapso de la tubería, se puede dar el caso en que la resistencia mecánica de la tubería soporte dichas depresiones, pero los accesorios no serán capaces de soportarlas, en conclusión, seguramente las consecuencias son fatales. Los elementos que mitigan dicho impacto son las ventosas de gran orificio que admitan la cantidad de aire requerida. Comprensiblemente, el caudal de agua desaguado debe ser sustituido de igual magnitud con caudal de aire admitido por las ventosas (V. S. Fuertes, 1990).

Existen tres problemas principales en la operación de vaciado. La primera, las depresiones como consecuencia de la apertura de las válvulas de desagüe sin contar con la adecuada localización y dimensión de las ventosas que harán posible la admisión de aire necesaria. En casos no deseados, se puede llegar al colapso de la tubería. En segundo lugar, se puede presentar la dificultad operativa de las válvulas de desagüe por excesos de presión en el interior de la tubería. Y la tercera, el exceso

de velocidad de vaciado puede generar importantes cambios de presión, vibraciones y daños estructurales de descarga. Normalmente se admite una velocidad máxima de circulación por la tubería principal, en condiciones de desagüe, de 0,3 o 0,4 m/s (García-Serra García et al., n.d.). También, se admite una velocidad máxima en la válvula de desagüe de 5 0 6 m/s (García-Serra, 2009).

1.2.3.1 Protocolo de vaciado

Para el vaciado de una conducción, el caso más desfavorable es que se quiera vaciar la extensión total, se recomienda seccionar los tramos de la extensión total y vaciar uno por uno. La definición de los tramos será posible por el cierre de las válvulas de seccionamiento ubicadas en el perfil de conducción.

De acuerdo (Espert & García, 2007) y (García-Serra, 2009). Partiendo del perfil presentado en la Figura 1, posicionando las válvulas de seccionamiento y situando al menos una válvula de desagua en cada uno de los tramos seccionados en los puntos bajos de cada uno de ellos, el proceso a seguir es el siguiente:

1. Con la instalación completamente llena, detenida completamente, la válvula de retención y la válvula de regulación a la salida del grupo de bombeo cerradas. Se deben cerrar todas las válvulas de seccionamiento, de este modo la presión en cada punto será la estática que existía antes de cerrar las válvulas de seccionamiento.
2. Los tramos entre las válvulas de seccionamiento cerradas se vaciarán desde el punto superior hasta el inferior. Por lo tanto, el orden de vaciado de los tramos será tramo 4, tramo 3, tramo 2 y tramo 1, respectivamente, se puede observar la Figura 1.
3. Inicialmente se hace el vaciado total del tramo 4. Partiendo de que todas las válvulas de desagüe se encuentran cerradas, se abre el desagüe en la posición más alta, es decir, la válvula de desagüe de mayor cota. Una vez que dicho desagüe no drena más agua, se abre la siguiente válvula de drenaje, será la siguiente válvula de desagüe en orden descendente de cotas, hasta que deja salir el agua de la siguiente parte del tramo. El proceso se termina hasta que el total de las válvulas de desagüe del tramo 4 se abren. Es posible realizar el proceso de vaciado simultaneo de varios tramos teniendo en cuenta que, en todo caso, obviamente, los tramos se encuentren aislados por las válvulas de seccionamiento. De esta manera se disminuye el tiempo de vaciado.
4. A continuación, se abre la válvula de seccionamiento del punto final del tramo 3 (VS3, se abre). A partir de este punto se procede a realizar el vaciado del tramo 3, iniciando con la apertura de la válvula de desagüe más elevada de dicho tramo y terminando con la válvula de desagüe más baja del tramo 3.
5. Se repite el procedo anterior para el tramo 2 y el tramo 1, respectivamente, hasta terminar con el vaciado total de la conducción.

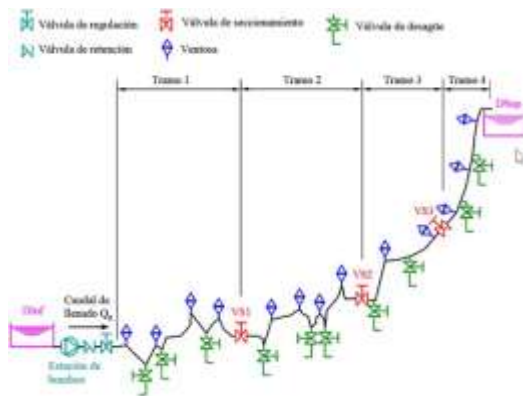


Figura 1. Esquema de una impulsión para el cálculo del vaciado de la tubería Fuente: (Espert & García, 2007)

1.2.3.2 Válvulas de vaciado

De acuerdo con (Espert & García, 2007), cuando una válvula de desagüe está cerrada y la instalación está parada, el desagüe tendrá aguas arriba la presión en el interior de la tubería y aguas abajo la presión atmosférica en el punto de descarga o la contrapresión. Si la diferencia de presiones es elevada existe la posibilidad de que se impida la apertura de la válvula de desagüe y, si se aumenta el par de apertura aplicado, se puede afectar el eje de accionamiento. Para ello, la presión aguas arriba de la válvula de desagüe, es decir, la presión aguas arriba, no debe exceder los 40 mca (4 bar). Por lo cual la diferencia de cotas entre dos válvulas de vaciado no deberá superar 40 m, si es posible.

Para el vaciado conviene instalar válvulas de desagüe tipo mariposa en vez de tipo compuerta, dado que, tanto el tamaño como el par de maniobra son menores, además, su precio es inferior a partir de diámetro 250 mm. El único caso en el que conviene instalar las válvulas de compuerta es cuando existen sólidos, de gran dimensión, hacia el desagüe (Espert & García, 2007).

1.2.3.3 Estructura de descarga

Los disipadores de energía son uno de los elementos recomendables en la estructura de descarga. Según (García-Serra García et al., n.d.), es indispensable contar comuna, al menos, una válvula de desagüe. Existe la posibilidad de ubicar dos válvulas de desagüe en serie, incrementado así el grado de seguridad. Según el tamaño de las válvulas de desagüe y las presiones a las que se exponen, para facilitar la maniobra de apertura se recomienda instalar un bypass con una válvula de menos diámetro para ocupar el espacio entre las dos válvulas de desagüe. Es necesario instalar un grifo de purga entre el espacio de los dos desagües, posibilitando la expulsión de aire atrapado en dicho tramo. Por último, se recomienda colocar elementos adicionales que incremente la resistencia hidráulica de la estructura de descarga, estos elementos pueden ser placas orificio mono o multiperforadas ubicadas transversalmente en la última parte de la estructura de descarga.

A continuación, se presenta el proceso de operación de la estructura de descarga, para ello se puede observar la Figura 2: Primero, se abre la purga (D) y se llena, con el bypass (C), el carrete intermedio entre las válvulas de desagüe. En segundo lugar, se abre la primera válvula de desagüe (A), en este punto se equilibran las presiones aguas arriba y aguas debajo de dicha válvula, después se cierra el

bypass. En tercer lugar, se abre la segunda válvula de desagüe (B), esta maniobra es más complicada por el hecho de que no existe equilibrio de presiones aguas arriba y aguas debajo de la válvula de desagüe. En algunas ocasiones se emplean válvulas especiales (paso anular, por ejemplo). Cuando el flujo es considerable, las pérdidas de carga generadas por el disipador de energía incrementan la presión aguas abajo de la válvula de desagüe (B), se produce un mayor equilibrio de presiones y se facilita la apertura de este desagüe.

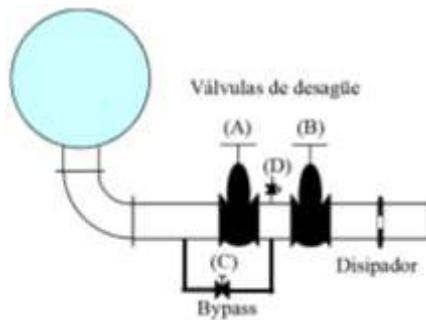


Figura 2. Esquema de estructura de descarga. Fuente: (García-Serra García et al., n.d.).

1.2.4 Rotura

Se trata de un vaciado incontrolado, es el caso más desfavorable, dependiendo del porcentaje de rotura de la sección de la tubería, de vaciado que se puede presentar. Dado que, se vacía la extensión total de la conducción y no existe, por algún tiempo prolongado, la posibilidad de seccionar, por medio de las válvulas de seccionamiento, la extensión total en tramos.

La rotura representa un cambio de velocidad abrupto de velocidad debido a la separación de la columna y al flujo por gravedad. En el flujo por gravedad, se pueden presentar condiciones de vacío extremas en los puntos altos de la conducción. La mayoría de las tuberías pequeñas o medianas pueden soportar condiciones de vacío; sin embargo, producto de la baja rigidez, las tuberías de gran dimensión pueden colapsar debido a las presiones internas negativas. Por tal motivo, es importante dimensionar las ventosas en condiciones de vacío extremas para mantener la integridad de la tubería y garantizar la seguridad de la extensión total de la instalación (AWWA, 2001).

1.2.5 Transitorios con presencia de aire atrapado

Como lo afirma (V. S. Fuertes, 1989), el estudio del flujo transitorio de un único fluido es complicado, se complica mucho más con la presencia de dos fluidos (aire y agua) en dos fases distintas (gaseosa y líquida). No se trata de un problema sencillo, dado que, es complicado conocer el tamaño y la localización exacta de las bolsas de aire en el instante inicial, esto dificulta el análisis de transitorios.

Varios investigadores han concluido y demostrado que las bolsas de aire incrementan considerablemente las presiones máximas ante un efecto transitorio. Se ha demostrado que, las pequeñas burbujas de aire incrementan considerablemente las presiones transitorias, mientras que las grandes bolsas de aire pueden reducir las sobrepresiones causadas por la ocurrencia de un

transitorio hidráulico. La explicación física de lo mencionado se debe a que las pequeñas burbujas de aire, debido a la baja densidad del aire y baja inercia, son fácil de comprimir; por otro lado, cuando las bolsas aumentan su tamaño actúan como un disipador o un amortiguador de energía que ayuda a reducir las sobrepresiones generadas ante un efecto transitorio. Hasta el punto de determinar si el tamaño de la bolsa de aire es pequeña o grande, dependiendo de los efectos producidos por el transitorio hidráulico (Pozos-Estrada et al., 2017).

El golpe de ariete es un aumento repentino de presiones debido a los cambios excesivos de velocidad, también se conoce como un aumento de presión o transitorio hidráulico. El golpe de ariete es un fenómeno complejo de comprender y de analizar, se requieren análisis informáticos; sin embargo, los principios operativos generales minimizan los efectos del mencionado fenómeno (AWWA, 2001).

1.3 Ventosas

Las ventosas son dispositivos diseñados para admitir o liberar aire durante las operaciones de una conducción, como lo son el llenado, vaciado, rotura u operación normal de un sistema. La seguridad de un sistema depende de la eficiente evacuación o admisión del aire en las conducciones. Las ventosas se encargan de realizar la función de manipular el aire, dependiendo del tipo y de la posición de la ventosa (AWWA, 2001).

Las ventosas son elementos que se posicionan en los sistemas hidráulicos con dos objetivos fundamentales. El primero, más relevante que el segundo, es la ventilación del sistema. El segundo, como dispositivo de protección frente a la presencia de un posible golpe de ariete.

Como elementos de ventilación de sistemas, las ventosas tienen que cumplir dos funciones. La primera es permitir la entrada o salida de aire en la tubería en operaciones de llenado, vaciado o rotura. La segunda es, expulsar el aire liberado durante el funcionamiento normal de la instalación, para de esta manera impedir que dicho aire se acumule en zonas estratégicas de la conducción.

Como elemento protector, debe mitigar las depresiones durante un fenómeno transitorio, que, en caso extremo, puede ocasionar el colapso de la tubería y más aún si esta es de gran dimensión.

1.3.1 Principio de funcionamiento

La interacción de la ventosa con el exterior es a través de un orificio de sección A_0 por donde entra y sale aire. En el cuerpo de la ventosa se encuentra un flotador de volumen V_f , el cual sube o baja cerrando o abriendo el orificio de salida. Obviamente, el peso específico del agua γ debe ser mayor al del flotador γ_f . Se llamará p_t a la presión manométrica en el interior de la tubería (en el caso de depresión el valor se llamará p_d) y por último, se llamará V_s al volumen del flotador sumergido en agua. (V. S. Fuertes, 1990).

El principio de funcionamiento de las ventosas se explica a partir del balance de fuerzas que actúan sobre el flotador. La resultante de las fuerzas permitirá subir o bajar al flotador, dichas fuerzas actuantes son:

- El peso del flotador: $\gamma_f V_f$

- El empuje del agua: γV_s
- El desequilibrio de presiones: $p_t A_0$

Existe una fuerza de adherencia que puede variar del 10% al 50% del peso del flotador. Dicha fuerza corresponde a la que se puede presentar, dependiendo de los materiales utilizados, con el contacto del flotador con el orificio, se manifiesta solo cuando la ventosa está cerrada y puede impedir la apertura de la ventosa (V. S. Fuertes, 1990).

También se presenta otra fuerza adicional, se trata de la fuerza de sustentación y tiene que ver con la incidencia del flujo de aire sobre la superficie del flotador cuando el aire sale de la conducción. Dicha fuerza puede generar el cierre prematuro de la ventosa y ocasionar la incapacidad de expulsar el aire necesario de la instalación, existen algunos fabricantes que ofrecen la información del caudal máximo de expulsión sin que se provoque el cierre prematuro.

En el momento en que la ventosa se encuentra cerrada, la presión en el interior de la tubería es superior a la presión atmosférica, como se puede observar en la primera imagen (a) de la Figura 3, la ventosa se encuentra cerrada porque la presión de la tubería es superior a la atmosférica. Cuando el peso del flotador supere la suma de empuje del agua más la fuerza resultante del desequilibrio de presiones la ventosa se abrirá, es decir, cuando se presente $\gamma_f V_f > \gamma V_s + p_t A_0$.

Cuando el cuerpo de la ventosa se encuentre lleno de aire, esta tendrá que abrir. En este momento desaparece el empuje del agua, por lo que se debe cumplir $\gamma_f V_f > p_t A_0$; si se produce lo contrario la ventosa nunca abrirá. Analizando la desigualdad, se puede observar que al peso específico del flotador está condicionado por el área del orificio y la presión de trabajo, de esta manera se puede obtener el peso del flotador conociendo el área del orificio, la presión de trabajo y el peso específico del flotador, o también, se puede conocer la presión máxima de trabajo que puede soportar la ventosa disponible. Por lo cual, para expulsar grandes cantidades de aire, es necesario un orificio de gran tamaño, pero, al aumentar la sección del orificio, la presión de trabajo no puede ser elevada si el volumen del flotador no es enorme.

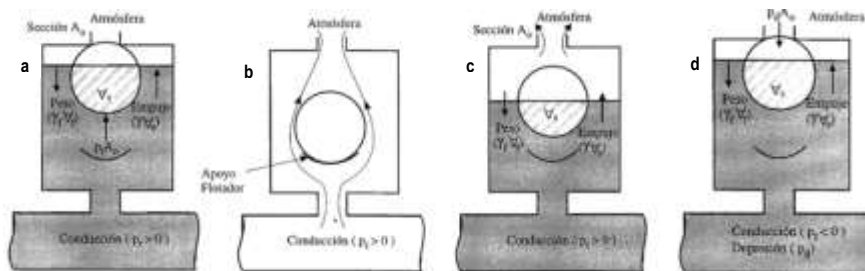


Figura 3. Fases de la ventosa: a. Ventosa cerrada ($p_t > 0$), b. Ventosa expulsando aire, c. Ventosa cerrando y d. Ventosa cerrada (depresión). Fuente: (V. S. Fuertes, 1990).

En la segunda imagen (b) de la Figura 3. Se puede observar que la ventosa ha abierto y el flotador descendió hasta el apoyo del cuerpo de la ventosa y el aire el expulsado libremente al exterior a través del orificio. La sección de entrada al cuerpo de la ventosa dese ser, como mínimo, igual a la sección

del orificio, si no se cumple esto, la sección de entrada al cuerpo de la ventosa determina la cantidad de aire expulsado a una presión dada.

En la tercera imagen (c) de la Figura 3, el cuerpo de la ventosa se empieza a llenar de agua, consecuencia de la expulsión de aire de la conducción en la operación de llenado. En el flotador actúa la fuerza de empuje del agua γV_s , cuando dicho empuje supera el peso del flotador $\gamma_f V_f$, este ascenderá hasta apoyarse en el orificio y la ventosa cerrará. Al momento en el que se cierra la ventosa, la presión existente en la tubería $p_t A_0$ ayuda a mantenerla cerrada sumado al empuje del agua y la fuerza de adherencia. El peso del flotador se opone a las fuerzas mencionadas, pero su oposición no es capaz de superar la suma de todas las fuerzas.

En la última fase de la ventosa, como se puede observar en la cuarta imagen (d) de la Figura 3, si la presión de la tubería es inferior a la atmosférica y la ventosa está cerrada, la apertura se produce cuando el peso del flotador más la fuerza de la depresión superen el empuje del agua. Es decir, cuando $\gamma_f V_f + p_t A_0 > \gamma V_s$, considerando la mencionada fuerza de adherencia que afecta la apertura de las ventosas. Una vez la ventosa ha abierto, la fuerza de desequilibrio y la fuerza de adherencia ya no actúan y la ventosa permanecerá en dicho estado hasta que cambie la operación de la conducción, en este caso se encuentra en vaciado.

En resumen, en la operación de llenado, considerando que la conducción se encuentra llena de aire, el flotador se encuentra apoyado en el cuerpo de la ventosa y se empieza a expulsar aire a través del orificio hasta que el flotador asciende totalmente y hace contacto con el orificio, cerrando la ventosa. Mientras que, en la operación de vaciado, se presentan depresiones en la conducción que hacen que el flotador descienda, permitiendo la entrada de aire y produciendo la apertura de la ventosa a la vez que las válvulas de desagüe permiten la salida de agua de la conducción (V. S. Fuertes, 1990).

1.3.2 Tipos de ventosas

La clasificación básica de las ventosas viene dada por las dos funciones que realizan los elementos. Las ventosas de gran orificio permiten la entrada y salida de aire durante las operaciones de vaciado y llenado de la instalación, mientras que las ventosas de pequeño orificio o, también llamados, purgadores se encargan de expulsar el aire en operaciones normales del sistema.

1.3.2.1 Pequeño orificio o purgadores

También llamadas ventosas automáticas, de alta presión o monofuncionales, se trata de sistemas hidromecánicos que expulsan, de forma automática, pequeñas bolsas de aire que se acumulan en los puntos elevados de una conducción en condiciones normales de operación y condiciones presurizadas (Gandarillas Prieto & Técnico Regaber -Hidroglobal, n.d.). Se caracterizan por poseer una sección de orificio de salida pequeña (máximo 25 mm). Cabe mencionar que los purgadores no permiten la admisión de aire

Como se puede observar en la Figura 4, existen numerosas tecnologías al desarrollo de purgadores. En el mercado se pueden encontrar purgadores con flotador esférico de acción directa contra el pequeño orificio, flotadores con palancas, flotadores de acción indirecta mediante gomas desplegadas y muchos más. Todos ellos cumplen con la función, cuando el nivel de agua desciende, el flotador

cae, abriendo el orificio de salida y permite la expulsión de aire, acumulado en el cuerpo de la ventosa, a la atmósfera (Gandarillas Prieto & Técnico Regaber -Hidroglobal, n.d.).

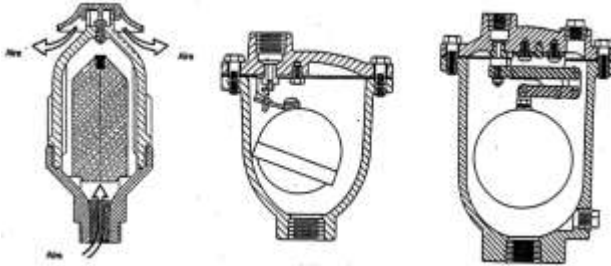


Figura 4. Purgadores. Fuente: (V. S. Fuertes, 1990).

1.3.2 Ventosas bifuncionales o de gran orificio

Para evitar los efectos críticos que ocasionan las operaciones de vaciado o llenado de una conducción se emplean las ventosas bifuncionales, también llamadas aire vacío. Están diseñadas para expulsar grandes cantidades de aire durante el llenado y admitir grandes cantidades de aire durante el vaciado. En la fase de liberación de aire, la ventosa actúa de similar manera al purgador, excepto que el diámetro del orificio es mayor y no se abre bajo presión, debido a que está diseñada para expulsar grandes cantidades de aire a través del orificio (AWWA, 2001). En la fase de admisión de aire el flotador desciende en el cuerpo de la ventosa hasta el apoyo cuando la ventosa está llena de aire o la presión de la tubería es menor a la atmosférica. En la Figura 5, se puede observar un esquema de algunas ventosas bifuncionales que existen en el mercado.

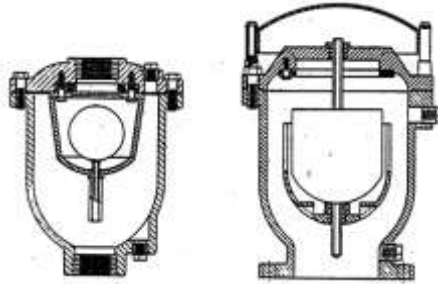


Figura 5. Ventosas bifuncionales. Fuente: (V. S. Fuertes, 1990).

1.3.3 Ventosas trifuncionales o Ventosas combinadas

Las también llamadas ventosas de doble efecto o de doble orificio, combinan las funciones de efecto automático y las de efecto cinético. Las ventosas trifuncionales expulsan aire en la operación de llenado, admiten aire en la operación de vaciado y purgan pequeñas cantidades de aire durante la operación normal del sistema.

Como se puede observar en la Figura 6, pueden encontrarse con un único cuerpo o con dos cuerpos conectados entre sí, combinación de una de gran orificio y un purgador (V. S. Fuertes, 1990).

Trabaja de la siguiente manera, durante el llenado de la conducción el agua va empujando aire el cual va saliendo a la atmosfera a través del gran orificio de la ventosa, en este proceso el pequeño orificio permanece abierto. Cuando la conducción se llena completamente los dos orificios se cierran, una vez la tubería alcanza la presión de operación normal de sistema y va acumulando aire, este se expulsa a través del pequeño orificio. Por último, si el sistema es vaciado o aparece alguna presión negativa (rotura), el flotador descenderá, abriendo el orificio y permitirá la entrada de aire a la conducción (Gandarillas Prieto & Técnico Regaber -Hidroglobal, n.d.).

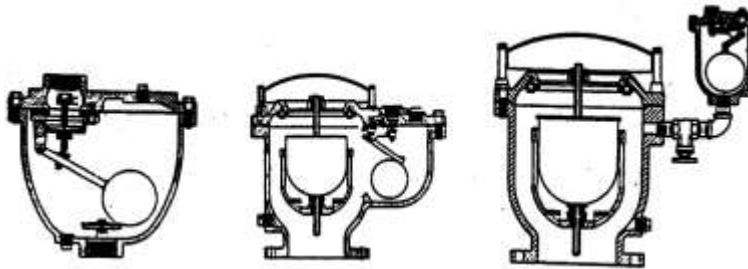


Figura 6. Ventosas trifuncionales. Fuente: (V. S. Fuertes, 1990).

1.3.2.4 Antiarriete o non.slam (NS)

Cuando el agua llega a la ventosa provoca el cierre del orificio por medio del flotador, en dicha acción se pueden generar excesos de presión o sobrepresiones como consecuencia del impacto del flotador con el orificio. Las ventosas non slam (NS) generalmente cuentan con dos o hasta tres flotadores, cuando detectan excesos de velocidad de expulsión de aire, cierran un primer flotador provocando la reducción del caudal de expulsión (reduciendo el tamaño del orificio inicial). Este incremento de presión producido frena el flujo de agua, de manera que al elevar el segundo flotador lo hará con menor velocidad y el choque provocado por el cierre de este no será abrupto (Arrué et al., 2017).

1.3.2.5 Otros tipos

Existen otros tipos de ventosas utilizadas para casos específicos. Las diferenciales, por ejemplo, cuentan con una capacidad elevada de admisión de aire mientras que la expulsión de aire se encuentra limitada, además, controlando el cierre o la apertura para ciertas presiones dadas. Los aductores son ventosas que solo permiten la admisión de aire, se suelen combinar con las ventosas bifuncionales o trifuncionales cuando la capacidad de admisión de estas no es suficiente, aunque su capacidad de expulsión si es la suficiente. Los grifos de purga o también denominadas ventosas manuales son válvulas generalmente de bola (Arrué Burillo et al., 2019).

1.3.3 Curvas características

Generalmente los fabricantes presentan la relación entre el caudal de aire admitido o expulsado y la diferencia de presiones entre el interior de la tubería y el exterior en forma gráfica. Esto se conoce como la curva característica de la ventosa, dicha curva se obtiene de un ensayo realizado en las

posibles regiones de funcionamiento. A partir de las curvas características se puede obtener la expresión matemática que la representa en la viene en función del caudal de aire y la presión diferencia (V. S. Fuertes, 1990).

En la Figura 7 se presenta la representación de la curva característica de la ventosa de gran orificio. En el eje X se representa el caudal en condiciones normales del aire, caudal medido a temperatura ambiente y presión atmosférica. En el eje Y de la gráfica se representa la presión diferencial que da lugar a la entrada o salida de aire. Cuando la ventosa funciona en la fase de expulsión se considera una presión diferencial de $\Delta p = p_t^* - p_{atm}^*$, por otro lado, cuando la ventosa funciona en fase de admisión se considera una presión diferencial de $\Delta p = p_{atm}^* - p_t^*$.

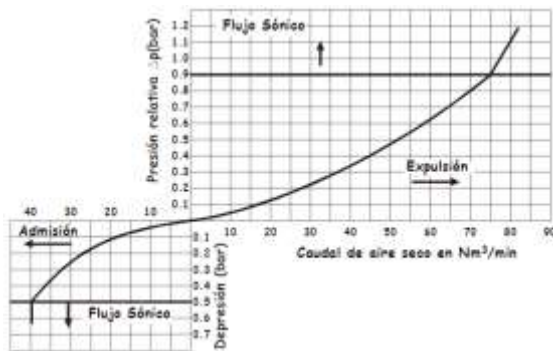


Figura 7. Curva característica de la ventosa (gran orificio) Fuente: (V. S. Fuertes, 1989).

No siempre se puede fiar de las curvas características que ofrecen los fabricantes en los catálogos dado que ciertos ensayos no se hacen de manera adecuada. Existen algunas ventosas que presentan el cierre prematuro del flotador como consecuencia de la ya mencionada fuerza de sustentación presente en la fase de expulsión. Si la velocidad de expulsión es alta, se puede superar el peso del flotador y el cierre indeseado de la ventosa, dejando bolsas de aire acumuladas en la conducción o sobrecargando las demás ventosas instaladas en la conducción. A este fenómeno se le conoce como "cierre dinámico" (V. S. Fuertes, 1990).

Cuando la ventosa se encuentra en fase de expulsión (costado derecho de la Figura 7) trabaja en flujo sónico, el caudal en condiciones normales aumenta si lo hace la presión de entrada (presión de tubería), por el contrario, el caudal volumétrico en condiciones reales se mantendrá constante. (bloqueo sónico) eso es debido a que la densidad del aire incrementa al aumentar la presión. Mientras que cuando la ventosa se encuentra en la fase de admisión (costado izquierdo de la Figura 7) y trabaja en flujo sónico, tanto el caudal en condiciones normales como el caudal volumétrico real permanecerá constante dado que la densidad atmosférica no podrá incrementarse por mucho que aumente la depresión.

En la Figura 8 se presenta la curva característica del purgador, los purgadores suelen trabajar en zona sónica, evacuando un gran diferencial de presiones con pequeños caudales de aire a la velocidad del sonido, esto dado que el orificio es de pequeña dimensión. Por el contrario, las ventosas de gran

orificio trabajan en la zona subsónica con pequeños diferenciales de presión y por ello, elevados caudales de aire producto del gran orificio.

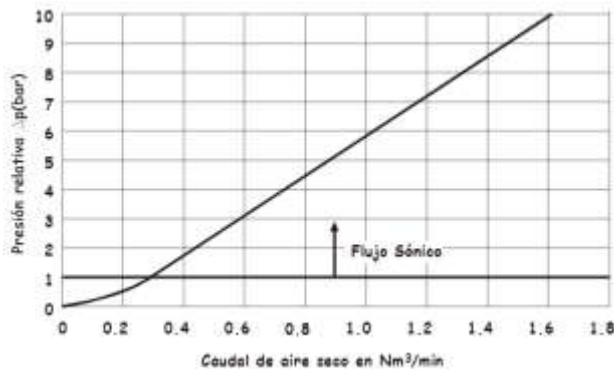


Figura 8. Curva característica del purgador. Fuente: (V. S. Fuertes, 1990).

Según (V. S. Fuertes, 1990), Las diferentes zonas de funcionamiento de las ventosas (zona subsónica y zona sónica) se determinan a partir de la presión existente en el interior de la tubería.

- Fase de expulsión: En la fase de expulsión la presión aguas arriba de la ventosa es la absoluta en el interior de la tubería p_t^* , mientras que la presión aguas abajo es la atmosférica p_{atm}^* . Por lo cual, en esta fase la ventosa trabaja en zona subsónica cuando $p_t^*/p_{atm}^* < 1,893$. Esto suponiendo que $p_{atm}^* = 10,33 \text{ mca}$, la presión absoluta será $p_t^* < 19,55 \text{ mca}$ para estar en zona subsónica, lo que representa una presión manométrica de $19,55 - 10,33 = 9,22 \text{ mca}$. Esto supone un diferencial de presiones de aproximadamente $0,9 \text{ bar}$.
- Fase de admisión: A diferencia de la fase de expulsión, ahora la presión aguas arriba es la atmosférica p_{atm}^* y la presión aguas abajo es la presión absoluta en el interior de la tubería p_t^* . Por lo cual, en esta fase la ventosa trabaja en zona subsónica cuando $p_t^*/p_{atm}^* > 0,528$. Esto suponiendo que $p_{atm}^* = 10,33 \text{ mca}$, la presión absoluta será $p_t^* > 5,45 \text{ mca}$ para estar en zona subsónica, lo que representa una presión manométrica de $5,45 - 10,33 = -4,88 \text{ mca}$. Esto supone un diferencial de presiones de aproximadamente $0,48 \text{ bar}$.

1.3.4 Instalación, operación, mantenimiento y seguridad

Según (AWWA, 2001), para garantizar que la ventosa funcione en óptimas condiciones, es necesario una adecuada instalación, operación, mantenimiento y seguridad de las ventosas.

1.3.4.1 Instalación

Para la correcta instalación de las ventosas se sugiere seguir el manual proporcionado por el fabricante; la ventosa debe ubicarse lo más cercana posible a la tubería; debe asegurarse una instalación que posibilite el mantenimiento de la ventosa; la conexión de la tubería con la conexión

debe ser mayor a la entrada al cuerpo de la ventosa; para efectos de corrosión se recomienda aplicar un recubrimiento; las ventosas ubicadas en el suelo deben estar protegidas contra el congelamiento, la contaminación o el vandalismo y las ventosas ubicadas bajo tierra deben contar además con una bóveda para su protección.

1.3.4.2 Operación y mantenimiento

Los purgadores deben abrirse y lavarse con mayor frecuencia que las ventosas de gran orificio, se recomienda hacer dicha operación una vez al año. Se debe inspeccionar las ventosas al menos una vez al año con el fin de buscar fugas y reemplazar los asientos elásticos.

Se requiere gran precaución en las operaciones de llenado y vaciado de la tubería. Nunca se deben insertar objetos en la fase de admisión de la ventosa, esto puede ocasionar su daño.

1.3.4.3 Seguridad

En el caso de las estructuras subterráneas, se ha visto que los gases que ingresan en las tuberías salen por la ventosa y pueden permanecer en la bóveda de la ventosa subterránea. Siempre se debe contar con un sistema de ventilación y un detector de gas y poco oxígeno antes de ingresar a inspeccionar las estructuras subterráneas de las ventosas.

2. Objetivos

La realización de este trabajo se centra en el módulo de cálculo o programa para posicionar, dimensionar y seleccionar ventosas de una conducción simple. El dimensionado se basa en curvas de ventosas ensayadas y comerciales, y las opciones del cálculo de vaciado se basa en datos de caracterización de válvulas de desagüe. No se trata de un programa de simulación e inicialmente se hizo con el fin de presentar una propuesta de localización, dimensión y selección de ventosas y válvulas de desagüe para conducciones simples. Con base en esto se tiene como finalidad alcanzar los siguientes objetivos

- Presentar una propuesta de posicionamiento de ventosas y válvulas de desagüe de un perfil de una conducción simple suministrada por el usuario.
- Presentar los resultados de cálculo, basado en la definición previa del posicionamiento de los componentes, de los caudales drenados por las válvulas de desagüe, de los caudales de aire admitido por las ventosas en las operaciones de vaciado y rotura, de los caudales de aire expulsado por las ventosas en las operaciones llenado y el diámetro del orificio de los purgadores.
- Basado en los resultados de cálculo y en las curvas características, comerciales y ensayadas, de una gran variedad de fabricantes de ventosas:
 - Proponer la dimensión de cada una de las ventosas posicionadas y calculadas en las etapas previas y dar libertad de selección al usuario.
 - Posibilitar al usuario la manera de incorporar nuevas curvas comerciales o ensayadas que disponga.

Al analizar los resultados del programa comparado con los resultados de los softwares existentes, se concluirá el éxito del programa con sus posibles recomendaciones de mejora.

3. Antecedentes

En primer lugar, se estudiaron algunos softwares existentes para el posicionamiento y el dimensionamiento de las ventosas y las válvulas de desagüe. En segundo lugar, se estudió la caracterización previa de las válvulas de llenado, las válvulas de vaciado y las ventosas comerciales ensayadas.

3.1 Softwares existentes

Se estudiaron cuatro softwares para el dimensionado de ventosas. Cada fabricante ofrece los programas, unos más completos que otros, con el fin de dimensionar y posicionar las ventosas de su respectivo fabricante para cualquier material, diámetro de tubería y perfil de una conducción simple, tanto para bombeo (bomba-deposito) como para conducciones de gravedad (deposito a deposito).

Para cada uno de los programas es necesario un previo registro para la creación de una cuenta. Los softwares, Bermad y Vent-O-Mat son descargables, para la versión completa de Vent-O-Mat es necesaria la solicitud de una clave, de lo contrario se tiene disponibilidad del demo. Mientras que los softwares de ARI y ValMatic son vía web.

A continuación, se describen los softwares estudiados:

3.1.1 BERMAD

El acceso al software de Bermad es posible con un previo registro y una posterior autorización del enlace de descarga. Después de realizar la instalación del programa se introduce el usuario y la contraseña, digitados en los datos de registro. Se trata de un software de descarga y se ingresa con el usuario y la contraseña de registro (sitio web (BERMAD WEB, 2021)).

Las etapas para la ejecución de un proyecto son:

3.1.1.1 Creación de proyecto

Esta etapa se divide en dos fases. Inicialmente, se introducen las propiedades del proyecto como los son el nombre del dicho estudio, nombre de la compañía, nombre del responsable de proyecto, tipo de segmento (abastecimiento, riego, aguas residuales), fecha de creación y versión del proyecto.

En la segunda, se introduce el tipo de unidades del proyecto (unidades métricas SI, unidades inglesas y unidades personalizadas) de distancia, diámetro, presión, velocidad y caudal de manera automática para las dos primeras opciones y de manera manual para la opción personalizada.

El proyecto creado se debe guardar y posteriormente se introducen los datos del perfil estudiado.

3.1.1.2 Creación del perfil de tubería

La creación del perfil de la tubería puede hacerse de tres maneras distintas (manual, importación desde Excel e importación desde AutoCAD). La visualización del perfil creado se puede observar en tres ventadas disponibles, la primera es de manera gráfica, la segunda es mediante la tabla de atributos de cada nodo y, la tercera, mediante la tabla de atributos de cada tramo de tubería entre nudos.

La tabla de atributos de los nodos presenta, para cada uno, el ID, nombre, distancia de origen, elevación, componentes y el punto tipo (ver Tabla 1). Mientras que la tabla de atributos de cada tramo presenta la sección entre ID de nudos, el tipo de material del tramo, la longitud, el diámetro, el coeficiente de fricción, la presión de colapso (la unidad de presión de colapso siempre será en mca independiente del sistema de unidades seleccionado) y el caudal.

Tabla 1 *Nodos tipo bermad*. Fuente: (BERMAD, 2013)

HP	Punto alto
LP	Punto bajo
IU	Aumenta pendiente positiva
ID	Aumenta pendiente negativa
DD	Disminuye pendiente negativa
DU	Disminuye pendiente positiva

3.1.1.3 Componentes

Los componentes del perfil representan el comportamiento, la característica y la función de los nodos presentes en el caso de estudio. Es indispensable conocer, el tipo de conducción que se estudia, si se trata de un perfil bomba-deposito o una conducción por gravedad (deposito-deposito) y los elementos o condiciones intermedios existentes que alteran el comportamiento del perfil, como pueden ser válvulas reductoras de presión, válvulas de seccionamiento, desagües, válvulas antirretorno y demanda de los nudos. El conocimiento a detalle de las características de los elementos final e inicial del perfil (bombas y depósitos) son necesarios para el análisis.

Los componentes disponibles se clasifican en el nodo inicial, en el nodo final y los otros componentes intermedios existentes se describen a continuación.

Nodo Inicial

- Estación de bombeo

En la librería del software se encuentra la biblioteca de los elementos disponibles a ingresar, el icono de bomba se debe arrastrar al nodo inicial y posteriormente se ingresan las características de la estación de bombeo.

La primera característica es la cantidad de bombas de la estación, el software ubica una válvula de aire en cada una de las bombas. La segunda característica es el caudal que impulsan todas las bombas, en el sistema de unidades seleccionadas en la creación inicial del proyecto. La tercera característica es el mínimo caudal que puede impulsar la estación de bombeo. Después se inserta la altura de las bombas, el software calcula de manera automática dicho valor y seleccionara el máximo valor entre el calculado o el insertado por el usuario. Seguidamente se inserta la presión de succión de la bomba, si es positiva el software inserta una válvula de aire en la válvula de retención aguas abajo, si es negativa el software inserta dos válvulas de aire en cada una de las válvulas de retención (aguas arriba y aguas abajo). Finalmente se indica si los elementos son solo de metal, si es verdadero, el software colocara solo válvulas de aire metálicas y si es falso, el software colocara válvulas de aire plástica o metálicas según la presión de la bomba.

- Depósito

Si el perfil estudiado es por gravedad, se debe arrastrar el icono del depósito, desde la biblioteca de elementos, al nodo inicial. Posteriormente se ingresan las características del depósito inicial.

La primera característica por ingresar es la altura de la lámina de agua en el depósito. Finalmente se ingresa el caudal medio y el caudal mínimo de circulación, respectivamente.

Nodo Final

- Depósito

De igual manera se debe arrastrar el icono de depósito desde la biblioteca de elementos del software hasta el nodo final del perfil y se ingresan las características del depósito.

La primera característica por ingresar es la altura de la lámina de agua en el depósito. Finalmente se ingresa la entrada de la tubería al depósito, si es en la parte superior, el software coloca una válvula de aire en la entrada del depósito, y si es en la parte inferior, el software no coloca ninguna válvula de aire.

- Demanda:

El software permite la opción de ingresar la demanda en el nudo final del perfil.

