
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN

TESIS

“DISEÑO ÓPTIMO DE CÁMARAS DE AIRE MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS PARA MITIGAR LOS EFECTOS DE TRANSITORIOS HIDRÁULICOS PRESENTADOS POR PARO DE EQUIPO DE BOMBEO.”

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE ING. CIVIL

PRESENTA:

SONIA PAULINA ESPINOSA PERALTA

Asesor

M. en I. Martín R. Jiménez Magaña

Ciudad Nezahualcóyotl, Edo. De México. Octubre 2019.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

El esfuerzo de la realización de este trabajo se lo dedico a mis papás, gracias por su apoyo incondicional a cada paso que doy, siempre han sido mi ejemplo y todos mis logros se los debo a ustedes; a mis hermanos, por sus ánimos y confianza hacia mí; a Beto, por alentarme incansablemente a seguir en los momentos difíciles y a lo largo de este proceso.

Agradezco también al Maestro Martin, por su infinita paciencia y por todas sus enseñanzas, a mis profesores de carrera por su influencia positiva e impulso constante para mi preparación profesional, y a mis amigos por su ayuda desinteresada y motivación para progresar en todos los aspectos de mi vida.

Qué gran orgullo haberme preparado en la UNAM ¡Goya! ¡Universidad!

ÍNDICE.

INTRODUCCIÓN.

1. FENÓMENOS TRANSITORIOS

1.1.	CONCEPTOS INTRODUCTORIOS.	1
1.1.1.	TERMINOLOGÍA.....	1
1.1.2.	CLASIFICACIÓN DE LOS FLUJOS.	5
1.1.3.	TIPOS DE TRANSITORIOS HIDRÁULICOS.	7
1.2.	GOLPE DE ARIETE.....	8
1.2.1.	CAVITACIÓN.	9
1.2.2.	CELERIDAD.	9
1.2.3.	DESCRIPCIÓN FÍSICA DEL GOLPE DE ARIETE.	11
1.2.4.	PULSO DE ZHUKOVSKI.	13
1.3.	CONSECUENCIAS DE TRANSITORIOS EN TUBERÍAS.	14
1.3.1.	SOBREPRESIÓN.	14
1.3.2.	DEPRESIÓN.....	15
1.3.2.1.	<i>COLAPSO DE TUBERÍA.....</i>	<i>16</i>
1.3.2.2.	<i>SEPARACIÓN DE COLUMNA LIQUIDA.</i>	<i>16</i>
1.3.2.3.	<i>ENTRADA DE AIRE EN LA TUBERÍA.</i>	<i>16</i>
1.3.3.	CALIDAD DEL AGUA.	17
1.3.4.	SOBREVELOCIDAD EN LAS MÁQUINAS.....	18
1.4.	ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS EXISTENTES PARA MITIGAR TRANSITORIOS.....	19
1.4.1.	TORRE DE OSCILACIÓN.	19
1.4.2.	CÁMARAS DE AIRE.....	20
1.4.3.	TANQUE UNIDIRECCIONAL.....	22
1.4.4.	TANQUE BIDIRECCIONAL.....	23
1.4.5.	VÁLVULAS.....	24
1.4.5.1.	<i>VÁLVULAS DE ALIVIO (DE SEGURIDAD).</i>	<i>25</i>
1.4.5.2.	<i>VÁLVULAS ANTICIPADORAS DE GOLPE DE ARIETE.</i>	<i>26</i>
1.4.5.3.	<i>VÁLVULAS DE ADMISIÓN Y EXPULSIÓN DE AIRE.</i>	<i>26</i>
1.4.5.4.	<i>VÁLVULAS ANTIRRETORNO (CHECK).</i>	<i>27</i>
1.4.6.	MEMBRANAS PROTECTORAS O FUSIBLES HIDRÁULICOS.	28

2. ESTADO DEL ARTE DEL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

2.1.	INTRODUCCIÓN Y BREVE REFERENCIA HISTÓRICA.	29
2.2.	PARMAKIAN (1955).	33
2.3.	RUUS E. (1977).	36
2.4.	GUARGA (1985).	38
2.5.	GRAZE & HORLACHER (1989).	41
2.5.1.	CÁMARAS DE AIRE SIN REDUCCIÓN DE DIÁMETRO DE CONEXIÓN.	41
2.5.2.	CÁMARAS DE AIRE CON ORIFICIO DIFERENCIAL.	44
2.6.	ZARCO HERNÁNDEZ (2000; 2002).	45
2.6.1.	MÉTODO SIMPLIFICADO PARA EL PREDIMENSIONAMIENTO DE CÁMARAS DE AIRE....	45
2.6.2.	MÉTODO ANALÍTICO PARA PREDIMENSIONAMIENTO DE DISPOSITIVOS DE CONTROL.	48
2.7.	RAMALINGAM (2007).	52

3. FUNDAMENTOS SOBRE MÉTODOS METAHEURÍSTICOS

3.1.	INTRODUCCIÓN.	58
3.2.	RECOCIDO SIMULADO (SA) (SIMULATED ANNEALING).	62
3.3.	ALGORITMO DE COLONIA DE HORMIGAS (ACO) (ANT COLONY OPTIMIZATION)....	65
3.4.	REDES NEURONALES ARTIFICIALES (ANN) (ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS).....	68
3.5.	ALGORITMOS GENÉTICOS (GA) (GENETIC ALGORITHMS).	72
3.5.1.	DESARROLLO HISTÓRICO.	72
3.5.2.	METODOLOGÍA.	73

4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

4.1.	METODOLOGÍA.	76
4.2.	DATOS DEL PROBLEMA.	78

4.3.	ARMADO DEL ARCHIVO DE DATOS PARA TRANS.....	80
4.4.	APLICACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO.	91
4.4.1.	GENERACIÓN DE POBLACIÓN INICIAL.	91
4.4.2.	ESTIMACIÓN DEL FACTOR DE APTITUD.	92
4.4.3.	SELECCIÓN.....	94
4.4.1.	CRUZA.	95
4.4.1.	MUTACIÓN.....	96
4.4.2.	NUEVA GENERACIÓN.	96
4.5.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.	98
4.5.1.	RESULTADOS.	101
4.5.2.	SELECCIÓN DE CÁMARA DE AIRE ÓPTIMA.	114
 5. CONCLUSIONES.		
 ANEXOS.		
A.	PARMAKIAN.	119
B.	RUUS E.....	123
C.	GRAZE & HORLACHER	129
D.	ESTABILIDAD DE COURANT	140
E.	RESULTADOS DE ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	141
 BIBLIOGRAFÍA.....		154

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1.1-1 Esfuerzo cortante en fluido.....	2
Figura 1.2-1 Bomba que alimenta un depósito de nivel constante. (M. Abreu, Guarga, & Izquierdo, pág. 10).....	11
Figura 1.2-2 Primera (Izq.) y Segunda (Der.) fase del Fenómeno Transitorio. (M. Abreu, Guarga, & Izquierdo)	12
Figura 1.2-3 Tercera (Izq.) y Cuarta (Der.) fase del fenómeno transitorio. (M. Abreu, Guarga, & Izquierdo)	12
Figura 1.2-4 Historiales de alturas piezométricas junto a la válvula de no retorno (línea continua) y en el punto medio de la tubería (punteada). (M. Abreu, Guarga, & Izquierdo).....	13
Figura 1.3-1 Instalación segura frente a las sobrepresiones.....	14
Figura 1.3-2 Instalación con riesgo de rotura frente a las sobrepresiones.....	15
Figura 1.3-3 Tubería en depresión (Izq.) y colapsada (Der.)	15
Figura 1.3-4 Proceso de separación y Reintegración de Columna	16
Figura 1.3-5 Válvula de alivio sumergida.....	17
Figura 1.3-6 Conducción con riesgo de separación de columna y riesgo de entrada de aire.....	18
Figura 1.3-7 Acueducto bien diseñado.....	19
Figura 1.4-1 Esquema de torre de oscilación (Comisión Nacional del Agua, 2015, pág. 39)	19
Figura 1.4-2 Cámara de aire (Chaudhry, 2014, p. 351)	21
Figura 1.4-3 Tanque unidireccional (Comisión Nacional del Agua, 2015, pág. 30)	23
Figura 1.4-4 Esquema de funcionamiento de tanque bidireccional (Comisión Nacional del Agua, 2015, pág. 31).....	24
Figura 1.4-5 Sección transversal y esquema del comportamiento de descarga de una válvula de seguridad.....	25
Figura 1.4-6 Colocación de membrana destructible	28
Figura 2.2-1 Control de niveles en la cámara de aire	35
Figura 2.6-1 Arreglo general de un acueducto con cámaras de aire.	46
Figura 3.1-1 Categorización básica de la inteligencia de enjambre.	60
Figura 3.2-1 Comparación entre las técnicas de templado y revenido.....	62
Figura 3.2-2 Diagrama de flujo del recocido simulado.....	63
Figura 3.2-3.....	64
Figura 3.2-4.....	64
Figura 3.3-1 Experimento de selección del camino más corto por una colonia de hormigas: (a) al comienzo del experimento, (b) al final del experimento	65
Figura 3.3-2 Las hormigas encuentran el camino más corto incluso si éste es bloqueado fortuitamente por un obstáculo.	66
Figura 3.4-1 Neurona Perceptrón de Pitts & McCulloch.....	69
Figura 3.4-2 Modelo de una neurona artificial.....	70
Figura 3.5-1 Ciclo básico del algoritmo genético	74
Figura 3.5-2 Procedimiento de cruza	74
Figura 3.5-3 Proceso de mutación.....	75
Figura 4.2-1 Perfil topográfico de la línea de conducción.....	78
Figura 4.2-2 Dibujo de Instalación de las bombas seleccionadas.	79
Figura 4.3-1 Grafica para obtención de punto de operación.....	83