Otros componentes

El software cuenta con la opción de insertar elementos adicionales y demandas en los nudos intermedios del perfil, los elementos disponibles se describen a continuación.

- Válvula reductora de presión:

La ubicación de alguna válvula reductora de presión se debe seleccionar desde la biblioteca de elementos del software y arrastrar la válvula hasta el nodo deseado, posteriormente se debe insertar la presión constante que reducirá la válvula a partir de dicho nodo.

- Válvula de seccionamiento:

La ubicación de alguna válvula de seccionamiento se debe seleccionar desde la biblioteca de elementos del software y arrastrar la válvula hasta el nodo deseado, posteriormente se debe ingresar el diámetro de dicha válvula.

Cuando se ubica la válvula de seccionamiento en un nudo de posterior pendiente ascendente, el software coloca una ventosa aguas arriba de la válvula insertada. Por el contrario, si la pendiente de la válvula de seccionamiento posterior es descendente, el software insertara una ventosa aguas abajo. Cabe mencionar que para ambos casos se requiere la protección ante sobrepresiones por el cierre de las válvulas insertadas.

- Válvulas de desagüe:

En el apartado de análisis, posterior al presente apartado, se explicará las opciones que el software presenta para dicho componente.

- Válvulas antirretorno:

La ubicación de alguna válvula de retención o antirretorno se debe seleccionar desde la biblioteca de elementos del software y arrastrar la válvula hasta el nodo deseado. El software ubica una válvula de aire antes de la válvula de retención y el posicionamiento de la válvula de retención insertada no afecta los cálculos hidráulicos.

- Demanda:

El software permite la opción de ingresar la demanda en un nudo intermedio del perfil.

3.1.1.4 Análisis

Una vez se han definido los procesos de los apartados precedentes, el software hace el análisis en el cual se dimensiona y posiciona las válvulas de aire y los desagües (si es automático) necesarios en el perfil estudiado. Para el análisis deseado es necesario insertar algunos parámetros en las configuraciones del análisis, como lo es el llenado de la conducción, la rotura de la tubería, los desagües del perfil, la tasa de daño y la máxima distancia entre válvulas de aire. A continuación, se describe cada parámetro de análisis.

El software cuenta con la opción de definir la máxima distancia entre válvulas de aire, si la distancia entre dos nodos supera el valor definido (de 500 m a 1000 m, se recomienda 600 m) se colocan ventosas entre ellos. La selección de las válvulas se puede hacer de dos maneras, automática y manual. En la manera manual se puede elegir el modelo, tamaño, número de unidades y tipo de conexión preferido de la válvula de aire a posicionar.

Llenado de tubería

El diseñador debe definir la velocidad de llenado de la tubería y con base en dicho valor, el software selecciona y posiciona las válvulas de aire que permiten la tasa de llenado descargando el aire de la tubería.

El software recomienda suponer una velocidad de llenado en el rango de 0.3 a 0.6 m/s. Si la velocidad de llenado supera 0.5 m/s, el software añade una protección ante efectos de sobrepresión en cada válvula de aire posicionada.

Vaciado de la tubería

El software ofrece tres maneras para definir las válvulas de desagüe y hacer su posterior análisis, se describen a continuación.

- Manualmente

De manera manual se posiciona y dimensiona. Desde la biblioteca de elementos, el icono de drenajes, se posicionan en los puntos deseados de la conducción y posteriormente se define el diámetro de la válvula posicionada.

- Automáticamente por velocidad mínima

Para dicha opción, es necesario definir la velocidad del flujo de drenaje (el software recomienda 0.6 m/s para una limpieza adecuada). El software calcula de manera automática el tamaño mínimo de las válvulas de desagüe con base en la velocidad definida y posiciona las válvulas en los puntos bajos del perfil. Cabe aclarar que, a mayor velocidad, mayor la dimensión de la válvula de drenaje.

- Automáticamente por diámetro uniforme

La última manera es automática con un diámetro uniforme, el software posicionara de manera automática las válvulas en los puntos bajos, con el diámetro definido por el usuario.

Rotura

El software hace el análisis de la conducción cuando ocurre una rotura de la tubería, posiciona y dimensiona las ventosas necesarias para mitigar el impacto de dicho fenómeno. BERMAD toma el peor de los casos y las roturas en los puntos bajos, por lo que las válvulas las coloca en el vértice cercano. Se debe definir el porcentaje de ruptura de la tubería, es decir, el grado de rotura. La

definición de dicho valor es inferior en instalaciones subterráneas, mayor en instalaciones superficiales y se recomienda que el valor se encuentre entre el rango del 10% al 50% (BERMAD, 2014).

3.1.1.5 Características de las Ventosas

Después de realizar el análisis y obtener los resultados, el software presenta el código del modelo de todas las ventosas, del paquete de BERMAD, que posiciona a lo largo del perfil importado. El usuario tiene la opción de realizar los cambios y calibración al tipo de conexión, revestimiento, salida y otras características específicas de los elementos posicionados.

3.1.1.6 Reportes

Los reportes de los resultados del software se encuentran disponibles en Excel o PDF, brinda un informe del sistema en el que incluye todos los nodos del perfil y un informe de resumen en el que solo incluye los nodos en los que se insertaron válvulas de aire o cualquier otro elemento.

3.1.2 VENT-O-MAT

El software de Vent-O-Mat se debe descargar desde la página web. Inicialmente se hace el registro para el suministro del usuario y contraseña de la cuenta con el fin de descargar el demo del software. La versión completa es posible con una clave de ingreso que se solicita en el inicio del demo y se obtiene contactándose con los encargados del software, al digitar la clave suministrada, es posible acceder a la versión completa del software descargable (sitio web: (VENT-O-MAT WEB, 2021).

Al igual que el software de Bermad, el programa CATT VENT-O-MAT selecciona, dimensiona y posiciona las ventosas, garantizando una ventilación efectiva de un sistema.

El usuario debe ingresar el perfil a estudiar, las características del fluido, las características de la tubería y los detalles que se requieran de la válvula de desagüe. Adicionalmente el programa realiza una evaluación económica del sistema de tuberías y determina la diferencia entre una tubería efectivamente ventilada contra una tubería que no está efectivamente ventilada.

3.1.2.1 Creación del proyecto

Para inicial un nuevo proyecto, se debe indicar la hoja nueva de la barra de menú de la ventana principal del programa.

Al iniciar un nuevo proyecto, se debe hacer la selección de una de las tres opciones presentes; Es un sistema de bombeo, es un sistema de gravitación o es un sistema de pozo profundo. La selección de alguna de las tres opciones es necesaria para la evaluación económica que hace el programa.

3.1.2.2 Datos de entrada

Los datos de entrada se presentan en tres pantallas distintas, la primera es la pantalla de datos generales, después los datos del perfil a estudiar y finalmente los datos de la evaluación económica.

Datos generales

Inicialmente se presenta el nombre del archivo guardado y la ruta de ubicación de este.

Los datos generales se clasifican en 4 secciones: datos del proyecto, características del flujo, características de la tubería y los criterios de selección de las válvulas de aire. En la se presenta la pantalla de datos de entrada.



The screenshot shows the 'GENERAL DATA' window of the VENT-O-MAT software. It contains several input fields and sections:

- File name:** C:\Users\luis\Documents\DavidM51\DavidMuhmar\FPM\Beca\Software de Laboratorios\Vent-o-Mat\Case2_3 0.ven
- Project name:** Case_2_3 0
- Designer:** David Giraldo
- Date:** 10 diciembre 2020
- Description:** Perfil del sistema de bombeo
- Flow characteristics:**
 - Fluid type:** Water
 - Operating flow rate:** 53 m³/s
 - Filling velocity:** 0.6 m/s
 - Temperature:** 20 °C
 - Elevation to calculate the vacuum pressure:** 1000 m
- Pipe characteristics:**
 - Pipe material:** Ductile iron
 - Estimated pipe rupture (m x 2 of pipe nom):** 150
 - Absolute pipe roughness (m):** 0.15
- Air valve selection criteria:**
 - Allowable negative differential pressure:** 25 kPa
 - The spacing between valves releasing air under operating pressure is set at:** 500 m
- Standardize the valve size:** Not Standardized
- Valve pressure class:** Calculate automatically
- Buttons:** Profile Data, Economic Data, Details

Figura 9. Datos generales VENT-O-MAT. Fuente: (AVENG, 2013)

- Datos del proyecto

En los datos del proyecto es necesario conocer el nombre del proyecto a presentar, el diseñador o persona responsable, la fecha en la que se inicia el análisis del proyecto y la descripción del proyecto a estudiar.

- Características del flujo

Inicialmente, se selecciona el tipo de fluido que circula (agua o alcantarillado).

Posteriormente, se introduce el caudal operativo con sus respectivas unidades, la tasa insertada es el flujo al comienzo del perfil ingresado, después es posible introducir demandas a lo largo de la tubería.

Seguidamente, se introduce la velocidad de llenado con sus respectivas unidades, para elevadas velocidades de llenado las ventosas disponibles en el catálogo de Vent-O-Mat cuentan con una serie de mecanismos que alivian la sobrepresión debido a las velocidades de llenado elevadas.

Después, se introduce el valor de la temperatura del fluido seleccionado, con sus respectivas unidades.

Por último, se selecciona la elevación con la que se calcula la presión de vacío, con sus respectivas unidades.

- Características de la tubería

De la lista desplegable se cuenta con algunos materiales predefinidos por el programa, son: HDPE (polietileno de alta densidad), LDPE (polietileno de baja densidad), uPVC (cloruro de polivinilo no plastificado), fibrocemento, GRP (plástico reforzado con vidrio), revestido de caucho, acero nuevo, hierro dúctil, hierro fundido, acero medio o acero corroído.

La definición del material determina la depresión máxima permitida por la ventosa, criterio para la correcta selección de las ventosas. El programa recomienda 20 kPa (0,2 bar) para los materiales HDPE, LDPE, uPVC y GRP y 35 (0,35 bar) kPa para los materiales Fibrocemento, hierro dúctil y fundido, acero nuevo, medio y corroído.

Posteriormente, se introduce la rotura de la tubería como valor estimado, de acuerdo con el diámetro insertado. El programa tiene unos tamaños predeterminados para los tamaños de ruptura (dato del porcentaje del diámetro de la tubería), para HDPE, LDPE, uPVC, GRP, hierro dúctil y fundido, acero nuevo, medio y corroído: 15% y para fibrocemento: 50%.

Finalmente, se introduce la rugosidad absoluta de la tubería (ks). El programa utiliza la rugosidad de la tubería para determinar la línea de pendiente hidráulica y recomienda los valores presentes en la Tabla 2.

Tabla 2 Rugosidad absoluta (ks) de materiales. Fuente: Elaboración propia a partir de: (AVENG, 2013)

Material	Rugosidad absoluta (ks) (mm)
HDPE, LDPE, uPVC y fibrocemento	0.03
GRP	0.04
Revestido de caucho	0.05
Acero nuevo	0.06
Hierro dúctil	0.15
Hierro fundido y acero mediano	0.30
Acero corroído	3.00

- Criterios de selección de las ventosas

El primer criterio es definir la presión diferencial negativa permitida a través de la ventosa, esta es la presión máxima permitida por el fabricante de la tubería. Las condiciones de orificio comienzan aproximadamente en 0,35 bar, por lo cual es indispensable asegurar que las ventosas tengan un tamaño correcto en condiciones de vacío. La presión negativa máxima permitida se establece con un valor de 0,35 bar. La recomendación de la máxima presión negativa permitida se presenta en el apartado precedente para cada tipo de material seleccionado.

El segundo criterio es la distancia máxima entre ventosas o liberación de aire presurizado (purgadores). El programa recomienda una distancia de 600 m. El valor puede cambiar de acuerdo con especificaciones del proyecto. Sin embargo, el software indica donde se presentan velocidades de flujo críticas (el aire no se puede transportar hidráulicamente), en dichos tramos es indispensable la instalación de purgadores. Si el valor digitado es menor o el recomendado por el software (600 m) las secciones de velocidad crítica no causaran problemas.

El tercer criterio es la estandarización del tamaño de ventosas a posicionar, la función es para el caso en el que el diseñador desea un tamaño de ventosas específicas en el perfil estudiado. Al seleccionar un tamaño, el programa está obligando a posicionar las ventosas necesarias con el tamaño establecido por el usuario. Existe la configuración predeterminada en la que no se estandariza el tamaño.

El cuarto y último criterio es la clase de presión ventosa a seleccionar, al igual que el criterio precedente, se puede estandarizar una presión en la lista desplegable o se puede hacer un cálculo predeterminado o automático del programa. En la opción automática, el programa calcula la línea de pendiente hidráulica y resta la elevación del suelo en la ventosa, de esta manera determina la clase de presión necesaria.

Datos del perfil

La segunda pantalla presenta los datos del perfil a ingresar (ver Figura 10). Se admiten máximo 400 nodos.

El software presenta dos opciones para la creación del perfil, la opción manual y la opción de importación desde datos de Excel y Quattro Pro. Además, tiene la opción de seleccionar el tipo de perfil, si se trata de datos o perfil nuevo o perfil existente (aún no habilitado). En la pantalla se presentan seis columnas: La descripción del nodo, la longitud acumulada, la elevación del nodo, el diámetro del tramo, los componentes del nodo y la descripción del componente insertado.



No	Point description	Accumulated length	Pipe invert level	Pipe diameter	Control point	Control point description
1		0	30	250	Reservoir	37
2		500	5	250	Outgoing	25
3		750	15	250	Nothing	8
4		1000	0	250	Outgoing	25
5		1300	30	250	Reservoir	22

Figura 10 Datos del perfil. Fuente: (AVENG, 2013)

En la columna de componentes o llamados puntos de control se describe la función del nodo, en dicha columna se presenta un panel de selección con las siguientes opciones: nada, válvula de desagüe, válvula de seccionamiento, seccionamiento y válvula de desagüe (combinación de elementos), válvula antirretorno, demanda, depósito y estación de bombeo.

En la columna de la descripción de la selección de punto de control se presentan las características del elemento seleccionado.

- Válvula de desagüe

Se debe ingresar el diámetro de la válvula de desagüe, debe ser un valor inferior al diámetro de tubería, las unidades son las mismas que las seleccionadas para el perfil.

- Seccionamiento y drenaje

Se debe ingresar el diámetro de la válvula de desagüe, inferior al de la tubería principal, y dicho valor será el mismo para la válvula de seccionamiento. Esta opción es en el caso en que se cuente con la combinación de los elementos.

- Demanda

En el caso en el que en algún nodo se presenta una demanda, el valor de descarga demandado tendrá las mismas unidades que el caudal operativo, insertado en los datos generales del proyecto.

- Depósito

Se debe insertar el nivel del suministro completo del depósito, esto quiere decir que se debe ingresar el valor de la elevación del nodo más el nivel de agua en el interior del depósito. Cabe mencionar que,

en el análisis de vaciado, el programa no usa el nivel del depósito para determinar el tamaño de la ventosa. En otras palabras, el depósito estará aislado del sistema al drenar una sección de tubería.

- Estación de bombeo

No existe una descripción para la estación de bombeo, se intuye que hace el cálculo automático para la altura necesaria.

Es posible editar el perfil, se puede eliminar o añadir filas, según los corresponda, se pueden editar los datos insertados o importados desde la misma pantalla del programa. Se puede observar el perfil como vista en plano de manera gráfica, se observa la línea de pendiente hidráulica, el gradiente estático del sistema, los componentes introducidos, el perfil creado y las características adicionales definidas en la pantalla de datos del perfil.

Datos de evaluación económica

La opción de evaluación económica es para una nueva tubería, determina el efecto de una ventilación adecuada en el sistema. Si se desea la evaluación económica, es necesario seleccionar en la pantalla "Sí, ingrese los datos de la evaluación económica"

Para el correcto análisis es necesario ingresar tres parámetros: el periodo de análisis en años, la tasa de descuento en porcentaje (necesaria para la comparación del sistema ventilado de manera efectiva contra el sistema ventilado de manera ineficaz durante el periodo de análisis insertado) todos los costos se convierten a costos de valor actual neto (VPN) y se comparan y finalmente, se introduce el porcentaje de escalamiento de los costos de energía.

- Sistema de bombeo

Para la evaluación económica de un sistema de bombeo se debe proporcionar la curva de la bomba (altura, caudal y eficiencia), se solicitan seis puntos de la curva de la bomba. Una vez ingresados se puede visualizar la curva introducida. Se debe comenzar de menor a mayor caudal.

Después se solicita: las horas de bombeo al día y el costo medio de la energía por hora. De esta manera se calcula el costo total de la energía del sistema cuando se ventila efectivamente y no se ventila de manera efectiva.

- Sistema a gravedad

Si se trata de un sistema de gravitación se debe proporcionar el beneficio medio por venta de agua, se ingresa la ganancia promedio que se obtiene con la venta de agua. De esta manera, una disminución en la capacidad de un sistema debido a la ventilación ineficaz proporcionara pérdida de posibles ingresos.

3.1.2.3 Análisis

La opción de análisis tiene varias opciones. Puede analizar el perfil nuevo o el perfil existente (actualmente deshabilitado). En el caso de una nueva tubería se hace un análisis económico para determinar los beneficios de una ventilación efectiva.

Nueva tubería

En la opción de nueva tubería es posible analizar la rotura y el vaciado. El software posiciona y dimensiona automáticamente las ventosas para el llenado y la liberación de aire en condiciones de funcionamiento.

Tubería existente (actualmente deshabilitado)

En el caso de una tubería existente, se puede analizar la rotura, el vaciado y el llenado. El software determinará cual es la capacidad de cada ventosa y determinará que sección de la tubería estará protegida contra condiciones de vacío (durante simulación de rotura y/o simulación de vaciado). El programa indicará cómo funcionan las ventosas durante el llenado de la tubería (expulsión de aire). Además, se verificará la capacidad efectiva de liberación de aire en condiciones normales de funcionamiento. En el caso en que el sistema existente no se encuentre debidamente protegido, se indicara la dimensión y posición de la ventosa requerida.

Evaluación económica

Esta opción es posible cuando se hace el análisis a una tubería nueva. El software determina la diferencia de costo entre un sistema efectivamente ventilado y uno no ventilado efectivamente.

Metodología de análisis

El objetivo del análisis es determinar la dimensión y la posición de las ventosas, evitar las condiciones de vacío en la tubería, tener la suficiente capacidad de descarga y liberar aire bajo presiones operativas. En primer lugar, el procedimiento se centra en la capacidad de admisión de las válvulas, se siguen los siguientes pasos:

Conocidas las características del flujo, las características de la tubería, el perfil longitudinal y definidos los componentes relevantes de cada nodo insertado (válvulas de desagüe, válvulas de seccionamiento, válvulas antirretorno y demanda de nodos) se realiza el análisis de rotura.

Para el análisis de rotura utilizando las fórmulas de Darcy-Weisbach, se calcula la capacidad de admisión para cada sección de la tubería, ver ecuación (5). El tamaño de la rotura (porcentaje introducido del área de la tubería) reduce el tamaño de la ventosa en términos de requisitos de admisión.

$$Q_{rotura} = \sqrt{\frac{g\pi D^5 S_0}{8\lambda} \cdot \frac{A_{rotura}}{A}} \quad (1)$$

Donde:

- Q_{rotura} = caudal de rotura
- g = aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$)
- D = diámetro de la tubería
- S_0 = pendiente de la sección de tubería
- λ = coeficiente de fricción
- A_{rotura} = área de la rotura
- A = área de la tubería

Para el análisis del vaciado, se determina el caudal máximo potencial que se puede vaciar en cada sección, ver ecuación (5).

$$Q_{vaciado} = C_D \sqrt{2g\Delta h} \cdot \frac{\pi D_{desagüe}^2}{4} \quad (2)$$

Donde: C_D = coeficiente de descarga

g = aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$)

Δh = diferencia de alturas de la ventosa más alta menos la válvula de desagüe

$D_{desagüe}$ = diámetro de la válvula de desagüe

Con base en la información anterior, es posible determinar la capacidad de admisión en los puntos de vértice y otros puntos donde los cambios bruscos de pendiente provocan un cambio de energía justificado para posicionar ventosas.

La capacidad de admisión requerida calculada se compara con las válvulas disponibles del catálogo de VENT-O-MAT y se selecciona la adecuada.

El paso por seguir es determinar la posición de las válvulas de aire que liberan aire bajo presiones operativas. Se determinan mediante la ecuación (5).

Inicialmente determinando la capacidad del flujo para transportar el aire hidráulicamente usando la siguiente relación:

$$V_{min} = 0,2178\sqrt{2D} \cdot \theta^{0,4007} \quad (3)$$

Donde: V_{min} = velocidad mínima requerida para transportar el aire

D = diámetro de la tubería

θ = ángulo de inclinación de la sección de tubería

También teniendo en cuenta la distancia introducida por el diseñador (recomendada: 600 m). Finalmente se combinan los resultados y determinar la ventosa del catálogo de Vent-O-Mat que se ajusta al cálculo realizado. Los resultados se presentan de manera gráfica, en tabla de resultados y en comentarios de análisis (se pueden visualizar los cálculos realizados).

Cabe mencionar que en el manual del software no se definen los componentes de las ecuaciones y por consiguiente no se definen sus unidades.

3.1.2.4 Resultados

La pantalla de resultados presenta varias pestañas: trazado de perfil, resultados calculados, comentarios y resultados de análisis económico. Los resultados se pueden exportar como archivo Excel o pdf.

Trazado de perfil

En el trazado de perfil se muestra el perfil insertado y las ventosas necesarias a lo largo del perfil, se puede observar un tramo específico del perfil, si se desea observar alguna sección.

Al seleccionar una válvula posicionada en el gráfico del perfil, el usuario puede editar algunas propiedades de la ventosa. Se pueden eliminar, mover (hasta 20 m hacia arriba o hacia abajo) o combinar con otras ventosas (actualmente la función no está operando). Si se edita alguna propiedad, no hay manera de revertir el cambio realizado, es necesario volver a realizar el análisis.

Resultados calculados

Los resultados del cálculo se presentan en una tabla resumen en la que presenta la ventosa necesaria en cada nodo estudiado. En la tabla se presenta el nombre o descripción del nodo, el tamaño de la ventosa posicionada, la clase de la ventosa, la presión soportada y el número del modelo.

Comentarios

En la pestaña de comentarios es posible observar los detalles sobre el proceso de cálculo. Presenta los resultados numéricos de los cálculos realizados en cada nodo.

Análisis económico

Si se trata de un análisis económico al sistema de bombeo, el programa presentara lo que se observa en la Figura 11.

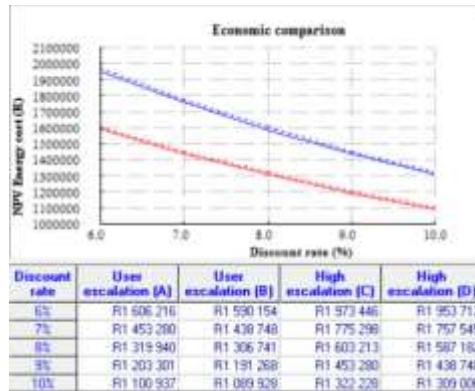


Figura 11 Resultados del análisis económico. Fuente: (AVENG, 2013)

En el gráfico se presenta la comparación de un sistema ventilado de manera eficaz (curva continua) contra un ventilado de manera ineficaz (curva discontinua). Se utiliza la tasa de escalada y la tasa de descuento ingresadas. Además, presenta un análisis de sensibilidad alrededor de los valores ingresados con respecto a la determinación del costo del valor actual neto.

Con mayor importancia se presenta, como dato, el ahorro anticipado que se puede lograr al ventilar eficazmente la conducción.

Si se cuenta con un sistema de gravitación, se obtienen una diferencia anticipada en los posibles ingresos durante el periodo de análisis.

3.1.2.5 Optimización de resultados

El diseñador cuenta con la opción de optimizar el análisis y se pueden observar los resultados optimizados y no optimizados para hacer la comparación.

La optimización de los resultados utiliza los siguientes criterios:

- Identifica las ventosas próximas y las combina
- Desecha las ventosas donde la flotación de la burbuja de aire y/o la velocidad del flujo es suficiente para transportar el aire a la siguiente ventosa.

- Identifica las válvulas de aire donde no se genera presión negativa importante durante las condiciones de vacío.
- Identifica la ventosa que tiene requisitos de admisión despreciables durante una rotura.

3.1.3 ARI

Se trata de un programa vía web. Al igual que los softwares que se describen en los apartados precedentes, el programa dimensiona y posiciona las ventosas del fabricante ARI de un perfil importado. Los proyectos creados y guardados permanecen disponibles para editarlos o visualizarlos.

Tomado de (ARI, n.d.). Los procedimientos que se llevan a cabo para la creación y posterior análisis de un perfil se describen a continuación: (sitio web: (ARIAVCAD, 2021)

3.1.3.1 Creación del proyecto

En la creación del proyecto solicita el nombre del proyecto, el país, la ciudad y la descripción del proyecto. Finalmente se presenta la opción de guardar el proyecto creado o de cancelar para salir del proceso.

3.1.3.2 Importar la red

La única opción para la creación del perfil del proyecto es por medio de la importación de un archivo en formato CSV.

Al momento de abrir la pestaña de importación se debe descargar la plantilla y la estructura del formato del archivo con el fin de importar la información de manera acertada, la estructura presenta las columnas de ID de estación, distancia, elevación y comentarios de los nodos creados. Se debe nombrar la red ya que en la creación del proyecto es posible importar diferentes perfiles para su posterior análisis.

Finalmente se debe seleccionar el tipo de sistema a estudiar, si se trata de un sistema de bombeo o de un sistema de gravitación. De manera predeterminada en el nodo final se selecciona el componente de depósito.

3.1.3.3 Componentes del perfil

Cuando la importación del correspondiente tipo de sistema se realiza de manera exitosa, se presentan tres pantallas: editar, gráfico y reporte.

Editar

En la pantalla se presentan las características de la tubería y los componentes de los nodos. En la sección de la tubería es posible agregar canalizaciones con previo conocimiento del tamaño nominal, diámetro interno, material de tubería, coeficiente Hazen-Williams, coeficiente de rugosidad absoluta (k_s), ubicación entre nodos del tipo de tubería y la presión máxima de vacío.

Para insertar un componente es necesario conocer el ID del nodo de manera que el programa identifique la ubicación del componente a insertar. En la sección de los componentes de presentan:

- Estación de bombeo

En la estación de bombeo se insertan las propiedades generales como el nombre, el tipo de estación (métrica o imperial), el fabricante y los componentes.

En las propiedades específicas de la estación de bombeo se cuenta con la opción de insertar el punto óptimo de operación (caudal y altura) o con insertar los valores de la curva de la bomba. Adicionalmente se puede insertar la geometría de succión y la geometría de presión de la estación de bombeo.

- Depósito inicial, intermedio o final.

Se cuenta con tres componentes de depósitos llamados suministro de torres de agua como el depósito inicial, torres de agua como depósitos intermedios y embalses como el depósito del nudo final. Al igual que la estación de bombeo, se deben insertar las propiedades generales del depósito y las propiedades específicas como lo son, el nivel de agua en el depósito y el caudal del depósito.

- PSV y PRV

En las válvulas de seguridad de presión o reductoras de presión y las válvulas sostenedoras de presión, se debe conocer el nudo en el cual se deben instalar, la dimensión de la válvula, el punto de ajuste de presión local y el coeficiente de caudal de dicha válvula (K_v).

- Válvulas de seccionamiento y Válvulas de desagüe

Para las válvulas de aislamiento y las válvulas de desagüe es necesario conocer las propiedades generales de dicha válvula y las propiedades específicas como el diámetro, el coeficiente de pérdidas de carga y el punto de ajuste de apertura de dicha válvula.

- Orificios

Es programa brinda la opción de insertar el componente de fugas o llamados orificios. Es necesario conocer el diámetro del orificio, la presión y el caudal.

- Medidores de agua

En el programa es posible insertar los medidores de agua, se debe conocer el tamaño de la conexión y el coeficiente de carga de dicho componente.

- Ventosas

Se debe conocer la ubicación de la ventosa a insertar, el tamaño, la familia, el material, el caudal y el tipo de conexión.

Grafico

En la pantalla de grafico se presenta el perfil con sus respectivos componentes insertados de manera visual, también se presenta la tabla del ID del nodo, la distancia, la elevación, componentes, velocidad, presión y la información adicional de los componentes insertados y posteriormente analizados.

Reporte

En la pantalla de reporte se presenta el resumen del análisis realizado por el programa. Se observa la ubicación de las ventosas más los componentes, la dimensión de las ventosas y la información adicional de los resultados de las ventosas.

3.1.3.4 Configuración de análisis

Previo al análisis del perfil insertado, es necesario indicar los criterios de la red estudiada. Los criterios disponibles son:

Solicitud

En el campo de solicitud se debe seleccionar la función del perfil, si se trata de una red para agricultura, suministro de agua, aguas residuales, subterránea, industria de sólidos en suspensión o líquido de transporte industrial.

Tipos de análisis

Los tipos de análisis son el análisis WCS, el análisis de llenado (conociendo la velocidad de llenado), el análisis de ruptura (porcentaje de rotura (%)), análisis de ráfagas (porcentaje de estallido (%)), el análisis de espaciado (espaciado máximo entre ventosas) y el análisis de vaciado.

Condiciones generales

En las condiciones generales se debe conocer el uso del colector, la clase de presión y la manipulación de las pérdidas localizadas.

Opciones de resultado

Existe la posibilidad de que recuerde los últimos resultados presentados y que nombre los resultados del análisis de los criterios seleccionados con un nombre personalizado.

Unidades

Se deben insertar de manera personalizada, si se quiere, las unidades de: la distancia, el diámetro, el caudal volumétrico, el caudal másico, la energía, la presión, la velocidad y la energía específica.

Filtrar resultados de análisis

Se cuenta con la opción de filtrar los resultados de análisis por tamaño de la conexión, tipo de flujo, tipo de conexión y cuerpo de material.

Finalmente, en el icono de resolver se presenta la solución y el análisis realizado por el programa.

3.1.4 Valmatic

El programa de ValMatic es vía web y al igual que los programas descritos en los apartados precedentes es necesario un previo registro para el acceso de este. Se trata de un programa que, a diferencia de los programas anteriormente descritos, únicamente posiciona las ventosas y presenta el tipo de ventosa recomendada (trifuncional, bifuncional o purgador) (sitio web: (VALMATIC, 2021)

Tomado de (VALMATIC, n.d.-b). Para el análisis del perfil se debe insertar previamente el nombre del proyecto, el propietario, el diseñador.

También debe conocer el caudal máximo (es el caudal más alto esperado en la tubería en condiciones de bombeo), caudal de llenado (arranque inicial de la tubería), CFS: el caudal por gravedad calculada debido a la pendiente hidráulica o el caudal de la bomba sin carga (es el caudal de la bomba durante el arranque sin presión del sistema).

Existe la posibilidad de escoger el criterio de selección del tipo de ventosas, entre las opciones disponibles se encuentran: las ventosas combinadas de cuerpo única, las ventosas combinadas de cuerpo doble y las ventosas anti-ariete o non-slam.

Se debe conocer el tipo de agua circulante (agua o agua residual), el material de la tubería, el diámetro de la tubería, el factor de seguridad del sistema, la clasificación de las ventosas a seleccionar y la dirección del flujo.

Finalmente se inserta de manera manual (nudo a nudo) el perfil con la distancia y la elevación, con el respectivo tipo de unidades seleccionado en etapas previas.

Después de insertar los parámetros, características y criterios. Se pulsa el botón “analizar” y el programa muestra un perfil con el posicionamiento y el tipo de ventosas recomendado.

3.2 Caracterización de válvulas y ventosas

La Universitat Politècnica de València (UPV) y la empresa Global Omnium trabajan de manera conjunta en un proyecto de investigación y desarrollo cuyo objetivo es elaborar un protocolo de llenado y vaciado de las grandes conducciones. Para la elaboración del protocolo es necesario conocer el funcionamiento de los elementos que intervienen en las operaciones mencionadas, estos son las ventosas, las válvulas de llenado y las válvulas de desagüe, asegurando una velocidad conveniente y por consiguiente asegurar de mayor manera la ejecución de las operaciones (Arrué et al., 2017).

3.2.1 Válvulas caracterizadas

El motivo de la caracterización de las válvulas se debe a que en los catálogos técnicos de los fabricantes de válvulas se tiene información sobre el caudal de la válvula trasiega en función de la diferencia de presiones entre sus extremos y el grado de apertura o la posición de la válvula. Sin embargo, las condiciones de la información de operación presentada no son análogas a las que soporta una válvula en condiciones de llenado o vaciado de las conducciones. No son análogas por el hecho de que no existe la contrapresión aguas abajo de la válvula, o el valor es mínimo (EMIMET, 2018).

La realización de los ensayos se hizo cumpliendo con las normativas: UNE-EN 1074-1:2001. Válvulas para el suministro de agua. Requisitos de aptitud al uso y ensayos de verificación apropiados. Parte 1: Requisitos generales y con la normativa de pérdida de carga en válvulas UNE-EN 1267. Válvulas. Ensayo de resistencia al flujo utilizando agua como fluido de ensayo.

- Para llevar a cabo los ensayos se instalaron los elementos que componen que se describen a continuación: Una bomba de bombas ideal, tipo CPE200/48, serie N.º 200108, con una potencia de 180 cv y 132 Kw. El caudal nominal es de 160 l/s y la altura nominal es de 58 mca.
- Grupo eléctrico.
- Medidor de caudal: caudalímetro electromagnético DN200 mm (marca Sensus WP Dynamic) Registro de caudal instantáneo y acumulado, características:

- Caudal nomina (Q_n): $250 \text{ m}^3/\text{h}$
- Caudal mínimo (Q_{min}): $4 \text{ m}^3/\text{h}$
- Caudal máximo (Q_{max}): $1200 \text{ m}^3/\text{h}$
- Caudal de transición (Q_t): $6 \text{ m}^3/\text{h}$
- Registro de datos de caudal: Cosmos Data Logger (CDL) o FM-2D/K.
- Medidores de presión: transductor de presión (Simens Sitrans P200/210 o similar), rangos:
 - 0 a 100 mbar (+/- 0,25%). Simens Sitrans P210.
 - 0 a 10 bar (+/- 0,25%). Simens Sitrans P200.
- Conexión a un sistema SCADA para registro de la información de los sensores en tiempo real y operación de la bomba.
- Depósito de aproximadamente 1176 m^3 .
- Tubería de metacrilato aguas debajo de la válvula de ensayo (carrete B de la Figura 12), para el DN de 400 mm con una longitud de cuatro metros. Única para el ensayo sin contrapresión.
- Medidor de nivel (piezómetro) para indicar la presión aguas abajo, siempre y cuando sea menor de cinco metros.

Los elementos empleados se pueden observar en la Figura 12.

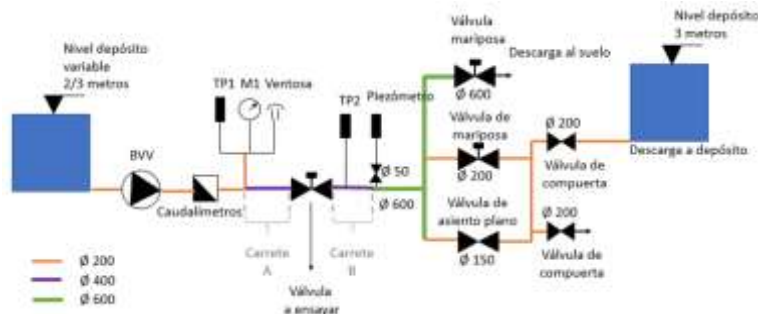


Figura 12 Esquema de los componentes del banco de ensayo. Fuente: (EMIMET, 2017)

El objetivo del banco de ensayos es determinar el coeficiente de caudal (K_v) en función del grado de apertura y la contrapresión. El K_v depende de si se encuentra en carga aguas arriba y aguas abajo o si aguas abajo no hay carga. El segundo caso es común encontrarlo en las operaciones de llenado, debido a que la tubería se encuentra vacía y no hay contrapresión.

Los ensayos se realizaron para válvulas mariposa de 400 y 600 mm de diámetro, y bypass en la válvula de 600 mm con una válvula mariposa de 200 mm. Las presiones de entrada a las válvulas fueron de 30, 40 y 50 mca, y las de salida fueron de 0 (sin contrapresión, tubería vacía), 10, 20 y 30 mca. El grado de apertura se midió en vueltas del mecanismo de accionamiento, para la válvula de 200 mm se ensayaron el número de vueltas de 15 a 20, para la válvula de 400 de 5 a 10 y para la válvula de 600 de 6 a 10 número de vueltas (Romero et al., 2017).

En la Tabla 3 se presentan los resultados de las válvulas de 200 mm.

Tabla 3 coeficiente de caudal K_v de la válvula de 200 mm. Fuente: (EMIMET, 2018)

N de vueltas / CP	$K_v (m^3/h/(kp/cm^2)^{1/2})$				
	0 (scp)	10	20	30	40
15	58,23	84,00	72,70	69,80	65,40
16	96,03	130,30	110,63	110,05	106,40
17	151,70	188,35	165,80	160,65	159,20
18	201,57	241,65	221,43	215,10	206,90
19	250,07	309,65	275,43	267,00	255,10
20	301,35	367,00	330,53	315,90	308,30

*scp: sin contrapresión

En la Tabla 4 se presentan los resultados de las válvulas de 400 mm.

Tabla 4 coeficiente de caudal K_v de la válvula de 400 mm. Fuente: (EMIMET, 2018)

N de vueltas / CP	$K_v (m^3/h/(kp/cm^2)^{1/2})$				
	0 (scp)	10	20	30	40
5	22,27	30,40	30,39	34,34	37,10
6	41,10	54,65	48,20	45,80	42,90
7	59,97	76,20	67,77	65,75	63,70
8	80,80	102,90	88,17	85,05	84,70
9	116,23	140,30	124,93	119,55	115,60
10	174,70	207,85	186,60	184,55	179,50

*scp: sin contrapresión

En la Tabla 5 se presentan los resultados de las válvulas de 600 mm.

Tabla 5 coeficiente de caudal K_v de la válvula de 600 mm. Fuente: (EMIMET, 2018)

N de vueltas / CP	$K_v (m^3/h/(kp/cm^2)^{1/2})$				
	0 (scp)	10	20	30	40
6	97,83	181,00	166,53	160,10	147,10
7	148,96	206,85	190,23	178,20	166,00
8	196,17	271,25	248,17	236,30	226,60
9	270,30	356,45	324,73	303,85	288,20
10	374,45	476,65	438,97	416,90	X

*scp: sin contrapresión

Como se puede observar en los resultados de las tablas, el coeficiente de caudal no permanece constante para un grado de apertura determinado, varía en función de la diferencia de presiones. Se puede observar que, sin contrapresión, el coeficiente del caudal de todos los diámetros disminuye respecto a los casos en los que existe la diferencia de presión y la presión de salida es distinta a cero.

También se cuenta con datos caracterizados de las válvulas de 100 mm y 150 mm. Se ha determinado una ecuación de los coeficientes de caudal para cada diámetro. La ecuación (5) se presenta:

$$K_v = A + B \cdot P_s + C \cdot \Delta P + D \cdot P_s^2 + E \cdot \Delta P^2 + F \cdot P_s \cdot \Delta P + G \cdot P_s \cdot \Delta P^2 \quad (4)$$

Donde: K_v = coeficiente de caudal, expresado en $m^3/h/bar^{0.5}$.
A, B, C, D, E, F, G = coeficientes de la expresión, dependientes de DN.
 P_s = presión de salida, en mca.
 ΔP = diferencia de presión entre entrada (P_e) y salida (P_s), en mca.

En la Tabla 6 se presentan los coeficientes de la ecuación (5) para las válvulas de 100 y 150 mm.

Tabla 6. Coeficientes de la ecuación (5) para los diámetros de válvulas de 100 mm y 150 mm. Fuente: (EMIMET, 2018)

DN (mm)	A	B	C	D	E	F	G
100	-238,75	403,17	357,29	-43,65	-53,13	-145,84	5,03
150	1253,57	83,08	-305,91	-50,82	39,55	-44,35	9,88

3.2.2 Ventosas caracterizadas

En los laboratorios de ARI Flow Control Accesories Ltd., en Kfar Charuv (Israel) y CSA, en Salsomaggiore Terme (Italia) se ensayaron 29 ventosas en expulsión (DN: 50, 80, 100, 150 y non-salam DN: 80 y 100) y se ensayaron 15 ventosas en admisión (DN: 50, 80 y 100). La ejecución de ensayos de los laboratorios se siguió bajo las recomendaciones de la norma UNE-EN 1074-4 e ISO 9635-4 (Arrué et al., 2017, p. 2).

El banco de ensayos de ARI está alimentado por 5 calderines de 10 m^3 , cada uno con una presión de almacenamiento de 13 bar permitiendo el ensayo de ventosas de hasta 12 pulgadas de diámetro. Las ventosas se pueden alimentar con presiones máximas de 1 bar, valor admitido para las presiones presentes en el llenado de las conducciones. En los ensayos de admisión, la ventosa se coloca en el interior de una capsula al que se le inyecta el aire a presión, generando así, una atmosfera presurizada en el recipiente. El ensayo no reproduce las condiciones de admisión reales de la ventosa, aunque es admitido por las normas mencionadas en el párrafo precedente,

El banco de ensayos de las ventosas del laboratorio de CSA está alimentado desde un soplante, capaz de impulsar $4500\text{ Nm}^3/h$ a una presión máxima aproximada de 0.50 bar, suficientes para simular una operación de llenado. El motor eléctrico del soplante cuenta con un variador de frecuencia, modificando así la velocidad de giro del soplante y de esta manera obteniendo diferentes puntos en de la curva P-Q de la ventosa. El banco puede ensayar ventosas de hasta DN 100 mm. Los ensayos de admisión de CSA son más limitados comparados con el laboratorio de ARI debido a que la tubería alimentada se conecta directamente desde el soplante a la brida de salida de la ventosa, inyecta valores superiores a la presión atmosférica.

Los resultados obtenidos de los laboratorios para cada ventosa fueron:

- Curvas P-Q, para determinar el caudal expulsado de aire por las ventosas en función de la presión en el interior de la tubería, o el caudal admitido dada una diferencia de presiones desde la salida de la ventosa (donde se admite el aire) y la presión en el interior de la tubería.
- Condiciones (P-Q) en las que se produce el cierre prematuro o "cierre dinámico" (cierre antes de la llegada del agua en llenado), si se llega a producir, o condiciones de cierre del dispositivo antiarriete (ventosas tipo non-slam).
- Condiciones (P) bajo las cuales se produce la apertura de la membrana (para las ventosas tipo membrana) en los ensayos de expulsión.

El tercer y último conjunto de pruebas se hizo en el banco de ensayo que dispone la empresa BERMD en sus instalaciones de Nahariya (Israel), ensayos realizados en septiembre del año 2017. Posteriormente se hizo una comparación con los resultados de los laboratorios mencionados anteriormente (ITA (Grupo de Ingeniería y Tecnología del Agua), n.d., p. 3). en los tres laboratorios se

realizaron más de 150 ensayos de ventosas entre los rangos de DN-50 a DN-150 en expulsión y admisión (Arrué Burillo et al., 2019, p. 3).

El banco de ensayos del laboratorio BERMAD está alimentado con dos soplantes de diferente capacidad de impulsión. El soplante de mayor capacidad llega a impulsar un caudal de $16320 \text{ Nm}^3/\text{h}$ a 0,5 bar con una potencia de 315 kW, para pequeñas cantidades de caudal de aire se utiliza el soplante de menor capacidad. Como e el laboratorio de CSA, los motores eléctricos que mueven los soplantes cuentan con un variador de frecuencia para de este modo ensayar diferentes puntos de la curva P-Q de cada ventosa.

El laboratorio está dotado de caudalímetros máscicos, de transductores de presión, y de sensores de temperatura, almacenando los registros de caudal (Nm^3/h), presión (bar relativo) y temperatura ($^{\circ}\text{C}$) almacenados en un software exportables a Excel.

El laboratorio de banco de ensayos de BERMAD realiza los siguientes ensayos:

- Ensayo para la medición del caudal de aire de descarga de cualquier ventosa para diferentes presiones en el interior de la tubería (P-Q)
- Ensayo para la medición del caudal de aire de admisión de cualquier ventosa para diferentes presiones en el interior de la tubería (P-Q)

En el caso de expulsión el laboratorio de BERMAD se miden presiones internas y la ventosa descarga presiones a la atmosfera. En el caso de admisión el aire es admitido en condiciones atmosféricas exteriores, generando depresiones, medidas, en el interior de tubería. En este caso, a diferencia del laboratorio CSA y ARI, se cumplen las condiciones termodinámicas reales, así que los resultados de ensayos de admisión en el laboratorio BERMAD son más fiables que los dos laboratorios mencionados.

En la Figura 13 se presenta el esquema de admisión del laboratorio BERMAD para el ensayo de admisión de aire de las ventosas, haciendo circular el aire desde la boca de salida del cuerpo de la ventosa hasta el interior de la tubería. En este ensayo la ventosa estará siempre abierta.

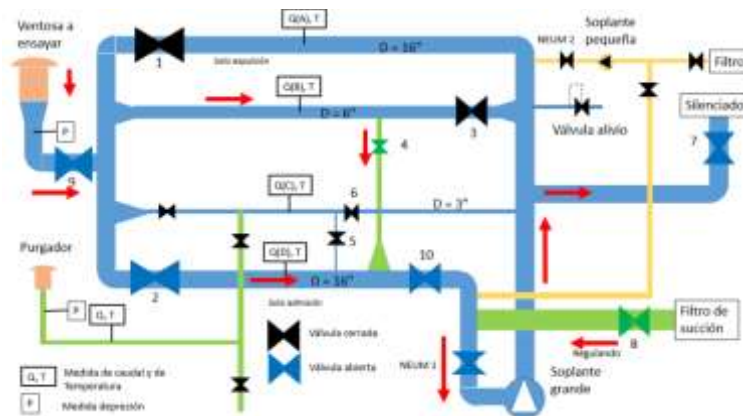


Figura 13 Esquema de instalación para ensayos de admisión. Fuente: (ITA (Grupo de Ingeniería y Tecnología del Agua), n.d., p. 9)

La regulación de la depresión generada en la tubería en el punto P (carrete de la ventosa) se realiza por la combinación de aire de los variadores de velocidad de los soplantes y la entrada de aire exterior directamente en la succión del soplante a través de las válvulas de regulación 8 u 11. El aire se expulsa al exterior a través del silenciador 7.

El caudal máximo se lograría con la velocidad máxima del variado y las válvulas en aspiración cerradas (todo el aire que aspira el soplante proviene de la ventosa, mientras que la regulación de las ventosas 8 u 11 o la disminución de la velocidad de giro de los soplantes daría lugar a una disminución del caudal de aire que entra en la ventosa (aumento de presión negativa en el carrete de conexión a la ventosa) (ITA (Grupo de Ingeniería y Tecnología del Agua), n.d., p. 9).

En la Figura 14 se presenta el esquema de ensayos para la expulsión de aire de las ventosas. Se puede observar que el aire se suministra desde los dos soplantes, esto será en función del caudal requerido.

La regulación del caudal deseado se realiza a través de los variadores de velocidad de cada soplante y el caudal de aire impulsado por cada uno que puede derivarse a través de la válvula 7, en función del grado de apretura (regulación por derivación). Quiere decir que el caudal se reparte entre la válvula 7 y la ventosa (después de la válvula 9).

Si durante el proceso de cierre de la válvula mariposa, se cierra completamente la ventosa (cierre dinámico) o se cierra parcialmente (cierra el primer flotador), se producirá un exceso de presión. Para dichas sobrepresiones existe una válvula de alivio en el sistema, tarada a una presión de $0,5 \text{ Kp/cm}^2$ (ITA (Grupo de Ingeniería y Tecnología del Agua), n.d., p. 8).

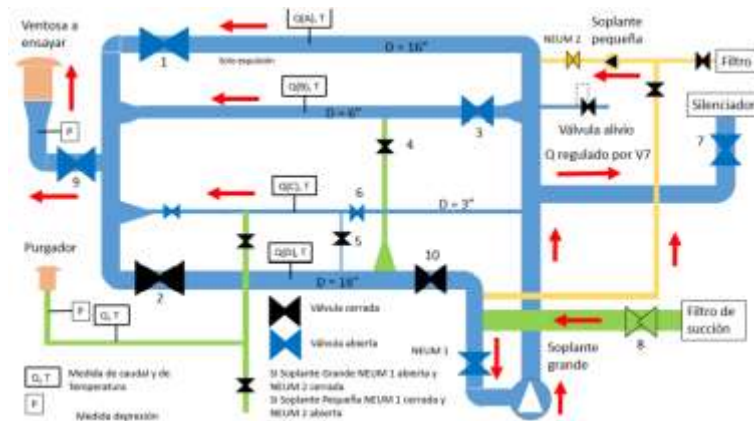


Figura 14 Esquema de instalación para ensayos de expulsión. Fuente: (ITA (Grupo de Ingeniería y Tecnología del Agua), n.d., p. 8)

De la caracterización realizada en el laboratorio se concluyó que las condiciones termodinámicas de algunos ensayos de admisión no fueron idóneas, para el caso de los laboratorios CSI y ARI. Sería ideal que los fabricantes indicaran el valor umbral de la presión en la tubería cuando se produce el cierre prematuro y recomendar a las normas que incorporen la propuesta de dicho ensayo, también sería ideal conocer, para el caso de las ventosas NS, la presión de la cual se cierra del primer flotador.

La comparativa con los resultados de las curvas comerciales y las curvas experimentales presenta una desviación de 19,9%. Las ventosas en las que el caudal de expulsión resulto menor al ofrecido por el fabricante, para los mismos valores de presión, han sido seis con una desviación de un rango entre el 10,2% y 62%; para el caso de admisión el resultado indico que 8 ventosas admiten menos aire al ofrecido por el fabricante con una desviación promedio entre el 4,3% y el 41,9% (Arrué Burillo et al., 2019, p. 9).

“Las ventosas en expulsión en las que se produjo un cierre dinámico fueron 11 de las 29 ensayadas. Esto condiciona la presión máxima de trabajo en las operaciones de llenado. Se observa desde la de menor presión (modelo 10.1.D80 a 0.02 bar y 1012 m³/h en CI) hasta la de mayor presión (modelo 10.1.D100 a 0.91 bar y 4835 m³/h en CI)” (Arrué et al., 2017, p. 14).

“Es muy importante determinar el valor de la presión en el interior de la tubería al que se produce el cierre dinámico de la ventosa, dado que a partir de ese momento la ventosa deja de realizar su función. En bastantes casos los valores de la presión de cierre dinámico eran muy pequeños, por lo que casi con toda seguridad se cerrarán en casi cualquier llenado, dejando bolsas de aire en el interior de la tubería. Los valores límite de la presión de ensayo en ambos laboratorios, 1 bar en ARI y 0.5 bar en CSA, están por encima de los valores de la presión del aire usual en los procesos de llenado (entre 1 y 3 mca), por lo que para situaciones de llenado usuales se han detectado aquellas ventosas que tiene un cierre dinámico a las presiones de trabajo normales. Sería deseable que los fabricantes indicaran en los catálogos el valor umbral de la presión en el interior de la tubería al que la ventosa cierra de manera prematura. Para próximas revisiones de las normativas de ventosas, tanto UNE-En como ISO, sería recomendable proponer incluir este ensayo en las citadas normativas.”(Arrué et al., 2017, p. 9)

4. Fundamentos del Programa

Los fundamentos del programa presentan los criterios, las normativas, las recomendaciones, los fundamentos matemáticos, las caracterizaciones y demás elementos en los que se basa el programa ejecutado.

Para entender claramente los fundamentos, se recomienda abrir el fichero: PV_CAV_DGM_JG.xlsm

En primer lugar se explica los resultados y criterios que presenta la hoja de Excel “Posición”, en la que se posicionan el tipo de ventosas y las válvulas de desagüe del perfil de conducción simple insertado; en segundo lugar se explica todo lo correspondiente a la hoja de Excel “Cálculo” del programa, en la que se presentan, a parte de otros cálculos, el procedimiento para obtener los resultados de la dimensión de los desagües, la dimensión del orificio del purgador, el caudal de admisión y/o el caudal de expulsión de cada ventosa posicionada en la hoja precedente; por último, en la tercera sección se explica el dimensionado de cada ventosa que se presenta en la hoja de Excel “Selección” del programa, en la que se presenta la dimensión de cada ventosa de la conducción simple para cada fabricante, basado en curvas características comerciales y curvas características ensayadas almacenadas en la hoja “Curvas”.

4.1 Posicionamiento las ventosas y las válvulas de desagüe

A continuación, se explican los criterios y los métodos aplicados para el posicionamiento de las ventosas y las válvulas de desagüe del perfil suministrado por el usuario. La ejecución de dicho proceso se presenta en la hoja "Posicion" del programa.

Gran parte de la metodología empleada por el programa para posicionamiento de los elementos, se basa de los criterios recomendados en el manual práctico (M51: Air Valves: Air-Release, Air/Vacuum & Combination) de la American Water Works Association (AWWA) y se las recomendaciones del fabricante ValMatic, que emplea casi que los mismos criterios de AWWA.

Antes de oprimir el botón de "Posicionar" de la hoja "Posición" el programa le solicita al usuario que inserte la identificación de cada punto en la columna "A", la cota media (m) de cada punto en la columna "B", la longitud acumulada (m) en la columna "C" y la longitud (m) de cada tramo en la columna "D", si no se cumple dicha condición el programa no ejecuta el resultado del posicionamiento y presenta un aviso crítico con lo requerido para posibilitar la ejecución. Si no se define la distancia máxima entre ventosas en la celda "B1", el programa presenta un aviso crítico y por defecto define una distancia de 600 m, distancia que recomiendan los manuales y los softwares. Pulsando el botón "Ayuda" el programa indica un procedimiento antes de ejecutar, indica algunas acciones y explica la función de cada botón.

Las celdas de la fila 4 y en general las celdas de color sombreado rosa son las que el usuario tiene que definir antes de ejecutar el proceso. Mientras que las celdas azules las calcula el programa.

Si se desea insertar un componente en el punto, se puede hacer en la columna "E", el programa ofrece las opciones de componentes y define una sigla para cada uno de ellos, se puede observar en la Tabla 7. Las siglas de cada componente se definen en la columna "F".

Tabla 7 Opciones de componentes y siglas definidas.

Componente	Siglas
Estación de bombeo	EB
Depósito	DEP
Válvula reductora de presión	VRP
Válvula de seccionamiento	VS
Válvula de desagüe	VD
Válvula de retención	VR
Purgador	P
Ventosa bifuncional	2F
Ventosa trifuncional	3F
Antiarriete o non-slam	NS
Aductor	AD
Expulsión	EX
Grifo de purga	GP
Tubo Piezométrico	PZ
Rotura	VM

Componente	Siglas
Caudalímetro	MQ
Orificios	OR

4.1.1 Posicionar

El botón posicionar hace un recorrido desde la fila 5 hasta el último valor definido del perfil, es decir que se puede insertar un perfil tan largo como la disponibilidad de filas en Excel. El bucle estudia los datos de cada fila y presenta los resultados deseados y aplica los criterios establecidos para obtener una propuesta de posicionamiento adecuada y finalmente presentar gráficamente el resultado del perfil y los componentes necesarios para el posterior análisis de las operaciones de vaciado, rotura, llenado y dimensión de purgadores. A continuación, se presenta el detalle de operación del botón "Posicionar".

Analizado y verificado el perfil insertado por el usuario y la distancia máxima admitida entre ventosas, el programa posiciona los tipos de componentes de acuerdo con los siguientes criterios.

1. Puntos altos (HP de la Figura 15): Ventosa trifuncional.
2. Puntos bajos (LP de la Figura 15): Válvula de desagüe.
3. Horizontales largos (CH): Si un tramo supera la distancia máxima entre ventosas, definida por el usuario (Celda "B1"), y además su pendiente es nula el programa posiciona un purgador.
4. Descensos largos (DL): Si un tramo supera la distancia máxima entre ventosas, definida por el usuario (Celda "B1"), y además su pendiente es negativa el programa posiciona una ventosa trifuncional.
5. Ascensos largos (SL): Si un tramo supera la distancia máxima entre ventosas, definida por el usuario (Celda "B1"), y además su pendiente es positiva el programa posiciona una ventosa bifuncional.
6. Disminución de pendiente ascendente (DU de la Figura 15): Ventosa bifuncional.
7. Aumento de pendiente descendente (ID de la Figura 15): Ventosa trifuncional
8. Caudalímetro (MQ): El programa inserta una fila aguas arriba del caudalímetro y posiciona un purgador.
9. Estación de bombeo (EB): El programa inserta una fila aguas abajo de la estación de bombeo y posiciona una ventosa bifuncional
10. Válvulas de seccionamiento: El programa inserta una fila aguas arriba y otra fila aguas abajo de la válvula de seccionamiento, en dichas filas posiciona, basado en la pendiente, una ventosa bifuncional o una válvula de desagüe (se describe más delante de la Figura 16).

Para los ítems 3, 4 y 5 de la clasificación precedente, el programa inserta la cantidad de filas necesarias hasta que el resultado de cada tramo es inferior a la distancia máxima ente ventosas definida. Por ejemplo, si el usuario definió una distancia máxima entre ventosas de 600 m y la distancia de un tramo del perfil sin ventosas es de 1400 m, el programa inicialmente divide la distancia del tramo en 2 (700 m) y rectifica que dicho valor es inferior a la distancia definida (600 m), si no es así, el programa retoma la distancia total del tramo (1400 m) y ahora la divide en 3 (466,67 m) y rectifica que dicho valor es inferior a la distancia definida, si es así, el programa inserta 2 (n=2) filas aguas arriba de la fila fijada para obtener un total de tres filas requeridas en la operación realizada del valor admitido.

Ahora, para cada fila insertada el programa define un ID del punto ("ID" & "." & n, n (1→∞)), para la tercera fila fija deja el ID que el usuario definió; calcula la cota de cada punto insertado, basado en la pendiente calculada previamente en el punto fijo y la longitud calculada del tramo (466.67 m); calcula la longitud acumulada del punto sumando sucesivamente el cálculo inicial y acumulándolo; para cada punto insertado ubica el valor de la longitud del tramo calculada y finalmente define el tipo del componente respectivo dependiendo del tipo de pendiente del tramo.

En la Tabla 8 se presenta el resumen de la clasificación de la posibilidad de puntos encontrados en el perfil, la sigla definida de cada tipo de punto, el tipo de componente correspondiente que depende del tipo del punto y las siglas del componente posicionado.

Tabla 8 Resumen de componente posicionado según condición de punto y siglas de tipo de punto y sigla de tipo de componente

Tipo de punto	Sigla	Tipo de componente	Sigla
Puntos altos	HP	Ventosa trifuncional	3F
Puntos bajos	LP	Válvula de desagüe	VD
Horizontales largos (400 a 800 m)	CH	Purgador	P
Descensos largos (400 a 800 m)	DL	Ventosa trifuncional	3F
Ascensos largos (400 a 800 m)	SL	Ventosa bifuncional	2F
Disminución de pendiente ascendente	DU	Ventosa bifuncional	2F
Aumento de pendiente ascendente	IU	Ninguno	NA
Disminución de pendiente descendente	DD	Ninguno	NA
Aumento de pendiente descendente	ID	Ventosa trifuncional	3F
Caudalímetro	MQ	Aguas arriba purgador	P
Estación de bombeo	EB	Aguas abajo Ventosa bifuncional	2F
Válvula de seccionamiento	VS	Aguas arriba o aguas abajo, ventosa bifuncional o purgador	P o 2F

En la Figura 15 se representan gráficamente las posibilidades de los tipos de puntos que se puedan presentar en un perfil de conducción, se aprovechó la imagen para entender de mejor manera la posición y el tipo de ventosa indicada para cada nodo, si es que lo requiere.

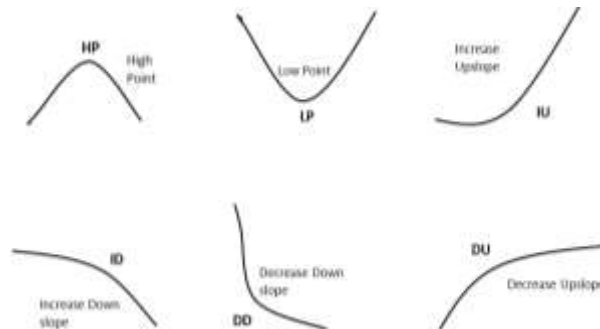


Figura 15 Clasificación de puntos en el perfil. Fuente: (BERMAD, 2013)

Como ya se ha mencionado, si en el perfil se define un punto de control como una válvula de seccionamiento, el programa inserta una fila aguas arriba y otra agua abajo en dicho proceso (ITEM

10 de clasificación previa). Aguas arriba define el ID del nuevo punto con el valor del ID del punto más un punto y 1 ("ID" & "." & 1) y aguas abajo define el ID con el valor del ID más un punto y 2 ("ID" & "." & 2), la cota y la longitud acumulada las mantiene igual; define un valor nulo para la longitud de los puntos insertados, respeta la pendiente, dado que la longitud del nuevo tramo es nula, aguas arriba (del punto fijo donde se definió la VS) y la pendiente aguas abajo (punto posterior al fijo), pendientes calculadas previamente. A cada válvula de seccionamiento, insertada por el usuario, el programa cambia la fuente del componente a color rojo y sombrea la celda a color verde claro.

Para definir el tipo de elemento indicado aguas arriba y aguas abajo el programa lo hace en función del tipo de pendiente. El programa define una válvula de desagüe si la pendiente aguas arriba es negativa o es horizontal, si la pendiente aguas arriba es positiva el programa inserta una ventosa bifuncional; el programa define una válvula de desagüe si la pendiente aguas abajo es positiva, si la pendiente aguas arriba es negativa o es horizontal el programa define una ventosa bifuncional. Los ejemplos se pueden observar en la Figura 16, considerando la dirección del flujo de izquierda a derecha. Cabe decir que si el perfil se inicia o finaliza con una válvula de seccionamiento (VS) el programa no inserta fula aguas arriba o aguas abajo respectivamente.

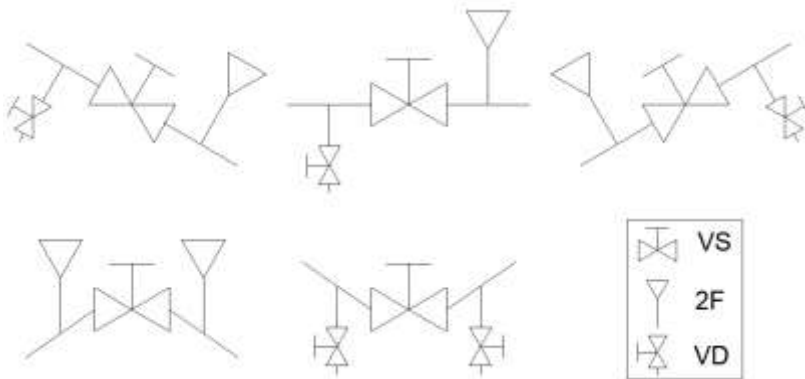


Figura 16 Instalación de elementos aguas arriba y aguas abajo de la válvula de seccionamiento (VS)

Si se define un punto de control como un caudalímetro o como una estación de bombeo el programa hace mencionado en la Tabla 8. En el nuevo punto instalado, ya sea aguas arriba o aguas abajo dependiendo del componente, el programa define un ID con el valor del ID del componente original más un punto y el numero 2 ("ID" & "." & 1), la cota y la longitud acumulada las mantiene igual; define un valor nulo para la longitud de los puntos insertados, respeta la pendiente, dado que la longitud del nuevo tramo es nula, aguas arriba o aguas abajo, dependiendo el caso y cambia el color de la fuente del punto fijo a color rojo y sombrea la celda a color verde claro. Si se finaliza con una estación de bombeo (caso extraño) el perfil insertado, el programa no instala ningún componente aguas abajo.

Cabe aclarar que para cualquier componente que el usuario defina inicialmente, el programa respeta dicho componente y además sombrea las celdas definidas en color verde claro. Así el programa detecta que dicha celda no se puede modificar y, además, visualmente le facilita al usuario identificar dichos componentes fijados.

A continuación, se añade un perfil de ejemplo para entender gráficamente algunas de las funciones que el programa hace en el botón “Posicionar” de la ventana posición.

Después del resultado propuesto por el programa, el usuario puede modificar los componentes resultado a criterio personal o experiencia de diseño y posteriormente está obligado a oprimir el botón “Consolidar”

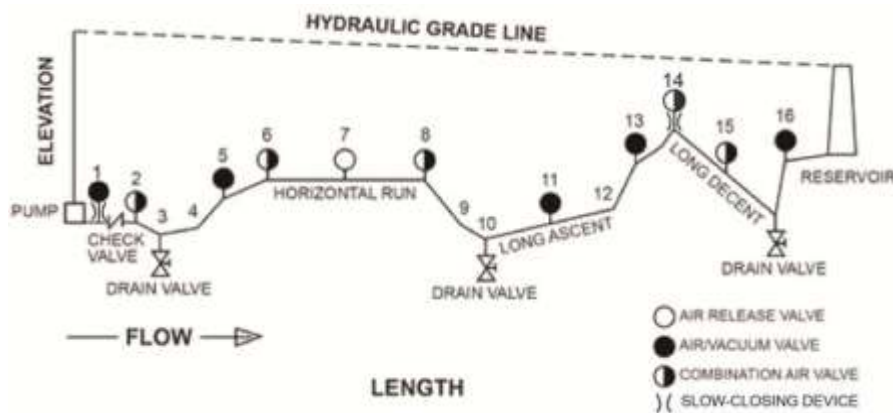


Figura 17 Criterios de posicionamiento de ventosas y desagües- Fuente: (VALMATIC, 2018, p. 5)

El resultado de la propuesta de posición se presenta en la Tabla 9. Se definieron la descripción de los puntos y los componentes recomendados utilizando las siglas definidas y presentadas en la Tabla 7 y en la Tabla 8.

Tabla 9 Propuesta de ubicación del perfil de la Figura 17.

No.	Descripción	Componente recomendado	No.	Descripción	Componente recomendado
1	Descarga de bomba (EB)	2F	9	DD	Nada
2	ID	3F	10	LP	VD
3	LP	VD	11	SL	2F
4	IU	Nada	12	IU	Nada
5	DU	2F	13	DU	2F
6	DU	2F	14	HP	3F
7	CH	P	15	DL	3F
8	ID	3F	16	DU	2F

Los resultados de la ejecución del posicionamiento se presentan a partir de la columna “E”, en dicha columna el programa respeta los componentes insertados por el usuario y propone una posición en las celdas vacías, aplicando los conceptos ya mencionados en el capítulo; en la columna “F” inserta las siglas (ver Tabla 7) que correspondan al componente propuesto; en la columna “G” recalcula la longitud acumulada basado en la longitud de cada tramo (columna “D”) con el fin de validar los valores, el resultado debe ser igual a la longitud acumulada insertada por el usuario en la columna “C”; en la columna “H” el programa calcula la pendiente de cada tramo, el valor los presenta en el punto final de

cada tramo; en la columnas "I" y "J" presenta el tipo del punto y la sigla, respectivamente, basado en la Tabla 8 y por último, en la columna "K" el programa presenta para algunos puntos los componentes que se podría replantear el usuario.

4.1.2 Insertar Punto

El botón insertar punto de la ventana del programa "Posición", se creó con el fin de insertar los componentes olvidados o añadidos posteriormente en un proyecto, es posible insertar los puntos que se deseen uno por uno. Solo es posible ejecutar el botón si ya se ha pulsado el botón "Posicionar", se cuestionará eso antes de ejecutar el botón.

Al oprimir el botón "Insertar Punto" y aceptar la cuestión, el programa le solicita al usuario la abscisa o punto (P.K.) del perfil previamente insertado, la abscisa que se inserte en el perfil debe coincides con algún valor entre la abscisa inicial y la abscisa final de la conducción simple insertada.

Después de digitar el correcto valor. El programa inserta una fila en el punto (P.K.) solicitado y realiza las siguientes funciones, en primera medida, llama al ID como el nodo aguas arriba más una "N" intermedia y finaliza con el ID del punto aguas abajo ("ID" (arriba) & "N" & "ID" (abajo)); posteriormente, calcula la pendiente con el mismo valor de la pendiente del punto aguas abajo; calcula la longitud del tramo aguas arriba y el tramo aguas abajo y a partir de dicho calculo con la pendiente mencionado recalcula la cota de dicho punto insertado. El componente del punto insertado lo debe definir el usuario y posteriormente debe pulsar el botón "Consolidar", si no oprime dicho botón, las siglas no se actualizarán y el cálculo de la siguiente ventana no será solicitado y el perfil grafico resultante no será el real.

4.1.3 Consolidar

La función del botón "Consolidar" es actualizar las siglas modificadas por el usuario, ejecutar procesos si se insertaron nuevos componentes en el perfil e insertar filas si se añaden o modifican válvulas de seccionamiento, estaciones de bombeo o caudalímetros en el perfil estudiado.

El botón se ejecuta si el usuario acepta que ha insertado un perfil de conducción, que ha pulsado el botón posicionar y que ha modificado o insertado algún componente. Al ser negativa la respuesta, el botón no se ejecuta.

El programa hace un recorrido desde la fila 5 hasta la última fila del perfil, analiza cada componente y le asigna la sigla definida. Con los colores de la fuente y de la celda el programa detecta que se ha añadido un nuevo componente al que hay que insertarle componentes aguas arriba o aguas abajo si es que es necesario hacerlo.

4.1.4 Perfil

La función del del botón "Perfil" es presentar el perfil resultado de los componentes necesarios para la fase de cálculo. En el eje de abscisas se representa la longitud acumulada en metros de cada punto desde el inicial hasta el nodo final. En el eje de ordenadas se representa la cota de cada punto en metros.

Las series que el gráfico presenta son la línea del perfil de color negro, los puntos de las válvulas de desagüe, las válvulas de seccionamiento, las ventosas bifuncionales, las ventosas trifuncionales y los purgadores. Los rangos del eje de abscisas los define el valor de la longitud acumulada del punto inicial y el valor de la longitud acumulada del punto final.

El programa tarda unos segundo debido a que, para la selección de cada una de las series comentadas que inserta en la leyenda (VD, VS, 2F, 3F y P), hace un filtro de cada componente a insertar y selecciona los valores visibles filtrados previamente de cotas y longitud acumulada, de esta manera define cada una de las series hasta completar los componentes deseados y define un estilo de icono para cada uno. Se recomienda esperar hasta que el programa realice dicho proceso.

4.1.5 Eliminar

La función del botón "Eliminar" es limpiar el posicionamiento realizado, lógicamente se recomienda ejecutar el botón después de realizar el posicionamiento. El botón elimina los resultados de las filas "F" hasta la "K" y elimina los componentes que el programa posicionó, respetando los componentes que el usuario inserto inicialmente.

4.2 Cálculo

La función de la ventana "Cálculo" es presentar tres opciones de cálculo de vaciado, rotura, llenado y/o purgador.

Antes de iniciar el cálculo de cualquier opción seleccionada por el usuario, el programa calcula la cota rasante y la cota clave de cada punto, en función del diámetro de tubería definido previamente por el usuario y considerando que la cota insertada en el perfil de conducción es la media.

En el cálculo de vaciado, el programa presenta los resultados del caudal, en condiciones interiores, admitido de aire de las ventosas bifuncionales y ventosas trifuncionales, basado en el caudal de agua drenado por las válvulas de desagüe, de cada uno de los tramos definidos por las válvulas de seccionamiento. Existen cuatro opciones de cálculo del vaciado, son en función de la velocidad de vaciado de las válvulas de desagüe, velocidad de vaciado de la tubería, caudal de vaciado de las válvulas de desagüe, cauda de vaciado de la tubería, coeficiente de caudal Kv de las válvulas de desagüe.

En el cálculo de la rotura, al igual que en el vaciado, el programa presenta los resultados del caudal, en condiciones interiores, admitido de aire de las ventosas bifuncionales y ventosas trifuncionales, aunque en este caso, basado en el caudal de agua drenado por la rotura, del tramo definido por las válvulas de seccionamiento. La rotura cuenta con tres opciones de cálculo, en función de: el porcentaje de rotura de la tubería (se recomienda un valor en el rango de 10% y 50%), simular la rotura como una válvula mariposa y según como lo hace la AWWA.

En el cálculo del llenado, el programa presenta los resultados del caudal, en condiciones normales, expulsado de aire de las ventosas bifuncionales y las ventosas trifuncionales, basado en la velocidad de llenado (se recomienda 0,3 m/s), ignorando en este caso las válvulas de seccionamiento y los

desagües presentes en el perfil de conducción. Se considera el mismo caudal para cada una de las ventosas (2F o 3F) posicionadas en el perfil.

En el cálculo del purgador, el programa presenta los resultados del caudal, en condiciones normales, expulsado de aire de los purgadores y las ventosas trinacionales, bajo operaciones normales del sistema. El cálculo se realiza basado en el caudal en operaciones normales y en el porcentaje de aire disuelto definido por el usuario (se recomienda 2%).

NOTA IMPORTANTE: Antes de ejecutar cualquier opción de cálculo el usuario debe realizar tres acciones. En primer lugar, importar el perfil de la conducción con sus respectivos componentes de la ventana "Posición" del programa. En segundo lugar, debe insertar: el diámetro (mm) de la tubería (columna "F"), el material de la tubería, la rugosidad (mm) y el estado (abierto o cerrado) de cada una de las válvulas de seccionamiento y cada una de las válvulas de desagüe de la conducción. En tercer lugar, si la opción del dimensionado de las válvulas de desagüe es; Manual (celda "D2"), se debe insertar el diámetro (mm) de cada una de las válvulas de desagüe del perfil en la columna "Q", si por el contrario la opción seleccionada de la celda "D2" es: Automática, el programa por defecto define el diámetro de cada válvula de desagüe en función de la dimensión de tubería definida por el usuario (Ver tabla Tabla 10). Además de otras características, en función de los criterios y opciones definidos por el usuario.

Tabla 10 diámetro automático de las válvulas de desagüe. Fuente: Experiencia práctica de Global Omnium.

DN Tubería (mm)	DN Desagües (mm)
≤ 500	100
501 - 999	150
1000 - 1200	200
>1200	400

A continuación, se presenta el fundamento y los criterios para obtener los resultados de cada una de las funciones disponibles del programa en la presente ventana ("Cálculo").

4.2.1 Importar perfil

Como ya se ha mencionado, la primera acción antes de ejecutar cualquier opción de cálculo es ejecutar el botón "Importar". Se recomienda pulsar el botón "Info Importar" en el cual se indicará la funcionalidad del botón "Importar" y la recomendación antes de iniciar cualquier tipo de cálculo.

La información importada es tomada desde la ventana "Posición", es necesario definir bien el perfil en dicha hoja, a fin de presentar la importación real y los cálculos deseados por el usuario. La información importada desde la hoja "Posición" hasta la hoja "Cálculo" es: El ID del punto, la cota media (m), la longitud acumulada del perfil, la longitud de cada tamo, la pendiente (desde la columna "A" hasta la columna "E", respectivamente), el componente de cada punto y la sigla de cada componente (Columna "N" y "O", respectivamente).

4.2.2 Vaciado

Como ya se ha mencionado, el cálculo del caudal máximo de aire admitido por cada ventosa en la operación de vaciado cuenta con cuatro opciones en función de: la velocidad de vaciado de las válvulas de desagüe, la velocidad de vaciado en la tubería, el caudal de vaciado de las válvulas de desagüe, el caudal de vaciado de la tubería y, por último, el coeficiente de caudal Kv de las válvulas de desagüe abiertas de cada tramo de conducción.

Algunos procesos empleados para realizar los cálculos pertinentes se basaron de la propuesta de aplicación para el cálculo de llenados y vaciados de tuberías de EMIMET (EMIMET, 2020).

Los criterios para el cálculo de la operación de vaciado los debe definir el usuario. En primer lugar debe definir el modo de dimensionamiento de las válvulas de desagüe (VD) en la celda "D2"; en segundo lugar debe definir, entre las opciones disponibles, el límite de depresión que soporta la tubería, con el que finalmente se dimensionan las ventosas, en la celda "B3" en mca (max: 3,06 mca); en tercer lugar, se debe definir el cálculo de vaciado en función de 4 opciones, ya mencionadas, en la celda "B2" y finalmente, se debe definir el valor del criterio en la celda "B1", varía de acuerdo a la opción seleccionada en "B2". Si la opción seleccionada es Kv, se debe definir el modo de cálculo de los coeficientes de caudal de las válvulas de desagüe en la celda "D3" (Automática o Manual).

Antes de emplear cualquier opción de cálculo es indispensable revisar el estado de las válvulas de seccionamiento (VS: abierta o cerrada) que determinan la definición de los tramos de la conducción y revisar el estado de las válvulas de desagüe (VD: abierta o cerrada) que determinan el caudal admitido de cada una de las ventosas del tramo. El estado de los elementos mencionados se define en la columna "P".

El programa emplea la siguiente metodología.

1. En primer lugar, define cada tramo desde una estación de bombeo (EB), un depósito o una válvula (DEP) de seccionamiento (VS) cerrada hasta que detecta, en el recorrido del bucle, una estación de bombeo (EB), un depósito (DEP) o una válvula de seccionamiento cerrada (VS). De esta manera el programa clasifica cada tramo y lo analiza por aparte.
2. Una vez identificados los tramos definidos por el usuario, el programa calcula el caudal drenado de cada válvula de desagüe (VD) abierta en función de: la cota clave de la ventosa más alta de cada tramo (VA), la cota rasante de cada válvula de desagüe abierta, el diámetro de la válvula de desagüe (opción manual o automática), y el parámetro de alguna de las cuatro opciones definidas del cálculo del vaciado.
3. Obtenidos los caudales de cada válvula de desagüe abierta y conociendo la clasificación de los tramos, el programa calcula el caudal admitido de aire, en condiciones interiores de la tubería, de cada una de las ventosas (2F o 3F).