Figura 4.3-2 Envoltente de sobrepresiones máximas y mínimas con cámara de aire $v=0.33$ $A=0.25$	89
Figura 4.3-3 Envoltente de sobrepresiones máximas y mínimas en la línea sin dispositivo de protección.	90
Figura 4.4-1 Archivo _HEX.csv	92
Figura 4.4-2 Generación de la población inicial y cálculo del factor de aptitud.	94
Figura 4.4-3 Selección mediante técnica de la ruleta	95
Figura 4.4-4 Proceso de cruce con probabilidad del 70%	96
Figura 4.4-5 Proceso de muta con probabilidad asignada del 5%.	97
Figura 4.4-6 Segunda generación	97
Figura 4.5-1 Opciones A y B del análisis de sensibilidad para el factor de aptitud	98
Figura 4.5-2 Opciones C y D del análisis de sensibilidad para el factor de aptitud	99
Figura 4.5-3 Opciones E y F del análisis de sensibilidad para el factor de aptitud.....	100
Figura 4.5-4 Gráfica de presiones durante paro de equipo de bombeo en la cámara óptima obtenida en las versiones 1a y 1b.....	101
Figura 4.5-5 Gráfica de presiones durante paro de equipo de bombeo en la cámara óptima obtenida en las versiones 2A y 2B.	103
Figura 4.5-6 Gráfica de presiones durante paro de equipo de bombeo en la cámara óptima obtenida en la versión 1C.....	104
Figura 4.5-7 Gráfica de presiones durante paro de equipo de bombeo en la cámara óptima obtenida en la versión 2C.....	105
Figura 4.5-8 Gráfica de presiones durante paro de equipo de bombeo en la cámara óptima obtenidas en las versiones 1D y 1E.	106
Figura 4.5-9 Gráfica de presiones durante paro de equipo de bombeo en la cámara óptima obtenida en la versión 2D.....	107
Figura 4.5-10 Gráfica de presiones durante paro de equipo de bombeo en la cámara óptima obtenida en la versión 2E.	109
Figura 4.5-11 Gráfica de presiones durante paro de equipo de bombeo en la cámara óptima obtenida en la versión 1F.	109
Figura 4.5-12 Gráfica de presiones durante paro de equipo de bombeo en la cámara óptima obtenida en la versión 2F.	110
Figura 4.5-13 Generación de la población inicial y cálculo del factor de aptitud en versión 1-A BIS.	112
Figura 4.5-14 Gráfica de presiones durante paro de equipo de bombeo en la cámara óptima obtenida en la versión 1A BIS.	113
Figura 4.5-15 Cámaras de aire instaladas en un acueducto en Linares-Monterrey (Izq.) y Chapala-Guadalajara (Der.)	114
Figura 4.5-16 Cámaras de aire instaladas en un acueducto ubicado en Acapulco, Guerrero.	114
Figura 4.5-17 Variación de la línea de presiones mínimas.....	115

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1.1-1 Presión de saturación del agua a diferentes temperaturas (Massey, 2006, p. 667).....	4
Tabla 1.1-2 Presiones de saturación a 20°C (Massey, 2006, p. 670).....	5
Tabla 1.2-1 Forma de valuar φ para tubos de sección circular.....	10
Tabla 1.2-2 Módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson y magnitud tentativa de la velocidad de propagación a para diferentes materiales de tubería (Comisión Nacional del Agua, 2015).	10
Tabla 4.3-1 Datos para obtener la curva del sistema.....	82
Tabla 4.3-2 Valores para obtener gráfica de eficiencia de las 3 bombas con arreglo paralelo.	83
Tabla 4.5-1 Características de las cámaras de aire óptimas obtenidas en el análisis de sensibilidad.	111
Tabla 4.5-2 Características de la cámaras de aire óptima obtenida en el análisis de sensibilidad 1A-BIS.	113
Tabla 4.5-3 Comparativo de relación de esbeltez por versión.....	114

ANEXOS:

Tabla D-1. Intervalos de tiempo y longitudes viables para satisfacer condición de estabilidad de courant.	140
Tabla D-2 Simulación versión 1.	141
Tabla D-3 Simulación versión 2.	142
Tabla D-4 Simulación versión 3.	143
Tabla D-5 Simulación versión 4.	144
Tabla D-6 Simulación versión 5.	145
Tabla D-7 Simulación versión 6.	146
Tabla D-8 Simulación versión 7.	147
Tabla D-9 Simulación versión 8.	148
Tabla D-10 Simulación versión 9.	149
Tabla D-11 Simulación versión 10.	150
Tabla D-12 Simulación versión 11.	151
Tabla D-13 Simulación versión 12.	152
Tabla D-14 Simulación versión 13.	153

INTRODUCCIÓN.

El fenómeno de los transitorios hidráulicos no siempre recibe la atención que su importancia amerita en la enseñanza y aplicación real en la Ingeniería a pesar de que su consideración es fundamental para garantizar el funcionamiento eficiente y operación segura de cualquier acueducto. Es muy común que en el diseño de un sistema de abastecimiento de agua sean las condiciones estáticas de operación normal las que cotidianamente se usen como base para el diseño del sistema, cuando son mucho más críticas las condiciones hidráulicas durante un transitorio. Es por ello que en el presente trabajo se plantea el diseño óptimo de un acueducto considerando las implicaciones reales de este fenómeno y las medidas de protección necesarias para un correcto funcionamiento.

Los fenómenos transitorios son el resultado de ondas de presión moviéndose a la velocidad del sonido y produciendo cambios en las condiciones de flujo y presión de la conducción. Estas ondas se transmiten y reflejan en el sistema de conducción pudiendo dejar a su paso consecuencias desastrosas si no se toman las previsiones necesarias para mitigar sus efectos. El entendimiento de los fenómenos transitorios es crucial para poder realizar cualquier análisis avanzado, es por ello que en el primer capítulo del presente trabajo se realiza una recopilación de conceptos fundamentales de la hidráulica, como propiedades y clasificación del flujo, así como una clasificación de los fenómenos transitorios y sus efectos en las líneas de conducción, como sobrepresiones extremas que pueden traducirse en daño al equipo de bombeo, válvulas, juntas, uniones y otros componentes, o bien presiones bajas que pueden acarrear problemas como separación de columna, cavitación o colapso de tubería, sin mencionar los riesgos a la salud debido a intrusión de agua al sistema. De todos los transitorios, el más desfavorable que pudiera presentarse en una línea de conducción por bombeo es el golpe de ariete, un fenómeno que por su envergadura se considera como base de diseño en el presente trabajo.

Luego de conocer las consecuencias más importantes del efecto de los transitorios, se presentan al lector algunas medidas que pueden usarse como protección, entre ellas está, evidentemente, usar tuberías y accesorios de un espesor o material tal, que soporten sin problema las sobrepresiones y depresiones máximas, aunque ello resultaría en un sobre costo para la conducción y por ende, inviabilidad en casos donde los transitorios sean excesivos. Otras alternativas consisten en forzar a que los transitorios sean menos bruscos, por ejemplo

INTRODUCCIÓN.

haciendo el paro de los equipos o el cierre de válvulas más lento; instalar equipos variadores de velocidad para propiciar una rampa en el arranque de los equipos de bombeo; realizar maniobras de apertura muy lentas; o bien, usar estructuras especiales que reduzcan los efectos negativos de los transitorios.

Una solución que cubre los requerimientos técnicos y económicos para soportar el golpe de ariete es adaptar el diseño del acueducto considerando estructuras mitigadoras de transitorios, como las torres de oscilación, tanques unidireccionales y bidireccionales, membranas protectoras, válvulas y cámaras de aire, etc. De estos y otros dispositivos se habla en el primer capítulo.

La protección del acueducto ante transitorios tiene que adaptarse a cada caso en particular, considerando características como la longitud de la línea, topografía, dispositivos especiales a usar, etc., dicha protección se consigue generalmente con distintos tipos de estructuras o con combinaciones entre ellas, aunque en la mayoría de las veces el criterio determinante es el económico, aquel que ofrezca la mejor protección posible con el mínimo de inversión inicial, costo de construcción y gastos complementarios como energía eléctrica y mantenimiento.

Uno de los dispositivos más usados para la protección de estaciones de bombeo ante transitorios producidos por un fallo en el suministro eléctrico, es la cámara de aire. Este dispositivo tiene una geometría simple consistente en un depósito cilíndrico cerrado y conectado a la tubería principal, con cierta cantidad de agua y aire comprimido en su interior. Durante la operación normal en régimen permanente el aire está comprimido a una presión igual a la existente en la línea de conducción y no existe flujo entre la cámara y la tubería, pero al presentarse la interrupción de flujo causada por el fenómeno transitorio, la cámara de aire se convierte en un medio para mantener en movimiento el fluido en la conducción y reducir las variaciones de presión de una forma controlada y mucho más lenta de lo que ocurriría sin la presencia de la cámara.

Las características y tipos de cámaras de aire se detallan en el primer capítulo de éste trabajo, pero es en el segundo capítulo donde se presentan los antecedentes del diseño óptimo de este dispositivo, pasando por métodos gráficos ideados en los años 50, hasta métodos analíticos desarrollados en el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Este apartado sintetiza la evolución del diseño de cámaras y contiene un método que sirve para dar cabida al tema primordial de esta tesis, es decir, un método de diseño empleando computación evolutiva.

Con la llegada de las computadoras digitales de alta velocidad y el crecimiento agigantado de la informática, un sinnúmero de mejoras han acontecido en los métodos numéricos y computacionales de cálculo, dichos métodos progresan y mejoran día a día y están logrando una popularidad sin precedentes que es demostrada por numerosos estudios en diversos campos. Sus aplicaciones consideran ya, casi todas las áreas de ciencias, ingeniería e industria; desde manejo de datos, inteligencia computacional, planificación de negocios, bioinformática, medicina, mejoramiento de procesos de fabricación, análisis financieros y por supuesto, han

INTRODUCCIÓN.

Llegado también a abarcar uno de los temas más complicados de la hidráulica, el análisis de transitorios hidráulicos en sistemas de tuberías complejos y largos. A éstas y otras mejoras tecnológicas se refiere el capítulo tres, donde se mencionan sensacionales e interesantes métodos derivados de la inteligencia artificial y se describen antecedentes, características, aplicaciones y metodología de algunos de los más populares. Dentro de los métodos de cómputo evolutivo citados, está el método de algoritmos genéticos (AG), el cual debido a su importancia y eficacia se pondrá en práctica para el desarrollo de este trabajo.

Al final de toda la preparación dada al lector como introducción al tema de diseño a través de los algoritmos genéticos, se presenta en el cuarto capítulo un caso de aplicación real de todos los conceptos revisados, además, se guía paso a paso el cálculo del golpe de ariete a través del programa de simulación TRANS, un software de modelación numérica de fenómenos transitorios y estructuras hidráulicas como cámaras de aire, pozos de oscilación, tanques unidireccionales, válvulas, etc., desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM; dicho software utiliza el método de las características para determinar las envolventes de presión máximas y mínimas, así como otras variables propias del fenómeno transitorio en cuestión.

El cálculo del golpe de ariete obtenido se complementa mediante la implementación del AG para determinar las dimensiones más adecuadas de la cámara de aire que otorguen a la tubería seguridad para operar, además de ofrecer el menor costo posible de inversión para la estructura hidráulica. Para ello se analizan diferentes opciones de cámaras de aire mediante un análisis de sensibilidad, enunciando por supuesto, las ventajas y desventajas de cada elección.

Finalmente en el capítulo quinto se exponen las conclusiones y ventajas del método de cálculo empleado y se plantean futuras líneas de trabajo para mejorar el procedimiento realizado.