Para obtener el caudal máximo de cada ventosa (QV1 y QV2), considerando que en un tramo existen dos ventosas (V1 y V2) y tres válvulas de desagüe (VD1, VD2 y VD3), el programa procede a hacer lo siguiente. Inicia un primer recorrido desde el primer punto del tramo analizado y se detiene hasta encontrar una ventosa (2F o 3F), al detectar dicha ventosa, el programa almacena su cota (CV1: cota de la ventosa 1 del tramo analizado). A partir de este

momento el programa inicia un segundo recorrido desde el primer punto del tramo, se detiene hasta que detecta una válvula de desagüe (VD1), una vez detectada la VD1, almacena el valor de su cota (CVD1: cota del desagüe 1 del tramo n), y hace la siguiente operación, si $CV1 \geq CDV1$ entonces, almacena el caudal drenado de esa válvula de desagüe (QVD1: caudal de válvula de desagüe 1). Una vez almacenado dicho caudal, el programa continúa el segundo recorrido deteniéndose en la segunda válvula de desagüe y coge la cota de dicha válvula (CVD2: cota del desagüe 2 del tramo n), si $CV1 < CDV2$ entonces, no almacena el caudal drenado de esa válvula de desagüe (QVD2). Ahora el programa continúa el segundo recorrido y se detiene en la última válvula de desagüe VD3 almacenando su cota (CVD3: cota del desagüe 3 del tramo n), si $CV1 \geq CVD3$ entonces, almacena el caudal drenado de la VD3 (QVD3: Caudal de la válvula de desagüe 3). El programa continúa el segundo recorrido hasta encontrar otra VD o el punto final del tramo (VS cerrada, EB o DEP). Una vez analizado y finalizado el segundo recorrido, el programa retoma el primer recorrido que sigue detenido en la ventosa V1, calcular el caudal de la V1 como la suma del cumplimiento de las condiciones anteriores con el valor almacenando los caudales de las VD aceptadas ($QV1 = QVD1 + QVD3$). Después de calcular el caudal de la ventosa 1, el programa continúa su primer recorrido y se detiene en la segunda ventosa (V2) almacenando la cota de dicha ventosa (CV2). Ahora se inicia de nuevo el segundo recorrido desde el primer punto del tramo hasta que finaliza el proceso de análisis ya explicado del segundo recorrido. Si consideramos que CV2 es mayor a CVD1, CVD2 y CVD3, el caudal de dicha ventosa será la sumatoria del caudal drenado de cada una de las válvulas de desagüe del tramo es decir que $QV2 = QVD1 + QVD2 + QVD3$. El programa continúa su primer recorrido hasta encontrar otra ventosa o el punto final de dicho tramo. El programa sigue y analiza el siguiente tramo con el mismo proceso de cálculo hasta que analiza cada uno de los tramos del perfil de conducción importado por el usuario.

En resumen, el caudal de aire de cada ventosa es la sumatoria del caudal de agua drenado de las válvulas de desagüe que superen la cota dicha ventosa analizada. Así para cada una de las ventosas y cada uno de los tramos del perfil de conducción.

Los criterios de las celdas "B1", "B3", "D2", "D3" y "D2", y los valores de la celda "B2" se deben definir", si el programa detecta que no se ha definido alguno o las celdas están vacías, se presenta un aviso de error y no se ejecuta ninguna de las opciones del botón "Calcular Vaciado".

Así como también, si el programa detecta que en las opciones y criterios seleccionados no se han insertado valores en las columnas o celdas deseadas, el programa presenta un aviso y no ejecuta el cálculo de vaciado. Además del diámetro de tubería, los datos importados, el tipo de material de tubería, la rugosidad de la tubería y el estado de las válvulas de seccionamiento y de las válvulas de desagüe.

Antes de ejecutar el cálculo de vaciado, se recomienda pulsar el botón "Ayuda Vaciado" en el cual se indica un paso a paso del proceso y se dan algunas recomendaciones adicionales para obtener un resultado deseado.

Si el usuario desea observar únicamente los resultados de vaciado, al oprimir el botón "Ver Vaciado y Rotura" podrá observar los Kv de las válvulas, los caudales admitidos de las ventosas en las dos

unidades calculadas, la velocidad de cada una de las válvulas de desagüe y la velocidad en la tubería. Si desea visualizar todos los cálculos realizados, se debe oprimir el botón "Ver Todo".

Conocido el proceso de obtención de los caudales de admisión de aire de las ventosas, y sabiendo que se calculan en función del caudal drenado algunas de las válvulas de desagüe. A continuación, se presentan las opciones para obtener el caudal drenado de cada válvula de desagüe:

4.2.2.1 Velocidad de vaciado en las válvulas de desagüe (VelVaciadoDesg)

La primera opción del cálculo del vaciado, definido en la celda "B2", es posible en función de la velocidad de vaciado en las válvulas de desagüe, es importante mencionar que el valor definido en la celda "B1" será el mismo para cada una de las VD del perfil de conducción, es decir que es un valor general. Ya se ha mencionado que se recomienda que dicho valor no supere los 6 m/s.

Una vez seleccionada la opción, fijado el valor de la velocidad de vaciado de las válvulas de desagüe (VD) y los criterios anteriormente mencionados el programa procede a realizar el siguiente cálculo:

1. En primer lugar, el programa identifica la cota clave de la ventosa más alta de cada tramo (Columna "R") y a partir de esto aplica la ecuación de Bernoulli entre la ventosa más alta (VA) de cada tramo y cada una de las válvulas de desagüe abiertas (ver (5)).

$$\frac{P_{VA}}{\gamma} + \frac{V_{VA}^2}{2g} + Z_{VA} = \frac{P_{VD}}{\gamma} + \frac{V_{VD}^2}{2g} + Z_{VD} + h_f + h_m \quad (5)$$

Donde:

- $\frac{P_{VA}}{\gamma}$ = Límite de depresión en la Ventosa (mca)
- $\frac{V_{VA}^2}{2g}$ = Factor cinético en la ventosa (m)
- Z_{VA} = Cota clave de la ventosa más alta del tramo (m)
- $\frac{P_{VD}}{\gamma}$ = cabeza de presión en la válvula de desagüe (m)
- $\frac{V_{VD}^2}{2g}$ = Factor cinético de la válvula de desagüe (m)
- Z_{VD} = Cota rasante de la válvula de desagüe (m).
- h_f = Pérdidas por fricción (m)
- h_m = Pérdidas de carga de la válvula de desagüe (m)

Como la operación de vaciado es controlada y se manejan velocidades bajas, de la ecuación (5) se desprecian los términos cinéticos de la ecuación, la cabeza de presión de la válvula de desagüe que drena a la atmósfera y las pérdidas por fricción de la tubería, por la misma razón, al ser unas velocidades pequeñas en la tubería, las pérdidas normalmente son despreciables. Partiendo de la hipótesis simplificada, se obtiene la ecuación (6).

$$\frac{P_{VA}}{\gamma} + Z_{VA} = Z_{VD} + h_m \quad (6)$$

Las pérdidas de carga por accesorios vienen definidas por la ecuación

$$h_m = k \cdot \frac{V_{VD}^2}{2g} \quad (7)$$

Donde: k = coeficiente de pérdidas de la válvula de desagüe (adimensional)

Sustituyendo la ecuación (7) en la ecuación (6) y despejando el coeficiente de pérdidas de la válvula de desagüe, se obtiene la ecuación (8).

$$k = \frac{2g \cdot \left(\frac{P_{VA}}{\gamma} + Z_{VA} - Z_{VD} \right)}{V_{VD}^2} \quad (8)$$

El coeficiente adimensional de cada una de las válvulas de desagüe abiertas se presenta en la columna "S" del programa, a partir de dicho valor se calcula el caudal de drenaje de cada válvula de desagüe, de la siguiente manera:

La velocidad en la válvula de desagüe viene dada por la expresión (9)

$$V_{VD} = \frac{Q_{VD}}{A_{VD}} \quad (9)$$

Donde: Q_{VD} = caudal drenado por la válvula de desagüe, en m^3/s .

A_{VD} = Sección de la válvula de desagüe, en m^2

La Sección de la válvula viene dada por la expresión (10)

$$A_{VD} = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{D_{VD}}{1000} \right)^2 \quad (10)$$

Donde: D_{VD} = diámetro de la válvula de desagüe, en mm

Sustituyendo la ecuación (10) en la ecuación (9) y posteriormente en la ecuación (8) se obtiene el caudal de cada válvula de desagüe, ver ecuación (11).

$$Q_{VD} = \sqrt{\frac{\left(\frac{\pi}{4} \right)^2 \cdot \left(\frac{D_{VD}}{1000} \right)^4 \cdot 2g \cdot \left(\frac{P_{VA}}{\gamma} + Z_{VA} - Z_{VD} \right)}{k}} \quad (11)$$

Donde: Q_{VD} = caudal drenado por la válvula de desagüe, en m^3/s . Columna "T".

D_{VD} = diámetro de la válvula de desagüe, en mm. Columna "Q".

g = aceleración de la gravedad ($9,81 m/s^2$)

P_{VA}/γ = límite de depresión de la tubería, en mca. Definida en la celda "B3".

Z_{VA} = cota clave de la ventosa más alta del tramo, en m. Columna "R".

Z_{VD} = cota rasante de la válvula de desagüe del tramo, en m. Columna "H".

k = coeficiente de pérdidas de la válvula de desagüe (adimensional). Columna "S".

Las pérdidas de carga de la válvula de desagüe también vienen dadas por la expresión (12)

$$h_m = K(\theta) \cdot Q_{VD}^2 \quad (12)$$

Donde: $K(\theta)$ = coeficiente de pérdidas en función del caudal, en $mca/(m^3/s)^2$

El coeficiente de pérdidas en función del caudal se puede definir en función del coeficiente de caudal K_v , viene definido por la expresión (13). (Soriano & Conejos, 2016, p. 64).

$$K(\theta) = \frac{10 \cdot 3600^2}{(K_v(\theta))^2} \quad (13)$$

Donde: K_v = coeficiente de caudal, en $(m^3/h)/(Kp/cm^2)^{0.5}$

Sustituyendo la ecuación (13) en la ecuación (12), se obtiene la expresión (14)

$$h_m = \frac{10 \cdot 3600^2}{(K_v(\theta))^2} \cdot Q_{VD}^2 \quad (14)$$

Sustituyendo la A_{VD} de la ecuación (10) en la ecuación (9) y despejando el Q_{VD} de la ecuación (9) se obtiene la expresión (15). Ahora sustituyendo la ecuación (15) en la ecuación (14) y dicho resultado sustituyéndolo en la ecuación (6), despejando el coeficiente de caudal K_v , se obtiene la expresión (16)

$$Q_{VD} = V_{VD} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{D_{VD}}{1000}\right)^2 \quad (15)$$

$$K_v = \sqrt{\frac{\left(\frac{\pi}{4}\right)^2 \cdot \left(\frac{D_{VD}}{1000}\right)^4 \cdot V_{VD}^2 \cdot 10 \cdot 3600^2}{\frac{P_{VA}}{\gamma} + Z_{VA} - Z_{VD}}} \quad (16)$$

Donde: K_v = coeficiente de caudal, en $(m^3/h)/(Kp/cm^2)^{0.5}$. Columna "Z".
 D_{VD} = diámetro de la válvula de desagüe, en mm. Columna "Q".
 V_{VD} = velocidad válvulas de desagüe, en m/s. Definida en la celda "B1" (máx. 6 m/s).
 P_{VA}/γ = límite de depresión de la tubería, en mca. Definida en la celda "B3".
 Z_{VA} = cota clave de la ventosa más alta del tramo, en m. Columna "R".
 Z_{VD} = cota rasante de la válvula de desagüe del tramo, en m. Columna "H".

Obtenido el coeficiente de caudal K_v , ahora es posible determinar el caudal drenado de cada una de las válvulas de desagüe. Sustituyendo V_{VD} de la ecuación (9) en la ecuación (16) y despejando Q_{VD} , se obtiene la expresión

$$Q_{VD} = \sqrt{\frac{\left(\frac{P_{VA}}{\gamma} + Z_{VA} - Z_{VD}\right) \cdot K_v^2}{3600^2 \cdot 10}} \quad (17)$$

Donde: Q_{VD} = caudal drenado por la válvula de desagüe, en m^3/s . Columna "AB".
 K_v = coeficiente de caudal, en $(m^3/h)/(Kp/cm^2)^{0.5}$. Columna "Z".
 P_{VA}/γ = límite de depresión de la tubería, en mca. Definida en la celda "B3".
 Z_{VA} = cota clave de la ventosa más alta del tramo, en m. Columna "R".
 Z_{VD} = cota rasante de la válvula de desagüe del tramo, en m. Columna "H".

En resumen, Inicialmente se calculan los coeficientes de carga de cada una de las válvulas de desagüe con las consideraciones y los criterios ya mencionados, después, se obtiene el caudal drenado en función del coeficiente de carga adimensional (k) y el caudal drenado en función del coeficiente de caudal (K_v) de cada una de las válvulas de desagüe. Lógicamente el cálculo de la ecuación (17) debe coincidir con el resultado de la ecuación (11). El parámetro determinante en esta opción de cálculo es la velocidad de vaciado de las válvulas de desagüe. El resultado del caudal depende del valor de la velocidad de vaciado de los desagües, criterio fijado por el usuario en la celda "B1".

El resultado del caudal de la ecuación (17) se presenta en la columna "AB", en la columna "AC" y "U" se hace la transformación a las unidades usuales en las curvas características de las ventosas Q (m^3/h).

A partir de los resultados del caudal máximo drenado para cada desagüe, se aplica el procedimiento ya explicado al inicio del capítulo (Vaciado, p.46) para obtener el caudal máximo de cada una de las ventosas de los tramos estudiados.

Adicionalmente se calcula la velocidad de los desagües de acuerdo con la ecuación (9), los resultados de presentan en la columna "AD". También, se calcula la velocidad en la tubería en la columna "AE", de acuerdo con la ecuación (9) pero con el diámetro de la tubería de la ecuación (10) (se reemplaza el término D_{VD} por el término: $D_T = \text{Diámetro de la tubería, en mm}$).

Si el usuario desea conocer las pérdidas por fricción de cada tramo el programa, adicionalmente, calcula la resistencia de la tubería en función de la velocidad calculada de la tubería, mencionada en el párrafo precedente, y la longitud acumulada hasta que el programa detecta válvulas de desagüe. En los resultados de la resistencia se encontrarán celdas vacías de algunos tramos, se aclara que la resistencia será el mismo valor aguas arriba del cálculo de la válvula de desagüe para cada tramo hasta encontrar algún elemento calculado por el programa.

Partiendo de que las pérdidas por fricción se calculan mediante la ecuación (18) (García-Serra, n.d., p. 4).

$$h_f = R \cdot Q_T^2 = \frac{8 \cdot f \cdot L_t}{\pi^2 \cdot D_T^5 \cdot g} \cdot Q_T^2 \quad (18)$$

Donde: R = Resistencia de la tubería, en $mca/(m^3/s)^2$. Columna "H"
 Q_T = caudal en la tubería, en m^3/s
 L_t = longitud acumulada del tramo, en m. Columna "C"
f = factor de fricción
 D_T = diámetro de la tubería, en mm. Columna "F" (dicho valor está en mm, precaución)

El factor de fricción de la ecuación (18) considerando siempre régimen turbulento se usa la ecuación de Seamee-Jain, expresión (19)

$$f = \frac{0,25}{\left(\log\left(\frac{\varepsilon}{D_T \cdot 3,7} + \frac{5,74}{R_e^{0,9}}\right)\right)^2} \quad (19)$$

Donde f = factor de fricción. Columna "L".
 ε = rugosidad de la tubería, en mm. Columna "J"
 D_T = diámetro de la tubería, en mm. Columna "F"
 R_e = número de Reynolds

El programa calcula el número de Reynolds mediante la ecuación (20). El resultado de número de Reynolds se presenta en la columna "K" del programa.

$$R_e = \frac{V_T \cdot D_T}{\nu} \quad (20)$$

Donde: R_e =número de Reynolds. Columna "K"
 V_T =velocidad en la tubería, en m/s. Columna "AE"
 D_T = diámetro de la tubería, en m. Columna "F"
 ν = viscosidad cinemática del agua a 20°, en m^2/s (0.000001 m^2/s)

Para obtener finalmente la resistencia de los tramos, el programa calcula la ecuación (20), sustituye el resultado del número de Reynolds en la ecuación (19) y finalmente calcula la resistencia, a partir de la ecuación (18). De esta manera el usuario puede obtener las pérdidas por fricción de cada tramo si lo desea. Aunque se recuerda que para métodos de cálculo el programa no calcula y no considera las pérdidas por fricción de la tubería debido a las bajas velocidades que se manejan en las operaciones analizadas por el programa.

4.2.2.2 Velocidad de vaciado en la tubería (VelVacTub)

La segunda opción del cálculo del vaciado, definido en la celda "B2", es posible en función de la velocidad de vaciado en la tubería, es importante mencionar que el valor definido en la celda "B1" será el mismo para todo el perfil de conducción, es decir que es un valor general. Ya se ha mencionado que se recomienda que dicho valor se encuentre en el rango de 0,3 m/s a 0,6 m/s.

Una vez se ha definido el valor en la celda "B1", se han establecido los estados de las válvulas de seccionamiento (definición de tramos) y las válvulas de desagüe, y los demás datos solicitados por el programa.

En primer lugar, el programa, basado en la velocidad de desagüe en la tubería definida, calcula el caudal total de la tubería con la sección obtenida de la ecuación (10) con el diámetro de la tubería. Ver ecuación (21).

Se le solicita al usuario que defina el porcentaje de caudal drenado por cada válvula de desagüe, considerando el número de VD de cada tramo sin superar la cantidad definida en el criterio. La definición de los porcentajes de drenaje se define en la columna "AA", si no existe el valor en alguna

válvula de desagüe abierta, el programa no ejecuta el cálculo y presenta un aviso de error. Se reitera que se debe conocer el perfil de conducción y presentar los porcentajes de desagüe adecuado para cada válvula, sin superar el total del caudal de la tubería.

$$Q_T = A_T V_T \quad (21)$$

Donde: Q_T = caudal en la tubería, en m^3/s .
 A_T = sección de la tubería m^2
 V_T = velocidad de la tubería, en m/s. Definido en la celda "B1".

Ahora conocido dicho caudal de la ecuación precedente, el programa calcula el coeficiente de caudal K_v , sustituyendo la ecuación (21) en la ecuación (16) y agregando el porcentaje de cada válvula de desagüe que recude el valor del caudal total, se recomienda que la suma de porcentajes ente cada tramo no supere el 100%. Por medio de la ecuación, el programa calcula el coeficiente de caudal K_v de cada desagüe

$$K_v = \sqrt{\frac{(Q_T \cdot (\frac{P_d}{100}))^2 \cdot 10 \cdot 3600^2}{\frac{P_{VA}}{\gamma} + Z_{VA} - Z_{VD}}} \quad (22)$$

Donde: K_v = coeficiente de caudal, en $(m^3/h)/(Kp/cm^2)^{0.5}$. Columna "Z".
 Q_T = caudal en la tubería, en m^3/s
 P_d = porcentaje de desagüe, en %. Definir para cada VD considerando su cantidad entre tramos.
 P_{VA}/γ = límite de depresión de la tubería, en mca. Definida en la celda "B3".
 Z_{VA} = cota clave de la ventosa más alta del tramo, en m. Columna "R".
 Z_{VD} = cota rasante de la válvula de desagüe, en m. Columna "H".

Finalmente, después de obtener el coeficiente de caudal de cada válvula de desagüe (VD) abierta, y conociendo los demás términos de la ecuación (17), el programa calcula el caudal máximo drenado por cada una de las válvulas de desagüe y lo registra en la columna "AB", transformándolo en otras unidades en la columna "AC" (m^3/h).

Después de conocer el caudal de cada desagüe, el programa determina el caudal admitido de aire en cada ventosa del perfil de conducción, con el procedimiento ya explicado en el inicio del capítulo (Vaciado, p.46).

Con el caudal calculado en cada válvula de vaciado es posible calcular la velocidad en la tubería (columna "AE"), la velocidad en las válvulas de desagüe (columna "AD"), igualando los caudales en las columnas "T" (m^3/s) y "U" (m^3/h) y determinando el número de Reynolds, el factor de fricción y la resistencia de acuerdo a las ecuaciones (20), (19) y (18), respectivamente. Además, calcula el k (adimensional) de acuerdo con la ecuación (8).

4.2.2.3 Caudal de vaciado de las válvulas de desagüe (QVacDesg)

La tercera opción del cálculo del vaciado, definido en la celda "B2", es posible en función del caudal de vaciado en las válvulas de desagüe, es importante mencionar que el valor definido en la celda "B1" será el mismo para cada una de las VD abiertas del perfil de conducción, es decir que es un valor general, igual para todas las VD del perfil.

Aunque el programa hace el cálculo de comprobación con las ecuaciones (9), (16) y (17) con el fin de conocer los demás términos que calculan las demás opciones

Una vez seleccionada la opción, fijado el valor del caudal de vaciado de las válvulas de desagüe (VD) y los criterios anteriormente mencionados el programa procede a realizar el cálculo de la velocidad de vaciado en los desagües (ver ecuación (9)), el coeficiente de caudal Kv (ver ecuación (16)) y finalmente una rectificación del caudal drenado, debe coincidir el dato insertado en la celda "B1" con el cálculo realizado de la ecuación (17) para cada una de las válvulas de desagüe del perfil.

Al igual que en las opciones explicadas anteriormente. Después de conocer el caudal de cada desagüe, el programa determina el caudal admitido de aire en cada ventosa del perfil de conducción, con el procedimiento ya explicado en el inicio del capítulo (Vaciado, p.46).

Con el caudal calculado en cada válvula de vaciado es posible calcular la velocidad en la tubería (columna "AE"), la velocidad en las válvulas de desagüe (columna "AD"), igualando los caudales en las columnas "T" (m^3/s) y "U" (m^3/h) y determinando el número de Reynolds, el factor de fricción y la resistencia de acuerdo a las ecuaciones (20), (19) y (18), respectivamente. Además, calcula el k (adimensional) de acuerdo con la ecuación (8).

4.2.2.4 Caudal de vaciado en la tubería (QVacTub)

La cuarta opción del cálculo del vaciado, definido en la celda "B2", es posible en función del caudal de vaciado en la tubería, es importante mencionar que el valor definido en la celda "B1" será el mismo para todo el perfil de conducción, es decir que es un valor general.

Una vez se ha definido el valor en la celda "B1", se han establecido los estados de las válvulas de seccionamiento (definición de tramos) y las válvulas de desagüe, y los demás datos solicitados por el programa.

Al igual que en el cálculo de la opción de la velocidad de vaciado en la tubería. Se le solicita al usuario que defina el porcentaje de caudal drenado por cada válvula de desagüe, considerando el número de VD de cada tramo sin superar la cantidad definida en el criterio. La definición de los porcentajes de drenaje se define en la columna "AA", si no existe el valor en alguna válvula de desagüe abierta, el programa no ejecuta el cálculo y presenta un aviso de error. Se reitera que se debe conocer el perfil de conducción y presentar los porcentajes de desagüe adecuado para cada válvula, sin superar el total del caudal de la tubería.

A diferencia de la opción de la velocidad de vaciado en la tubería, en la presente opción se hace omite el primer proceso, debido a que el usuario lo conoce y se hace el cálculo directo del coeficiente de caudal Kv en la ecuación (22) y se sigue el proceso explicado en la opción de la velocidad de vaciado.

Es decir, finalmente, después de obtener el coeficiente de caudal de cada válvula de desagüe (VD) abierta, y conociendo los demás términos de la ecuación (17), el programa calcula el caudal máximo drenado por cada una de las válvulas de desagüe y lo registra en la columna "AB", transformándolo en otras unidades usuales en las curvas características de las ventosas en la columna "AC" (m^3/h).

Al igual que en las opciones explicadas anteriormente. Después de conocer el caudal de cada desagüe, el programa determina el caudal admitido de aire en cada ventosa del perfil de conducción, con el procedimiento ya explicado en el inicio del capítulo (Vaciado, p.46).

Con el caudal calculado en cada válvula de vaciado es posible calcular la velocidad en la tubería (columna "AE"), la velocidad en las válvulas de desagüe (columna "AD"), igualando los caudales en las columnas "T" (m^3/s) y "U" (m^3/h) y determinando el número de Reynolds, el factor de fricción y la resistencia de acuerdo a las ecuaciones (20), (19) y (18), respectivamente. Además, calcula el k (adimensional) de acuerdo con la ecuación (8).

4.2.2.5 Vaciado en función del coeficiente de caudal Kv (Kv)

Se trata de la quinta y última opción de cálculo de vaciado en la celda "B2", en esta opción el cálculo es en función del coeficiente de caudal Kv. A diferencia de las otras cuatro opciones, en esta se debe definir el modo de obtención, de las 2 opciones disponibles, del coeficiente de caudal Kv en la celda "D3" (automática-manual).

Si en la celda "D3" no se definen ningún modo de cálculo del coeficiente de caudal Kv, el programa presenta un aviso de alerta y no se ejecutará la opción.

Kv manual

Si en la celda se define la opción "Manual", el usuario debe conocer el coeficiente de caudal de cada una de las válvulas de desagüe abiertas en el perfil de conducción. El valor lo debe insertar en la columna "Z" y a partir de ese momento, considerando que los demás criterios y las demás solicitudes del programa están hechas, el programa calcula el caudal de cada desagüe aplicando la ecuación (17).

Cabe mencionar y recordar que las unidades del coeficiente de caudal Kv conocido deben ser $(m^3/h)/(Kp/cm^2)^{0.5}$, de lo contrario el resultado del caudal será erróneo.

Una vez conocido el caudal drenado de cada una de las válvulas de desagüe, el programa aplica el procedimiento explicado en la introducción de capítulo de vaciado para obtener el caudal admitido de aire de cada una de las ventosas del perfil de conducción insertado por el usuario. Además de la velocidad de cada válvula de desagüe, la velocidad en la tubería, el número de Reynolds, el factor de fricción, la resistencia de la tubería y el coeficiente de carga adimensional (k) para cada una de las válvulas de desagüe abiertas.

Si el programa detecta que no hay ningún valor en alguna válvula de desagüe abierta, se mostrará un aviso de alerta y la opción de cálculo no se ejecutará.

Kv Automático

Si en la celda se define la opción "Automático", el programa cuanta con registros caracterizados de cuatro diámetros ensayados para dimensiones usuales de válvulas de desagüe, los cuales son: 100,

150, 200 y 400. Dichos diámetros de las válvulas de desagüe coinciden con los resultados por defecto de la función automática de la dimensión de los desagües (celda "D2") que determina el diámetro de las VD en función de la dimensión de la tubería (ver Tabla 10).

Si la dimensión de los desagües es manual (celda "D2" = "Manual"), la opción de cálculo es del vaciado es Kv (celda "B2" = Kv) y la opción del Kv es automática (celda "D3" = "Automática"), en la columna "Q" solo pueden ir los diámetros de 100, 150, 200 o 400 mm para cada una de las válvulas de desagüe abiertas que se quieran analizar.

Como ya se ha mencionado se cuenta con cuatro DN caracterizados para operar con la opción automática. En el caso de DN100 y DN150 se aplica una ecuación con algunos coeficientes definidos para cada uno y en el caso de DN200 y DN400 se cuenta con resultados de Kv en función de la contrapresión y el número de vueltas de la válvula.

- **DN100:** si el diámetro nominal de alguna de las válvulas de desagüe es de 100 mm, el usuario debe conocer e insertar la presión de entrada (P_e , columna "V" (mca)) y la presión de salida (P_s , columna "W" (mca)) de cada válvula de desagüe. Conocidas las dos presiones de las VD abiertas, el programa calcula la diferencia de presión $\Delta P = P_e - P_s$ (columna "X") de cada una de ellas. A partir dicho cálculo, el programa sustituye los coeficientes de la Tabla 6 del DN100 en la ecuación (4). Así determina el coeficiente de caudal Kv de cada una de las ventosas.
- **DN150:** si el diámetro nominal de alguna de las válvulas de desagüe es de 150 mm, el usuario debe conocer e insertar la presión de entrada (P_e , columna "V" (mca)) y la presión de salida (P_s , columna "W" (mca)) de cada válvula de desagüe. Conocidas las dos presiones de las VD abiertas, el programa calcula la diferencia de presión $\Delta P = P_e - P_s$ (columna "X") de cada una de ellas. A partir dicho cálculo, el programa sustituye los coeficientes de la Tabla 6 del DN150 en la ecuación (4). Así determina el coeficiente de caudal Kv de cada una de las ventosas.

Si el programa detecta que alguna VD abierta y alguno de los diámetros precedentes (100 o 150) no tiene valores de presión de entrada o presión de salida, el programa no continúa el cálculo y se detiene en la fila en la que dicho valor es solicitado.

- **DN200:** si el diámetro nominal de alguna de las válvulas de desagüe es de 200 mm, el usuario debe conocer la contrapresión (P_s , columna "W" (mca)) y el número de vueltas (N° Vueltas, columna "Y") de cada válvula de desagüe. La contrapresión debe ser, 0 (sin contrapresión), 10, 20, 30 o 40 y el número de vueltas de la válvula debe estar en el rango de 15 a 20. Una vez definidos los dos valores por el usuario para cada VD abierta, el programa determina el coeficiente del caudal Kv basado en la Tabla 3. De esta manera el programa determina el coeficiente de caudal Kv de la columna "Z" de cada una de las válvulas de desagüe abiertas.
- **DN400:** si el diámetro nominal de alguna de las válvulas de desagüe es de 400 mm, el usuario debe conocer la contrapresión (P_s , columna "W" (mca)) y el número de vueltas (N° Vueltas, columna "Y") de cada válvula de desagüe. La contrapresión debe ser, 0 (sin contrapresión), 10, 20, 30 o 40 y el número de vueltas de la válvula debe estar en el rango de 5 a 10. Una vez definidos los dos valores por el usuario para cada VD abierta, el programa determina el

coeficiente del caudal Kv basado en la Tabla 4. De esta manera el programa determina el coeficiente de caudal Kv de la columna "Z" de cada una de las válvulas de desagüe abiertas.

Si el programa detecta que alguna VD abierta y alguno de los diámetros precedentes (200 o 400) no cuenta con valores de contrapresión o de número de vueltas, el programa no continúa el cálculo y se detiene en la fila en la que dicho valor es solicitado. Algo que no detecta el programa es los valores de contrapresión o número de vueltas que no se encuentren en la Tabla 3 o en la Tabla 4, por lo que el programa no ejecutará y se bloqueará hasta que el usuario detenga la ejecución. Se recomienda prevención al insertar los valores que dependen del diámetro.

Una vez que se define el coeficiente de caudal Kv para cada VD abierta, el programa procede a calcular el caudal drenado de cada VD aplicando la ecuación (17). A partir del cálculo del caudal drenado para cada VD, se calcula el caudal admitido de aire de cada ventosa (2F o 3F) con el procedimiento explicado en la introducción del cálculo de vaciado (Vaciado, p.46).

Al igual que en las demás opciones, con el caudal calculado en cada válvula de vaciado es posible calcular la velocidad en la tubería (columna "AE"), la velocidad en las válvulas de desagüe (columna "AD"), igualando los caudales en las columnas "T" (m^3/s) y "U" (m^3/h) y determinando el número de Reynolds, el factor de fricción y la resistencia de acuerdo a las ecuaciones (20), (19) y (18), respectivamente. Además, calcula el k (adimensional) de acuerdo con la ecuación (8).

4.2.3 Rotura

La rotura se trata de un vaciado incontrolado, Como ya se ha mencionado, el cálculo del caudal máximo de aire admitido por cada ventosa en la operación de rotura cuenta con tres opciones en función de: el porcentaje de rotura (%Rotura), simulación de rotura como una válvula mariposa (VM), y, por último, método empleado por la American Water Works Association (AWWA).

Los criterios para el cálculo de la operación de rotura los debe definir el usuario. En primer lugar, se debe definir alguna de las alternativas del cálculo de rotura en función de 3 opciones, ya mencionadas, en la celda "D1" y, en segundo lugar, debe definir, entre las opciones disponibles, el límite de depresión que soporta la tubería, con el que finalmente se dimensionan las ventosas, en la celda "B3" en mca (max: 3,06 mca). Si la opción seleccionada de a celda "D1" es VM, se debe definir el modo de cálculo de los coeficientes de caudal de las válvulas mariposa en la celda "E3" (Automática o Manual).

Antes de emplear cualquier opción de cálculo es indispensable revisar el estado de las válvulas de seccionamiento (VS: abierta o cerrada) que determinan la definición de los tramos de la conducción. El estado de los elementos se define en la columna "P".

El programa emplea la siguiente metodología.

1. En primer lugar, define cada tramo desde una estación de bombeo (EB), un depósito o una válvula (DEP) de seccionamiento (VS) cerrada hasta que detecta, en el recorrido del bucle, una estación de bombeo (EB), un depósito (DEP) o una válvula de seccionamiento cerrada (VS). De esta manera el programa clasifica cada tramo y lo analiza por aparte. El programa cambia el estado de todas las VD a "cerrado".

2. Una vez definidos los tramos e insertados los criterios, el programa le solicita al usuario la abscisa (P.K.) donde desea la rotura, el P.K. insertado debe ser un valor entre el inicio y el fin del perfil. Tras conocer el P.K. insertado por el usuario, el programa inserta una fila entre los puntos donde ha localizado la abscisa. Al insertar la nueva fila, el programa nombra el nuevo ID como el ID (aguas arriba y aguas abajo) con un "ROT" intermedio ("ID" & "ROT" & "ID"), mantiene la pendiente del tramo en el que se inserta la rotura, inserta la longitud acumulada (misma P.K.), calcula la longitud del tramo de la rotura y modifica la longitud del tramo aguas abajo de la rotura, calcula la cota de la rotura con la pendiente, la longitud del nuevo tramo creado y la cota del punto aguas abajo, al componente lo llama "Rotura" y la sigla "VM", mantiene el diámetro, la rugosidad y el material de la tubería del tramo ahora dividido y calcula las cotas clave y rasante de la rotura.
3. Después, el programa procede a calcular el caudal de la rotura mediante las opciones "%Rotura" o "VM", excepto en la opción "AWWA", debido a que el programa calcula directamente el caudal admitido de aire de las cada una de las ventosas. Para las dos primeras opciones el programa determina el caudal de la rotura y posteriormente la distribuye en las ventosas de cota superior a la rotura en el tramo definido por las VS. A partir de esto, el programa define el caudal admitido de aire, en condiciones interiores de la tubería, de cada una de las ventosas (2F o 3F) que superen la cota de la rotura. El caudal drenado de la rotura será el mismo caudal admitido de aire para cada una de las ventosas superiores a la rotura.

Para las opciones de las celdas "B3", "D2" y "E3", si el programa detecta que no se ha definido alguno o las celdas están vacías, se presenta un aviso de error y no se ejecuta ninguna de las opciones del botón "Calcular Rotura".

Así como también si el programa detecta que en las opciones y criterios seleccionados no se han insertado valores en las columnas o celdas deseadas, el programa presenta un aviso y no ejecuta el cálculo de vaciado. Además del diámetro de tubería, los datos importados, el tipo de material de tubería, la rugosidad de la tubería y el estado de las válvulas de seccionamiento.

Antes de ejecutar el cálculo de rotura, se recomienda pulsar el botón "Ayuda Rotura" en el cual se indica un paso a paso del proceso y se dan algunas recomendaciones adicionales para obtener un resultado deseado. Si desea visualizar todos los cálculos realizados, se debe oprimir el botón "Ver Todo".

Conocido el proceso de obtención de los caudales de admisión de aire de las ventosas, y sabiendo que se calculan en función del caudal drenado por la rotura o directamente el caudal de admisión de aire en las ventosas (AWWA). A continuación, se presentan las opciones disponibles del programa.

4.2.3.1 Porcentaje de rotura (%Rotura)

La primera opción es el cálculo del caudal de la rotura en función del porcentaje de rotura de la tubería, es decir en función de la reducción de la dimensión de la tubería. Se recuerda que se recomiendan valores entre el rango de 10% a 50%, dependiendo del material estudiado.

Inicialmente el programa determina la cota de la ventosa más alta del tramo en el que se presenta la rotura, tramo definido por las válvulas de seccionamiento cerradas (VS, cerradas).

Después se solicita el porcentaje de rotura, una vez definido el valor del usuario el programa calcula el diámetro de la rotura mediante la expresión

$$D_{ROT} = D_T \cdot (\%Rotura/100) \quad (23)$$

Donde: D_{ROT} = diámetro de la rotura, en mm. Columna "Q"
 D_T = diámetro de la tubería, en mm. Columna "F"
 %Rotura= Porcentaje de rotura definido por el usuario, se recomienda (10% a 50%).

Después de calcular el diámetro de la rotura, el programa calcula el caudal de la rotura mediante la ecuación (24). En esta opción el programa desprecia el coeficiente de carga de la rotura con un valor de uno ($k=1$), partiendo de que se considera que la rotura no presenta ninguna pérdida de carga ya que en la reducción del diámetro de la sección de la tubería se está asumiendo dicha pérdida.

$$Q_{ROT} = \sqrt{\frac{\left(\frac{\pi}{4}\right)^2 \cdot \left(\frac{D_{ROT}}{1000}\right)^4 \cdot 2g \cdot \left(\frac{P_{VA}}{Y} + Z_{VA} - Z_{VD}\right)}{k}} \quad (24)$$

Donde: Q_{ROT} = caudal drenado por la rotura, en m^3/s . Columna "T".
 D_{ROT} = diámetro de la rotura, en mm. Columna "Q".
 g = aceleración de la gravedad ($9,81 m/s^2$)
 P_{VA}/Y = límite de depresión de la tubería, en mca. Definida en la celda "B3".
 Z_{VA} = cota clave de la ventosa más alta del tramo, en m. Columna "R".
 Z_{VD} = cota rasante de la rotura, en m. Columna "H".
 k = coeficiente de pérdidas de la válvula de desagüe (adimensional). Valor =1.

A partir del caudal calculado en las roturas, el programa define el caudal admitido de aire, en condiciones interiores de la tubería, de cada una de las ventosas (2F o 3F) que superen la cota de la rotura en el tramo. El caudal drenado de la rotura será el mismo caudal admitido de aire para cada una de las ventosas superiores a la rotura.

Con el caudal calculado de la rotura es posible calcular el coeficiente de caudal de la rotura (columna "Z"), la velocidad en la tubería (columna "AE"), la velocidad en la rotura (columna "AD"), igualando los caudales en las columnas "T" (m^3/s) y "U" (m^3/h) y determinando el número de Reynolds, el factor de fricción y la resistencia de acuerdo a las ecuaciones (20), (19) y (18), respectivamente. Además, calcula el k (adimensional) de acuerdo con la ecuación (8) y el coeficiente de caudal K_v de acuerdo con la ecuación (16).

4.2.3.2 Simular una válvula mariposa (VM)

La segunda opción disponible es simular la rotura como una válvula mariposa. Dicha opción requiere conocer el coeficiente de caudal K_v de cada rotura insertada por el usuario. Se debe indicar la obtención del K_v en la celda "E3", existen dos opciones: "Automática" o "Manual" A continuación se indica el procedimiento que aplica cada una de las opciones disponibles.

Cabe recordar que el programa determina la cota de la ventosa más alta del tramo en el que se presenta la rotura, tramo definido por las válvulas de seccionamiento cerradas (VS, cerradas).

Una vez se determina la opción de la obtención del Kv de la VM (válvula mariposa), el usuario debe pulsar el botón "Calcular Rotura". Posteriormente el programa solicita la abscisa de la rotura y procede a realizar el cálculo.

Kc manual

Si la definición de la celda "E3" es "Manual", el programa interpreta que el usuario conoce el coeficiente de caudal de la simulada válvula mariposa. El usuario debe insertar el coeficiente de caudal Kv en cada rotura presente en el perfil de conducción. Si el programa detecta que para alguna VM el valor de Kv (Columna "Z") es nulo, detiene la ejecución del cálculo y da un aviso de lo ocurrido.

Al conocer los coeficientes de caudal de cada una de las roturas, el programa calcula el caudal de la rotura con la ecuación (17).

A partir del caudal calculado en las roturas, el programa define el caudal admitido de aire, en condiciones interiores de la tubería, de cada una de las ventosas (2F o 3F) que superen la cota de la rotura en el tramo. El caudal drenado de la rotura será el mismo caudal admitido de aire para cada una de las ventosas superiores a la rotura.