Es increíble la cantidad de nuevos métodos de cálculo que existen y el gran desconocimiento que aún conservan en el contexto de la Ingeniería común. En esta tesis se pretende mostrar que aquellos conceptos que al parecer pudieran ser del alcance de problemas teóricos matemáticos o físicos, pueden aplicarse al área de Ingeniería y ofrecer soluciones excelentes sin necesidad de contar con tanta experiencia en temas particulares. Si dichas tecnologías se extendieran, podrían mejorar completamente problemáticas comunes y en mucho menos tiempo de lo que ofrecen los métodos tradicionales de la ingeniería.

1. FENÓMENOS TRANSITORIOS.

1.1. CONCEPTOS INTRODUCTORIOS.

1.1.1. TERMINOLOGÍA.

VISCOSIDAD. Es la facilidad con la que un fluido fluye, mientras lo haga más despacio se habla de una mayor viscosidad.

VISCOSIDAD DINÁMICA. A medida que un fluido entra en movimiento, en él se manifiestan esfuerzos cortantes (T), esta fuerza cortante es la requerida para que una unidad de área de una sustancia se deslice sobre otra, las unidades en las que se mide son N/m^2 (Pa) o lb/ft^2 .

Si se tiene un fluido confinado dentro de dos superficies de frontera, una estacionaria y otra en movimiento, el fluido tendrá la misma velocidad que la superficie de contacto, así la velocidad del fluido que esté en contigua a la superficie estacionaria será igual a cero y la otra tendrá una velocidad de la misma magnitud con la que se desplace dicha superficie. Si la distancia que separa a las dos superficies es pequeña, entonces la tasa de cambio de la velocidad será lineal. El **gradiente de velocidad o tasa cortante** es una medida del cambio de velocidad, y se define como el cociente de la variación de la velocidad entre la variación de la distancia entre ambas superficies de confinamiento ($\Delta v/\Delta y$).

El esfuerzo cortante en el fluido es directamente proporcional al gradiente de velocidad, enunciándose de la siguiente forma:

$$\tau = \eta \left(\frac{\Delta v}{\Delta y} \right)$$

ECUACIÓN 1.1-1

1. FENÓMENOS TRANSITORIOS.

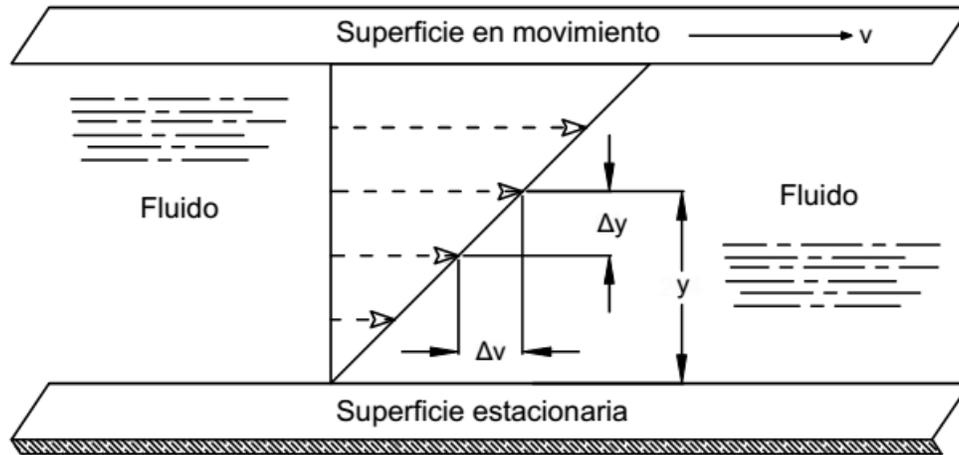


FIGURA 1.1-1 ESFUERZO CORTANTE EN FLUIDO.

A la viscosidad dinámica del fluido se le llama también viscosidad absoluta (η). Sus unidades en el S.I. son $\frac{N \cdot s}{m^2}$ o $Pa \cdot s$ o bien $\frac{kg}{m \cdot s}$. La expresión para obtenerla surge al despejar a η de la Ecuación 1.1-1, como se indica a continuación:

$$\eta = \tau \left(\frac{\Delta y}{\Delta v} \right)$$

ECUACIÓN 1.1-2.

VISCOSIDAD CINEMÁTICA. Es una propiedad del fluido expresada como sigue:

$$\nu = \eta / \rho$$

ECUACIÓN 1.1-3.

(ρ = densidad) Sus unidades son m^2/s (SI) (Mott, 2006, págs. 27-29)

ÍNDICE DE VISCOSIDAD. Nos indica cuanto cambia la viscosidad con la temperatura. “Un fluido con índice de viscosidad alto muestra un cambio pequeño en su viscosidad con la temperatura. Un fluido con índice de viscosidad bajo muestra un cambio grande en su viscosidad con la temperatura”. (Mott, 2006, pág. 33)

FLUIDO NO VISCOSO. “Fluido hipotético con viscosidad cero, llamado anteriormente fluido ideal” (Massey, 2006, p. 28). En la realidad ningún fluido tiene viscosidad nula, aunque esta sea muy pequeña, como en el aire o agua, el esfuerzo cortante se manifestará en el gradiente de velocidad de la superficie de contacto del fluido con los bordes de confinamiento. (Mataix, 1986, pág. 31)

NÚMERO DE REYNOLDS. Osborne Reynolds fue el primero en demostrar que era posible pronosticar el flujo laminar o turbulento si se conoce la magnitud de un número adimensional, que hoy conocemos como Número de Reynolds, el cual define el comportamiento del fluido y las pérdidas de energía. (Mott, 2006)

1. FENÓMENOS TRANSITORIOS.

$$N_R = \frac{vD\rho}{\eta} = \frac{vD}{\nu}$$

ECUACIÓN 1.1-4.

Donde:

- ν = Viscosidad cinemática
- ρ = Densidad del fluido
- η = Viscosidad dinámica
- D = Diámetro del tubo
- v = Velocidad promedio del flujo

El número de Reynolds es la relación de la fuerza de inercia sobre un elemento de fluido a la fuerza viscosa. Los flujos tienen números de Reynolds grandes debido a una velocidad elevada y/o una viscosidad baja, son irregulares y se les conoce como turbulentos. Aquellos fluidos con viscosidad alta y que se mueven a velocidades bajas, tendrán números de Reynolds bajos y tenderán a comportarse en forma laminar. (Mott, 2006, pág. 231)

Se le denomina flujo laminar porque el fluido parece moverse en láminas continuas con poca mezcla entre capas adyacentes; En el flujo turbulento los elementos del fluido parecen mezclarse en forma caótica dentro de la corriente, “debido a las fluctuaciones tridimensionales aleatorias de velocidad” (Robert W. Fox, 2004, p. 39). La sección donde el flujo cambia de laminar a turbulento se le llama de transición. (Mott, 2006, págs. 226-227)

Para aplicaciones prácticas del flujo en tuberías, se tiene que:

Si $N_R < 2000$, el flujo es laminar.

Si $N_R > 4000$, el flujo es turbulento.

En el rango de números de Reynolds entre 2000 y 4000 es imposible predecir qué flujo existe; por tanto, se le denomina región crítica donde la práctica usual es cambiar la tasa de flujo o diámetro del tubo para hacer que el flujo sea en definitiva laminar o turbulento. (Mott, 2006, pág. 231)

COMPRESIBILIDAD E INCOMPRESIBILIDAD DEL FLUJO.

Cuando existen variaciones importantes en la densidad y volumen de un fluido, éste es llamado compresible. Para efectos prácticos, los líquidos se consideran incompresibles; sin embargo, estrictamente hablando se sabe que a altas presiones el agua tiene la capacidad de almacenar energía elástica en forma de mínimas variaciones de volumen, por lo que la tubería podría llegar a experimentar mínimas variaciones en su diámetro, o bien si se presentase algún fenómeno transitorio como el “golpe de ariete” o la cavitación, se pueden generar unos niveles de presiones muy superiores (o inferiores) a los correspondientes a regímenes estacionarios, es por

1. FENÓMENOS TRANSITORIOS.

ello por lo que para el diseño de una conducción donde los cambios de presión puedan ser grandes o súbitos, es necesario considerar los efectos elásticos de la compresibilidad del líquido en la tubería. (Robert W. Fox, 2004, pp. 39-40)

Los cambios en la presión y en la densidad están asociados al módulo de elasticidad como se enuncia a continuación. Sus unidades son las mismas que las de la presión.

$$E_v = \frac{dp}{(d\rho/\rho)}$$

ECUACIÓN 1.1-5

PRESIÓN DE VAPORIZACIÓN.

Todos los líquidos tienden a evaporarse debido a que en su superficie libre existe un movimiento continuo de partículas que escapan del líquido, pero, así como unas escapan otras regresan. Suponiendo el caso en que el espacio sobre la superficie del líquido sea sellado, el número de moléculas evaporadas incrementará hasta que el intercambio de moléculas que entra en el líquido se equilibre con las que salen, de manera que ya no se evaporará más líquido (Mataix, 1986, pág. 30).

Las moléculas sobre la superficie del líquido que regresan a éste crean la llamada presión parcial de vapor, la cual junto con las presiones parciales de otros gases conjuntan la presión total. Las moléculas que dejan el líquido dan lugar a la presión de vaporización, de esta magnitud depende la razón a la cual las moléculas escapan de la superficie.

Cuando la presión de vaporización es igual a la presión parcial del vapor encima de la superficie, la razón del intercambio de moléculas que entran y salen del líquido es la misma, entonces se dice que el gas sobre la superficie está saturado con el vapor. A esta 'presión de evaporación' se le llama **presión de saturación**.

Temperatura (°C)	Presión de Saturación del vapor (Pa)
0	615
10	1,230
20	2,340
40	7,400
60	20,000
80	47,400
100	101,500

TABLA 1.1-1 PRESIÓN DE SATURACIÓN DEL AGUA A DIFERENTES TEMPERATURAS (MASSEY, 2006, P. 667)

Dado que la velocidad de las moléculas y la razón de éstas para escapar a través de la superficie del líquido aumentan con la temperatura, también lo hará la presión de vaporización. Si la presión total del gas sobre el líquido es menor que la presión de saturación, moléculas escaparán repentinamente del líquido dando lugar a la ebullición, en donde burbujas de vapor

1. FENÓMENOS TRANSITORIOS.

se forman en el líquido y se elevan a la superficie. En agua pura a 100°C, la presión de saturación es de aproximadamente 105 Pa, la cual es la presión atmosférica total al nivel del mar, entonces el agua sujeta a esta presión atmosférica hierve a esta temperatura. Si la presión externa sobre líquido es menor, la evaporación comenzará a un valor menor al de presión de saturación y por consiguiente menor temperatura. El agua se vaporizará incluso a temperatura ambiente si la presión es reducida al valor de la presión de saturación a esa temperatura. (Massey, 2006, p. 16) “Así en todo fluido habrá para cada temperatura, una presión de saturación del vapor”. (Mataix, 1986, pág. 30)

	Presión de Saturación del vapor (Pa)
Mercurio	0.16
Agua	2,340
Queroseno	3,300
Etanol	5,900
Benceno	10,000
Metanol	12,500
Gasolina	30,400

TABLA 1.1-2 PRESIONES DE SATURACIÓN A 20°C (MASSEY, 2006, P. 670)

1.1.2. CLASIFICACIÓN DE LOS FLUJOS.

Para clasificar un flujo se requiere analizar sus propiedades y características físicas y mecánicas, dependiendo de cuales se tomen en cuenta se encontrarán los siguientes tipos:

CLASIFICACIÓN SEGÚN LAS PROPIEDADES TEMPORALES: PERMANENTE Y NO PERMANENTE.