Al igual que en el proceso anterior, con el caudal calculado de la rotura es posible calcular la velocidad en la tubería (columna "AE"), la velocidad en la rotura (columna "AD"), igualando los caudales en las columnas "T" (m^3/s) y "U" (m^3/h) y determinando el número de Reynolds, el factor de fricción y la resistencia de acuerdo a las ecuaciones (20), (19) y (18), respectivamente. Además, calcula el k (columna "S") (adimensional) de acuerdo con la ecuación (8) (columna "Z").

Kv automático

Si la definición de la celda "E3" es "Automático", el programa solicita al usuario el diámetro nominal y el grado de apertura de la simulada válvula mariposa. Las opciones disponibles de los grados de apertura y los diámetros disponibles de pueden observar en la Figura 18. De acuerdo a los datos insertados por el usuario, el programa hace una búsqueda del Kv, el diámetro nominal de la VM no puede ser superior al diámetro de la tubería del perfil de conducción. El programa solicita dichos datos en avisos que el usuario debe responder adecuadamente, de no ser así, se presentarían problemas de ejecución.

Al conocer los coeficientes de caudal de cada una de las roturas, el programa calcula el caudal de la rotura con la ecuación (17).

A partir del caudal calculado en las roturas, el programa define el caudal admitido de aire, en condiciones interiores de la tubería, de cada una de las ventosas (2F o 3F) que superen la cota de la rotura en el tramo analizado. El caudal drenado de la rotura será el mismo caudal admitido de aire para cada una de las ventosas superiores a la rotura.

Al igual que en el proceso anterior, con el caudal calculado de la rotura es posible calcular la velocidad en la tubería (columna "AE"), la velocidad en la rotura (columna "AD"), igualando los caudales en las

columnas "T" (m^3/s) y "U" (m^3/h) y determinando el número de Reynolds, el factor de fricción y la resistencia de acuerdo a las ecuaciones (20), (19) y (18), respectivamente. Además, calcula el k (columna "S") (adimensional) de acuerdo con la ecuación (8) (columna "Z").

DN	ANGLE D'OUVERTURE DU ROBINET													
	10°	15°	20°	22½°	30°	40°	45°	50°	60°	67½°	70°	75°	80°	90°
40	2	3	4	5	8	15	23	33	40	60	70	75	80	100
50	3	4	6	8	11	14	23	34	49	60	90	105	113	135
65	4	6	10	14	17	20	33	53	72	88	132	154	165	198
80	7	10	16	22	27	32	54	80	117	144	216	252	272	324
100	10	14	22	30	38	46	77	128	186	204	306	357	383	450
125	16	22	35	45	60	72	120	200	260	320	480	560	600	720
150	25	35	55	70	95	113	189	315	430	504	756	882	945	1134
200	40	55	85	110	145	174	324	540	702	864	1296	1512	1620	1944
250	70	95	145	190	255	315	525	875	1138	1400	2100	2450	2646	3150
300	102	140	215	285	385	475	765	1275	1658	2040	3060	3570	3825	4590
350	147	200	295	390	520	640	1000	1633	2182	2632	3998	4531	4898	5940
400	186	255	380	500	660	817	1235	2025	2728	3280	4980	5610	5975	7210
450	230	315	465	610	800	985	1475	2475	3338	4000	5900	6650	7094	8550
500	284	385	560	740	980	1216	1800	2944	3907	4670	6700	7563	8031	9750
600	450	600	870	1150	1540	1880	2700	4300	5700	6900	9900	11200	11900	14400
700	700	900	1300	1700	2250	2750	3900	6000	7900	9500	13500	15200	16000	19200
800	1110	1450	2050	2700	3550	4350	6100	9200	12200	14500	20500	23000	24000	28800
900	1400	1850	2600	3400	4500	5500	7600	11300	14900	17600	24800	28000	29000	35200
1000	1900	2500	3400	4400	5800	7000	9600	14200	19000	22800	32000	36000	37000	44800

Figura 18. Kv de diferentes grados de apertura y DN de válvulas mariposa. Fuente: (García-Serra, 2010, p. 46)

4.2.3.3 Rotura según AWWA

La tercer y última opción de cálculo de rotura es de acuerdo con la recomendación que aplica la American Water Works Association (AWWA). En el manual M51 de la AWWA hacen el cálculo directo en las ventosas, se recomienda calcular el caudal haciendo coincidir la pendiente de la tubería con el diámetro de la tubería. Recomienda hacer uso de la siguiente expresión (ver ecuación (25)).

$$Q_{AWWA}(scfm) = 0,0472 \cdot C_{HW} \cdot \sqrt{S \cdot \left(\frac{D_T}{25,4}\right)^5} \quad (25)$$

Donde: $Q_{AWWA}(scfm)$ = caudal estándar admitido de aire, en ft^3/min
 C_{HW} = coeficiente Chezy: 110 (hierro), 120 (hormigón), 130 (acero), 190 (cloruro de polivinilo).

S = Pendiente de la tubería (adimensional).

D_T = diámetro de la tubería, en mm. Columna "F".

Como se hace el cálculo directo del caudal máximo de aire admitido por las ventosas, el programa no hace más cálculos y presenta el resultado, haciendo la transformación, del caudal (columna "AB" t columna "T", en m^3/s) (columna "AC" y "U" m^3/h), en de cada una de las ventosas (2F y 3F) del tramo en el que se presenta la rotura.

Al igual que en las opciones anteriores, el programa únicamente calcula las ventosas de cotas superiores a la cota de la rotura.

La pendiente de la ecuación (25) se determina fijando la cota de cada ventosa a calcular, conociendo la cota de la rotura (diferencia de cotas entre ventosa y rotura) y la distancia entre cada ventosa y la rotura (distancia ente ventosa calculada y rotura). Es decir que el resultado de la pendiente para cada ventosa será distinto.

4.2.4 Llenado

En el cálculo de llenado, el objetivo del programa es determinar el caudal de aire expulsado por cada una de las ventosas que se encuentran en el perfil de conducción simple. Dicha operación de cálculo únicamente cuenta con la opción en función de la velocidad de llenado de la conducción. Ya se ha mencionado que se recomienda una velocidad de llenado máxima de 0,3 m/s.

En el cálculo de llenado el programa le solicita al usuario: la velocidad de llenado (m/s), la presión diferencial en fase de expulsión (recomendación max: 0,4 bar), la cota sobre el nivel del mar (m) y la temperatura del proyecto ($^{\circ}C$).

Con los datos proporcionados por el usuario, inicialmente el programa calcula el caudal volumétrico de llenado de acuerdo con la ecuación (26).

$$Q_u = V_u \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{D_T}{1000}\right)^2 \quad (26)$$

Donde: $Q_u(CI)$ = caudal de llenado, en m^3/s . Columna "AO"

V_u = velocidad de llenado, en m/s

D_T = diámetro de tubería, en mm

El caudal calculado de llenado será el mismo caudal de expulsión de aire de las ventosas, se trata del caudal máximo en condiciones interiores de la tubería, el caudal expulsado de aire será el calculado en condiciones normales.

Con el caudal calculado y la velocidad insertada por el usuario, el programa calcula el numero Reynolds, el factor de fricción, y la resistencia de acuerdo con las ecuaciones (20), (19) y (18) y ubicado en las columnas "K", "L" y "M", respectivamente.

Las curvas características de las ventosas solicitan el caudal en el eje de abscisas generalmente en condiciones normales. Por lo cual es necesario tener en cuenta el concepto de caudal másico (ver (27)).

$$G = Q_{CI} \cdot \rho_{CI} = Q_{CN} \cdot \rho_{CN} \quad (27)$$

Donde: G = caudal masico kg/s
 Q_{CI} = caudal en condiciones del interior de la tubería, en m^3/s . Ecuación (27)
 ρ_{CI} = densidad del aire en condiciones del interior de la tubería, en kg/m^3
 Q_{CN} = caudal en condiciones normales del aire, en Nm^3/s . Columna "AP".
 ρ_{CN} = densidad del aire en condiciones normales kg/Nm^3

Despejando Q_{CN} de la ecuación (27) se obtiene la ecuación (28). El caudal se encuentra en condiciones normales generalmente cuando la temperatura es $0^\circ C$ y la presión atmosférica (1 atm).

$$Q_{CN} = \frac{Q_{CI} \cdot \rho_{CI}}{\rho_{CN}} \quad (28)$$

El caudal Q_{CI} se obtiene de la ecuación (27), la densidad del aire en condiciones normales (ρ_{CN}) se calcula mediante la ecuación (29).

$$\rho_{CN} = \frac{P_{atm}}{R_{aire} \cdot T_N} = \frac{101325}{287,7 \cdot (273,15 + 0)} = 1,29 \quad (29)$$

Donde: ρ_{CN} = densidad del aire en condiciones normales ($1,29 kg/Nm^3$)
 P_{atm} = presión atmosférica (101325 Pa)
 R_{aire} = la constante del aire, en $Pa \cdot m^3/mol \cdot ^\circ K$
 T_N = la temperatura en condiciones normales ($0^\circ C$)

$$R_{aire} = 8,310 \cdot 1/0,02888 = 287,7 Pa \cdot m^3/mol \cdot ^\circ K \quad (30)$$

La constante del aire R se determina mediante la expresión ($n \Lambda = mR$). Para 1 mol, la masa es igual a su peso molecular. Para el caso del aire este es 28,99 gr = 0,02888 kg. Sustituyendo $n=1$, $m=0,02888$ kg y $\Lambda=8,310$ se obtiene la ecuación (30) (García-Serra, n.d., p. 4).

Sustituyendo la constante del aire R_{aire} de la ecuación (30) en la ecuación (29) se obtiene la densidad del aire en condiciones normales $\rho_{CN} = 1,29 kg/Nm^3$.

El último término a obtener de la ecuación (28) para calcular el caudal del aire en condiciones normales es la densidad en condiciones interiores de la tubería (ρ_{CI}), se determina mediante la ecuación

$$\rho_{ci} = \frac{P_{int}}{R_{aire} \cdot T} = \frac{P_{atmlocal} + P_{diferencial}}{R_{aire} \cdot (273,15 + T)} \quad (31)$$

Donde: $P_{atmlocal}$ = presión atmosférica local, en Pa.

$P_{diferencial}$ = presión diferencial del proyecto, en Pa, Columna "AN" (definida por el usuario)

R_{aire} = la constante del aire = $287,7 Pa \cdot m^3 / mol \cdot ^\circ K$

T = Temperatura ($^\circ C$). (definida por el usuario)

Según (Romero et al., 2017, p. 5) la presión atmosférica local se determina mediante la ecuación

$$P_{atmlocal} = P_{aire(CN)} \cdot (1 - 2,25577 \cdot 10^{-5} \cdot Z)^{5,2559} \quad (32)$$

Donde: $P_{aire(CN)}$ = presión atmosférica: (101325 Pa).

$P_{atmlocal}$ = presión atmosférica local, en Pa

Z = cota sobre el nivel de la mar definida por el usuario, en m.

Conocida la cota sobre el nivel del mar, se obtiene la presión atmosférica local con la ecuación (32). Posteriormente, sustituyendo el valor anteriormente calculado y conociendo la presión diferencial definida por el usuario, el programa calcula la densidad en condiciones interiores de la tubería de acuerdo con la ecuación (31). Finalmente, conocidas las densidades en condiciones normales y en condiciones interiores de la tubería, y el caudal en condiciones interiores de la tubería (ecuación (26)) el programa determina el caudal del aire en condiciones normales para cada una de las ventosas (2F o 3F) del perfil de conducción. El resultado se ubica en la columna "AP". En la columna "AN" se ubica la presión diferencial definida por el usuario.

Al pulsar el botón "Ayuda Llenado", el programa presenta un procedimiento para llevar a cabo el cálculo del caudal de aire expulsado por cada una de las ventosas.

Si el usuario desea observar únicamente los resultados obtenidos del cálculo de llenado se debe oprimir el botón "Ver Llenado". El programa visualizara las celdas referentes para el dicho cálculo. Si desea visualizar todos los cálculos realizados, se debe oprimir el botón "Ver Todo".

4.2.5 Purgador

El último cálculo de la ventana es el diámetro del orificio y el caudal expulsado de cada uno de los purgadores o de las ventosas trifuncionales que ejercen la función purgadora. El procedimiento se basó de la recomendación de AWWA (M51), se aplican las ecuaciones para las dos fases (sónica y subsónica).

El programa le solicita al usuario el caudal de la conducción (l/s), el porcentaje de aire disuelto en el agua (se recomienda un 2%), la cota sobre el nivel del mar (m) y la temperatura promedio del proyecto ($^\circ C$).

El caudal calculado insertado por el usuario corresponde al máximo en condiciones interiores de la tubería, el caudal expulsado de aire será el calculado en condiciones normales.

Con el caudal calculado en condiciones interiores de la tubería, el programa calcula el número Reynolds, el factor de fricción, y la resistencia de acuerdo con las ecuaciones (20), (19) y (18) y ubicado en las columnas "K", "L" y "M", respectivamente.

Para el cálculo de purgadores el manual M51 de la "AWWA" recomienda la ecuación (33)

$$Q_{st} = 678 \cdot Y \cdot d^2 \cdot C_d \sqrt{\frac{\Delta P \cdot P_1}{T \cdot S_g}} = 678 \cdot Y \cdot d^2 \cdot C_d \sqrt{\frac{0,47 \cdot P_1 \cdot P_1}{520}} \quad (33)$$

Donde: Q_{st} = caudal en condiciones estándar (ft^3/min)
 $Y = 0,71$ factor de expansión para el flujo de aire
 d = diámetro del orificio, en in.
 C_d = coeficiente de descarga, 0,7
 ΔP = presión diferencial, $0,47 \cdot P_1$ (para flujo sónico)
 P_1 = presión absoluta ($P_{relativa} + 14,7 \text{ psi}$) asume presión atm: 14,7 psi
 T = Temperatura estándar 15,55 °C (520 °Rankine)
 S_g = gravedad específica, 1,0 para el aire

Según (AWWA, 2001, p. 8) el agua en contiene al menos dos por ciento de aire disuelto por volumen en condiciones estándar (14,7 psi y 15,55 °C). A diferencia de las condiciones normales (14,7 psi y 0°C) i las condiciones de trabajo del proyecto, en el presente capítulo de cálculo de los purgadores es necesario conocer los caudales en las diferentes condiciones.

Si se trata de un flujo sónico ($P_{relativa} \geq 13 \text{ psi}$), la ecuación (33) se simplifica a la ecuación (34)

$$Q_{st} = 14,47 \cdot 0,7 \cdot d^2 \cdot (P_{relativa} + 14,7 \text{ psi}) \quad (34)$$

Donde: Q_{st} = caudal en condiciones estándar (ft^3/min)
 $P_{relativa}$ = presión relativa definida por el usuario, en psi
 d = diámetro del orificio, en in.

Haciendo las correspondientes conversiones al sistema de unidades de los valores solicitados por el programa la ecuación (34) se modifica a la ecuación (35) que corresponde al flujo sónico.

$$Q_{st} = 0.01054 \cdot d^2 \cdot (P_{relativa} + 10,33 \text{ mca}) \quad (35)$$

Donde: Q_{st} = caudal en condiciones estándar (l/s)
 $P_{relativa}$ = presión relativa definida por el usuario, en mca "Columna AF"
 d = diámetro del orificio, en mm.

Si se trata de un flujo sónico ($P_{relativa} < 13 \text{ psi}$), la ecuación (33) se simplifica a la ecuación (36).

$$Q_{st} = 21,11 \cdot 0,7 \cdot d^2 \cdot \sqrt{P_{relativa}(P_{relativa} + 14,7 \text{ psi})} \quad (36)$$

Donde: Q_{st} = caudal en condiciones estándar (ft^3/min)
 $P_{relativa}$ = presión relativa definida por el usuario, en psi

d = diámetro del orificio, en in.

Haciendo las correspondientes conversiones al sistema de unidades de los valores solicitados por el programa la ecuación (36) se modifica a la ecuación (37) que corresponde al flujo subsónico.

$$Q_{st} = 0.01538 \cdot d^2 \cdot \sqrt{P_{relativa} \cdot (P_{relativa} + 10,33 \text{ mca})} \quad (37)$$

Donde: Q_{st} = caudal en condiciones estándar (l/s)
 $P_{relativa}$ = presión relativa definida por el usuario, en mca "Columna AF"
 d = diámetro del orificio, en mm.

A partir de la ecuación (35) y (37) es posible obtener el diámetro del orificio del purgador en flujo sónico o subsónico, respectivamente, es necesario hacer la transformación del caudal en condiciones en el interior de la tubería, insertado por el usuario, al caudal en condiciones estándar solicitado en la ecuación (35) para flujo sónico o ecuación (37) para flujo subsónico.

El caudal en condiciones estándar necesario para el cálculo del diámetro del orificio se obtiene mediante la ecuación (38).

$$Q_{st} = \frac{Q_{CI} \cdot \%air \cdot \rho_{CI}}{\rho_{st}} \quad (38)$$

Donde: Q_{CI} = caudal en condiciones del interior de la tubería, en l/s . Ecuación (27) "AH"
 $\%air$ = porcentaje de aire disuelto, insertado por el usuario (se recomienda 2%)
 ρ_{CI} = densidad del aire en condiciones del interior de la tubería, en kg/m^3
 Q_{st} = caudal en condiciones estándar del aire, en stm^3/s . Columna "Al".
 ρ_{st} = densidad del aire en condiciones estándar kg/stm^3

La densidad en condiciones estándar se obtiene de acuerdo con la ecuación (39), necesaria en la ecuación (38).

$$\rho_{st} = \frac{P_{atm}}{R_{aire} \cdot T_{st}} = \frac{101325}{287,7 \cdot (273,15 + 15,55)} = 1,22 \quad (39)$$

Donde: ρ_{st} = densidad del aire en condiciones estándar ($1,22 \text{ kg}/Nm^3$)
 P_{atm} = presión atmosférica (101325 Pa)
 R_{aire} = la constante del aire, $273,15 \text{ Pa} \cdot m^3/mol \cdot ^\circ K$
 T_{st} = la temperatura en condiciones estándar ($15,55 \text{ }^\circ C$)

La densidad en condiciones en el interior de la tubería se obtiene de acuerdo con la ecuación (40), necesaria en la ecuación (38).

$$\rho_{ci} = \frac{P_{int}}{R_{aire} \cdot T} = \frac{P_{atmlocal} + (P_{relativa} \cdot 9810)}{R_{aire} \cdot (273,15 + T)} \quad (40)$$

Donde: $P_{atmlocal}$ = presión atmosférica local, en Pa. De la ecuación (32)
 $P_{relativa}$ = presión relativa definida por el usuario, en mca "Columna AF"
 R_{aire} = la constante del aire = $287,7 Pa \cdot m^3 / mol \cdot ^\circ K$
T = Temperatura ($^\circ C$). (definida por el usuario)

Sustituyendo los resultados de los términos de la ecuación (39), ecuación (40) en la ecuación (38) y conociendo el caudal en el interior de la tubería (suministrado por el usuario) se obtiene el caudal en condiciones estándar (l/s).

El diámetro del orificio se calcula despejando el término "d" de la ecuación (35) si se trata de flujo sónico y despejando "d" de la ecuación (37) si se trata de flujo subsónico. Los resultados de cada ventosa trifuncional y purgador se observan en la columna "AJ".

$$Q_{CN} = \frac{Q_{st} \cdot \rho_{st}}{\rho_{CN}} . \quad (41)$$

Donde: Q_{CN} = caudal de aire en condiciones normales, en l/s. Columna "AK"
 ρ_{CN} = densidad del aire en condiciones normales, en $1,29 kg/m^3$
 Q_{st} = caudal en condiciones estándar del aire, en stm^3/s . Columna "AI".
 ρ_{st} = densidad del aire en condiciones estándar $1,22 kg/stm^3$

Mediante la ecuación (41) se determina el caudal del aire en condiciones normales. Los resultados de cada ventosa trifuncional y purgador se registran en la columna "AK". Además, se presenta el caudal en (m^3/h) y la presión relativa (bar) en las columnas "AL" y "AM", respectivamente, con el fin de posibilitar al usuario a la comprobación o verificación del dimensionado del purgador en alguna curva disponible.

Cabe recordar que el programa tiene disponibles curvas caracterizadas de ventosas y aun no cuenta con curvas ensayadas ni comerciales de purgadores.

Al pulsar el botón "Ayuda Purgador", el programa presenta un procedimiento para lleva a cabo el cálculo del purgador de aire expulsado por cada una de las ventosas trinacionales, en condiciones normales de operación, y purgadores.

Si el usuario desea observar únicamente los resultados obtenidos del cálculo del purgador se debe oprimir el botón "Ver Purgador". El programa visualizara las celdas referentes para el dicho cálculo. Si desea visualizar todos los cálculos realizados, se debe oprimir el botón "Ver Todo".

4.3 Selección

En la hoja de cálculo del programa llamada "Selección", el programa dimensiona las ventosas con base en el cálculo previo del caudal de admisión de aire en condiciones normales de cada ventosa (columna "I"), en el límite de depresión de las ventosas (celda "B1"), el caudal de expulsión de aire en condiciones normales de cada ventosa (columna "J"), la presión diferencial (celda "D1"). La hoja

“Selección” es el resultado final de la dimensión de cada uno de los fabricantes disponibles, ensayados y comerciales, en admisión y expulsión.

La dimensión se basa de los resultados obtenidos en la caracterización de ventosas, en dicha caracterización realizada en tres laboratorios se obtuvieron curvas características de algunas dimensiones de ventosas ensayadas y se evaluó el resultado contra las curvas comerciales ofrecidas por los fabricantes. En la hoja “Curvas” del programa, se encuentran el resultado de los coeficientes de las curvas ensayadas y comerciales en admisión y expulsión de aire de cada diámetro disponible para cada fabricante evaluado y ensayado. En el capítulo “Ventosas caracterizadas P.34” se detalla la metodología de los ensayos y se puntualizan algunos detalles importantes y conclusiones del estudio realizado.

Antes de iniciar la ejecución del dimensionado, se recomienda ejecutar el botón “Ayuda” para realizar el proceso adecuado y obtener la dimensión deseada.

La ecuación de la curva se presenta a continuación (ver ecuación (42)).

$$P = A \cdot Q^2 + B \cdot Q \quad (42)$$

Donde: P = Presión diferencial, en bar (celda “B1”, admisión) y (ceda “D1”, expulsión)
A y B = coeficientes de las curvas
Q = caudal del aire, en Nm^3/s

Se dispone de 25 fabricantes y un total de 136 curvas, distribuidas de la siguiente manera. Por motivos de confidencialidad no se muestran los nombres comerciales de las ventosas, pero si se codifico cada uno con una llamada “Ficha de fabricante”, lo que si se explica es la metodología de los ensayos en el capítulo de Ventosas caracterizadas, P.34 del presente documento.

El programa dispone de coeficientes de 58 curvas comerciales de admisión, cada una de diámetros diferentes para cada uno de los 16 fabricantes. El resumen se puede observar en la Tabla 11

Tabla 11. Curvas características de diámetros de ventosas comerciales de admisión disponibles

Ficha de fabricante	Diámetro ventosas (mm)						
	25	50	80	100	150	200	250
1.1				X			
1.3	X	X	X	X	X	X	X
1.2		X	X	X	X	X	X
1.4				X			
2.1				X			
3.4		X	X	X	X	X	
3.3		X	X	X			
4.1		X	X	X	X	X	X
4.2	X	X	X	X	X	X	X
5.1		X	X	X	X		
6.1			X	X			
7.1		X	X	X			

Ficha de fabricante	Diámetro ventosas (mm)						
	25	50	80	100	150	200	250
7.2	X	X	X				
8.1			X				
9.1			X	X			
10.1		X	X	X			

El programa dispone de coeficientes de 14 curvas ensayadas de admisión, cada una de diámetros diferentes para cada uno de los 11 fabricantes. La cantidad de fabricantes ensayados es menor como también lo es la cantidad de curvas, comparada con los comerciales de la tabla precedente. El resumen se puede observar en la Tabla 12

Tabla 12. Curvas características de diámetros de ventosas ensayadas de admisión

Ficha de fabricante	Diámetro ventosas (mm)		
	50	80	100
1.1		X	
1.5		X	
3.3			X
4.1		X	
4.2		X	X
5.1		X	X
7.1			X
7.2	X		X
8.1		X	
10.1		X	
11.2		X	

El programa dispone de coeficientes de 37 curvas comerciales de expulsión, cada una de diámetros diferentes para cada uno de los 20 fabricantes. El resumen se puede observar en la Tabla 13

Tabla 13. Curvas características de diámetros de ventosas comerciales de expulsión

Ficha de fabricante	Diámetro ventosas (mm)		
	50	80	100
1.1		X	
1.3		X	X
1.2		X	X
1.4		X	X
2.2		X	
2.1		X	
3.1	X	X	X
3.2		X	X
4.1		X	X
4.2		X	X
5.1		X	X
6.1		X	X

Ficha de fabricante	Diámetro ventosas (mm)		
	50	80	100
7.1		X	X
7.2	X	X	X
8.1		X	
9.1		X	X
10.2		X	
10.1	X	X	X
15.1		X	
12.1		X	

El programa dispone de coeficientes de 27 curvas ensayadas de expulsión, cada una de diámetros diferentes para cada uno de los 17 fabricantes. La cantidad de fabricantes ensayados es menor como también lo es la cantidad de curvas, comparada con los comerciales de la tabla precedente. El resumen se puede observar en la Tabla 14

Tabla 14. Curvas características de diámetros de ventosas ensayadas de expulsión

Ficha de fabricante	Diámetro ventosas (mm)			
	50	80	100	150
1.1		X		
1.3			X	
1.2		X		
1.4		X	X	
2.1		X		
4.1		X	X	
4.2		X	X	
5.1		X	X	
6.1		X		
7.1		X	X	
7.2	X		X	
8.1		X		X
9.1		X	X	
10.2		X		
10.1		X	X	
11.1		X	X	
12.1		X		

En la Tabla 15 se presenta el resultado del cierre dinámico o prematuro obtenido en algunas de las ventosas ensayadas en expulsión. Resultados de la caracterización de las ventosas.

Tabla 15 Cierre dinámico de las ventosas ensayadas en expulsión

Ficha de fabricante	DN (mm)	CD (bar)
1.1	80	0.43
1.3	100	0.42
2.1	80	0.32

Ficha de fabricante	DN (mm)	CD (bar)
4.1	100	0.16
5.1	80	0.21
7.1	80	0.004
9.1	80	0.06
9.1	100	0.06
10.1	80	0.02
10.1	100	0.908
10.2	80	0.2

En primera medida se deben definir por el usuario algún valor del límite de depresión, en bar, en la celda “B1” de las opciones disponibles, también se debe definir el valor de la presión diferencial, en bar (se recomienda máx. 0,4), la cota sobre el nivel del mar del proyecto, en metros (celda “B2”) y la temperatura del proyecto. Se recomienda que dichos valores coincidan con los introducidos en la fase de cálculo. Se da libertad a que el usuario cuente con la posibilidad de variar los valores, con el fin de observar las diferentes dimensiones con la modificación de algún parámetro, aunque no será realmente el real.

Inicialmente se procede, previo a ejecutar el botón “Seleccionar”, a importar las ventosas y purgadores del perfil de conducción estudiado. Dicha importación integra cada uno de los componentes mencionados y presenta los resultados obtenidos en la ventana “Cálculo” del programa.

El programa importa el ID, la cota media, la longitud acumulada, el tipo de componente y la sigla de dicho componente con el fin de que el usuario identifique fácilmente la ventosa o el purgador que quiera evaluar.

También importa, más relevante aun que lo anterior, los resultados del caudal de aire expulsado y admitido de cada ventosa y el caudal de aire expulsado del purgador (aunque ya se dimensiona en la ventana de “Cálculo”). Dichos valores son claves para determinar la dimensión recomendada por el programa para cada fabricante. Cabe mencionar que algunos casos se disponen de curvas de dimensión mínima de, por ejemplo, DN100 mm como se pudo observar en las tablas, por lo que en cierta medida se puede sobredimensionar una ventosa para determinados fabricantes por falta de información de curvas de un diámetro menor.

El programa hace una serie de bucles para determinar el diámetro de cada fabricante según si el caudal es el admitido y el expulsado para cada curva ensayada o comercial. Para mayor practicidad se identificó cada tipo de curva con un color (ver Tabla 16) que se representa en la fila 6 de la hoja “selección” con el nombre de cada fabricante y la posterior búsqueda de los coeficientes del fabricante adecuado en la hoja “Curvas” donde se obtiene el diámetro adecuado que presenta un valor adecuado de acuerdo con la ecuación (42) y a la presión definida por el usuario (celdas “B1” o “D1” admisión o expulsión, respectivamente).

Tabla 16 identificación de curvas

Tipo de Curva	Color	Código
Admisión y comercial	Azul	33

Tipo de Curva	Color	Código
Admisión y ensayada	Verde	43
Expulsión y comercial	Naranja	46
Expulsión y ensayada	Amarillo	44

El programa procede a hacer lo siguiente en las curvas de admisión

- Inicialmente hace un recorrido desde la fila 7 hasta la última fila con datos de la hoja "selección". Esto para fijar la ventosa a estudiar
- Hace un segundo bucle desde la columna 12 de la hoja "Selección" hasta la última columna con la ficha del fabricante de la fila 6. Esto para reconocer el fabricante que se quiere evaluar.
- Posteriormente hace un tercer bucle desde la fila 3 de la hoja "Curvas" hasta el último dato de la curva insertada. En este proceso se detecta el código del color y la ficha del fabricante que se quiere evaluar. Esto para evaluar las presiones, comparar y determinar el diámetro adecuado.
- Si detecta las dos coincidencias (ficha de fabricante y tipo de curva (código de color)), el programa hace un cuarto y último bucle en el que analiza cada diámetro. Hace el cálculo de la presión con la ecuación (42) sustituye los coeficientes del diámetro evaluado y el caudal admitido (columna "I", hora "Selección") de la ventosa a dimensionar.
- Después hace la comprobación. Si la presión calculada del primer diámetro del fabricante detectado es mayor a la depresión definida en la celda "B1", entonces el programa detecta el diámetro de la columna "B" de la hoja "Curvas" y lo representa en la hoja "Selección". Si por el contrario la presión calculada es menor, entonces sigue a los coeficientes del segundo diámetro del fabricante fijado y vuelve a hacer el cálculo de presión y la comprobación de manera consecutiva hasta que analice cada uno de los diámetro disponibles o finalmente identifique que ningún diámetro del fabricante cuenta con la capacidad de admitir el caudal calculado y la depresión definida por el usuario, en este caso el programa indica en la celda de selección del fabricante "No Diámetro".

El programa procede a hacer lo siguiente en las curvas de expulsión

- Inicialmente hace un recorrido desde la fila 7 hasta la última fila con datos de la hoja "selección". Esto para fijar la ventosa a estudiar
- Hacer un segundo bucle desde la columna 12 de la hoja "Selección" hasta la última columna con la ficha un fabricante de la fila 6. Esto para reconocer el fabricante que se quiere evaluar.
- Posteriormente hace un tercer bucle desde la fila 3 de la hoja "Curvas" hasta el último dato de la curva insertada. En este proceso se detecta el código del color y la ficha del fabricante que se quiere evaluar. Esto para valvular las presiones, comparar y determinar el diámetro adecuado.
- Si detecta las dos coincidencias (ficha del fabricante y tipo de curva (código de color)), el programa hace un cuarto y último bucle en el que analiza cada diámetro. Hace el cálculo de la presión con la ecuación (42) sustituye los coeficientes del diámetro evaluado y el caudal expulsado (columna "J", hoja "Selección") de la ventosa a dimensionar.

- Después hace la comprobación. Si la presión calculada del primer diámetro del fabricante detectado es menor a la presión diferencial definida en la celda "D1", entonces el programa detecta el diámetro de la columna "B" de la hoja "Curvas" y lo representa en la hoja "Selección". Si por el contrario la presión calculada es mayor, entonces sigue a los coeficientes del segundo diámetro del fabricante fijado y vuelve a hacer el cálculo de presión y la comprobación de manera consecutiva hasta que analice cada uno de los diámetros disponibles o finalmente identifique que ningún diámetro del fabricante cuenta con la capacidad de expulsar el caudal calculado de aire y el diferencial de presión definido por el usuario, en este caso el programa indica en la celda de selección del fabricante "No Diámetro".

El programa termina el proceso una vez analiza cada uno de los fabricantes, las curvas, y los caudales de cada una de las ventosas. La selección es a criterio del usuario con la dimensión propuesta por el programa para cada fabricante en la fase de admisión y expulsión de la ventosa. El usuario puede visualizar las dimensiones únicamente de las curvas comerciales en admisión, ensayadas en admisión, comerciales en expulsión, ensayadas en expulsión o ver todas las curvas disponibles. Los botones se presentan en la hoja "Selección" con sus respectivos colores definidos en la Tabla 16.

Por los recorridos que hace el dimensionado y la cantidad de curvas, fabricantes y caudales visualizados y analizados, el programa tarda un poco en presentar todos los resultados, debido a que es un proceso de mucha carga. Se recomienda esperar hasta que se presenten todas las dimensiones.

El usuario puede insertar nuevas curvas de los fabricantes que disponga. Se debe insertar el código del fabricante en la hoja "Selección" en la última columna del tipo de curva que desee agregar, con el respectivo color del tipo de curva que contenga, es decir que inserte una columna en el último fabricante del tipo de curva que desee integrar, lógicamente con su respectivo código y color correspondiente en la fila 6 (ver Tabla 16). Adicionalmente debe insertar los datos necesarios en la hoja "Curvas" de cada uno de los diámetros que disponga del fabricante agregado con sus respectivos coeficientes y su clasificación. Es muy importante que la ficha o código insertado en la hoja "Curvas" coincida exactamente con el digitado en la nueva columna insertada de la fila 6 de la hoja "Selección", con el fin de que el programa identifique el fabricante y lo analice.

5. Manual de uso

El presente capítulo presenta el manual de uso del programa.

En primer lugar, abra el fichero "PV_CAV_DGM_JG.xlsm", al abrir el fichero se encuentran presentes cuatro hojas: "Posición", "Cálculo", "Selección" y "Curvas". A continuación, se explican los procesos para ejecutar de manera adecuada cada ventana del programa:

5.1 Hoja "Posición"

En la hoja posición se presentan seis botones: Posicionar, Insertar Punto, Consolidar, Perfil, Ayuda y Eliminar.



Figura 19 botones de ejecución de hoja "Posición"

Las celdas sombreadas de color azul claro son las que el programa calcula y las celdas de color rojo claro son las que debe definir el usuario.

5.1.1 Ayuda

Si nunca ha utilizado el programa, se recomienda utilizar en primera medida el botón "Ayuda" de la Figura 19.

Al pulsar el botón "Ayuda" el programa le indica un paso a paso de lo que se debe llevar a cabo y además le hace algunas advertencias e informaciones que debe conocer de los procesos que hace cada uno de los botones y de lo que hace la hoja como tal.

Antes de pulsar el botón "Posicionar", en necesario insertar los siguientes valores:

- En la celda "B1" se debe inserta la distancia máxima, en metros, admitida entre ventosas. Es decir, si en algún tramo se supera dicha distancia, el programa insertara una fila, recalculando las cotas y las longitudes. Insertará un purgador o una ventosa 3F o 2F como componente del perfil, dependiendo del tipo de pendiente del tramo largo.
- En la columna "A", a partir de "A5", se deben insertar las identificaciones o ID de cada punto del perfil.
- En la columna "B", a partir de "B5", se deben insertar las cotas medias (cota del eje de la tubería), en metros, de cada uno de los puntos del perfil.
- En la columna "C", a partir de "C5", se debe insertar la abscisa o la longitud acumulada, en metros, correspondiente al punto del ID correspondiente.
- En la columna "D", a partir de "D5", se debe insertar la longitud de cada tramo, en metros, la cual se puede calcular a partir de la longitud acumulada o abscisa del proceso precedente.
- En la columna "E", a partir de "E5", se debe definir el componente instalado en cada punto. En cada celda de dicha columna se cuenta con algunas opciones de componentes, se debe seleccionar alguno de ellos, si el punto de control no cuenta con componente, entonces dejar la celda vacía.

5.1.2 Posicionar

Una vez se definieron cada uno de los procesos anteriormente explicados, se procede a pulsar el botón "Posicionar" (ver Figura 19).

Al pulsar dicho botón, el programa, de acuerdo con las recomendaciones del manual M51 de la AWWA y algunos otros criterios predefinidos, propondrá los componentes adecuados y respetará los que el usuario inserto inicialmente.

Además, el programa presenta en la columna "F", a partir de "F5", la sigla de cada componente insertado y propuesto, las siglas son predefinidas. (ver Tabla 7), posteriormente calcula la longitud

acumulada del perfil, como una verificación al dato insertado por el usuario, calcula la pendiente de cada tramo, el tipo de nodo (ver Tabla 8) y la sigla del tipo de nodo.

El programa inserta filas bajo las siguientes condiciones:

- Si la longitud del tramo supera la máxima distancia entre ventosas insertada en la celda "B2"
- Si el componente es una "Válvula de seccionamiento" o "VS", el programa inserta, aguas arriba y aguas abajo, una ventosa bifuncional o una válvula de desagüe dependiendo el caso (analizando las pendientes) (ver Figura 16).
- Si el componente es una "Estación de bombeo" o "EB", el programa inserta, aguas abajo, una ventosa bifuncional
- Si el componente es un "Caudalímetro" o "MQ", el programa inserta, aguas arriba, un purgador.

5.1.3 Insertar punto

Al oprimir el botón "Insertar Punto" (ver Figura 19) el programa le solicita al usuario la abscisa (P.K), de acuerdo con el valor deseado por el usuario. Una vez el usuario define el valor, el programa inserta una fila entre el tramo correspondiente y recalcula los demás datos. Después de insertado el punto, el usuario debe definir, entre las opciones disponibles, el componente del punto y posteriormente pulsar el botón "Consolidar", que actualizará las siglas o insertará una fila si es requerido.

5.1.4 Consolidar

El botón "Consolidar" (ver Figura 19) se debe usar siempre que se modifique un componente del perfil y posteriormente a que se inserte un punto y un componente. La ejecución del botón actualizará las siglas de los componentes modificados o insertará filas nuevas, si se requiere.

5.1.5 Perfil

El botón "Perfil" (ver Figura 19) presenta el perfil con los componentes necesarios para el cálculo posterior de la hoja "Cálculo". Se presenta el perfil para que el usuario verifique el resultado de la propuesta del programa y observe el perfil definido, de manera gráfica, de esta manera facilitar la verificación de los resultados y de los datos insertados o importados del perfil.

5.1.6 Eliminar

El botón "Eliminar" (ver Figura 19), como su nombre indica, elimina la propuesta que el programa posicionó, respetando lo que el usuario definió. Cabe decir que las filas que el programa insertó no las elimina, es necesario que el usuario elimine las filas que se insertaron. Se identifican con facilidad por el ID de la columna "A".

Si el programa detecta que no se ha definido algún dato de un punto de control, se presenta un aviso de error y no ejecuta ninguna función. En el caso de la distancia máxima entre ventosas, si el valor no se ha definido, el programa predifine 600m y ejecuta la función.

En el fichero se presenta un perfil ejemplo en el que se puede pulsar el botón "Posicionar" directamente

5.2 Hoja “Cálculo”

En la hoja “Cálculo” se presenta una información y ayuda necesaria para cada botón de cálculo o importación que se quiera pulsar y los resultados que el usuario desee.

Los botones claves de la Figura 20 para cada proceso son: Importar, Calcular vaciado, calcular rotura, Calcular Purgador y Calcular llenado. Cada uno acompañado de una ayuda que facilita el proceso del resultado que se quiera obtener y una visualización única o general de los resultados de cada función.



Figura 20 botones de ejecución de la hoja “Cálculo”

Las celdas sombreadas de amarillo claro, corresponde a los datos importados de la hoja “Posición”, las de color rojo claro son los datos que el usuario debe definir, las celdas de color azul son las que el programa calcula y las de color rojo son las que el usuario debe definir en función de la opción de cálculo de cada operación.

5.2.1 Importar

Antes de proceder al cálculo de cualquier operación que se quiera estudiar, lo primero que se debe hacer es pulsar el botón amarillo “Importar” (ver Figura 20). Al pulsar el botón, se importará la información necesaria para cada uno de los cálculos de los resultados presentados en la hoja “Posición”: ID punto, cota media, abscisa, longitud de tramo, componentes y sigla de cada componente.

Posterior a la importación, el usuario debe definir datos de cada nodo. Los datos a insertar corresponden al tramo situado aguas arriba del punto de control seleccionado.

- En la fila “F” a partir de la celda “F5” se debe insertar el diámetro de cada uno de los tramos de tubería. Si el usuario pulsa la celda “F4”, recibirá información de los datos a insertar.
- En la fila “I” a partir de la celda “I5” se debe insertar el material de la tubería de cada tramo. Si el usuario pulsa la celda “I4”, recibirá información de los datos a insertar.
- En la fila “J” a partir de la celda “J5” se debe insertar la rugosidad del material de la tubería de cada tramo. Si el usuario pulsa la celda “J4”, recibirá información de los datos a insertar.
- En la fila “P” a partir de la celda “P5” el usuario debe definir el estado de las válvulas de seccionamiento (VS) y de las válvulas de desagüe (VD), entre las opciones “Abierto” o “Cerrado”. Esta opción es clave para definir los tramos y ejecutar el cálculo a partir de la definición de cada tramo, es decir que, si una válvula de seccionamiento se encuentra abierta, el programa ignora el componente. Por el contrario, si una válvula de desagüe se encuentra cerrada, el programa ignora el elemento a efectos de cálculos posteriores. Al pulsar la celda “P4”, recibirá información de lo dicho.

A partir de este momento se deben seguir las indicaciones para cada opción de cálculo

5.2.2 Calcular Vaciado

Antes de realizar el cálculo de vaciado en necesaria la definición de una serie de procesos con el fin de obtener los resultados adecuados.

Se recomienda ejecutar el botón “Ayuda Vaciado” con el fin de conocer el procedimiento adecuado antes de ejecutar el cálculo de vaciado. Si el usuario desea observar únicamente los resultados del vaciado, debe ejecutar el botón “Ver Vaciado y Rotura”.

Antes de pulsar el botón “Calcular vaciado” se debe hacer lo siguiente:

	A	B	C	D	E
1	2. Valor del criterio seleccionado en “B2”	0.8	Rotura en Función de?	% Rotura	
2	1. Vaciado en función de?	VelVaciadoDesag	4. Dimensión de desagüe	Manual	Rotura KV (D4)
3	3. PoV (mca) inDepresiónVirt	-0.255	Modo cálculo de Kv (D3)	Automática	Automática

Figura 21 criterios a definir, hoja “Cálculo”

5.2.2.1 Dimensión de desagüe

En primer lugar, se debe definir, en la celda “D2”, el modo de dimensión de los desagües (Automática o Manual). Recibe información al pulsar la celda “C2” (ver Figura 21).

- Si es “Automática”, la dimensión se hará en función del diámetro de la tubería, de acuerdo con unos criterios prefijados (ver Tabla 10).
- Si es “Manual”, el usuario debe seleccionar la dimensión de cada válvula de desagüe de manera manual en la columna “Q” a partir de “Q5”

5.2.2.2 ¿Vaciado en función de?

En segundo lugar, en la celda “B2” (ver Figura 21) se debe definir, de 5 opciones disponibles, en función de que se desea realizar el cálculo de vaciado. Al oprimir la celda “A2” recibirá información. Las opciones disponibles son:

- “VelVaciadoDesag”: Quiere decir que el cálculo se hará en función de la velocidad de vaciado general en las válvulas de desagüe, previamente definida por el usuario.
- “VelVacTub”: El cálculo se hará en función de la velocidad de vaciado, referida esta velocidad a la sección de la tubería.
- “QVacDesg”: El cálculo de vaciado se hará en función del caudal general de vaciado prefijado de los desagües.
- “QVacTub”: El cálculo se hará en función del caudal de vaciado de la tubería.
- “Kv”: Quiere decir que el cálculo se hará en función del coeficiente de caudal (Kv) de las válvulas de desagüe. En esta opción de debe definir alguna opción de la celda “D3”.

5.2.2.3 Valor definido de la función

Al seleccionar la celda “A1” se darán instrucciones de acuerdo a cada opción seleccionada en la celda “B2”

- Si en la celda “B2” se definió “VelVaciadoDesag”, en la celda “B1” se debe insertar la velocidad de vaciado (m/s) de las válvulas de desagüe. Cabe mencionar que el valor máximo de velocidad en las válvulas de desagüe, se recomienda no superar un valor de 5 m/s o 6 m/s.

Si se supera el valor máximo, el programa presenta un aviso de advertencia, aunque continúa con el cálculo. Solo presenta el aviso.

- Si en la celda "B2" se definió "VelVacTub", en la celda "B1" se debe insertar la velocidad de vaciado (m/s) en la tubería. El rango de valores de la velocidad en las tuberías se encuentra en un rango de 0,3 m/s a 0,6 m/s. Si se supera el valor máximo, el programa presenta un aviso de advertencia, aunque continúa con el cálculo. Solo presenta el aviso.

Además, en la columna "AA" a partir de "AA5", se debe definir, para cada válvula de desagüe, el porcentaje de velocidad de vaciado deseada. Cabe mencionar que dicho criterio se debe considerar de acuerdo con los tramos definidos por las válvulas de seccionamiento cerradas, con tal de vaciar todo el tramo a una velocidad adecuada. Se encuentra la información al seleccionar la celda "AA4". Si se detecta que no se ha definido el porcentaje de alguna válvula de desagüe, el programa detiene el cálculo y no continúa.

- Si en la "B2" se seleccionó "QVacDesg", en la celda "B1" se debe insertar el caudal de vaciado (m^3/s) de las válvulas de desagüe.
- Si en la celda "B2" se seleccionó "QVacTub", en la celda "B1" se debe insertar el caudal de vaciado (m^3/s) de la tubería.

Además, en la columna "AA" a partir de "AA5", se debe insertar, para cada válvula de desagüe, el porcentaje del caudal de vaciado deseado. Cabe mencionar que dicho criterio se debe considerar de acuerdo con los tramos definidos por las válvulas de seccionamiento cerradas, con tal de vaciar todo el caudal deseado para cada tramo. Se encuentra la información al seleccionar la celda "AA4". Si se detecta que no se ha definido el porcentaje de alguna válvula de desagüe, el programa detiene el cálculo y no continúa.

- Si en la celda "B2" se seleccionó "Kv", en la celda "D3" (ver Figura 21) se debe seleccionar el modo de cálculo del coeficiente de caudal con dos opciones: Automática o Manual. Al pulsar la celda "C3" encontrará más información.
 - Automática: si se selecciona la opción automática para definir los Kv de cada válvula de desagüe. El programa define los coeficientes con datos base de una caracterización para válvulas desagüe de diámetros de 100 mm, 150 mm, 200 mm y 400 mm.

Para los diámetros de 100 y 150: se debe insertar un valor de presión de entrada y presión de salida de cada válvula de desagüe en las columnas: "V" a partir de "V5" y en la columna "W" a partir de "W5" respectivamente. Al seleccionar las celdas "V4" y "W4" recibirá más información.

Para los diámetros de 200 y 400: se debe insertar un valor de la contrapresión (opciones: 0, 10, 20, 30 o 40), para cada válvula de desagüe en la columna "W" a partir de "W5" Recibirá más información al seleccionar la celda "W4".

Para los diámetros de 200: se debe insertar el número de vueltas de la válvula de desagüe (opciones: 15, 16, 17, 18, 19 o 20), para cada válvula de desagüe en la columna "Y" a partir de "Y5". Recibirá más información al seleccionar la celda "Y4".

Para los diámetros de 400: se debe insertar el número de vueltas de la válvula de desagüe (opciones: 5, 6, 7, 8, 9 o 10), para cada válvula de desagüe en la columna "Y" a partir de "Y5". Recibirá más información al seleccionar la celda "Y4".

- Manual: Al seleccionar la opción manual, se deben insertar los coeficientes de caudal Kv para cada válvula de desagüe abiertas en la columna "Z" a partir de "Z5". Recibirá más información al pulsar la celda "Z4".

5.2.2.4 Límite de depresión de las ventosas

El usuario debe definir el límite de depresión en el interior de las ventosas en las unidades de mca en la celda "B3" (ver Figura 21) con alguna de las opciones disponibles. Al Seleccionar la celda "A3", el usuario recibirá información.

Después de realizar cada uno de los procesos precedentes, ya es posible pulsar el botón "**Calcular Vaciado**" y el programa presentará los resultados bajo los criterios y las condiciones seleccionadas por el usuario.

5.2.3 Calcular Rotura

Antes de pulsar el botón "Calcular Rotura" el usuario debe definir algunos criterios.

Independiente de cualquier opción seleccionada en la celda "D1", el programa solicita al usuario la abscisa (P.K.) de la rotura e inserta una fila entre el tramo solicitado. Posteriormente solicita algunos datos, en función de la opción seleccionada en la celda "D1" (ver Figura 21).

Se recomienda ejecutar el botón "Ayuda Rotura" con el fin de conocer el procedimiento adecuado antes de ejecutar el cálculo de rotura. Si el usuario desea observar únicamente los resultados de la rotura, debe ejecutar el botón "Ver Vaciado y Rotura".

5.2.3.1 ¿Rotura en función de?

Al seleccionar la celda "C1" se darán instrucciones al usuario:

En la celda "D1" se cuenta con tres opciones de cálculo de rotura en función del: porcentaje de rotura, VM (supone la rotura como una válvula mariposa) y AWWA (recomendación de la American Water Works Association (AWWA)). El programa cierra todas las válvulas de desagüe y mantiene el estado de las válvulas de seccionamiento definido por el usuario.

- Si en la celda "D1" se selecciona "%Rotura", el programa solicita el porcentaje de rotura de la tubería y hace el cálculo de caudal con base en el diámetro calculado de acuerdo a la rotura de la dimensión de la tubería definida por el usuario. En esta opción se calcula el caudal con el porcentaje de rotura de la sección de la tubería.
- Si en la celda "D1" se selecciona "VM", el programa le solicita que seleccione alguna de las opciones de la celda "E3": Automático o Manual. Al seleccionar la celda "E2", recibirá información. En esta opción el programa supone que la rotura es una válvula mariposa.
 - Automático: si la opción seleccionada el "Automático" el programa requiere, para cada rotura: la dimensión de la válvula mariposa y el ángulo de apertura de dicha VM. Una

vez se definen los dos valores, el programa busca (Figura 18) el coeficiente de caudal Kv de la rotura para el caso deseado.

- Manual: si la opción seleccionada es “Manual” en necesario insertar el Kv de la VM en la rotura de la columna “Z”. Recibirá más información seleccionando la celda “Z4”.
- Si en la celda “D1” se selecciona “AWWA”, el programa le solicita al usuario el coeficiente chézy (110 para hormigón, 130 para acero o 190 para cloruro de polivinilo) de la tubería. En esta opción se calcula el caudal de cada ventosa con base en la ecuación recomendada por AWWA en el manual M51. Dicha ecuación depende de la pendiente, por lo cual se asume una pendiente aproximada desde cada ventosa hasta el punto de la rotura.

Después de definir los criterios e insertar los datos disponibles es posible pulsar el botón **“Calcular Rotura”** (ver Figura 20) y observar los resultados.

5.2.4 Calcular Purga

En dicho botón, se calcula la dimensión del orificio del purgador para cada una de las ventosas trifuncionales (3F) y los purgadores (P).

Se recomienda ejecutar el botón “Ayuda Purga” con el fin de conocer el procedimiento adecuado antes de ejecutar el cálculo de purga. Si el usuario desea observar únicamente los resultados de la purga, debe ejecutar el botón “Ver Purgador”.

Previo a pulsar el botón “Calcular Rotura” el usuario debe definir algunos criterios.

- En primer lugar, se recomienda oprimir el botón “Ver purgador”
- Después, en la columna “AF” a partir de la fila 5 se debe insertar la presión relativa de cada ventosa trinacional y de cada purgador.
- A partir de este momento, es posible pulsar el botón **“Calcular Purga”** (ver Figura 20).

El programa solicita 4 datos:

- Caudal (l/s): Se debe insertar la tasa de flujo o el caudal de la conducción.
- Porcentaje de aire disuelto (%): se debe insertar la cantidad de aire disuelto en el agua, se recomienda valor del 2%.
- Altitud (msnm): se solicita la cota sobre el nivel del mar del proyecto.
- Temperatura (°C): se debe insertar la temperatura del proyecto.

A partir de este momento, el programa detecta la condición en la que se encuentra el purgador (flujo sónico o flujo subsónico), calcula el caudal en condiciones estándar (l/s), calcula la dimensión del orificio (mm) y calcula los datos necesarios para facilitar la búsqueda en las curvas comerciales de los fabricantes.

5.2.5 Calcular Llenado

En dicho botón, se calcula el caudal de expulsión de aire de cada una de las ventosas. El usuario debe definir algunos datos solicitados por el programa.

Se recomienda ejecutar el botón “Ayuda Llenado” con el fin de conocer el procedimiento adecuado antes de ejecutar el cálculo de Llenado. Si el usuario desea observar únicamente los resultados del Llenado, debe ejecutar el botón “Ver Llenado”.

- En primer lugar, se debe oprimir el botón “**Calcular Llenado**” (ver Figura 20).

El programa solicita 4 datos al usuario:

- Velocidad de llenado (m/s): El usuario debe insertar la velocidad de llenado, se recomienda un valor máximo de 0,3 m/s.
- Presión diferencial (bar): El usuario debe insertar la presión diferencial de las ventosas, dato general, se recomienda un valor mayor a 0 bar y menor a 5 bar
- Altitud (msnm): El usuario debe insertar la cota sobre el nivel del mar del proyecto.
- Temperatura (°C): El usuario debe insertar la temperatura promedio del proyecto.

A partir de este momento, el usuario puede dirigirse a la hoja “Selección” y seguir los procesos que se explican posteriormente.

5.3 Hoja “Selección”

En la hoja “Selección” se presentan 3 botones: Ayuda, importar y seleccionar. En el botón de ayuda se presenta un procedimiento para ejecutar la selección.



Figura 22 botones de ejecución de la hoja “Selección”

Se recomienda ejecutar el botón “Ayuda” con el fin de conocer el procedimiento adecuado antes de ejecutar el dimensionamiento de las ventosas. Si el usuario desea observar las dimensiones de todas las curvas debe ejecutar el botón “Ver Todo”.

Antes de pulsar el botón “Seleccionar” son necesarios unos procesos. En primer lugar, se debe importar la información calculada en la hoja “Cálculo”.

5.3.1 Importar

Al pulsar el botón “Importar” se importarán los resultados de las ventosas de hoja “Cálculo”. Los datos importados son: el ID del punto, la cota media, la longitud acumulada, el tipo de ventosas, las siglas de las ventosas y los caudales calculados de cada una de las ventosas en la hoja precedente.

5.3.2 Seleccionar

Antes de pulsar el botón “Seleccionar” (ver Figura 22) es necesario fijar 4 criterios para la selección de la dimensión cada uno de los fabricantes previamente caracterizados y comparados.

	A	B	C	D
1	Límite Depresión (bar)	-0.025	Presión Diferencial (bar)	0.4
2	Altitud (csnm)	2500	DensN (Aire) (kg/m ³)	1.288557828
3	Temperatura (°C)	15	DensCl (Aire) (kg/m ³)	0.870717686

Figura 23 criterios a definir, hoja "Selección"

- Límite de depresión (bar) (admisión): al pulsar la celda "A1" se dará información. Se debe seleccionar el límite de depresión de las ventosas a dimensionar en alguna de las opciones de la celda "B1" (ver Figura 23). Se recomienda el mismo valor utilizado en la hoja "Cálculo", tenga en cuenta que el valor de esta hoja está en bares y en la hoja de "Cálculo" se encuentra en mca.
- Presión diferencial (bar) (expulsión): En la celda "D3" (Figura 23) se debe insertar la presión diferencial para dimensionar las ventosas de expulsión de aire, se recomienda un valor no mayor a 0,4 bar y también digitar el mismo valor definido en el cálculo de llenado de la hoja previa.
- Altitud: de acuerdo con la zona donde sea el proyecto, se cuenta con diferentes condiciones topográficas, en la celda "B2" se debe insertar la altitud (cota sobre el nivel del mar) del proyecto.
- Temperatura (°C): así como la altitud se debe definir la temperatura promedio de la ubicación del proyecto.

La cota sobre el nivel del mar y la temperatura son necesarios para dimensionar en función del caudal del aire de condiciones normales, caudal de aire en las curvas características y en las curvas de caracterización de cada fabricante.

Después de definir cada uno de los criterios e insertar los datos, se procede a pulsar el botón "Seleccionar" (ver Figura 22). El programa presenta la dimensión recomendada, basado en curvas comerciales y caracterización de ensayos de admisión y expulsión, respecto al límite de depresión insertado, al diferencial de presión, respectivamente, y al caudal del aire calculado en condiciones normales.

Adicionalmente existen botones de visualización exclusiva de los resultados de la dimensión de las ventosas comerciales y ensayadas de admisión y, las ventosas comerciales y ensayadas de expulsión.

5.4 Hoja "Curvas"

En la hoja "Curvas" se presentan los coeficientes de la ecuación de cada una de las curvas disponibles. El usuario puede adicionar curvas comerciales o curvas de ensayos previos en dicha hoja, la ficha del fabricante debe integrarse en la hoja "Selección" con el formato deseado según las curvas a insertar. El nombre código o ficha del fabricante debe coincidir en las dos hojas ("Selección" y "Curvas"), de esta manera el programa detecta los datos necesarios y dimensiona de acuerdo a la nueva curva agregada.

6. Resultados

Con el fin de corroborar los resultados de los fundamentos del programa explicados en el capítulo 4, se presenta un perfil ejemplo en el que se aplicaran la mayoría de las funciones del programa.

Además, se analiza el perfil ejemplo en cada uno de los softwares del capítulo 3.1 y se comparan los resultados con los presentados por programa propuesto.

En la Tabla 17 se presenta el perfil a insertar en el programa, se ha definido una distancia máxima entre ventosas de 600 m. Una vez se define y se inserta el perfil en el programa, se procede, en primer lugar, a observar y analizar el resultado de posicionamiento.

Se trata de un tramo de corte de una conducción simple, se puede observar que se inicia y se termina con válvulas de seccionamiento. Es posible dividir el perfil de conducción insertado en tres tramos, si es que el estado de las válvulas de seccionamiento es cerrado.

Tabla 17 conducción ejemplo

ID punto	Cota (msnm)	LongAcumu (m)	Long (m)	Componente
1	56.88	0.00	0.00	Válvula de seccionamiento
2	54.89	265.43	265.43	
3	55.52	334.40	68.97	
4	50.01	410.00	75.60	
5	54.76	476.88	66.88	
6	50.82	650.00	173.12	
7	51.39	795.00	145.00	Válvula de seccionamiento
8	49.87	974.28	179.28	
9	52.20	1190.00	215.72	
10	63.10	1231.00	41.00	
11	70.16	1295.00	64.00	Válvula de seccionamiento
12	72.24	1595.00	300.00	Válvula de seccionamiento

6.1 Posicionamiento

Una vez definidas las solicitudes del programa, se procede a ejecutar el botón "Posicionar". En la Tabla 18 se presenta el resultado del posicionamiento del programa.

Analizando el resultado del programa con las válvulas de seccionamiento, se puede observar que al iniciar con una válvula de seccionamiento el programa inserta únicamente un componente aguas abajo, sería ilógico que insertara un componente aguas arriba al tratarse del primer punto del perfil, además, al tratarse de una pendiente negativa aguas abajo, el programa propone una ventosa bifuncional, nombrando el ID con un punto más el número de elementos insertados por la VS inicial, manteniendo la cota y suponiendo una longitud nula entre los dos elementos.

A diferencia de la primera válvula de seccionamiento del perfil, para la segunda válvula de seccionamiento (ID=7) el programa inserta un componente aguas arriba y un componente aguas abajo. Como la pendiente del tramo aguas arriba es positiva, el programa inserta una ventosa bifuncional y como la pendiente del tramo aguas abajo es negativa, el programa inserta una ventosa

bifuncional. Esto es lógico debido a que la VS se encuentra en un punto alto. Al los ID nuevos los nombra como el ID de la VS más el orden de instalación de filas nuevas.

Para la tercera VS (ID=11) el programa realiza la misma acción a la VS (ID=7) precedente, instala aguas arriba y aguas abajo un nuevo elemento. Como detecta que la pendiente aguas arriba es positiva el programa instala una 2F y como detecta que la pendiente aguas abajo es también positiva el programa instala una VD. Los datos restantes los define de igual manera a la válvula de seccionamiento anterior.

Para la última válvula de seccionamiento, al tratarse del último punto del perfil, el programa solo inserta un nuevo elemento aguas arriba de la VS (ID=12) y como su pendiente el positiva instala una 2F.

Tabla 18 Resultado de posicionamiento del programa

ID	Cota (msnm)	LongAcum (m)	Componente	SiglaComp	Pendiente	Sigla TP
1	56.88	0.00	Válvula de seccionamiento	VS		
1.1	56.88	0.00	Ventosa bifuncional	2F	-7.50E-03	
2	54.89	265.43	Válvula de desagüe	VD	-7.50E-03	LP
3	55.52	334.40	Ventosa trifuncional	3F	9.13E-03	HP
4	50.01	410.00	Válvula de desagüe	VD	-7.29E-02	LP
5	54.76	476.88	Ventosa trifuncional	3F	7.11E-02	HP
6	50.82	650.00	Válvula de desagüe	VD	-2.28E-02	LP
7.1	51.39	795.00	Ventosa bifuncional	2F	3.93E-03	
7	51.39	795.00	Válvula de seccionamiento	VS	3.93E-03	
7.2	51.39	795.00	Ventosa bifuncional	2F	-8.48E-03	
8	49.87	974.28	Válvula de desagüe	VD	-8.48E-03	LP
9	52.20	1190.00	Válvula de desagüe	VD	1.08E-02	IU
10	63.10	1231.00	Ventosa bifuncional	2F	2.66E-01	DU
11.1	70.16	1295.00	Ventosa bifuncional	2F	1.10E-01	
11	70.16	1295.00	Válvula de seccionamiento	VS	1.10E-01	
11.2	70.16	1295.00	Válvula de desagüe	VD	6.93E-03	
12.1	72.24	1595.00	Ventosa bifuncional	2F	6.93E-03	
12	72.24	1595.00	Válvula de seccionamiento	VS	6.93E-03	

La función "Posicionamiento" detecta la clase de punto que se está estudiando y asigna el componente adecuado para cada uno. El único punto que no coincide con lo explicado en el capítulo de Fundamentos es el punto ID=9, el programa no debe definir ningún elemento en el tipo de punto "IU", en efecto el programa no definió ningún elemento, en este caso, como el resultado se puede modificar y se trata de un punto que se puede considerar bajo, se asignó una válvula de desagüe y posteriormente se ejecutó la función "Consolidar" para actualizar las siglas.

Una vez se ha definido y se ha modificado el perfil de la conducción, se ejecutó el botón "Perfil" para observar gráficamente el resultado del posicionamiento. En la Figura 24 se presenta el perfil resultado de manera gráfica con los componentes relevantes en la fase de cálculo y dimensionamiento.

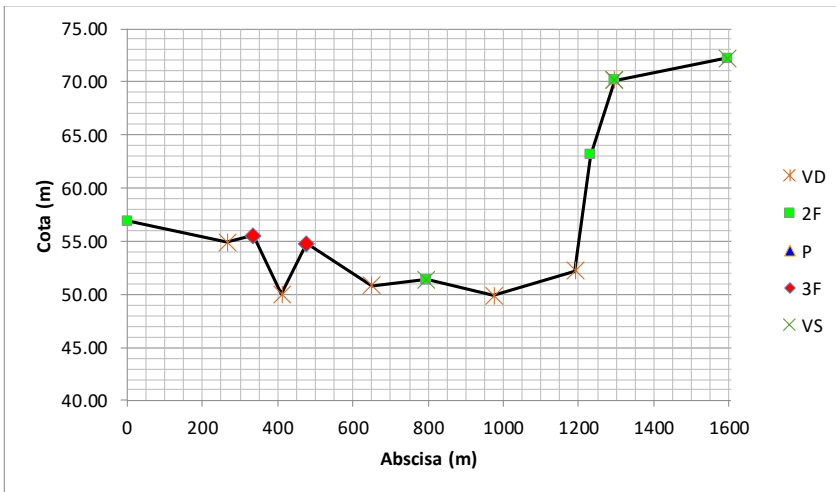


Figura 24 grafico resultado de la conducción simple

6.2 Calculo

Se hizo una prueba para cada una de las opciones de cálculo de vaciado, para cada una de las opciones de rotura, el cálculo del purgador y el cálculo de llenado del perfil ejemplo utilizado y con los resultados previos de posicionamiento.

6.2.1 Resultados de vaciado

Inicialmente se hizo la importación del resultado de posicionamiento de la ventana "Posición". Posteriormente se fijaron los criterios constantes para el estudio de cada una de las opciones de cálculo de vaciado, la dimensión de las válvulas de desagüe automática, el límite de depresión se definió de -2,55 mca, se fijó un diámetro de 1300 mm de toda la tubería conducción, de hormigón armado y una rugosidad de 0,1 mm.

Se definió que todas las válvulas de seccionamiento del perfil de conducción resultado se encuentran cerradas, por lo cual la conducción se divide en tres tramos. Se define que todas las válvulas de desagüe se encuentran abiertas.

Tabla 19 dimensión de tubería y estado de VS y VD

ID punto	Cota (msnm)	LongAcumu(m)	Dt (mm)	Componente	SiglaComp	Estado
1	56.88	0.00	1300	Válvula de seccionamiento	VS	Cerrado
1.1	56.88	0.00	1300	Ventosa bifuncional	2F	
2	54.89	265.43	1300	Válvula de desagüe	VD	Abierto
3	55.52	334.40	1300	Ventosa trifuncional	3F	
4	50.01	410.00	1300	Válvula de desagüe	VD	Abierto
5	54.76	476.88	1300	Ventosa trifuncional	3F	
6	50.82	650.00	1300	Válvula de desagüe	VD	Abierto

ID punto	Cota (msnm)	LongAcumu(m)	Dt (mm)	Componente	SiglaComp	Estado
7.1	51.39	795.00	1300	Ventosa bifuncional	2F	
7	51.39	795.00	1300	Válvula de seccionamiento	VS	Cerrado
7.2	51.39	795.00	1300	Ventosa bifuncional	2F	
8	49.87	974.28	1300	Válvula de desagüe	VD	Abierto
9	52.20	1190.00	1300	Válvula de desagüe	VD	Abierto
10	63.10	1231.00	1300	Ventosa bifuncional	2F	
11.1	70.16	1295.00	1300	Ventosa bifuncional	2F	
11	70.16	1295.00	1300	Válvula de seccionamiento	VS	Cerrado
11.2	70.16	1295.00	1300	Válvula de desagüe	VD	Abierto
12.1	72.24	1595.00	1300	Ventosa bifuncional	2F	
12	72.24	1595.00	1300	Válvula de seccionamiento	VS	Cerrado

Una vez se han definido las solicitudes del programa, se procedió a realizar el cálculo del vaciado para cada una de las opciones disponibles.

6.2.1.1 Velocidad de vaciado en los desagües

En la celda "B2" se seleccionó "VelVaciadoDesg" y en la celda "B1" se definió una velocidad de vaciado en los desagües de 3,00 m/s. Una vez definidos los criterios se ejecutó el botón "Calcular Vaciado" y se analizaron los resultados.

Los resultados del cálculo en función de la velocidad de vaciado de los desagües, definida como 3,00 m/s, se presenta en la Tabla 20. Al tratarse de una tubería de 1300 mm y definirse la dimensión de las válvulas de desagüe como automática, el programa asigna a cada VD un DN400 y detecta la cota clave de la ventosa más alta de cada uno de los tramos. Se puede observar que inicialmente se calculan los caudales de las válvulas de desagüe (VD) y posteriormente se hace la distribución en las ventosas de cada tramo.

El primer tramo (ID: 1 a 7) se puede observar que el caudal de la ventosa más alta (ID: 1.1) es la suma de los caudales de las VD, mientras que la ventosa ID:5 y ID:7.1 como se encuentran a una cota inferior a la VD del ID:2 no la contemplan en su cálculo. Así ejecuta la distribución de caudales en las ventosas a 2 tramos restantes. Además, el programa calcula el coeficiente de caudal la velocidad de los desagües calcula la velocidad en la tubería con las ecuaciones explicadas en el capítulo de fundamentos, junto a algunos datos adicionales que no se presentan en la Tabla 20 (número de Reynolds, factor de fricción, resistencia, coeficiente de carga (k).

Tabla 20 Resultados en función de la VelVaciadoDesg = 3,00 m/s

ID	Sigla Comp	Estado	DimVD (mm)	Cota clave VA	Kv (m ³ /h)/(Kp/cm ²) ^{0.5}	Qmax (m ³ /h)	VelDes (m/s)	VelTub (m/s)
1	VS	Cerrado						
1.1	2F					4071.50		
2	VD	Abierto	400	57.529	3838.65	1357.17	3.00	0.28
3	3F					4071.50		
4	VD	Abierto	400	57.529	1733.42	1357.17	3.00	0.28
5	3F					2714.34		
6	VD	Abierto	400	57.529	1860.71	1357.17	3.00	0.28

ID	Sigla Comp	Estado	DimVD (mm)	Cota clave VA	Kv (m ³ /h)/(Kp/cm ²) ^{0.5}	Qmax (m ³ /h)	VelDes (m/s)	VelTub (m/s)
7.1	2F					2714.34		
7	VS	Cerrado						
7.2	2F					1357.17		
8	VD	Abierto	400	70.809	970.64	1357.17	3.00	0.28
9	VD	Abierto	400	70.809	1034.23	1357.17	3.00	0.28
10	2F					2714.34		
11.1	2F					2714.34		
11	VS	Cerrado						
11.2	VD	Abierto	400	72.889	3707.50	1357.17	3.00	0.28
12.1	2F					1357.17		
12	VS	Cerrado						

En la Tabla 21 se presenta la propuesta de dimensión con respecto a los resultados de la Tabla 20 de los caudales de aire, en condiciones normales, de las ventosas basado en las curvas comerciales de admisión y definido el límite de depresión (-0,25 bar). Como ya se explicó en los fundamentos, el programa hace la transformación del caudal en el interior de la tubería al caudal de aire admitido en condiciones normales, para dicho proceso se solicita al usuario la cota sobre el nivel del mar y la temperatura promedio del proyecto. Se supuso que el proyecto se encuentra en la ciudad de Bogotá, Colombia, es decir, de altitud 2566 msnm y temperatura promedio de 15°C.

Tabla 21 dimensión de las ventosas de curvas comerciales de admisión (VelVD=3 m/s)

ID	Sig	QCI (m ³ /h)	QN (m ³ /h)	DN (mm)																	
				1.3	1.2	4.1	4.2	5.1	7.1	3.4	1.1	1.4	2.1	3.3	4.2	6.1	7.1	7.2	8.1	9.1	10.1
1.1	2F	4071.50	1870.13	100	80	100	100	80	80	100	ND	80	ND	ND	100	ND	80	80	ND	80	80
3	3F	4071.50	1870.13	100	80	100	100	80	80	100	ND	80	ND	ND	100	ND	80	80	ND	80	80
5	3F	2714.34	1246.76	80	50	80	80	80	80	80	80	80	ND	100	80	ND	80	80	ND	80	50
7.1	2F	2714.34	1246.76	80	50	80	80	80	80	80	80	80	ND	100	80	ND	80	80	ND	80	50
7.2	2F	1357.17	623.38	50	50	80	80	50	50	50	80	80	80	80	80	80	50	80	ND	80	50
10	2F	2714.34	1246.76	80	50	80	80	80	80	80	80	80	ND	100	80	ND	80	80	ND	80	50
11.1	2F	2714.34	1246.76	80	50	80	80	80	80	80	80	80	ND	100	80	ND	80	80	ND	80	50
12.1	2F	1357.17	623.38	50	50	80	80	50	50	50	80	80	80	80	80	80	50	80	ND	80	50

En la Tabla 22 se presenta la propuesta de dimensión con respecto a los resultados de la Tabla 20 de los caudales de aire, en condiciones normales, de las ventosas basado en las curvas ensayadas de admisión y definido el límite de depresión (-0,25 bar).

Tabla 22 dimensión de las ventosas de curvas ensayadas de admisión (VelVD=3 m/s)

ID	Sig	QCI (m ³ /h)	Q (Nm ³ /h)	DN (mm)										
				1.1	1.5	3.3	4.1	4.2	5.1	7.1	7.2	8.1	10.1	11.2
1.1	2F	4071.50	1870.13	ND	80	100	80	100	ND	100	100	ND	80	ND

ID	Sig	QCI (m ³ /h)	Q (Nm ³ /h)	1.1 1.5 3.3 4.1 4.2 5.1 7.1 7.2 8.1 10.1 11.2											
				DN (mm)											
3	3F	4071.50	1870.13	ND	80	100	80	100	ND	100	100	ND	80	ND	
5	3F	2714.34	1246.76	80	80	100	80	80	80	100	100	ND	80	ND	
7.1	2F	2714.34	1246.76	80	80	100	80	80	80	100	100	ND	80	ND	
7.2	2F	1357.17	623.38	80	80	100	80	80	80	100	50	80	80	80	
10	2F	2714.34	1246.76	80	80	100	80	80	80	100	100	ND	80	ND	
11.1	2F	2714.34	1246.76	80	80	100	80	80	80	100	100	ND	80	ND	
12.1	2F	1357.17	623.38	80	80	100	80	80	80	100	50	80	80	80	

Comparando las fichas de los fabricantes coincidentes entre las tablas comerciales y las ensayadas, se puede observar que las dimensiones comerciales, para los diámetros disponibles, son inferiores a los resultados de las dimensiones de las curvas ensayadas. Esto se debe a que las curvas ensayadas presentan el comportamiento y la capacidad real de funcionamiento y esta es inferior a la presentada en las curvas comerciales. El único fabricante que coincide es el fabricante de ficha 4.2, esto da a entender que ofrecen en las curvas comerciales una capacidad real de funcionamiento.

6.2.1.2 Velocidad de vaciado en la tubería

En la celda "B2" se seleccionó "VelVacTub" y en la celda "B1" se definió una velocidad de vaciado en la tubería de 0,4 m/s. Posteriormente se definieron los porcentajes de desagüe a cada una de las VD de cada uno de los tramos. Una vez definidos los criterios se ejecutó el botón "Calcular Vaciado" y se analizaron los resultados.

Los resultados del cálculo de la velocidad de vaciado de la tubería, definida como 0,4 m/s, se presenta en la Tabla 23. Al tratarse de una tubería de 1300 mm y al definirse la dimensión de las válvulas de desagüe como automática, el programa asigna a cada VD un DN400 y detecta la cota clave de la ventosa más alta de cada uno de los tramos. Se puede observar que inicialmente se calculan los caudales de las válvulas de desagüe (VD) y posteriormente se hace la distribución en las ventosas de cada tramo.

El primer tramo (ID: 1 a 7) se puede observar que el caudal de la ventosa más alta (ID: 1.1) es la suma de los caudales de las VD, mientras que la ventosa ID:5 y ID:7.1 como se encuentran a una cota inferior a la VD del ID:2 no la contemplan en su cálculo. Así ejecuta la distribución de caudales en las ventosas a 2 tramos restantes. Además, el programa calcula el coeficiente de caudal la velocidad de los desagües calcula la velocidad en la tubería con las ecuaciones explicadas en el capítulo de fundamentos, junto a algunos datos adicionales que no se presentan en la Tabla 20 (número de Reynolds, factor de fricción, resistencia, coeficiente de carga (k)).

Se puede observar que se hizo la distribución del porcentaje de desagües por tramos y se cargaron en mayor magnitud los desagües estratégicos que en este caso corresponde a los más bajos o los que soportan una pendiente considerablemente pronunciada, en el caso del último tramo, se cargó el total drenado debido a que es la única VD del tramo.

Tabla 23 resultados en función de la velocidad de vaciado en la tubería 0,40 m/s

ID	Sigla Comp	Estado	Kv (m ³ /h)/(Kp/cm ²) ^{0.5}	PorceDes (%)	Qmax (m ³ /h)	VelDes (m/s)	VelTub (m/s)
1	VS	Cerrado					
1.1	2F				1911.34		
2	VD	Abierto	1351.52	25	477.84	1.06	0.10
3	3F				1911.34		
4	VD	Abierto	1220.62	50	955.67	2.11	0.20
5	3F				1433.51		
6	VD	Abierto	655.12	25	477.84	1.06	0.10
7.1	2F				1433.51		
7	VS	Cerrado					
7.2	2F				860.11		
8	VD	Abierto	615.15	45	860.11	1.90	0.18
9	VD	Abierto	946.75	65	1242.37	2.75	0.26
10	2F				2102.48		
11.1	2F				2102.48		
11	VS	Cerrado					
11.2	VD	Abierto	5221.40	100	1911.34	4.23	0.40
12.1	2F				1911.34		
12	VS	Cerrado					

En la Tabla 24 se presenta la propuesta de dimensión con respecto a los resultados de la Tabla 23 de los caudales de aire, en condiciones normales, de las ventosas basado en las curvas comerciales de admisión y definido el límite de depresión (-0,25 bar). Como ya se explicó en los fundamentos, el programa hace la transformación del caudal en el interior de la tubería al caudal de aire admitido en condiciones normales, para dicho proceso se solicita al usuario la cota sobre el nivel del mar y la temperatura promedio del proyecto. Se supuso que el proyecto se encuentra en la ciudad de Bogotá, Colombia, es decir, de altitud 2566 msnm y temperatura promedio de 15°C.

Se puede observar que en este caso los caudales son inferiores al caso precedente, por lo tanto, las dimensiones también lo son. La curva comercial 8.1 ha presentado inconvenientes, se detectó que es debido a que, con un caudal mínimo, según el resultado, no se presenta ninguna propuesta de dimensión, en este caso debería ser el diámetro mínimo disponible. Por lo cual, se hizo una rectificación, pero los datos disponibles de la curva coinciden con la ecuación insertada en el programa.