Un flujo **permanente o estacionario** es aquel en el que, en una sección determinada, no presenta variaciones en sus características hidráulicas (gasto, presión, velocidad) con respecto al tiempo, caso que es difícil de encontrar en la naturaleza. El flujo **no permanente** presenta variaciones de sus características hidráulicas a lo largo del tiempo en una sección determinada. (Felices, 2007, págs. 4-5)

FLUJO TRANSITORIO.

Un caso particular de flujo no permanente es el flujo transitorio, o variable (M. Abreu, Guarga, & Izquierdo, pág. 2) que es el que se produce en la transición entre dos estados distintos de flujo permanente. Frecuentemente uno de estos dos estados permanentes, el inicial o el final, corresponde al reposo, estado denominado de manera coloquial condición de gasto nulo. Las alteraciones del estado permanente pueden ser causadas por cambios planificados o accidentales en la configuración de los equipos de control de un sistema hecho por el hombre o por cambios en la entrada o salida de un sistema natural.

Cabe aclarar que no todos los flujos no permanentes son transitorios, por ejemplo las oscilaciones estacionarias. (Cafaggi Félix, Rodal Canales, & Sánchez Huerta, 2011, pág. 243)

1. FENÓMENOS TRANSITORIOS.

CLASIFICACIÓN SEGÚN LAS PROPIEDADES ESPACIALES: UNIFORME Y NO UNIFORME.

“Se dice que un tramo de tubería tiene movimiento **uniforme** cuando las características hidráulicas son constantes para cualquier sección de dicho tramo” (Felices, 2007, págs. 5-6). Por ejemplo, si en un instante dado, la velocidad es constante respecto a la distancia en cualquier punto del flujo, ese flujo es **uniforme**. (Sotelo Ávila, 1997, pág. 97)

En el movimiento **variado** cambia la sección transversal, velocidad, presión o cualquier característica hidráulica en un tramo, ya sea en la dirección del flujo o en direcciones perpendiculares a él. Así entonces la variabilidad es el cambio del régimen de corriente con respecto al tiempo y la no uniformidad es la variación del régimen de corriente con respecto al espacio. (Felices, 2007, pág. 6)

Cerca de fronteras sólidas que contienen a un fluido se presenta un tipo de no uniformidad por efecto de la viscosidad; pese a ello en hidráulica se acepta la uniformidad o no uniformidad, cuando se refiere a la variación de la velocidad media en la dirección general del movimiento. (Sotelo Ávila, 1997, pág. 97)

El hecho de que un flujo sea permanente no repercute en que éste sea uniforme; pudiendo así ocurrir que se tengan: flujos permanente uniforme, permanente no uniforme, no permanente uniforme y no permanente no uniforme.

CLASIFICACIÓN SEGÚN LAS TRAYECTORIAS: LAMINAR Y TURBULENTO.

En un flujo **laminar** el movimiento de las partículas se produce siguiendo trayectorias separadas perfectamente definidas, sin ser forzosamente paralelas y sin existir mezcla macroscópica o intercambio transversal entre ellas. Si se inyecta colorante (de la misma densidad del líquido) dentro de un flujo laminar, se observará que éste se mueve como un filamento delgado que sigue las trayectorias del flujo. (Sotelo Ávila, 1997, págs. 97-98)

Conforme un flujo va incrementando su velocidad, la corriente se vuelve menos suave y comienza a desarrollar ondulaciones a lo largo de su longitud. La sección transversal de la corriente parece oscilar hacia dentro y hacia fuera, aun cuando el flujo fuese suave en general. Las velocidades mayores producen más oscilaciones de ese tipo hasta que el flujo eventualmente se vuelve turbulento. Esta región del flujo donde ocurre el cambio de régimen, recibe el nombre de zona de transición.

En el flujo **turbulento**, las partículas se mueven dentro de la corriente sobre trayectorias completamente erráticas, sin seguir un orden establecido. Existen pequeñas componentes de la velocidad en direcciones transversales a la del movimiento general, las cuales no son constantes sino que fluctúan con el tiempo aleatoriamente, aun cuando el flujo general sea permanente. Esto por el hecho de que la permanencia respecto del tiempo se refiere a los valores medios de dichas componentes en un intervalo grande. Las componentes transversales de la velocidad en cada punto originan un mezclado intenso de las partículas que consume parte de la energía del movimiento por efecto de la fricción interna y que también, en cierto modo, es resultado de los

1. FENÓMENOS TRANSITORIOS.

efectos viscosos del fluido. *(Estrictamente hablando, los flujos turbulentos son no permanentes debido a que sus condiciones en un punto varían continuamente; pero pueden ser considerados permanentes si sus condiciones medias temporales sobre un periodo corto no cambian con el tiempo (Chaudhry, 2014, p. 2))*

Se sabe que los fluidos con viscosidad baja fluyen con mayor facilidad que los fluidos con viscosidad elevada. Por ello, es más probable que el flujo de líquidos de viscosidad baja, como el agua, sean turbulentos. (Mott, 2006, págs. 226-230)

CLASIFICACIÓN SEGÚN LAS DIRECCIONES DE CIRCULACIÓN: UNIDIMENSIONAL, BIDIMENSIONAL Y TRIDIMENSIONAL.

El flujo es **tridimensional** cuando sus características varían en el espacio, o sea que los gradientes del flujo existen en las tres direcciones, siendo éste es el caso más general del flujo. Es **bidimensional** cuando sus características de velocidad o de presión (o ambas) se encuentran en dos direcciones exclusivamente. Es **unidimensional** cuando sus características varían en función del tiempo y de una coordenada curvilínea en el espacio, comúnmente la distancia medida a lo largo del eje de conducción. El flujo de un fluido real no puede ser completamente unidimensional debido al efecto de la viscosidad, ya que la velocidad en una frontera sólida es igual a cero, pero en otro punto es distinta de cero; sin embargo con la consideración de valores medios de las características de cada sección, se puede considerar unidimensional. Ésta hipótesis es una de las más importantes en la hidráulica por las simplificaciones que trae consigo. (Sotelo Ávila, 1997, pág. 97)

1.1.3. TIPOS DE TRANSITORIOS HIDRÁULICOS.

De acuerdo a la rapidez con la que se producen cambios en el flujo, se distinguen 3 tipos de transitorios Hidráulicos:

TRANSITORIO MUY LENTO O CUASI-ESTÁTICO.

En él, las variables del flujo transmutan de manera muy lenta en el tiempo (con períodos desde varias horas hasta varios días). Como un ejemplo se tiene el flujo no permanente en una red de agua potable, cuyos cambios se generan por la variación del consumo y de los niveles de agua en los tanques; o bien, cuando un tanque grande es vaciado a través de una pequeña tubería de salida, después de un tiempo la reducción de la carga en el depósito resultará en la reducción del caudal proveniente del tanque. (Massey, 2006, p. 37) (Comisión Nacional del Agua, 2015, pág. 1)

Debido a que las variaciones en este tipo de flujo son muy lentas, no es necesario considerar en los métodos de análisis la inercia del flujo ni las propiedades elásticas del fluido y de las tuberías; el flujo transitorio se puede modelar con una aplicación sucesiva de un modelo estático. Una simulación de este tipo se conoce también con el nombre análisis de períodos extendidos. (Comisión Nacional del Agua, 2015, pág. 1)

1. FENÓMENOS TRANSITORIOS.

TRANSITORIO LENTO U OSCILACIÓN DE MASA.

Si las condiciones del flujo varían con el tiempo y si estas se repiten después de un intervalo de tiempo fijo, el flujo se denomina flujo periódico o permanente-oscilatorio. El intervalo de tiempo en el que las condiciones se repiten es denominado como período, el cual varía normalmente de varios minutos a varias horas. Si T es el período en segundos, entonces la frecuencia de oscilaciones, f , en ciclos/s y en rad/s es $1/T$ y $2\pi/T$, respectivamente. La frecuencia expresada en rad/s se denomina frecuencia circular y generalmente es designado por ω . (Chaudhry, 2014, p. 2) (M. Abreu, Guarga, & Izquierdo, pág. 2)

Este flujo se relaciona ante todo con el movimiento de la masa de agua en la conducción, semejante a la oscilación en dos vasos comunicantes. Los cambios de las variables en este tipo de transitorios son importantes pero no tanto como para tomar en consideración los efectos elásticos en fluido y tuberías, de hecho las variaciones de presión no llegan a modificar de manera significativa la energía elástica almacenada por el fluido y/o el material de la conducción. (Comisión Nacional del Agua, 2015, pág. 1)

Para el análisis de éste flujo, es suficiente un modelo que considere solamente el movimiento y la inercia del volumen de agua en las tuberías, éste modelo se conoce con el nombre genérico de modelo rígido o de columna rígida. (Zarco Hernández, 2000, pág. 2)

TRANSITORIO RÁPIDO (GOLPE DE ARIETE).

Se genera por la violencia de perturbaciones introducidas en el sistema a través de maniobras rápidas de regulación, como la interrupción repentina de la energía eléctrica, el arranque o parada repentina de una bomba, la apertura o el cierre rápido de una válvula en una tubería o el encendido de una turbina hidráulica. Esto provoca cambios bruscos de velocidad que a su vez generan cambios bruscos de presión, los cuales se propagan por la tubería generando ondas de presión de período muy corto (apenas varios segundos).