Tabla 24 dimensión de las ventosas de curvas comerciales de admisión (VelTub=0,4 m/s)

ID	Sig	QCI (m ³ /h)	QN (m ³ /h)	DN (mm)																
				1.3	1.2	4.1	4.2	5.1	7.1	3.4	1.1	1.4	2.1	3.3	4.2	6.1	7.1	7.2	8.1	9.1
1.1	2F	1911.34	877.92	50	50	80	80	50	50	80	80	80	80	80	80	50	80	ND	80	50
3	3F	1911.34	877.92	50	50	80	80	50	50	80	80	80	80	80	80	50	80	ND	80	50
5	3F	1433.51	658.44	50	50	80	80	50	50	80	80	80	80	80	80	50	80	ND	80	50
7.1	2F	1433.51	658.44	50	50	80	80	50	50	80	80	80	80	80	80	50	80	ND	80	50
7.2	2F	860.11	395.07	50	50	50	50	50	50	80	80	80	50	50	80	50	80	ND	80	50

ID	Sig	QCI (m ³ /h)	QN (m ³ /h)	1.3	1.2	4.1	4.2	5.1	7.1	3.4	1.1	1.4	2.1	3.3	4.2	6.1	7.1	7.2	8.1	9.1	10.1
				DN (mm)																	
10	2F	2102.48	965.72	50	50	80	80	50	80	80	80	80	80	100	80	100	80	80	ND	80	50
11.1	2F	2102.48	965.72	50	50	80	80	50	80	80	80	80	80	100	80	100	80	80	ND	80	50
12.1	2F	1911.34	877.92	50	50	80	80	50	80	80	80	80	80	80	80	80	50	80	ND	80	50

En la Tabla 25 se presenta la propuesta de dimensión con respecto a los resultados de la Tabla 23 de los caudales de aire, en condiciones normales, de las ventosas basado en las curvas ensayadas de admisión y definido el límite de depresión (-0,25 bar).

En este caso se observa que la curva 8.1, que presenta errores en la curva comercial de dicho fabricante, presenta una propuesta de dimensión. Además, al igual que la prueba anterior, las dimensiones son mayores con respecto a las curvas comerciales. Será un resultado común de las pruebas realizadas.

Tabla 25 dimensión de las ventosas de curvas ensayadas de admisión (VelTub=0,4 m/s)

ID	Sig	QCI (m ³ /h)	QN (m ³ /h)	1.1	1.5	3.3	4.1	4.2	5.1	7.1	7.2	8.1	10.1	11.2
				DN (mm)										
1.1	2F	1911.34	877.92	80	80	100	80	80	80	100	100	80	80	80
3	3F	1911.34	877.92	80	80	100	80	80	80	100	100	80	80	80
5	3F	1433.51	658.44	80	80	100	80	80	80	100	50	80	80	80
7.1	2F	1433.51	658.44	80	80	100	80	80	80	100	50	80	80	80
7.2	2F	860.11	395.07	80	80	100	80	80	80	100	50	80	80	80
10	2F	2102.48	965.72	80	80	100	80	80	80	100	100	80	80	80
11.1	2F	2102.48	965.72	80	80	100	80	80	80	100	100	80	80	80
12.1	2F	1911.34	877.92	80	80	100	80	80	80	100	100	80	80	80

6.2.1.3 Caudal de vaciado en las válvulas de desagües.

En la celda "B2" se seleccionó "QVacDesg" y en la celda "B1" se definió un caudal de vaciado en las válvulas de desagüe de 0,50 m³/s. Una vez definidos los criterios se ejecutó el botón "Calcular Vaciado" y se analizaron los resultados.

Los resultados del cálculo del caudal de vaciado en las válvulas de desagüe, definido como 0,50 m³/s, se presenta en la Tabla 23. Los criterios de selección y la distribución de caudales de ventosas se hacen igual en todos los casos, ya explicado en las dos opciones precedentes y a detalles en fundamentos.

Como en este caso es prácticamente el caculo directo del caudal a las válvulas de desagüe, el programa hace la distribución a las ventosas como ya se ha explicado anteriormente. En este caso las velocidades con un poco excesiva por lo que la dimensión de las ventosas es mayor.

Tabla 26 resultados en función del caudal de vaciado en las válvulas de desagüe de 0,50 m³/s

ID	Sigla Comp	Estado	DimVD (mm)	Cota clave VA	Kv (m ³ /h)/(Kp/cm ²) ^{0.5}	Qmax (m ³ /h)	VelDes (m/s)	VelTub (m/s)
1	VS	Cerrado						
1.1	2F					5400.00		

ID	Sigla Comp	Estado	DimVD (mm)	Cota clave VA	Kv (m ³ /h)/(Kp/cm ²) ^{0.5}	Qmax (m ³ /h)	VelDes (m/s)	VelTub (m/s)
2	VD	Abierto	400	57.529	6616.93	1800.00	3.98	0.38
3	3F					5400.00		
4	VD	Abierto	400	57.529	2401.07	1800.00	3.98	0.38
5	3F					3600.00		
6	VD	Abierto	400	57.529	2595.37	1800.00	3.98	0.38
7.1	2F					3600.00		
7	VS	Cerrado						
7.2	2F					1800.00		
8	VD	Abierto	400	70.809	1304.48	1800.00	3.98	0.38
9	VD	Abierto	400	70.809	1392.46	1800.00	3.98	0.38
10	2F					3600.00		
11.1	2F					3600.00		
11	VS	Cerrado						
11.2	VD	Abierto	400	72.889	6247.89	1800.00	3.98	0.38
12.1	2F					1800.00		
12	VS	Cerrado						

En la Tabla 27 se presenta la dimensión propuesta con respecto a los resultados del caudal de aire y a las curvas comerciales de admisión, cabe aclarar que, bajo las mismas condiciones de las opciones anteriores, considerando el proyecto en la ciudad de Bogotá, Colombia. Se puede observar que los diámetros aumentan debido a que los caudales de admisión de aire aumentan en comparación con las pruebas realizadas. En la ficha del fabricante 5.1 presenta dos opciones para el caudal de las ventosas que mayor caudal de aire admiten.

Tabla 27 dimensión de las ventosas de curvas comerciales de admisión (QVD=0,5 m/s)

ID	Sig	QCI (m ³ /h)	QN (m ³ /h)	DN (mm)																	
				1.3	1.2	4.1	4.2	5.1	7.1	3.4	1.1	1.4	2.1	3.3	4.2	6.1	7.1	7.2	8.1	9.1	10.1
1.1	2F	5400.00	2480.34	150	150	100	100	150/200	100	150	ND	80	ND	ND	100	ND	100	80	ND	100	80
3	3F	5400.00	2480.34	150	150	100	100	150/200	100	150	ND	80	ND	ND	100	ND	100	80	ND	100	80
5	3F	3600.00	1653.56	100	80	100	100	80	80	80	ND	80	ND	ND	100	ND	80	80	ND	80	80
7.1	2F	3600.00	1653.56	100	80	100	100	80	80	80	ND	80	ND	ND	100	ND	80	80	ND	80	80
7.2	2F	1800.00	826.78	50	50	80	80	50	50	80	80	80	80	80	80	80	50	80	ND	80	50
10	2F	3600.00	1653.56	100	80	100	100	80	80	80	ND	80	ND	ND	100	ND	80	80	ND	80	80
11.1	2F	3600.00	1653.56	100	80	100	100	80	80	80	ND	80	ND	ND	100	ND	80	80	ND	80	80
12.1	2F	1800.00	826.78	50	50	80	80	50	50	80	80	80	80	80	80	80	50	80	ND	80	50

En la Tabla 28 se presenta la propuesta de dimensionado de ventosas con respecto al caudal admitido calculado, el límite de depresión definido y las curvas ensayadas de admisión. Se puede observar que, en muchos fabricantes, con los ensayos realizados, el diámetro no se encuentra disponible para muchas ventosas, esto se debe a que no se cuenta con el total de diámetros ensayados de los fabricantes, así que la capacidad supera a la dimensión máxima ensayada. Además, como en las pruebas precedente, los diámetros propuestos superan los coincidentes de los resultados de las curvas comerciales.

Tabla 28 dimensión de las ventosas de curvas ensayadas de admisión (QVD=0,5 m/s)

ID	Sig	QCl (m ³ /h)	QN (m ³ /h)	1.1	1.5	3.3	4.1	4.2	5.1	7.1	7.2	8.1	10.1	11.2
				DN (mm)										
1.1	2F	5400.00	2480.34	ND	ND	100	80	100	ND	100	100	ND	80	ND
3	3F	5400.00	2480.34	ND	ND	100	80	100	ND	100	100	ND	80	ND
5	3F	3600.00	1653.56	ND	80	100	80	80	80	100	100	ND	80	ND
7.1	2F	3600.00	1653.56	ND	80	100	80	80	80	100	100	ND	80	ND
7.2	2F	1800.00	826.78	80	80	100	80	80	80	100	100	80	80	80
10	2F	3600.00	1653.56	ND	80	100	80	80	80	100	100	ND	80	ND
11.1	2F	3600.00	1653.56	ND	80	100	80	80	80	100	100	ND	80	ND
12.1	2F	1800.00	826.78	80	80	100	80	80	80	100	100	80	80	80

6.2.1.4 Caudal de vaciado en la tubería

En la celda "B2" se seleccionó "QVAcTub" y en la celda "B1" se definió un caudal de vaciado en la tubería de 0,80 m³/s. Posteriormente se definieron los porcentajes de desagüe a cada una de las VD de cada uno de los tramos. Una vez definidos los criterios se ejecutó el botón "Calcular Vaciado" y se analizaron los resultados.

Los resultados del cálculo del caudal de vaciado en la tubería, definido como 0,80 m³/s, se presenta en la Tabla 29. Los criterios de selección y la distribución de caudales de ventosas se mantienen con respecto a las pruebas anteriores.

Se mantiene la misma distribución de los porcentajes drenados con respecto a la opción de la velocidad de vaciado en la tubería ya analizada. En este caso se presenta una magnitud intermedia de caudales para observar la propuesta de dimensión de las curvas

Tabla 29 resultados en función del caudal de vaciado en la tubería 0,50 m³/s

ID	Sigla Comp	Estado	Kv (m ³ /h)/(Kp/cm ²) ^{0.5}	PorceDes (%)	Qmax (m ³ /h)	VelDes (m/s)	VelTub (m/s)
1	VS	Cerrado					
1.1	2F				2880.00		
2	VD	Abierto	2036.47	25	720.00	1.59	0.15
3	3F				2880.00		
4	VD	Abierto	1839.21	50	1440.00	3.18	0.30
5	3F				2160.00		
6	VD	Abierto	987.14	25	720.00	1.59	0.15
7.1	2F				2160.00		
7	VS	Cerrado					
7.2	2F				1296.00		
8	VD	Abierto	926.90	45	1296.00	2.86	0.27
9	VD	Abierto	1426.56	65	1872.00	4.14	0.39
10	2F				3168.00		
11.1	2F				3168.00		
11	VS	Cerrado					
11.2	VD	Abierto	7867.56	100	2880.00	6.37	0.60

ID	Sigla Comp	Estado	Kv (m ³ /h)(Kp/cm ²) ^{0.5}	PorceDes (%)	Qmax (m ³ /h)	VelDes (m/s)	VelTub (m/s)
12.1	2F				2880.00		
12	VS	Cerrado					

En la Tabla 30 se presenta la dimensión propuesta con respecto a los resultados del caudal de aire, en condiciones normales y a las curvas comerciales de admisión, cabe aclarar que, bajo las mismas condiciones de las opciones anteriores, considerando el proyecto en la ciudad de Bogotá, Colombia.

Tabla 30 dimensión de las ventosas de curvas comerciales de admisión (QTub=0,8 m/s)

ID	Sig	QCI (m ³ /h)	QN (m ³ /h)	DN (mm)																		
				1.3	1.2	4.1	4.2	5.1	7.1	3.4	1.1	1.4	2.1	3.3	4.2	6.1	7.1	7.2	8.1	9.1	10.1	
1.1	2F	2880.00	1322.85	80	50	80	80	80	80	80	80	ND	80	ND	100	80	ND	80	80	ND	80	50
3	3F	2880.00	1322.85	80	50	80	80	80	80	80	ND	80	ND	100	80	ND	80	80	ND	80	50	
5	3F	2160.00	992.14	50	50	80	80	50	80	80	80	80	80	80	100	80	100	80	80	ND	80	50
7.1	2F	2160.00	992.14	50	50	80	80	50	80	80	80	80	80	80	100	80	100	80	80	ND	80	50
7.2	2F	1296.00	595.28	50	50	80	50	50	50	50	80	80	80	80	50	80	50	80	80	ND	80	50
10	2F	3168.00	1455.13	80	50	80	80	80	80	80	ND	80	ND	100	80	ND	80	80	ND	80	80	
11.1	2F	3168.00	1455.13	80	50	80	80	80	80	80	ND	80	ND	100	80	ND	80	80	ND	80	80	
12.1	2F	2880.00	1322.85	80	50	80	80	80	80	80	ND	80	ND	100	80	ND	80	80	ND	80	80	50

En la Tabla 31 se presenta la propuesta de dimensionado de ventosas con respecto al caudal admitido calculado, el límite de depresión definido y las curvas ensayadas de admisión. Como en las pruebas precedentes, los diámetros propuestos superan los coincidentes de los resultados de las curvas comerciales.

Tabla 31 dimensión de las ventosas de curvas ensayadas de admisión (QTub=0,8 m/s)

ID	Sig	QCI (m ³ /h)	QN (m ³ /h)	DN (mm)										
				1.1	1.5	3.3	4.1	4.2	5.1	7.1	7.2	8.1	10.1	11.2
1.1	2F	2880.00	1322.85	80	80	100	80	80	80	100	100	ND	80	ND
3	3F	2880.00	1322.85	80	80	100	80	80	80	100	100	ND	80	ND
5	3F	2160.00	992.14	80	80	100	80	80	80	100	100	80	80	80
7.1	2F	2160.00	992.14	80	80	100	80	80	80	100	100	80	80	80
7.2	2F	1296.00	595.28	80	80	100	80	80	80	100	50	80	80	80
10	2F	3168.00	1455.13	80	80	100	80	80	80	100	100	ND	80	ND
11.1	2F	3168.00	1455.13	80	80	100	80	80	80	100	100	ND	80	ND
12.1	2F	2880.00	1322.85	80	80	100	80	80	80	100	100	ND	80	ND

6.2.1.5 Vaciado en función de Kv

En la celda "B2" se seleccionó "Kv" y en la celda "D3" se definió un el modo de obtención del coeficiente del caudal Kv como automático. Como se trata de unas válvulas de desagüe de DN400, se definió que las válvulas no presentan contrapresión (Ps=0 mca) y 10 como número de vueltas. Una vez definidos los criterios se ejecutó el botón "Calcular Vaciado" y se analizaron los resultados.

Los resultados del cálculo en función del coeficiente de caudal Kv automático, se presenta en la Tabla 32. Los criterios de cálculo y la distribución de caudales de ventosas se mantienen con respecto a las pruebas anteriores.

Se puede observar el coeficiente del caudal Kv son contrapresión y con 10 vueltas para las válvulas de desagüe de 400 mm determinados ($174 \text{ (m}^3\text{/h)/(Kp/cm}^2\text{)}^{0.5}$). También se observa que los caudales son inferiores con respecto a las pruebas anteriores.

Tabla 32 resultados en función del coeficiente del caudal Kv, automático (sin contrapresión, 10 vueltas las válvulas de DN400)

ID	Sigla Comp	Estado	DimVD (mm)	Cota clave VA	Kv ($\text{m}^3\text{/h)/(Kp/cm}^2\text{)}^{0.5}$	Qmax ($\text{m}^3\text{/h}$)	VelDes (m/s)	VelTub (m/s)
1	VS	Cerrado						
1.1	2F					325.97		
2	VD	Abierto	400	57.529	174.70	61.77	0.14	0.01
3	3F					325.97		
4	VD	Abierto	400	57.529	174.70	136.78	0.30	0.03
5	3F					264.20		
6	VD	Abierto	400	57.529	174.70	127.42	0.28	0.03
7.1	2F					264.20		
7	VS	Cerrado						
7.2	2F					244.27		
8	VD	Abierto	400	70.809	174.70	244.27	0.54	0.05
9	VD	Abierto	400	70.809	174.70	229.25	0.51	0.05
10	2F					473.52		
11.1	2F					473.52		
11	VS	Cerrado						
11.2	VD	Abierto	400	72.889	174.70	63.95	0.14	0.01
12.1	2F					63.95		
12	VS	Cerrado						

En la Tabla 33 se presenta la propuesta de dimensionamiento de las curvar comerciales de admisión para las ventosas presentes en el perfil de conducción, en las pruebas anteriores se presentó problemas con el fabricante 8.1 debido a que, a caudales bajos no proponía ningún diámetro, este es el único caso en que en la curva comercial del fabricante 8.1 presento una propuesta de dimensionamiento de ventosas y corresponde al diámetro mínimo (DN80) disponible de dicho fabricante.

Tabla 33 dimensión de las ventosas de curvas comerciales de admisión (Kv)

ID	Sig	QCl ($\text{m}^3\text{/h}$)	QN ($\text{m}^3\text{/h}$)	DN (mm)																	
				1.3	1.2	4.1	4.2	5.1	7.1	3.4	1.1	1.4	2.1	3.3	4.2	6.1	7.1	7.2	8.1	9.1	10.1
1.1	2F	325.97	149.72	25	50	50	25	50	50	50	80	80	80	50	25	80	50	80	80	80	50
3	3F	325.97	149.72	25	50	50	25	50	50	50	80	80	80	50	25	80	50	80	80	80	50
5	3F	264.20	121.35	25	50	50	25	50	50	50	80	80	80	50	25	80	50	80	80	80	50
7.1	2F	264.20	121.35	25	50	50	25	50	50	50	80	80	80	50	25	80	50	80	80	80	50
7.2	2F	244.27	112.20	25	50	50	25	50	50	50	80	80	80	50	25	80	50	80	80	80	50
10	2F	473.52	217.50	25	50	50	25	50	50	50	80	80	80	50	25	80	50	80	80	80	50

ID	Sig	QCI (m ³ /h)	QN (m ³ /h)	1.3	1.2	4.1	4.2	5.1	7.1	3.4	1.1	1.4	2.1	3.3	4.2	6.1	7.1	7.2	8.1	9.1	10.1
				DN (mm)																	
11.1	2F	473.52	217.50	25	50	50	25	50	50	50	80	80	80	50	25	80	50	80	80	80	50
12.1	2F	63.95	29.37	25	50	50	25	50	50	50	80	80	80	50	25	80	50	80	80	80	50

En la Tabla 34 se presenta la propuesta de dimensionado de ventosas con respecto al caudal admitido calculado, el límite de depresión definido y las curvas ensayadas de admisión. Como en las pruebas precedentes, los diámetros propuestos superan los coincidentes de los resultados de las curvas comerciales, aunque en este caso se presentan unos diámetros sobredimensionados con respecto al caudal de admisión requerido, esto se debe a que este es el diámetro mínimo ensayado y de curvas disponibles de cada fabricante.

Tabla 34 dimensión de las ventosas de curvas comerciales de admisión (Kv)

ID	Sig	QCI (m ³ /h)	QN (m ³ /h)	1.1	1.5	3.3	4.1	4.2	5.1	7.1	7.2	8.1	10.1	11.2
				DN (mm)										
1.1	2F	325.97	149.72	80	80	100	80	80	80	100	50	80	80	80
3	3F	325.97	149.72	80	80	100	80	80	80	100	50	80	80	80
5	3F	264.20	121.35	80	80	100	80	80	80	100	50	80	80	80
7.1	2F	264.20	121.35	80	80	100	80	80	80	100	50	80	80	80
7.2	2F	244.27	112.20	80	80	100	80	80	80	100	50	80	80	80
10	2F	473.52	217.50	80	80	100	80	80	80	100	50	80	80	80
11.1	2F	473.52	217.50	80	80	100	80	80	80	100	50	80	80	80
12.1	2F	63.95	29.37	80	80	100	80	80	80	100	50	80	80	80

En resumen, se hizo una prueba, variando las magnitudes, en cada una de las opciones disponibles de cálculo de vaciado con el fin de observar los resultados de dimensionamiento y verificar, de acuerdo con la lógica, la coherencia de las propuestas del programa.

6.2.2 Resultados de rotura

Inicialmente se hizo la importación del resultado de posicionamiento de la ventana "Posición". Posteriormente se fijaron los criterios constantes para el estudio de cada una de las opciones de cálculo rotura, el límite de depresión se definió de -2,55 mca, se fijó un diámetro de 1300 mm de toda la tubería conducción, de hormigón armado y una rugosidad de 0,1 mm.

Se definió que tres válvulas de seccionamiento del perfil de conducción resultado se encuentran cerradas, por lo cual la conducción se divide en tres tramos. Por defecto, el programa define que todas las válvulas de desagüe se encuentran cerradas.

Una vez se definen las solicitudes del programa, se hace una prueba a cada una de las opciones con diferentes criterios de rotura.

6.2.2.1 Porcentaje de rotura

En la celda "D1" se seleccionó "%Rotura" y se ejecutó el botón "Calcular Rotura". A las solicitudes del programa se definió que la rotura se presentó en el P.K. 1200m y seguidamente que el porcentaje de rotura fue de 12%.

En la Tabla 35 se presenta el resultado del tramo en el que se presenta la rotura, es decir desde el ID7 hasta el ID11, dado que el P.K. definido se encuentra en dicho tramo. Se observa que la rotura se presenta entre el ID9 y el ID10 y lo llama con un "ROT" intermedio entre los ID definidos. Calcula la cota con base en la pendiente del tramo, al componente lo llama Rotura con su sigla VM, cierran todas las VD del tramo, se calcula el diámetro de la rotura (12% de 1300mm), define el coeficiente de carga $k=1$ y procede a realizar el cálculo de la rotura para conseguir la distribución a cada ventosa.

Como en este caso la primera ventosa del tramo se encuentra en una cota inferior a la rotura, la ventosa no se activa debido a que no se ve afectada por la rotura, en este caso la ventosa, lógicamente, no interviene.

Tabla 35 resultados de rotura con respecto al porcentaje de rotura (P.K. 1200 m)

ID	Cota	LonAcu	Sigla Comp	Estado	Dim (mm)	Cota clave VA	k	KV $(m^3/h)/(Kp/cm^2)^{0.5}$	Q (m^3/h)	VelRot (m/s)	VelTub (m/s)
7	51.39	795.00	VS	Cerrado							
7.2	51.39	795.00	2F						0.00		
8	49.87	974.28	VD	Cerrado	400	70.809					
9	52.20	1190.00	VD	Cerrado	400	70.809					
9ROT10	60.44	1200.00	VM		156	70.809	1	963.81	913.26	13.27	0.19
10	63.10	1231.00	2F						913.26		
11.1	70.16	1295.00	2F						913.26		
11	70.16	1295.00	VS	Cerrado							

En la Tabla 36 se presenta la propuesta de admisión de las ventosas que intervienen, se puede observar que como el caudal no es de gran magnitud, las dimensiones en este caso son las mínimas disponibles de cada fabricante. Lo curioso es que para un caudal nulo se propone una dimensión y esto tiene que ver con que el programa asume que la ventosa está posicionada en el tramo, por consiguiente, sin actuar, propone una dimensión mínima por el hecho de esta presente.

Tabla 36 dimensión de las ventosas de curvas comerciales de admisión por rotura (%Rotura)

ID	Sig	QCI (m^3/h)	QN (m^3/h)	DN (mm)																		
				1.3	1.2	4.1	4.2	5.1	7.1	3.4	1.1	1.4	2.1	3.3	4.2	6.1	7.1	7.2	8.1	9.1	10.1	
7.2	2F	0.00	0.00	25	50	50	25	50	50	50	50	80	80	80	50	25	80	50	80	80	80	50
10	2F	0.25	913.26	25	50	50	25	50	50	50	50	80	80	80	50	25	80	50	80	80	80	50
11.1	2F	0.25	913.26	25	50	50	25	50	50	50	50	80	80	80	50	25	80	50	80	80	80	50

En la Tabla 37 se presenta la propuesta de dimensionado de ventosas con respecto a las curvas ensayadas de admisión. Como en las pruebas precedentes, los diámetros propuestos superan los coincidentes de los resultados de la propuesta las curvas comerciales, también mencionando que se trata de la dimensión mínima ensayada de cada fabricante.

Tabla 37 dimensión de las ventosas de curvas comerciales de admisión por rotura (%Rotura)

ID	Sig	QCI (m^3/h)	QN (m^3/h)	DN (mm)											
				1.1	1.5	3.3	4.1	4.2	5.1	7.1	7.2	8.1	10.1	11.2	
7.2	2F	0.00	0.00	80	80	100	80	80	80	80	100	50	80	80	80
10	2F	0.25	913.26	80	80	100	80	80	80	80	100	50	80	80	80

ID	Sig	QCI (m ³ /h)	QN (m ³ /h)	1.1	1.5	3.3	4.1	4.2	5.1	7.1	7.2	8.1	10.1	11.2
				DN (mm)										
11.1	2F	0.25	913.26	80	80	100	80	80	80	100	50	80	80	80

6.2.2.2 Válvula mariposa

En la celda "D1" se seleccionó "VM", y en la celda "E3" se definió un el modo de obtención del coeficiente del caudal Kv como automático y se ejecutó el botón "Calcular Rotura". A las solicitudes del programa se definió la abscisa de P.K:850 m, diámetro de la válvula mariposa simulada como rotura de DN:250 mm y que su grado de apertura de GA:80.

En la Tabla 38 se presenta el resultado del tramo en el que se presenta la rotura, es decir desde el ID7 hasta el ID11, dado que el P.K. definido se encuentra en dicho tramo. Se observa que la rotura se presenta entre el ID7.2 y el ID8 y lo llama con un "ROT" intermedio entre los ID definidos. Calcula la cota con base en la pendiente del tramo, al componente lo llama Rotura con su sigla VM, cierran todas las VD del tramo y procede a realizar el cálculo de la rotura para conseguir la distribución a cada ventosa.

En este caso, a diferencia de la prueba anterior, la rotura se presentó a una cota inferior con respecto a todas las ventosas del tramo. Por lo cual todas las ventosas del tramo actúan con la misma magnitud al caudal de la rotura, cabe mencionar que se trata del caudal máximo que puede expulsar cada ventosa, a criterio personal se podría definir una distribución más equivalente.

Tabla 38 resultados de rotura simulando una VM (250mm y GA 80) (P.K. 850 m)

ID	Cota	LonAcu	Sigla Comp	Estado	Dim (mm)	Cota clave VA	k	KV (m ³ /h)/(Kp/cm ²) ^{0.5}	Q (m ³ /h)	VelRot (m/s)	VelTub (m/s)
7	51.39	795.00	VS	Cerrado							
7.2	51.39	795.00	2F						4351.53		
7.2ROT8	50.34	850.00	VM		250	70.809	0.62	3150.00	4351.53	24.62	0.91
8	49.87	974.28	VD	Cerrado	400	70.809					
9	52.20	1190.00	VD	Cerrado	400	70.809					
10	63.10	1231.00	2F						4351.53		
11.1	70.16	1295.00	2F						4351.53		
11	70.16	1295.00	VS	Cerrado							

En la Tabla 39 se presenta la propuesta de dimensión de las ventosas con respecto a las curvas comerciales de admisión, se puede observar que como el caudal es de mayor magnitud a la prueba anterior, debido a que el diámetro de la rotura en este caso es superior y el coeficiente Kv del caudal es casi tres veces mayor a la rotura de 12%.

Tabla 39 dimensión de las ventosas de curvas comerciales de admisión por rotura (Kv)

ID	Sig	QCI (m ³ /h)	QN (m ³ /h)	1.3	1.2	4.1	4.2	5.1	7.1	3.4	1.1	1.4	2.1	3.3	4.2	6.1	7.1	7.2	8.1	9.1	10.1
				DN (mm)																	
7.2	2F	4351.53	1998.75	100	80	100	100	80	80	100	ND	80	ND	ND	100	ND	80	80	ND	80	80
10	2F	4351.53	1998.75	100	80	100	100	80	80	100	ND	80	ND	ND	100	ND	80	80	ND	80	80
11.1	2F	4351.53	1998.75	100	80	100	100	80	80	100	ND	80	ND	ND	100	ND	80	80	ND	80	80

En la Tabla 40 se presenta la propuesta de dimensionado de ventosas con respecto a las curvas ensayadas de admisión por el tramo donde se presenta la rotura. En este caso, al ser el caudal de mayor magnitud, algunos fabricantes ensayados nos disponen de ninguna ventosa o no se han ensayado unas dimensiones superiores.

Tabla 40 dimensión de las ventosas de curvas ensayadas de admisión por rotura (Kv)

ID	Sig	QCI (m ³ /h)	QN (m ³ /h)	1.1	1.5	3.3	4.1	4.2	5.1	7.1	7.2	8.1	10.1	11.2
7.2	2F	4351.53	1998.75	ND	80	100	80	100	ND	100	100	ND	80	ND
10	2F	4351.53	1998.75	ND	80	100	80	100	ND	100	100	ND	80	ND
11.1	2F	4351.53	1998.75	ND	80	100	80	100	ND	100	100	ND	80	ND

6.2.2.3 AWWA

En la celda "D1" se seleccionó "AWWA" y se ejecutó el botón "Calcular Rotura". A las solicitudes del programa se definió el mismo P.K. que la prueba anterior, con el fin de hacer comparaciones de metodologías. A la solicitud del programa, se definió un coeficiente de Chezy de C:120, por ser de hormigón armado el material de la tubería.

En la Tabla 41 se puede observar que, a diferencia de las pruebas precedentes de rotura, el caudal de admisión de cada ventosa es diferente y es superior cada vez que se aleja, en distancia y en cota, de la rotura, esto debido a que, la ecuación propuesta por AWWA depende de la pendiente. Es importante mencionar que el programa supone una pendiente desde cada ventosa hasta la rotura y no asume las diferentes pendientes entre la cantidad de tramos que varían desde una ventosa hasta la rotura.

Tabla 41 resultados de rotura simulando AWWA (P.K. 850 m)

ID	Cota	LonAcu	Sigla Comp	Estado	Dim (mm)	Cota clave VA	Qmax (m ³ /s)	Qmax (m ³ /h)
7	51.39	795.00	VS	Cerrado				
7.2	51.39	795.00	2F				6.91	24858.38
7.2ROT8	50.34	850.00	VM			70.809		
8	49.87	974.28	VD	Cerrado	400	70.809		
9	52.20	1190.00	VD	Cerrado	400	70.809		
10	63.10	1231.00	2F				9.13	32871.79
11.1	70.16	1295.00	2F				10.53	37906.17
11	70.16	1295.00	VS	Cerrado				

En la Tabla 42 se presenta la propuesta de dimensión de las ventosas con respecto a las curvas comerciales de admisión, se puede observar que como el caudal es muy superior a la prueba anterior, la mayoría de las dimensiones de los fabricantes del programa no disponen de elementos de mayor capacidad, de hecho, se puede considerar que el caudal es muy sobreestimado así que las opciones precedentes son más recomendables para la obtención de una propuesta por rotura.

Tabla 42 dimensión de las ventosas de curvas comerciales de admisión por rotura (AWWA)

ID	Sig	QCI (m ³ /h)	QN (m ³ /h)	1.3	1.2	4.1	4.2	5.1	7.1	3.4	1.1	1.4	2.1	3.3	4.2	6.1	7.1	7.2	8.1	9.1	10.1
				DN (mm)																	
7.2	2F	24858.38	11418.01	250	250	250	250	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	250	ND	ND	ND	ND	ND	ND

ID	Sig	QCI (m ³ /h)	QN (m ³ /h)	1.3	1.2	4.1	4.2	5.1	7.1	3.4	1.1	1.4	2.1	3.3	4.2	6.1	7.1	7.2	8.1	9.1	10.1
				DN (mm)																	
10	2F	32871.79	15098.75	ND	ND	ND	250	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	250	ND	ND	ND	ND	ND	ND
11.1	2F	37906.17	17411.15	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

En la Tabla 43 se puede observar que, de las curvas ensayadas disponibles por el programa, ninguna dispone de ningún diámetro que pueda admitir el caudal de aire resultado.

Tabla 43 dimensión de las ventosas de curvas ensayadas de admisión por rotura (AWWA)

ID	Sig	QCI (m ³ /h)	QN (m ³ /h)	1.1	1.5	3.3	4.1	4.2	5.1	7.1	7.2	8.1	10.1	11.2
				DN (mm)										
7.2	2F	24858.38	11418.01	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
10	2F	32871.79	15098.75	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
11.1	2F	37906.17	17411.15	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

6.2.3 Resultados de llenado

En primer lugar, se ejecutó la función "Calcular Llenado", posteriormente se definieron las solicitudes del programa, la velocidad de llenado de 0,4 m/s, el diferencial de presión de 0,4 bar, la cota sobre el nivel del mar de 2655 m y la temperatura promedio de 15°C, los dos últimos valores suponiendo que el proyecto, como en las pruebas anteriormente realizadas, se encuentra en la ciudad de Bogotá, Colombia.

El resultado del llenado se presenta en la Tabla 44, se puede observar que el cálculo de la expulsión de aire en condiciones normales es igual para todas las ventosas del perfil de conducción ejemplo, esto se debe a que el programa no hace ningún tipo de distribución solo supone que el caudal de agua que ingresa a la tubería es el mismo caudal de aire que sale por todas las ventosas. Cabe mencionar que el programa calcula el caudal máximo de las ventosas y es un valor sobredimensionado, el criterio para definir que ventosa se cierra primero o que ventosa actúa primero o la cantidad de ventosas que actúan en simultaneo es un poco complicado por esta razón el programa brinda el resultado más seguro, pero lógicamente, no el óptimo.

Tabla 44 Resultado de llenado de 0,4 m/s

ID	Sigla Comp	Estado	ΔP (bar)	QCI (m ³ /s)	QN (m ³ /h)
1	VS	Cerrado			
1.1	2F		0.400	0.398	1530.713
2	VD	Abierto			
3	3F		0.400	0.398	1530.713
4	VD	Abierto			
5	3F		0.400	0.398	1530.713
6	VD	Abierto			
7.1	2F		0.400	0.398	1530.713
7	VS	Cerrado			
7.2	2F		0.400	0.398	1530.713
8	VD	Abierto			

ID	Sigla Comp	Estado	ΔP (bar)	QCI (m ³ /s)	QN (m ³ /h)
9	VD	Abierto			
10	2F		0.400	0.398	1530.713
11.1	2F		0.400	0.398	1530.713
11	VS	Cerrado			
11.2	VD	Abierto			
12.1	2F		0.400	0.398	1530.713
12	VS	Cerrado			

En la Tabla 45 se presenta la propuesta de dimensión de las ventosas con respecto a las curvas comerciales de expulsión, se puede observar que como el caudal es el mismo para todas las ventosas del perfil de conducción, obviamente, todas las dimensiones para cada fabricante serán las mismas. La dimensión para dicho caudal calculado ronda entre 80 mm o 100 mm.

Tabla 45 dimensión de las ventosas de curvas comerciales de expulsión por llenado (VI=0,3 m/s)

ID	Sig	QN (m ³ /h)	DN (mm)																			
			1.1	1.2	1.3	1.4	2.1	2.2	3.1	3.2	4.1	4.2	5.1	6.1	7.1	7.2	8.1	9.1	10.1	10.2	12.1	15.1
1.1	2F	1530.71	80	ND	80	80	80	ND	80	80	80	ND	100	100	80	80	ND	ND	80	80	ND	80
3	3F	1530.71	80	ND	80	80	80	ND	80	80	80	ND	100	100	80	80	ND	ND	80	80	ND	80
5	3F	1530.71	80	ND	80	80	80	ND	80	80	80	ND	100	100	80	80	ND	ND	80	80	ND	80
7.1	2F	1530.71	80	ND	80	80	80	ND	80	80	80	ND	100	100	80	80	ND	ND	80	80	ND	80
7.2	2F	1530.71	80	ND	80	80	80	ND	80	80	80	ND	100	100	80	80	ND	ND	80	80	ND	80
10	2F	1530.71	80	ND	80	80	80	ND	80	80	80	ND	100	100	80	80	ND	ND	80	80	ND	80
11.1	2F	1530.71	80	ND	80	80	80	ND	80	80	80	ND	100	100	80	80	ND	ND	80	80	ND	80
12.1	2F	1530.71	80	ND	80	80	80	ND	80	80	80	ND	100	100	80	80	ND	ND	80	80	ND	80

En la Tabla 46 se presenta la propuesta de dimensión de las ventosas con respecto a las curvas ensayadas de expulsión, se puede observar que como el caudal es el mismo para todas las ventosas del perfil de conducción, obviamente, todas las dimensiones para cada fabricante serán las mismas. Al igual que en las curvas comerciales, la dimensión para dicho caudal calculado ronda entre 80 mm o 100 mm. Como dato adicional, el programa presenta, basado en los ensayos, la presión en la que la dimensión del fabricante presentó cierre dinámico o cierre prematuro.

Tabla 46 dimensión de las ventosas de curvas ensayadas de expulsión por llenado (VI=0,3 m/s)

CD (bar)			0,43		1,3		0,32		0,16		0,2		0,004		0,06		0,02		0,2	
ID	Sig	QN (m ³ /h)	DN (mm)																	
			1.1	1.2	1.3	1.4	2.1	4.1	4.2	5.1	6.1	7.1	7.2	8.1	9.1	10.1	10.2	11.1	12.1	
1.1	2F	1530.71	80	ND	100	80	80	80	ND	100	100	80	100	ND	ND	80	80	100	ND	
3	3F	1530.71	80	ND	100	80	80	80	ND	100	100	80	100	ND	ND	80	80	100	ND	
5	3F	1530.71	80	ND	100	80	80	80	ND	100	100	80	100	ND	ND	80	80	100	ND	
7.1	2F	1530.71	80	ND	100	80	80	80	ND	100	100	80	100	ND	ND	80	80	100	ND	
7.2	2F	1530.71	80	ND	100	80	80	80	ND	100	100	80	100	ND	ND	80	80	100	ND	
10	2F	1530.71	80	ND	100	80	80	80	ND	100	100	80	100	ND	ND	80	80	100	ND	
11.1	2F	1530.71	80	ND	100	80	80	80	ND	100	100	80	100	ND	ND	80	80	100	ND	
12.1	2F	1530.71	80	ND	100	80	80	80	ND	100	100	80	100	ND	ND	80	80	100	ND	

6.2.4 Resultados de purgador

En primer lugar, se definió la presión relativa (10,5 mca) de cada purgador o ventosa trifuncional, posteriormente se ejecutó la función "Calcular Purga", se definieron las solicitudes del programa, el caudal de 800 l/s, el porcentaje de aire disuelto en el agua de 2%, la cota sobre el nivel del mar de 2655 m y la temperatura promedio de 15°C, los dos últimos valores suponiendo que el proyecto, como en las pruebas anteriormente realizadas, se encuentra en la ciudad de Bogotá, Colombia.

En la Tabla 47 se presenta el resultado del cálculo del purgadores, se puede observar que el flujo se encuentra en sónico y que la dimensión de los purgadores de las ventosas trifuncionales se propone de, aproximadamente, 11,00 mm. Se presenta el primer tramo de toda la conducción debido a que los demás tramos no cuentan con ventosas trifuncionales ni con purgadores a lo largo de sus puntos de control. Se presentan datos adicionales con el fin de facilitar la búsqueda al usuario en una curva característica que disponga.