El modelo teórico para su análisis se llama modelo elástico, el cual es el más completo y general pero también más complejo y de utilización más costosa, ya que considera la compresibilidad del fluido y la elasticidad de las paredes de la conducción. (M. Abreu, Guarga, & Izquierdo, pág. 3)

1.2. GOLPE DE ARIETE.

Anteriormente se refería como golpe de ariete a las fluctuaciones de presión causadas por perturbaciones en las características del flujo, aunque desde los años 60 es común el término *transitorio hidráulico*. (Chaudhry, 2014)

1. FENÓMENOS TRANSITORIOS.

1.2.1. CAVITACIÓN.

Si se reduce la presión de un líquido que contiene gases disueltos, el líquido comenzará a evaporarse y los gases disueltos se comenzarán a liberar en forma de burbujas o cavidades de vapor. Estas burbujas, ya sean de vapor o de otros gases serán transportadas a través del líquido y al encontrar un punto donde la presión sea mayor, colapsarán al condensarse el vapor, formado así una cavidad a la que el líquido circundante se abalanzará a llenar de manera violenta. Luego el líquido moviéndose de todas direcciones chocará en el centro de dicha cavidad, dando lugar a presiones locales de alta magnitud (Arriba de 1GPa). Cualquier superficie sólida que esté alrededor será sujeta a intensas presiones ya que, aunque las cavidades no estén realmente en la superficie sólida, las presiones se propagan desde las cavidades mediante ondas de presión similares a las que se encuentran en el golpe de ariete. Esta alternancia en la formación y colapso repentino de burbujas probablemente se repita con una frecuencia de varios miles de veces por segundo. Estas intensas presiones, actuando tal vez por un tiempo muy corto, pero sobre una superficie delgada, pueden causar un daño severo en la superficie circundante, ya sean piezas de maquinaria para el control del fluido o la tubería. Así, el material finalmente tenderá a fallar por fatiga, ni se diga el caso en que se encuentre además una superficie oxidada por corrosión. Asociado al flujo con cavitación, también puede haber vibración y sonido; cuando la cavitación ocurre por ejemplo en una turbina o bomba, puede sonar como si grava estuviese pasando por la maquinaria.

Las burbujas de vapor que se forman en la cavitación no sólo pueden dañar una turbina/bomba, sino perturbar el flujo modificando la eficiencia con la que trabajan, por lo que debemos asegurarnos de que en cada punto de la tubería la presión existente sea mayor que la presión de vaporización. (Massey, 2006, pp. 16-17, 619-620) La hélice de un barco trabajando tres o cuatro meses en condiciones donde exista cavitación, queda totalmente inutilizable. A veces un solo viaje trasatlántico era suficiente para destrozarse una hélice cuando no se contaba con medios contra cavitación. (Mataix, 1986, pág. 323)

1.2.2. CELERIDAD.

Cualquier cambio repentino en las condiciones del flujo que se origina en un punto de una tubería a presión se propaga por la misma con una velocidad que depende de la elasticidad del fluido y de la pared de la tubería. Esta velocidad se señala con a y se denomina celeridad para distinguirla de la velocidad del flujo V .

Si el material de la tubería fuese completamente indeformable, la celeridad sería igual a la velocidad de propagación del sonido en el fluido. Así, la elasticidad de la tubería reduce la velocidad de propagación, como se expresa en la Ecuación 1.2-1:

$$a = \frac{a_0}{\sqrt{1 + \frac{DE_v}{eE_t} \varphi}}$$

ECUACIÓN 1.2-1

1. FENÓMENOS TRANSITORIOS.

$$a_0 = \sqrt{E_v/\rho}$$

ECUACIÓN 1.2-2.

Donde:

a_0 – celeridad con la que se propaga la onda de presión en un medio no confinado

E_v - módulo de elasticidad volumétrica del agua.

E_t - módulo de elasticidad (módulo de Young) del material del tubo.

D - diámetro interior del tubo.

e - espesor de la pared del tubo.

Tipo de anclaje de la tubería	Pared delgada $\frac{e}{D} \leq 0.1$	Pared gruesa $\frac{e}{D} > 0.1$
Totalmente restringido el movimiento en sentido axial	$\varphi = (1 - \nu^2)$	$\varphi = \frac{D}{D + e}(1 - \nu^2) + \frac{2e}{D}(1 + \nu)$
Parcialmente restringido el movimiento	$\varphi = (1.25 - \nu)$	$\varphi = \frac{D}{D + e}(1 - 0.5\nu) + \frac{2e}{D}(1 + \nu)$
Sin restricción (con juntas de expansión)	$\varphi = 1$	$\varphi = \frac{D}{D + e} + \frac{2e}{D}(1 + \nu)$

TABLA 1.2-1 FORMA DE VALUAR φ PARA TUBOS DE SECCIÓN CIRCULAR.

En los tubos de sección circular φ se determina según el tipo de pared y por la restricción que se tenga al movimiento por efecto del anclaje de acuerdo a la Tabla 1.2-1. En su cálculo interviene la relación de Poisson ν , la cual toma en cuenta la proporción entre las deformaciones laterales y longitudinales. En el caso de valores grandes del módulo de elasticidad del conducto, se emplea $\varphi = 1$. Para tubos elaborados con materiales plásticos, la Ecuación 1.2-1 se utiliza siempre y cuando las deformaciones que sufran los materiales se encuentren dentro del límite elástico.

MATERIAL	E_{mat} (N/m ²) 10 ⁹	ν	Magnitud de a (m/s)
Acero	200-212	0.30	1000 – 1250
Fibrocemento	23.5	0.30	900 – 1200
Concreto presforzado	39	0.15	1050 – 1150
Hierro dúctil	166	0.28	1000 – 1350
Polietileno de alta densidad	0.59-1.67	0.45	230 – 430
PVC	2.4-2.75	0.45	300 – 500

TABLA 1.2-2 MÓDULO DE ELASTICIDAD, COEFICIENTE DE POISSON Y MAGNITUD TENTATIVA DE LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN A PARA DIFERENTES MATERIALES DE TUBERÍA (COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA, 2015).

(Comisión Nacional del Agua, 2015) (Cafaggi Félix, Rodal Canales, & Sánchez Huerta, 2011, págs. 249-252)

1.2.3. DESCRIPCIÓN FÍSICA DEL GOLPE DE ARIETE.

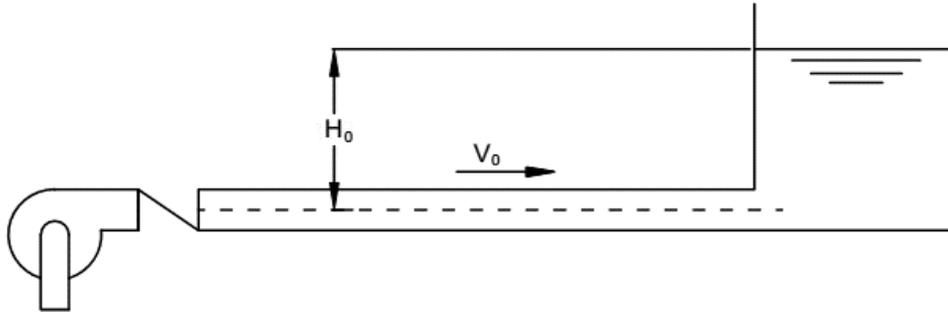


FIGURA 1.2-1 BOMBA QUE ALIMENTA UN DEPÓSITO DE NIVEL CONSTANTE. (M. ABREU, GUARGA, & IZQUIERDO, PÁG. 10)

Para la explicación del fenómeno transitorio se considerará como ejemplo una instalación hidráulica simple, consistente en un grupo de bombeo provisto de una válvula de no retorno en la descarga que alimenta a un depósito a través de una tubería horizontal, como muestra la Figura 1.2-1.

Un fenómeno transitorio ocurriría si se presentara un paro en el equipo de bombeo que alimenta el tanque. Este proceso se caracteriza por una transformación alternativa cíclica de la energía cinética que arrastra el líquido, en energía elástica que almacenarán el fluido y las paredes de la propia tubería.

Para describir únicamente el fenómeno físico se supondrán inexistentes las pérdidas por fricción, lo cual equivaldría a hacer nulo el amortiguamiento en la transmisión de las perturbaciones producidas. También se despreciará la inercia que puede tener el grupo motor-bomba, por lo que la válvula de no retorno se supondrá cierra de inmediato al producirse un fallo de energía en el suministro del motor. Tampoco la altura cinética del fluido $V^2/2g$ es tomada en consideración. Con estas simplificaciones la condición inicial previa al acontecimiento que representa la parada del grupo de bombeo presenta una línea de alturas piezométricas horizontal, que es la correspondiente al régimen estacionario.

La primera fase del “Golpe de Ariete” inicia cuando se produce la parada de la bomba, la válvula de no retorno cierra y el fluido que circula a través de la tubería continúa en movimiento hasta que la depresión que se crea tras la válvula de no retorno debida a la ausencia de fluido, provoca su detención. En estas condiciones, viaja una onda depresiva hacia el depósito que además va deteniendo el fluido. Si tal perturbación se propaga con una celeridad de valor a , al cabo de un tiempo L/a (L es la longitud del conducto) toda la tubería estará bajo los efectos de una depresión y con el fluido en reposo. La energía cinética del fluido se ha transformado entonces en un gradiente de presiones.

En la segunda fase la presión constante en el interior del depósito es superior a la de la tubería que se encuentra bajo los efectos de la depresión. Este desequilibrio es reparado por el depósito introduciendo fluido en la tubería que inicia un retroceso abierto hacia la válvula de no

1. FENÓMENOS TRANSITORIOS.

retorno con una velocidad, en ausencia de pérdidas, igual a $-V_0$. Ahora es el gradiente energético depósito-tubería el que se convierte en energía cinética. Con el fluido a la velocidad de régimen (aunque en sentido contrario), nuevamente se tiene la presión de partida en la tubería, de manera que al cabo de $2L/a$ segundos, toda ella está sometida a dicha presión inicial y el fluido circulando con una velocidad $-V_0$.