Tabla 47 resultado del purgador

ID	Sigla Comp	Estado	ΔP (bar)	Flujo	QN (l/s)	Q (Nm ³ /h)	d (mm)
1	VS	Cerrado					
1.1	2F						
2	VD	Abierto					
3	3F		1.03	Sónico	25.13	90.45	10.99
4	VD	Abierto					
5	3F		1.03	Sónico	25.13	90.45	10.99
6	VD	Abierto					
7.1	2F						
7	VS	Cerrado					

7. Análisis de resultados

Como ya se ha comentado en los resultados, la propuesta de dimensionado de las curvas ensayadas siempre resulto superior a la propuesta de las curvas comerciales de los fabricantes disponibles, esto se debe a que los fabricantes ofrecen capacidades irreales al comportamiento real de la ventosa. En las conclusiones de los trabajos de las caracterizaciones realizadas de las ventosas, se indica que el caudal de expulsión ensayado resulto inferior al comercial para los mismos valores de presión, sin producirse cierre dinámico en el intervalo ensayado, seis ventosas presentaron una capacidad inferior a la ofrecida con una desviación de entre 10,2 y 62%. En el caso del ensayo de admisión las ventosas en las que el caudal ensayado resulto inferior al comercial ofrecido para los mismos valores de presión fueron ocho ventosas, con una desviación estándar de entre el 4,3% y el 41,9% comparando las curvas comerciales y ensayadas en el caudal en condiciones normales. Según las conclusiones obtenidas en los resultados de la caracterización de las ventosas, se llega a entender como la dimensión propuesta de las ventosas de cada una de las pruebas ejecutadas en el programa fue mayor en las curvas ensayadas contra las curvas comerciales. Cabe recordar que en algunos ensayos de admisión las condiciones termodinámicas no fueron las ideales.

La propuesta de posicionamiento del perfil insertado como ejemplo presentó los resultados acordes a lo explicado en el capítulo de los fundamentos de posicionamiento, una ventaja que presenta el

programa es la posibilidad de modificar los resultados antes de importarlos el posterior cálculo y, además, el usuario tiene la posibilidad de observar gráficamente el perfil de conducción insertado y el perfil resultado de la propuesta del programa.

En general todos los resultados de las opciones del cálculo de vaciado resultaron coherentes de acuerdo con los criterios definidos, se observó que la opción de Kv automático presentó unos resultados, con respecto a coeficientes de caudal Kv caracterizado previamente, inferiores en el caudal drenado de las válvulas de desagüe con respecto a las demás opciones. Cabe mencionar que depende tanto del valor de contrapresión como también en el número de vueltas de la válvula.

Las opciones “%Rotura” y “VM” del cálculo de rotura presentaron unos resultados coherentes y la distribución de hizo de acuerdo con lo explicado en el capítulo de fundamentos, mientras que los resultados de la propuesta “AWWA” parecen un poco desfasados y esto se debe a que no definen claramente la determinación del término de la pendiente de la ecuación (25), no se define si se trata de una expresión exclusiva para tramos de pendiente única. El programa asume la pendiente como la diferencia de longitud y cotas entre la ventosa a calcular y la rotura presente, sin considerar los cambios de pendientes que se presentan en los tramos intermedios entre los elementos analizados, por lo que se puede decir que no es un resultado completamente real. Se puede suponer que la propuesta de AWWA lo interpreta de otra manera o es una ecuación única para tramos de pendiente invariable.

Como ya se ha mencionado en los resultados, al parecer la curva comercial de admisión del fabricante 8.1 presenta unos coeficientes de la ecuación erróneos o la curva, en sí, presenta datos erróneos. La curva disponible se analizó y los coeficientes insertados en el programa coinciden con la curva comercial, así que se puede decir que los datos de la curva son erróneos, las curvas de cada uno de los diámetros observados son capaces de admitir un caudal muy bajo.

El cálculo del llenado presentó resultados coherentes, aunque solo cuenta con la opción de cálculo en función de la velocidad de llenado, además la distribución de caudales de expulsión de aire para todas las ventosas es el resultado del caudal total de llenado. Se recomienda un análisis de distribución a incorporar al programa considerando ventosas activas y simultaneidad de las ventosas que actúan en la fase de llenado o definir el orden de cierre de las ventosas para asimilar una distribución más idónea. El programa garantiza la seguridad en la operación de llenado con la propuesta presentada, aunque hay que decir que puede llegar a ser una propuesta sobredimensionada.

El cálculo del purgador presentó las dimensiones en las que se encuentra el orificio de un purgador (1,6 mm a 25 mm). Adicionalmente el programa presenta resultados de tipo de flujo, del caudal en condiciones normales y el diferencial de presión con los cuales puede corroborar la dimensión del orificio del purgador en una curva comercial o una curva disponible por el usuario. En las mejoras al programa, se pueden incorporar curvas características de purgadores con el fin de definir las dimensiones basadas en curvas comerciales y/o ensayadas.

7.1 Comparación con los softwares existentes

El perfil ejemplo ejecutado y analizado en el programa se comparó con los resultados de los softwares existentes, se definieron los mismos criterios y se insertó el mismo perfil de conducción simple.

7.1.1 Vent-O-Mat

Al parecer el software de Vent-O-Mat es completo, presenta propuesta de posicionamiento de ventosas, sin posibilidad de posicionar VD automáticamente, presenta resultados del caudal drenado por rotura o por las válvulas de desagüe y propone un dimensionamiento en las ventosas posicionadas.

Inicialmente se insertaron los criterios similares, en su mayoría, a los definidos en el perfil ejemplo. Aparentemente el cálculo del vaciado lo hace de acuerdo con el caudal de operación del sistema y la rotura de acuerdo con el porcentaje de rotura (10%). Por lo cual se comparan los resultados con las opciones de "QVacTub" para el caso del cálculo de vaciado y la opción "%Rotura" para el caso del cálculo de rotura con los resultados del programa. El software solicita la velocidad de llenado, pero actualmente no presenta análisis de llenado en su última versión, aunque mencionan que la próxima versión incluirá dicho análisis.

En la Figura 25 se presentan los criterios definidos para el análisis de vaciado y rotura que realiza el software. Criterios similares a los seleccionados en las opciones mencionadas en el programa.



The screenshot shows the Vent-O-Mat software interface with the following settings:

- Project name:** Tema_1
- Designer:** David G. **Date:** 31 mayo 2020
- Fluid characteristics:**
 - Fluid type: Water
 - Operating flow rate: 600 l/s
 - Filling velocity: 0.4 m/s
 - Temperature: 15 °C
 - Elevation to calculate the vacuum pressure: 2000 m
- Pipe characteristics:**
 - Pipe material: Ductile iron
 - Estimated pipe rupture as a % of pipe area: 10%
 - Allowable pipe roughness (k): 0.5 mm
- Air valve selection criteria:**
 - Atmospheric negative differential pressure: 0.25 bar
 - The spacing between valves releasing air under operating pressures is set at: 100 m
 - Standardize the valve size: No Standardized
 - Valve pressure class: Calculate automatically
- Buttons:** [Print data], [Process data], [Results]

Figura 25 criterios definidos en Vent-O-Mat. Fuente: captura de (AVENG, 2013)

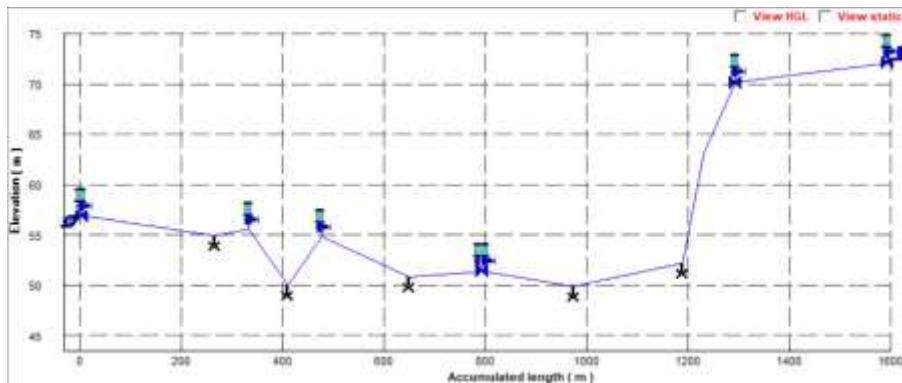


Figura 26 perfil resultado de Vent-O-Mat. Fuente: captura de (AVENG, 2013)

En la Figura 26 se puede observar el resultado de posicionamiento propuesto por el software. En primer lugar, el perfil tiene que iniciar con una estación de bombeo o un depósito, si es que el sistema es a gravedad, no hay posibilidad de estudiar un tramo desde válvulas de seccionamiento y no hay posibilidad de definir el estado de las válvulas de seccionamiento ni de las válvulas de desagüe. Las válvulas de desagüe se posicionan y se dimensionan manualmente, a diferencia de la opción del programa presente del trabajo. En el resultado podemos observar que el posicionamiento de ventosas es similar, aunque en el P.K. 1231 m no se posiciona una ventosa bifuncional considerando que se trata de una disminución de pendiente ascendente y además, para las VS con pendientes positivas aguas arriba, no se proponen VD como si lo hace el programa propuesto.

Vnet-O-Mat es el único software que presenta resultados del caudal drenado, lo interesante es que, para el análisis del vaciado presenta resultados de desagüe aguas arriba y aguas debajo de cada una de las VD, a diferencia del programa propuesto que presenta el caudal total y máximo drenado para cada una de las válvulas de desagüe (VD). No define la sección de tramos ni el porcentaje de desagüe de cada una de las VD, aunque observando y comparando los resultados, son mayores en el software que en el programa propuesto por el presente proyecto.

Observando los resultados de la rotura, se puede prestar atención a que utiliza las VD como la rotura y aparentemente supone el porcentaje como la apertura de la válvula de desagüe posicionada, por lo que presenta 5 roturas y no hay posibilidad de definir el punto donde se presenta la rotura, simplemente asume las VD, cada una, como una rotura del 10%. A diferencia, el programa propuesto fija el punto de la rotura y supone que ese es la única posibilidad de drenaje, cerrando todas las VD. Bajo esta comparativa de propuestas de cálculo es lógico que los resultados de rotura del software sean superiores a los presentados por el programa propuesto. (ver

[Figura 27](#)).

En la

[Figura 28](#) se puede observar que la dimensión de las ventosas es mayor debido a que los caudales de la rotura son excesivos.

En la Figura 29 se puede observar la dimensión inferior con respecto a los resultados de la Figura 28, esto se debe a que en dicha figura se presenta la propuesta de dimensionamiento sin incluir la rotura en la tubería.

Station	Inlet up-stream	Inlet downstream	Drain up-stream	Drain downstream
1	0.00 m ³ /hour	0.00 m ³ /hour	0.00 m ³ /hour	3161.31 m ³ /hour
2	0.00 m ³ /hour	1976.41 m ³ /hour	0.00 m ³ /hour	3161.31 m ³ /hour
3	0.00 m ³ /hour	0.00 m ³ /hour	0.00 m ³ /hour	0.00 m ³ /hour
4	2189.61 m ³ /hour	6199.96 m ³ /hour	477.16 m ³ /hour	2923.21 m ³ /hour
5	0.00 m ³ /hour	0.00 m ³ /hour	0.00 m ³ /hour	0.00 m ³ /hour
6	4025.00 m ³ /hour	3411.34 m ³ /hour	1310.97 m ³ /hour	2950.01 m ³ /hour
7	0.00 m ³ /hour	0.00 m ³ /hour	0.00 m ³ /hour	0.00 m ³ /hour
8 *	1416.97 m ³ /hour	11551.99 m ³ /hour	489.90 m ³ /hour	741.13 m ³ /hour
9	0.00 m ³ /hour	0.00 m ³ /hour	0.00 m ³ /hour	0.00 m ³ /hour
10	0.00 m ³ /hour	0.00 m ³ /hour	0.00 m ³ /hour	0.00 m ³ /hour
11	0.00 m ³ /hour	0.00 m ³ /hour	0.00 m ³ /hour	0.00 m ³ /hour
12	11451.99 m ³ /hour	0.00 m ³ /hour	5415.69 m ³ /hour	0.00 m ³ /hour
13	1820.76 m ³ /hour	0.00 m ³ /hour	2469.92 m ³ /hour	0.00 m ³ /hour
14	9425.24 m ³ /hour	0.00 m ³ /hour	2454.51 m ³ /hour	0.00 m ³ /hour

* - All valve required on upstream and downstream side

Figura 27 caudales drenados Vent-O-Mat. Fuente: captura de (AVENG, 2013)

REQUIRED AIR VALVES ON PIPELINE

Number	Description (UH)	Description (DH)	Size (UH)	Size (DH)
1	No air valve required	RRE Double Acting air valve	-	150 mm
2	No air valve required	RRE Double Acting air valve	-	150 mm
3	No air valve required	No air valve required	-	-
4	RRE Double Acting air valve	No air valve required	200 mm	-
5	No air valve required	No air valve required	-	-
6	RRE Double Acting air valve	No air valve required	200 mm	-
7	No air valve required	No air valve required	-	-
8	RRE Double Acting air valve	RRE Double Acting air valve	80 mm	80 mm
9	No air valve required	No air valve required	-	-
10	No air valve required	No air valve required	-	-
11	No air valve required	No air valve required	-	-
12	RRE Double Acting air valve	No air valve required	250 mm	-
13	RRE Double Acting air valve	No air valve required	150 mm	-
14	RRE Double Acting air valve	No air valve required	200 mm	-

Figura 28 propuesta de dimensión de Vent-O-Mat (rotura y vaciado). Fuente: captura de (AVENG, 2013)

Number	Description (UH)	Description (DH)	Size (UH)	Size (DH)
1	No air valve required	RRE Double Acting air valve	-	150 mm
2	No air valve required	RRE Double Acting air valve	-	150 mm
3	No air valve required	No air valve required	-	-
4	RRE Double Acting air valve	No air valve required	150 mm	-
5	No air valve required	No air valve required	-	-
6	RRE Double Acting air valve	No air valve required	200 mm	-
7	No air valve required	No air valve required	-	-
8	RRE Double Acting air valve	RRE Double Acting air valve	80 mm	80 mm
9	No air valve required	No air valve required	-	-
10	No air valve required	No air valve required	-	-
11	No air valve required	No air valve required	-	-
12	RRE Double Acting air valve	No air valve required	150 mm	-
13	RRE Double Acting air valve	No air valve required	150 mm	-
14	RRE Double Acting air valve	No air valve required	150 mm	-

Figura 29 propuesta de dimensión de Vent-O-Mat (vaciado). Fuente: captura de (AVENG, 2013)

En la Figura 30 se presentan los resultados de las pendientes de los tramos y la relación de velocidad crítica con respecto a la velocidad de flujo. Si la velocidad crítica supera a la velocidad del flujo, no es posible transportar la bolsa de aire en la fase de llenado. Como el análisis del llenado no se presenta aun por el software este es el único dato relevante con relación al llenado y cabe decir que el software propuesto en el presente proyecto no cuenta con dicho resultado.

CRITICAL VELOCITY ANALYSIS FOR HYDRAULIC REMOVAL OF AIR

Number	Begin distance	End distance	Slope	Critical velocity
1	0.000	5.000	0.0000	V > Vc
2	5.000	265.430	-0.0076	V > Vc
3	265.430	334.400	0.0091	-
4	334.400	410.000	-0.0729	V < Vc
5	410.000	476.880	0.0711	-
6	476.880	650.000	-0.0328	V < Vc
7	650.000	795.000	0.0039	-
8	795.000	974.280	-0.0085	V > Vc
9	974.280	1190.000	0.0108	-
10	1190.000	1231.000	0.2659	-
11	1231.000	1295.000	0.1103	-
12	1295.000	1594.000	0.0065	-
13	1594.000	1595.000	0.1350	-

Figura 30 velocidad crítica. Fuente: captura de (AVENG, 2013)

7.1.2 BERMAD

El software de Bermad es completo, aunque menos que el software Vent-O-Mat, presenta propuesta de posicionamiento de ventosas, con posibilidad de posicionar VD automáticamente (sin dimensión automática) y propone un dimensionamiento de las ventosas propuestas.

Inicialmente se insertaron los criterios similares, en su mayoría, a los definidos en el perfil ejemplo del programa. Suponemos que el cálculo del vaciado lo hace de acuerdo con el caudal de operación del sistema y la rotura de acuerdo con el porcentaje de rotura (12%). Por lo cual se comparan los resultados con las opciones de "QVacTub" para el caso del cálculo de vaciado y la opción "%Rotura" para el caso del cálculo de rotura con los resultados del programa. A diferencia del software de Vent-O-Mat, aquí es posible posicionar las VD y se debe fijar el diámetro general de todas las VD. El programa propuesto en el presente proyecto cuenta con la opción automática de posicionamiento y de dimensionamiento de las VD (ver Figura 31).



The screenshot shows the 'Analysis' section of the BERMAD software. It includes several input fields and checkboxes for parameters like 'Filling velocity', 'Damage rate', 'Vacuum accuracy', and 'Max. distance'. Below this is a 'Waterworks' table with columns for 'Select', 'Model', 'Material', 'Diameter', and 'Preferred connection'.

Select	Model	Material	Diameter	Preferred connection
<input checked="" type="checkbox"/>	C100-1	Quartz Iron	100	90° BSP (M), PN11
<input checked="" type="checkbox"/>	C10	Fluorin	10	90° BSP (M), PN11
<input checked="" type="checkbox"/>	C10	Fluorin	10	90° BSP (M), PN11
<input checked="" type="checkbox"/>	C10	Quartz Iron	10	18° BSP (M)
<input checked="" type="checkbox"/>	C10 Multistore	Quartz Iron	10	18° BSP (M)
<input checked="" type="checkbox"/>	C15	Quartz Iron	15	18° BSP (M)
<input checked="" type="checkbox"/>	C15-M	Quartz Iron	15	18° BSP (M)
<input checked="" type="checkbox"/>	A10	Fluorin	10	90° BSP (M), PN11
<input checked="" type="checkbox"/>	A15	Fluorin/Steel	15	90° BSP (M), PN11

Figura 31 criterios definidos en BERMAD. Fuente: captura de (BERMAD, 2013)

En la Figura 32 se puede observar el resultado de posicionamiento propuesto por el software BERMAD. En primer lugar, el perfil tiene que iniciar con una estación de bombeo o un depósito, si es que el sistema es a gravedad, no hay posibilidad de estudiar un tramo desde válvulas de seccionamiento y no hay posibilidad de definir el estado de las válvulas de seccionamiento ni de las válvulas de desagüe. En el resultado podemos observar que el posicionamiento de ventosas es similar, aunque en los P.K.= 334,40m y 1231 m, no posicionan ninguna ventosa, debería ser así debido a que a que se trata de un punto alto y un punto con una disminución de pendiente ascendente, respectivamente. Además, para las VS con pendientes positivas aguas arriba, no se proponen VD como si lo hace el programa propuesto en el trabajo.

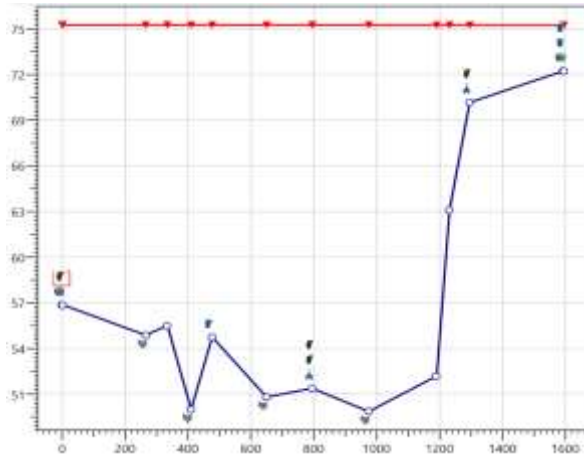


Figura 32 Perfil resultado de BERMAD. Fuente: (BERMAD, 2013)

En la Figura 33 se presenta la dimensión y la cantidad de ventosas posicionadas en el perfil, además presenta el tipo de material de la ventosa, el tipo de conexión y algunas sugerencias adicionales. Este tipo de datos son importantes para observar la resistencia mecánica de la ventosa y diferenciar la dimensión de la conexión con la dimensión del orificio de la ventosa.

Catalog ID	Name	Quantity	Material	Diameter	Connection Type	Coating	Valve Outlet	Additional
WW-4'-C7D-SF-C-D-16-EV	Combination 1	1	Ductile Iron	100	ISO 16	Epoxy Blue Ultraviolet Protection	Down Outlet	Surge Protection
WW-2'-C3D-SF-F-S-BP-WD	Combination A	1	Plastic	50	BSP (M) PN16	None	Side Outlet	Surge Protection
WW-3'-C7D-00-C-D-16-EV	Combination 1	1	Ductile Iron	80	ISO 16	Epoxy Blue Ultraviolet Protection	Down Outlet	None
WW-6'-C7D-SF-C-M-16-EV	Combination 2	2	Ductile Iron	150	ISO 16	Epoxy Blue Ultraviolet Protection	Mushroom Outlet	Surge Protection

Figura 33 cantidad y dimensión de ventosas en el perfil. Fuente: (BERMAD, 2013)

7.1.3 ARI

El software de ARI es un poco básico, todos los componentes hay que definirlos y los criterios a elegir son la velocidad de llenado y el porcentaje de rotura de la tubería. Con estos dos criterios definidos el software posiciona y dimensiona únicamente las ventosas.

En la Figura 34 se presenta el resultado presentado por el software de ARI, se puede observar que en varios puntos donde se requieren ventosas, el software considera que no requiere ningún tipo de elemento, para las válvulas de seccionamiento no define ningún elemento aguas arriba ni aguas abajo. En el resultado posicionó dos ventosas DN46 y una ventosa DN40. El software es más limitado que los dos anteriores y mucho más limitado que el programa propuesto en este trabajo.

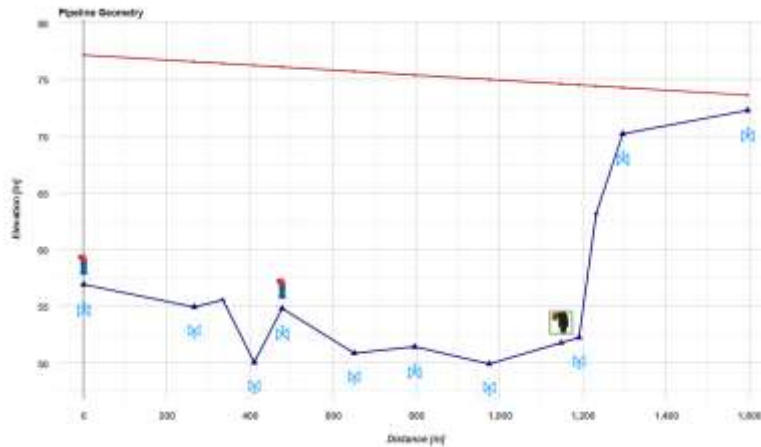


Figura 34 perfil resultado del software ARI. Fuente: (ARIAVCAD, n.d.)

7.1.4 ValMatic

El software de ValMatic es el más limitado de todos, no hay posibilidad de añadir componentes y únicamente posiciona las ventosas con el perfil insertado por el usuario, añadido manualmente. Los únicos criterios para definir son el caudal y la clasificación de las ventosas, además de otros elementos como el material, espesor, diámetro y demás de la tubería.

En la Figura 35 se presenta el resultado presentado por el software de ValMatic, se puede observar que posicionalmente las ventosas coinciden con el programa propuesto, aunque la clasificación no coincide de la misma manera. Hay que valorar que es el único software que coincide con el posicionamiento de las ventosas, sin considerar los componentes adicionales por las válvulas de seccionamiento, debido a que en este software no es posible añadir componentes en el perfil.

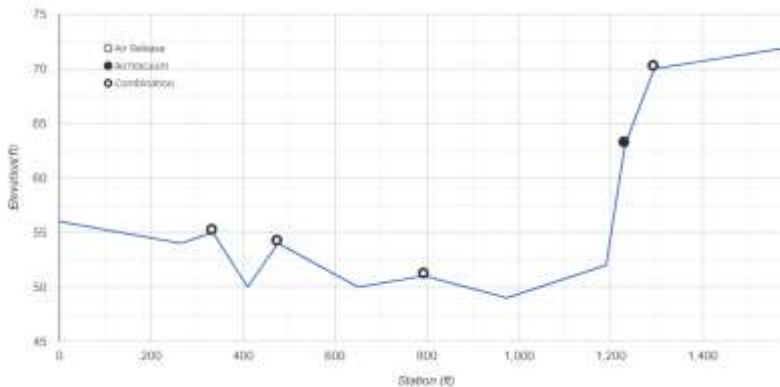


Figura 35 perfil resultado del software ValMatic. Fuente: (VALMATIC, n.d.-a)

8. Conclusiones y Desarrollos Futuros

Sin lugar a duda este trabajo presenta una alternativa de solución a las consecuencias catastróficas que ocasiona el aire en las tuberías simples, no en redes ramificadas o malladas. Ofrece una propuesta de posicionamiento y de dimensionamiento de las ventosas y de las válvulas de desagüe con el fin de mitigar los impactos en las operaciones normales de un sistema, es decir, en las operaciones de llenado y de vaciado, así como en la inesperada rotura de una tubería, todo ello basado en resultados previos de caracterización de funcionamiento de válvulas de desagüe y de ventosas.

Se han estudiado y analizado softwares existentes como punto de partida con el fin de aplicar e integrar sus funciones en el programa propuesto. Se han comparado los resultados calculados por el programa propuesto con los resultados de los softwares estudiados. El programa propuesto es una versión mejorada de los softwares existentes, debido a que, incluye una serie de opciones de cálculo de la operación de vaciado, alternativas de cálculo de rotura, cálculo de dimensiones de orificio de purgadores, y, además, presenta alternativas de dimensionamiento de curvas comerciales y curvas ensayadas de ventosas.

En resumen, el programa es una versión mejorada con respecto a los softwares existentes, debido a que, aborda situaciones completas en la fase de posicionamiento y dimensionamiento de ventosas, válvulas de desagüe y purgadores:

- Posiciona las ventosas, las válvulas de desagüe y los purgadores de acuerdo con las recomendaciones de la AWWA y algunos criterios predefinidos.
- Se puede definir el estado (abierto o cerrado) de las válvulas de desagüe y de las válvulas de seccionamiento.
- Calcula el caudal drenado de las válvulas de desagüe
- Calcula el caudal de aire admitido por las ventosas con diferentes opciones de cálculo en la operación de vaciado (velocidad de vaciado en las válvulas de desagüe, caudal de vaciado en las válvulas de desagüe, velocidad de vaciado en la tubería, caudal de vaciado en la tubería y coeficiente de caudal Kv de las válvulas de desagüe).
- Calcula el caudal de aire admitido por las ventosas, con diferentes opciones de cálculo en la rotura de la tubería (porcentaje de rotura de la tubería, simula la rotura como una válvula mariposa y según la ecuación propuesta por AWWA).
- Calcula el caudal de aire expulsado por las ventosas en la operación de llenado, basado en la velocidad de llenado.
- Dimensiona el orificio del purgador y calcula el caudal de aire expulsado por el purgador.
- Propone una dimensión de las ventosas de acuerdo con diversas curvas características de ventosas de admisión o expulsión de ensayos previos y curvas características de ventosas de admisión o expulsión comerciales ofrecidas por los fabricantes.
- Presenta la alternativa de adicionar curvas características de ventosas ensayadas o curvas características comerciales.

Uno de los objetivos del trabajo es el correcto posicionamiento de las ventosas y las válvulas de desagüe en una conducción siempre. El posicionamiento de los componentes mencionados anteriormente es tan importante como su correcto dimensionamiento, de hecho, es el primer proceso previo al análisis y al cálculo, una propuesta ilógica o errónea presenta una alternativa ineficaz en el

sistema. El programa propuesto en este trabajo plantea un posicionamiento de las ventosas y de las válvulas de desagüe, basado en recomendaciones de la AWWA y en análisis lógicos, predefinidos e incorporados en el programa. Uno de ellos, por ejemplo, es la definición de los componentes aguas arriba y aguas abajo de las válvulas de seccionamiento, considerando las pendientes de los tramos. Haciendo una comparación del posicionamiento con los softwares existentes, se llega a la conclusión de que el programa propuesto en este trabajo ofrece una alternativa completa, acorde a las recomendaciones de AWWA y, además, considera situaciones adicionales que garantizan, aun más, el resultado presentado.

Se concluye que las opciones de cálculo son diversas, a fin de mitigar cualquier posibilidad de que el aire genere efectos adversos en las tuberías en las operaciones de vaciado. La operación con mayores opciones de cálculo es la de vaciado, su finalidad es descartar las depresiones y por consiguiente la posibilidad de colapso en la tubería, dicha operación de cálculo (vaciado) cuenta con cinco opciones en función de los datos definidos por el usuario, esta manera posibilita al usuario el análisis desde diferentes perspectivas.

- La opción de cálculo de la velocidad de vaciado en las válvulas de desagüe y el caudal de vaciado en las válvulas de desagüe tienen relación y parten del valor definido para las válvulas de desagüe en general y la sección de tramos definida por las válvulas de seccionamiento cerradas.
- La opción de cálculo de la velocidad de vaciado en la tubería y el caudal de vaciado en la tubería tienen relación. El cálculo parte de la definición del valor definido por el usuario y el porcentaje drenado por cada una de las válvulas de desagüe de los tramos definidos por las válvulas de seccionamiento cerradas.
- La opción de cálculo con respecto a los coeficientes de caudal Kv de las válvulas de desagüe parte de la definición del coeficiente de cada una de las válvulas de desagüe de modo manual o automático (basado en resultados de válvulas de desagüe ensayadas).

La operación de rotura cuenta con tres opciones de cálculo cada una de ellas con diferentes criterios definidos por el usuario.

- Se puede concluir que las opciones “%Rotura” y “VM” presentan resultados coherentes, aunque la distribución del caudal de aire admitido para cada ventosa en el caso de existir varias en funcionamiento simultáneo, es el resultado del caudal drenado por cada una de ellas como si estuviera funcionando ella sola, por lo que el dimensionado estaría del lado de la seguridad. Sería interesante para futuras propuestas, una distribución más real y no dimensionar con los caudales la máxima posible.
- En el caso de la opción “AWWA” se concluye que presenta resultados desfasados, esto se debe a lo que ya se ha comentado, el término de la pendiente de la ecuación (25) representa un valor importante. Los resultados presentan valores superiores dado que considera roturas francas tramo a tramo frente a las otras opciones de cálculo en las que es posible considerar roturas parciales (no francas).

En el caso del cálculo de la operación de llenado, para futuras investigaciones se recomienda fijar criterios de distribución del caudal de aire expulsado por las ventosas. El criterio puede ser basado en experiencia del propio diseñador o por clasificación de cierre o la inactividad de ciertas ventosas. La

infinidad de alternativas es la que define la complejidad de dicha distribución. Se concluye que el programa garantiza la seguridad en la operación de llenado al hacer una distribución del caudal de aire expulsado máximo a cada ventosa, pero puede ser un resultado que dé lugar a ventosas sobredimensionadas.

Se concluye que los cálculos del purgado representan datos lógicos considerando la dimensión del orificio, además presenta datos adicionales con el fin de que el usuario tenga la posibilidad de seleccionar un purgador desde la curva característica de algún fabricante. Se recomienda integrar en el programa las curvas comerciales y ensayadas de los purgadores con el fin de comparar los resultados de la ecuación propuesta con los resultados de las curvas características insertadas.

Cabe mencionar que el programa no selecciona en sí la dimensión adecuada de cada una de las ventosas de un perfil, lo que hace es proponer varias opciones entre ventosas de diferentes dimensiones de diversos fabricantes, tanto de curvas comerciales como de curvas procedentes de ensayos. Algunas de las ventosas de expulsión ensayadas incluyen el valor de la presión en las que se presenta el cierre prematuro. El programa brinda una gran cantidad de alternativas de selección, pero el que finalmente selecciona la dimensión adecuada de la ventosa es el usuario, eso sí, basado en una gran variedad de alternativas propuestas por el programa. Además, posibilita la integración de nuevas curvas características de ventosa que el usuario disponga.

Ya se ha mencionado, pero es importante recordarlo, en algunos fabricantes hay limitaciones de curvas, ya sea ensayadas o comerciales, es decir que es posible que un fabricante tenga una curva de un único diámetro y ese puede ser el mínimo. Esto es importante debido a que, para el resultado de un caudal pequeño de admisión o de expulsión el programa selecciona la dimensión mínima de cada fabricante, esto quiere decir que si un fabricante únicamente tiene incorporada la curva de DN150 en el programa para un caudal muy bajo propone dicha dimensión.

El programa hace el cálculo y la posterior propuesta de dimensionamiento de un perfil simple de conducción. Es una alternativa inicial adecuada, pero para desarrollos futuros será adecuado un programa que analice, simule, calcule y dimensione redes malladas y ramificadas de conducción.

El programa despreja las pérdidas de carga por fricción dado que se trabaja con velocidades de llenado y velocidades de vaciado bajas, con el fin de tener unas operaciones controladas. Sin embargo, el programa calcula la resistencia para cada tramo del perfil de conducción. Para desarrollos futuros será interesante incluir en la fase de cálculo las pérdidas de carga por fricción para de esta manera obtener resultados precisos del caudal de aire en admisión y en expulsión.

El programa requiere implementar un criterio estándar de distribución del caudal de aire, ya sea admitido o expulsado, reconociendo la actuación simultánea de las ventosas. Dicho criterio basado en el porcentaje de caudal de aire por cada ventosa ya sea admitido o expulsado, contemplando la simultaneidad de las ventosas activas. Además, se recomienda incluir otros aspectos importantes que intervienen en el cálculo como lo son: la posición de las ventosas, la dirección de la lámina de agua, la localización de las burbujas de aire y las demás consideraciones necesarias siguiendo protocolos de llenado y de vaciado de las conducciones.

Es necesario conocer la velocidad crítica en el cálculo de la operación de llenado. Esto es clave en el sentido en que si la velocidad crítica supera a la velocidad del flujo, no es posible transportar la bolsa

de aire y por consiguiente expulsarlo, en este caso crítico se produce un tapón (bolsa de aire) que imposibilita el llenado de una conducción al impedir el paso del flujo.

La versión del programa propuesto no incluye curvas características, ni comerciales ni ensayadas, de purgadores, aunque es posible incluir curvas de ventosas. Para desarrollos futuros se recomienda mejorar la función de incluir nuevas curvas características de ventosas y además integrar las curvas características de purgadores y comparar los resultados de la fase de cálculo de purgador con el dimensionamiento basado en dichas curvas a incluir.

Añadir un módulo de simulación, no modelo pistón, como comprobación del cálculo y el dimensionamiento propuesto. El programa realmente realiza un predimensionamiento del lado de la seguridad debido al criterio establecido de distribución de caudal de aire a las ventosas, siendo este el máximo posible (no incluye simultaneidad de actividad de varias ventosas). Para la fase de simulación se recomienda tener en cuenta los efectos de arrastre del aire y la circulación a contracorriente de agua, además será interesante calcular los tiempos de vaciado, tiempo de llenado y de alguna manera, observar dinámicamente el proceso de principio a fin de la operación de llenado y de la operación de vaciado.

9. Referencias bibliográficas

- ARI. (n.d.). *ARI-Solver* (7.0). Retrieved June 28, 2021, from <https://www.ariavcad.com/#/empty>
- ARIAVCAD. (n.d.). *Herramientas de Planificación*. Retrieved July 30, 2021, from <https://www.arivalves.com/es/design-tools>
- Arrué Burillo, P., Manuel, A., Sedó, R., García, J., & García, S. (2019). Caracterización experimental de flujos de admisión y expulsión de aire en ventosas. *TECNOAGUA*, 35, 1–9. www.tecnoaqua.es
- Arrué, P., Romero, A. M., Espert, V., Garcia-Serra, J., & Ponz, P. (2017). *Caracterización de ventosas de admisión y expulsión de aire*.
- AVENG. (2013). *VENT-O-MAT CATT PROGRAM* (4.1.0).
- AWWA. (2001). *Air-Release, Air/Vacuum & Combination Air Valves* (Library of Congress Cataloging, Ed.; 1st ed., Vol. M51).
- BERMAD. (2013). *Software BERMAD AIR VALVES*.
- BERMAD. (2014). *BERMAD AIR Manual de instrucciones*.
- BERMAD WEB. (2021, July 30). *Herramientas - Bermad*. <https://www.bermad.com/es/herramientas/>
- Castillo, Q., Iglesias, P., & Garay, J. (2014). *Determinación de las características de una ventosa comercial mediante técnicas CFD*.
- EMIMET. (2017). *Caracterización de válvulas (banco de ensayos de Albalat dels Sorells, Valencia)*.
- EMIMET. (2018). *Caracterización de válvulas*. 1–21.

- EMIMET. (2020). *Propuesta de aplicación para el cálculo de llenados y vaciados de tuberías*.
- Espert, V., & García, G.-S. J. (2007). *Dimensionado de ventosas para el llenado y vaciado controlados de una conducción*. www.ita.upv.es
- Fuertes, V., Izquierdo, J., Iglesias, P., Cabrera, E., & Garcia-Serra, J. (1997). *Llenado de tuberías con aire atrapado*.
- Fuertes, V. S. (1989). Tema 6: FENÓMENOS TRANSITORIOS CON PRESENCIA DE AIRE ATRAPADO. In *Fenómenos Transitorios en Sistemas Hidráulicos de Fluidos* (pp. 1–87).
- Fuertes, V. S. (1990). Tema 7: LAS VENTOSAS EN LAS REDES HIDRÁULICAS. In *Fenómenos Transitorios en Sistemas Hidráulicos de Fluidos*.
- Gandarillas Prieto, I., & Técnico Regaber -Hidroglobal, D. (n.d.). *Problemas típicos de las ventosas, soluciones técnicas disponibles y criterios de selección de las válvulas de aire*.
- García -Consuegra, G., Fuentes Miquel, V., & Ponz Carcelén, R. (2020). *Análisis de los transitorios hidráulicos generados durante los procesos de llenado y vaciado en instalaciones reales*.
- García-Serra García, J., Esper Alemany, V., Soriano Olivares, J., Arregui de la Cruz, F., & Tejedor Mora, M. J. (n.d.). *Disipadores de energía para controlar el vaciado de conducciones*.
- García-Serra, J. (n.d.). *Flujo incompresible de gases a través de conductos*.
- García-Serra, J. (n.d.). *Fundamentos de cálculo hidráulico* (Instituto Tecnológico del Agua (ITA), Ed.). www.ita.upv.es
- García-Serra, J. (2009). *Curso: Ventosas* (ITA, Ed.; pp. 1–53).
- García-Serra, J. (2010). *Las válvulas en los sistemas de distribución de agua* (Instituto Tecnológico del Agua & Universidad Politécnica de Valencia, Eds.; pp. 1–111).
- ITA (Grupo de Ingeniería y Tecnología del Agua). (n.d.). *Elaboración de un protocolo para el llenado y vaciado de grandes conducciones*.
- Pozos-Estrada, O., Fuentes, O. A., Sánchez, A., Rodal, E. A., & de Luna, F. (2017). Análisis de los efectos del aire atrapado en transitorios hidráulicos en acueductos a bombeo. *Revista Internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*, 33(1–2), 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2015.11.002>
- Romero, A. M., Arrué, P., Garcia-Serra, J., Espert, V., & Biel, F. (2017). *Modelo de llenado de grandes conducciones*.
- Soriano, J., & Conejos, M. P. (2016, December). *Válvulas*.
- VALMATIC. (n.d.-a). *Air Valve Sizing Program Software*. Retrieved July 30, 2021, from <https://www.valmatic.com/resources/software/air-valve-sizing-software>
- VALMATIC. (n.d.-b). *Software del programa de dimensionamiento de válvulas de aire*. Retrieved June 28, 2021, from <https://www.valmatic.com/resources/software/air-valve-sizing-software>

VALMATIC. (2018). *Theory, Application, and Sizing of Air Valves White Paper Theory, Application and Sizing of Air Valves*. www.valmatic.com

VENT-O-MAT WEB. (2021, July 30). *Vent-O-Mat Australia | Air Valves, Pinch Valves, Knife Gates*. https://www.ventomat.com.au/sizing_programhtml