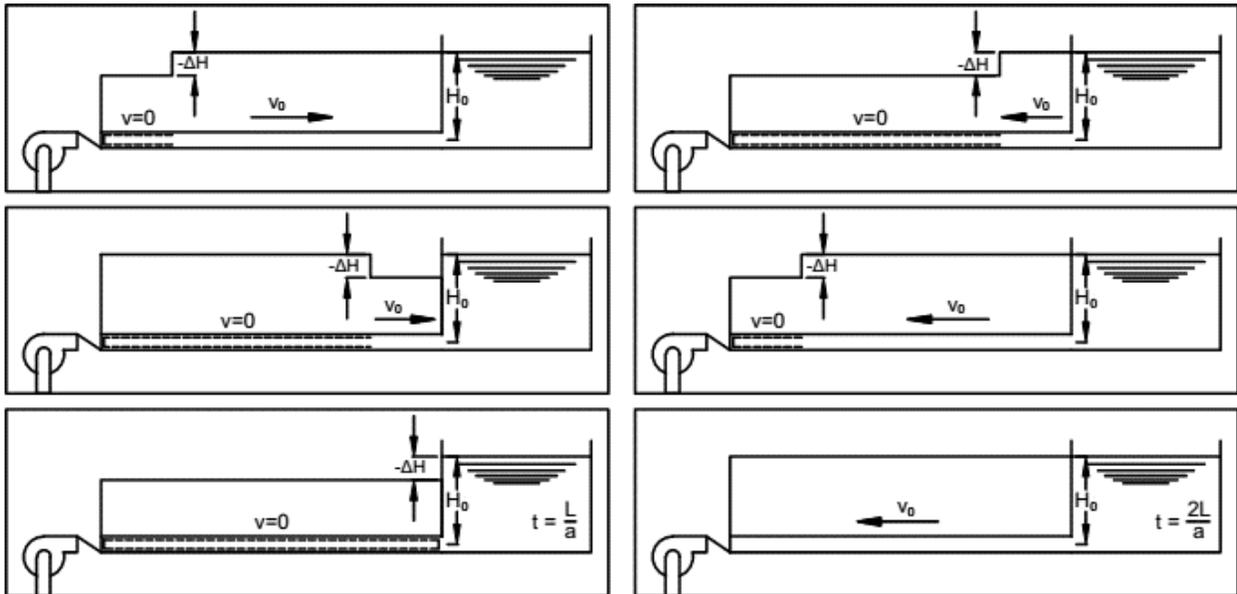


FIGURA 1.2-2 PRIMERA (IZQ.) Y SEGUNDA (DER.) FASE DEL FENÓMENO TRANSITORIO. (M. ABREU, GUARGA, & IZQUIERDO)

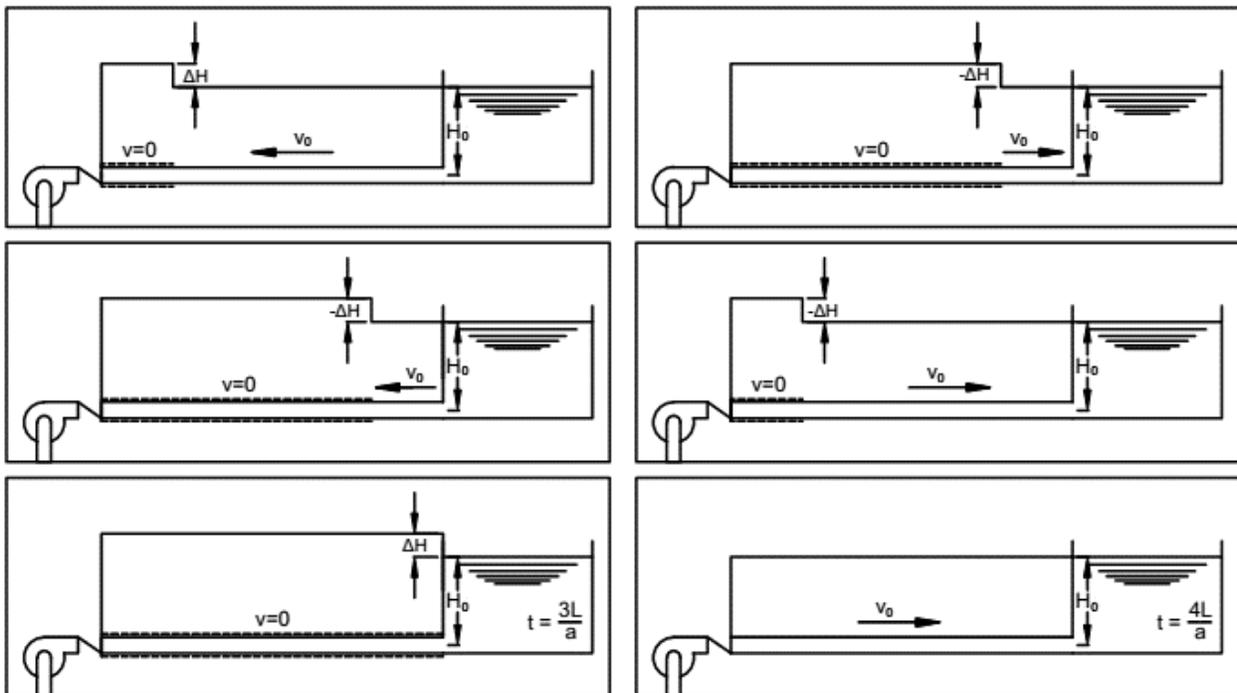


FIGURA 1.2-3 TERCERA (IZQ.) Y CUARTA (DER.) FASE DEL FENÓMENO TRANSITORIO. (M. ABREU, GUARGA, & IZQUIERDO)

1. FENÓMENOS TRANSITORIOS.

El inicio de la tercera fase es consecuencia de la concentración incontrolada de líquido junto a la válvula de no retorno y poco a poco en toda la tubería, ya que el depósito, para compensar la depresión, sigue permitiendo el flujo hacia la tubería. El resultado es un brusco aumento de presión junto a la válvula de no retorno que se propaga hacia el depósito, acompañado de una detención progresiva del fluido en la tubería, de modo que transcurridos $3L/a$ segundos (final de la tercera fase), todo el fluido de la tubería está en reposo y la conducción sometida a una sobrepresión de la misma magnitud que la depresión inicial. De nuevo hay una transformación de energía cinética en potencial.

Llegada la perturbación hasta las inmediaciones del depósito existe un gradiente de presión entre tubería y depósito (mayor presión en la tubería que en el depósito), que hace que el fluido inicie de nuevo el movimiento, esta vez en la dirección original y con la misma velocidad V_0 . Transcurridos $4L/a$ segundos, la situación es idéntica a la que se tenía al inicio.

El golpe de ariete en una tubería es un fenómeno cíclico de período $4L/a$ que se inicia con la fase depresiva, continuando con sobrepresiones y depresiones alternadas. En la realidad, debido a la fricción, las fluctuaciones que se presentan no son rectangulares como en la Figura 1.2-4, sino curvas que se amortiguan con el tiempo. (M. Abreu, Guarga, & Izquierdo, págs. 9-13)

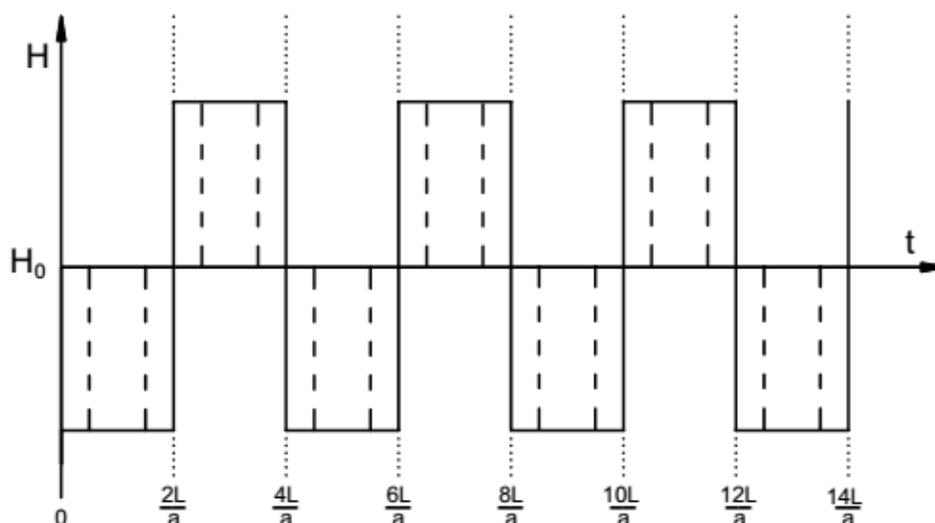


FIGURA 1.2-4 HISTORIALES DE ALTURAS PIEZOMÉTRICAS JUNTO A LA VÁLVULA DE NO RETORNO (LÍNEA CONTINUA) Y EN EL PUNTO MEDIO DE LA TUBERÍA (PUNTEADA). (M. ABREU, GUARGA, & IZQUIERDO)

1.2.4. PULSO DE ZHUKOVSKI.

A la fórmula obtenida por el científico ruso Nikolai Zhukovski, se le conoce como 'fórmula de Zhukovski', y a la sobrepresión instantánea ΔH que se obtiene se le denomina pulso de Zhukovski. Dicha fórmula demuestra teóricamente que cualquier cambio instantáneo en la velocidad del flujo a presión, Δv en un punto de una tubería, genera una variación instantánea ΔH de la carga hidráulica en el mismo punto según la siguiente ecuación:

1. FENÓMENOS TRANSITORIOS.

$$\Delta H = \pm \frac{a}{g} \Delta v$$

ECUACIÓN 1.2-3

Donde:

g = Aceleración de la gravedad (9.81 m/s²)

a = Velocidad de propagación de la onda en m/s

Δv = Cambio de velocidad para flujo permanente en m/s

Las sobrepresiones que se producen en los transitorios pueden ser sumamente altas. Como un ejemplo, la detención instantánea de un flujo con una velocidad de unos 2 m/s en una tubería de acero ($a \approx 1\,000$ m/s) daría un incremento de presión del orden de los 200 metros. Un incremento de presión de esa magnitud sería destructivo para la mayoría de las tuberías de conducción de agua potable. Afortunadamente los cambios del flujo no son instantáneos y las sobrepresiones normalmente no son tan altas.

Los cambios en la carga hidráulica y la velocidad ΔH y Δv se transmiten por la tubería como una onda de presión con una celeridad a , hasta que encuentren un punto de cambio ya sea de diámetro o de material, una unión con otros tramos o un extremo de la tubería. (Comisión Nacional del Agua, 2015)

1.3. CONSECUENCIAS DE TRANSITORIOS EN TUBERÍAS.

1.3.1. SOBREPRESIÓN.

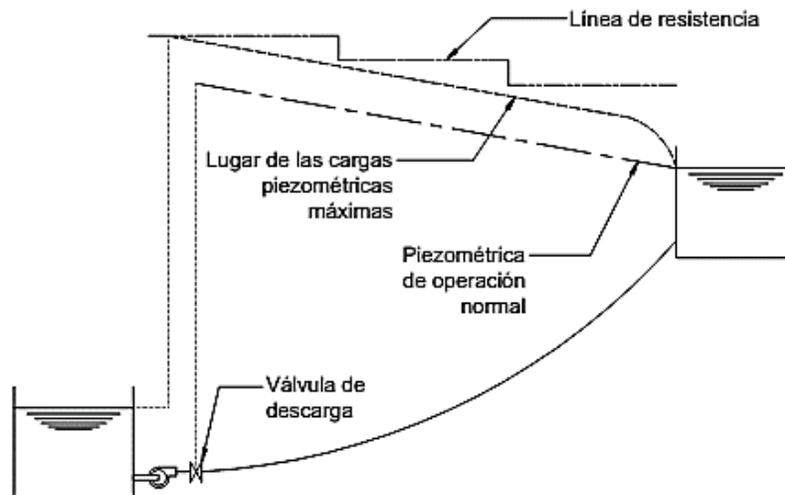


FIGURA 1.3-1 INSTALACIÓN SEGURA FRENTE A LAS SOBREPRESIONES.

Se denomina así a toda presión superior a la de trabajo en cualquier punto de una conducción a presión. Esta provoca un incremento de tensiones en el material de la tubería que se puede prever desde el proyecto, para evitar que produzca deformaciones plásticas o roturas en la instalación. En los cálculos deberá establecerse una cota de presiones máximas admisibles a lo largo de la tubería. Esta cota determinará la clase de la tubería en cada tramo de la instalación,

1. FENÓMENOS TRANSITORIOS.

que está dada por su resistencia a la presión. La suma de la cota de elevación de cada uno de los puntos más la resistencia dan como resultado la línea de resistencia. Al determinar la clase, es decir, la presión manométrica que soporta la tubería sin dañarse, los fabricantes no establecen diferencias entre presiones estacionarias y transitorias; por lo tanto, es aconsejable que desde el diseño se señale la clase de cada tramo de tubería, por encima de la presión manométrica máxima (estacionaria o transitoria) que el tramo deberá soportar cuando forme parte de la conducción.

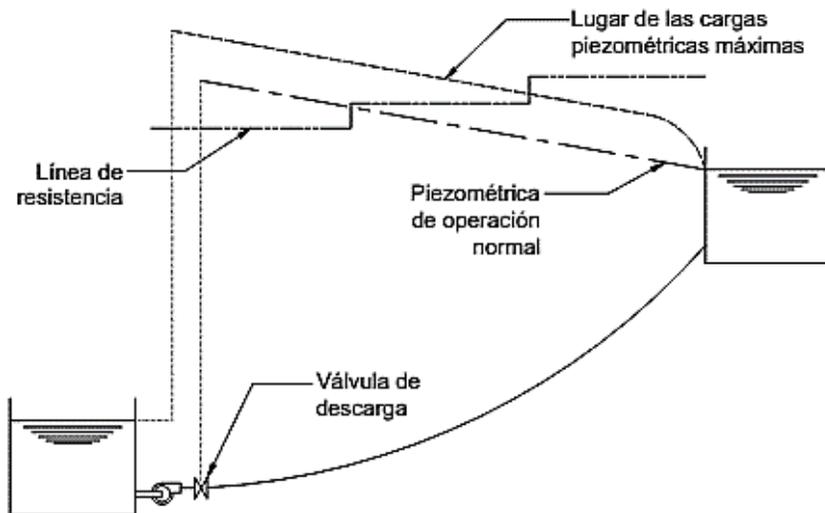


FIGURA 1.3-2 INSTALACIÓN CON RIESGO DE ROTURA FRENTE A LAS SOBREPRESIONES.

Al elegir la clase de tubería deberá tenerse en cuenta su costo: a mayor resistencia, mayor costo, pero menos problemas de sobrepresiones transitorias y, en consecuencia, menor erogación en el sistema de control para transitorios hidráulicos; y a la inversa, una resistencia menor disminuirá los costos, pero los aumentará en dichos sistemas de control (Ver Figura 1.3-1 y Figura 1.3-2). (Carmona Paredes & Aguilar Moreno, 1987, págs. 29-30)

1.3.2. DEPRESIÓN.

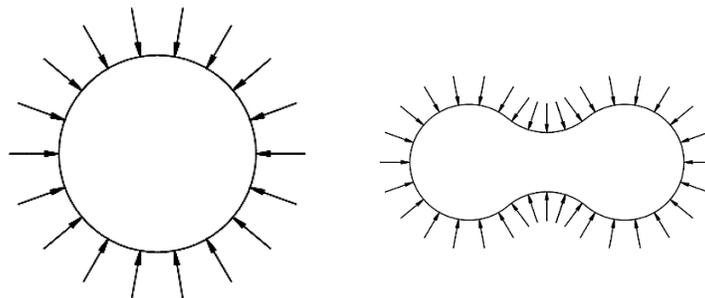


FIGURA 1.3-3 TUBERÍA EN DEPRESIÓN (IZQ.) Y COLAPSADA (DER.)

Depresión es toda presión absoluta menor que la atmosférica. Si la tubería está enterrada, la presión media exterior que tolera es mayor que la atmosférica, dependiendo del tipo de suelo y de la profundidad. En el diseño estructural de este tipo de instalaciones habrá que tomar en

1. FENÓMENOS TRANSITORIOS.

cuenta los factores que implican tener una tubería vacía que resista a la presión exterior. En los fenómenos transitorios creados por el paro accidental de una planta de bombeo, los problemas de depresión son los más frecuentes, y se pueden clasificar en los siguientes tipos:

1.3.2.1. COLAPSO DE TUBERÍA.

Al reducirse la presión interior y alcanzar valores por debajo de la presión media exterior, el tramo de tubería afectado trabajará a compresión según la circunferencia. Si éstas fuerzas de compresión son lo suficientemente altas, se producirá un fenómeno de pandeo en la pared del tramo hasta llegar al colapso.

No es fácil establecer la presión mínima que provoque colapso ni la forma de la deformación, ya que ésta tiene que ver con las deformaciones previas que la tubería tenga en su vida útil. (Carmona Paredes & Aguilar Moreno, 1987, pág. 30)

1.3.2.2. SEPARACIÓN DE COLUMNA LIQUIDA.

Si es que la tubería resiste la compresión, el descenso de la presión al interior del conducto puede producir la vaporización del líquido a temperatura ambiente, tal como se explicó en el concepto de Presión de Vaporización visto anteriormente. Así, si la cantidad de energía presente en el fenómeno es de gran magnitud, se liberará un muy importante volumen de vapor de agua, que incluso puede provocar una discontinuidad en el medio, esto es a lo que se conoce como separación de columna líquida. Cuando las burbujas son sometidas a una presión levemente superior a la de vaporización, el vapor reducirá con mucha rapidez su volumen ya que las columnas de agua empujarán al vapor por ambos lados, provocando que las columnas separadas choquen violentamente. Las sobrepresiones resultantes resultan del orden del doble de las que se ocasionarían un transitorio común sin separación de columna, esto puede ocasionar la ruptura de la tubería. (Cafaggi Félix, Rodal Canales, & Sánchez Huerta, 2011, pág. 247) (Carmona Paredes & Aguilar Moreno, 1987, pág. 31)

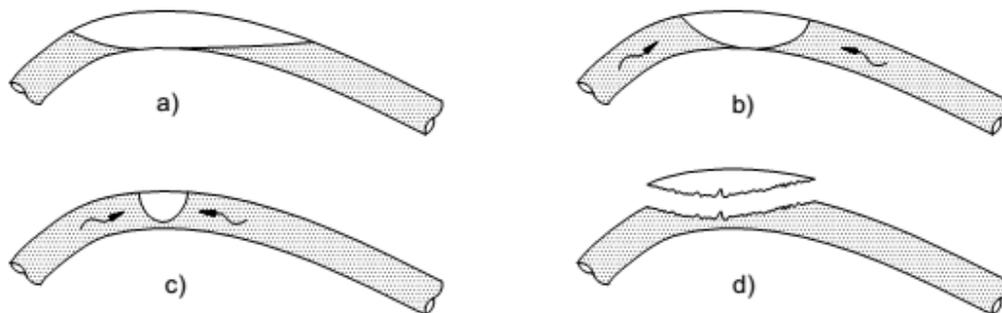


FIGURA 1.3-4 PROCESO DE SEPARACIÓN Y REINTEGRACIÓN DE COLUMNA

1.3.2.3. ENTRADA DE AIRE EN LA TUBERÍA.

El aire puede entrar en el sistema a través de válvulas de admisión o expulsión de aire cuando la presión del interior de la tubería es menor que la atmosférica, lo cual es importante evitar para prevenir sobrepresiones graves. También puede entrar por donde existen juntas en la tubería, a

1. FENÓMENOS TRANSITORIOS.

través de los empaques, los cuales, al ser sometidos a fenómenos de depresión, pueden fallar antes que las paredes del conducto, permitiendo el ingreso de aire al sistema. Los problemas que pueden acarrear las “macroburujas” son la reducción de la capacidad de regulación, inestabilidad en el flujo transportado o la generación de sobrepresiones durante transitorios hidráulicos.

(Cafaggi Félix, Rodal Canales, & Sánchez Huerta, 2011, pág. 248) (Carmona Paredes & Aguilar Moreno, 1987, pág. 31)

1.3.3. CALIDAD DEL AGUA.

Los eventos transitorios también pueden tener importantes implicaciones para la salud y la calidad del agua. Estos eventos pueden generar altas fuerzas cortantes del fluido, causar resuspensión de partículas sedimentadas, así como desprendimiento de biopelículas. Los eventos llamados de “agua roja” (“Término genérico para agua con altas concentraciones de partículas de hierro debido a la liberación de subproductos de corrosión.” (Corrosionpedia Inc, 2018)), a menudo se han asociado con perturbaciones transitorias.

Un evento transitorio de depresión, derivado por ejemplo, de una falla de energía o rotura de tubería, tiene el potencial para causar intrusión de agua subterránea contaminada en una tubería, a través de una unión, rotura con fugas, sellos defectuosos, válvulas de alivio sumergidas, etc. Dependiendo del tamaño de las fugas, el volumen de intrusión puede ascender hasta cientos de litros. Las presiones negativas inducen el contrasifonaje de agua no potable de tuberías domésticas, industriales e institucionales hacia el sistema de distribución.



FIGURA 1.3-5 VÁLVULA DE ALIVIO SUMERGIDA

Cuando la presión local disminuye considerablemente, el aire disuelto (gas) puede ser liberado del agua, y esto puede promover la corrosión de las secciones de acero y hierro con la posterior formación de óxido y daños en las tuberías.

1. FENÓMENOS TRANSITORIOS.

Incluso algunos dispositivos de protección contra transitorios, como las válvulas de alivio o las cámaras de aire, si no están diseñados y mantenidos adecuadamente, pueden permitir que los patógenos u otros contaminantes encuentren una ruta hacia el sistema de distribución de agua potable. Esto enfatiza la necesidad de mantener un nivel adecuado de desinfectante residual en todo el sistema de distribución. De manera similar, el almacenamiento sobre límites superiores para protección contra sobrecargas (por ejemplo, tanques cerrados, tubo vertical abierto, tanque de alimentación) puede resultar en largos tiempos de estancia, que a su vez pueden contribuir al deterioro de la calidad del agua. Estos efectos incluyen la pérdida residual de cloro y posibles aumentos en el nivel de microorganismos.

(F Boulous, Karney, Wood, & Lingireddy, 2005) (Lechevallier, W Gullick, R Karim, Friedman, & E Funk, 2003)

1.3.4. SOBREVELOCIDAD EN LAS MÁQUINAS.

Cuando ocurre un paro accidental en el equipo de bombeo, este queda condicionado a la acción combinada del flujo (que en un acueducto ascendente tiende a invertirse) y a la inercia de las masas en rotación (bomba y motor eléctrico). En esta operación se permite un retorno temporal del flujo con el fin de evitar maniobras de cierre brusco que incrementen la severidad del transitorio, así la velocidad de giro del equipo de bombeo se reduce drásticamente y al cabo de pocos segundos incluso comienza a revertir su sentido. Esta velocidad en reversa puede aumentar aún por encima de la velocidad de giro en operación normal (sobrevelocidad), provocando que los componentes mecánicos del equipo se vean sometidos a esfuerzos excesivos que si persisten por mucho tiempo provocan en las piezas un mayor desgaste que el de operación normal.

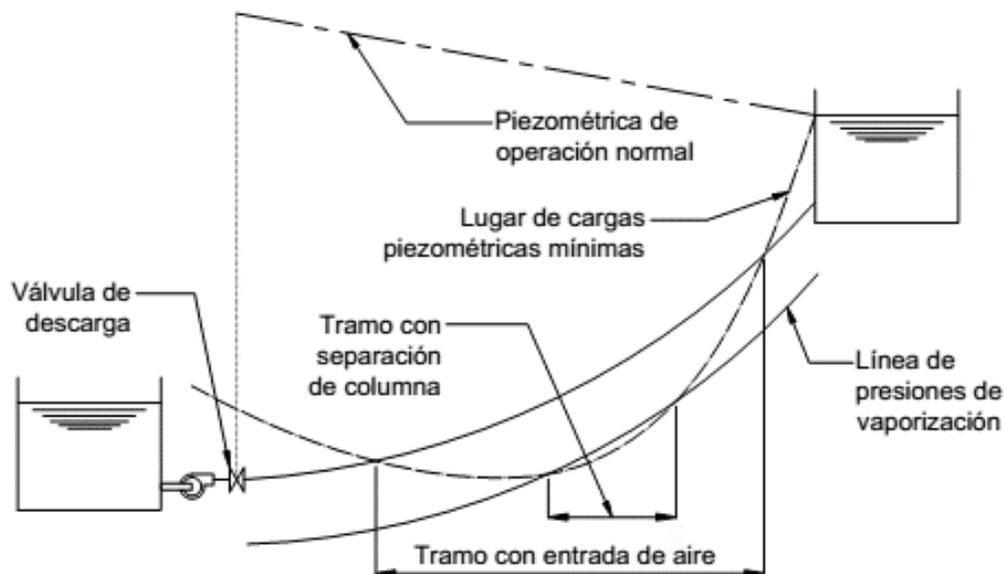


FIGURA 1.3-6 CONDUCCIÓN CON RIESGO DE SEPARACIÓN DE COLUMNA Y RIESGO DE ENTRADA DE AIRE.

1. FENÓMENOS TRANSITORIOS.

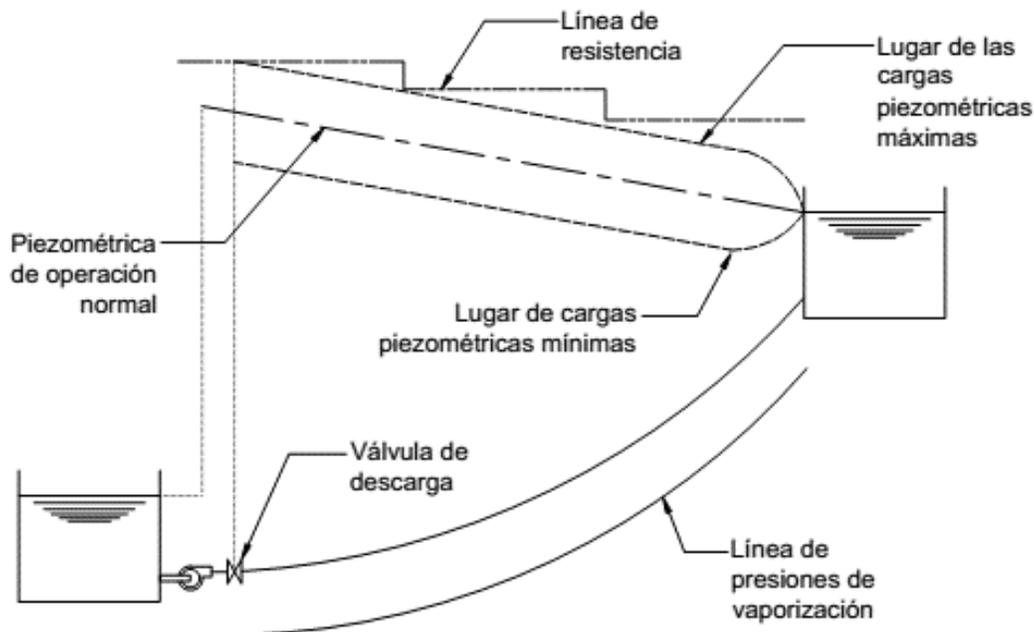


FIGURA 1.3-7 ACUEDUCTO BIEN DISEÑADO.

En un acueducto bien diseñado la línea de resistencia es mayor a la presión máxima, y la presión mínima debe ser menor a la atmosférica.

(Carmona Paredes & Aguilar Moreno, 1987, pág. 32)

1.4. ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS EXISTENTES PARA MITIGAR TRANSITORIOS.

1.4.1. TORRE DE OSCILACIÓN.

Un tanque de elevación es un medio de control de transitorios, consiste en un cilindro abierto a la atmósfera que es conectado a la tubería a través de una extensión de tubería o directamente. Este tanque reduce las variaciones de presión haciendo que los transitorios no se propaguen hacia la conducción sino en forma de oscilación en masa.

(Cafaggi Félix, Rodal Canales, & Sánchez Huerta, 2011, pág. 320)

Las torres de oscilación aseguran la entrada de agua a la tubería al bajar la presión en ésta y reciben el agua que sale de la tubería al subir la presión. El funcionamiento de la torre de oscilación es tanto más efectivo para reducir el golpe de ariete, cuanto mayor sea el área de la superficie libre de agua en ella. Ésta es la razón por la cual frecuentemente las torres de oscilación se construyen con diámetro variable. (Comisión Nacional del Agua, 2015, pág. 24)

Los transitorios rápidos en un sistema de tuberías con una torre de oscilación pueden ser analizados a través del método de las características. (Chaudhry, 2014, p. 349)

1. FENÓMENOS TRANSITORIOS.

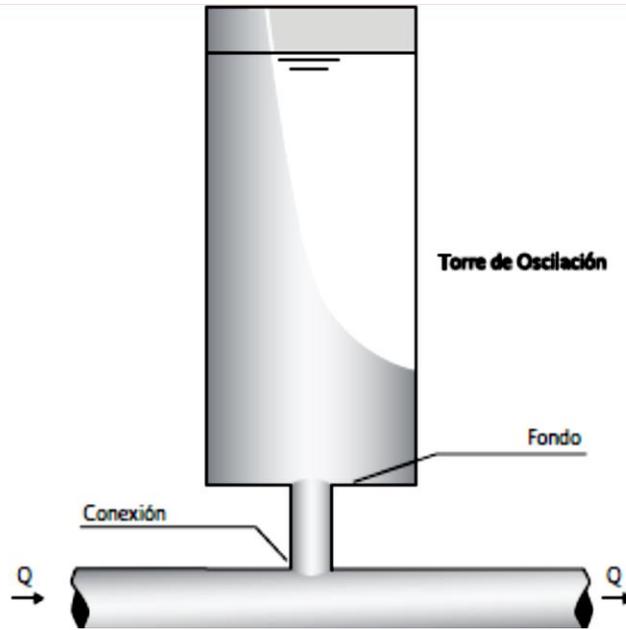


FIGURA 1.4-1 ESQUEMA DE TORRE DE OSCILACIÓN (COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA, 2015, PÁG. 39)

Las ventajas de este dispositivo de control son:

- No requiere mantenimiento eléctrico ni mecánico
- No requiere otros dispositivos adicionales de control

Entre las principales desventajas se encuentran:

- Como es una estructura sometida a la presión atmosférica requiere que el coronamiento de la torre esté sobre el nivel piezométrico.
- Para evitar su vaciado, el desplante de la torre debe estar por debajo de la línea piezométrica correspondiente al gasto nulo.
- Normalmente es una estructura de gran altura, por lo que también es costosa.
- Los equipos de bombeo deberán soportar velocidades considerables en reversa durante el transitorio.

(Cafaggi Félix, Rodal Canales, & Sánchez Huerta, 2011, pág. 321)

1.4.2. CÁMARAS DE AIRE.

Uno de los dispositivos para control de transitorios más usados, es la cámara de aire. Se trata de un recipiente hermético unido a la tubería, con cierto contenido de aire y agua en su interior. Al no estar ligado a la línea piezométrica puede instalarse muy libremente a lo largo de la línea de conducción, sin embargo, en la mayoría de las ocasiones la mejor locación para la cámara es aguas abajo del equipo de bombeo y tan cerca como sea posible de éste.

1. FENÓMENOS TRANSITORIOS.

Para impedir que un flujo en reversa afecte al equipo de bombeo, se provee de una válvula antirretorno entre la brida de descarga de la bomba y la cámara de aire, la cual se cierra rápidamente luego de ocurrida la falla. Es importante que dicha válvula tenga una respuesta adecuada para así minimizar el riesgo de golpeteo. Asimismo, se instala a la cámara un compresor cuya función es restituir el aire perdido por dilución en el agua o por posibles fugas entre conexiones debido a la operación continua del dispositivo ante los transitorios.

Durante el trabajo normal en régimen permanente, el aire en la cámara está comprimido a una presión igual a la presión del agua dentro de la tubería, de esa manera no existe flujo entre la cámara y la tubería.

Cuando ocurre algún fenómeno transitorio en la línea de conducción por paro de equipo de bombeo, el medio que usa la cámara de aire para contenerlo es proporcionar agua a la red para compensar la depresión que se causa al dejar de suministrarse un caudal, expandiendo entonces el volumen de aire del interior de la cámara hasta alcanzar un nivel mínimo de agua dentro. Posteriormente se produce una sobrepresión en la conducción, lo que permite la entrada de agua nuevamente hacia la cámara, comprimiendo de nuevo el aire y aumentando la presión al interior.

El intercambio de gasto entre la cámara y la tubería debe otorgar siempre menor resistencia al gasto que sale de la cámara, que al que entra, lo cual se logra a través de un orificio de regulación diferencial.

Inmediatamente después de que se presente el fenómeno transitorio, la cámara de aire se convierte en un medio para mantener en movimiento el fluido en la conducción y reducir las variaciones de presión de una forma controlada y mucho más lenta de lo que ocurriría sin la presencia de la cámara. Se trata entonces, de convertir un transitorio rápido en un fenómeno de oscilación en masa.

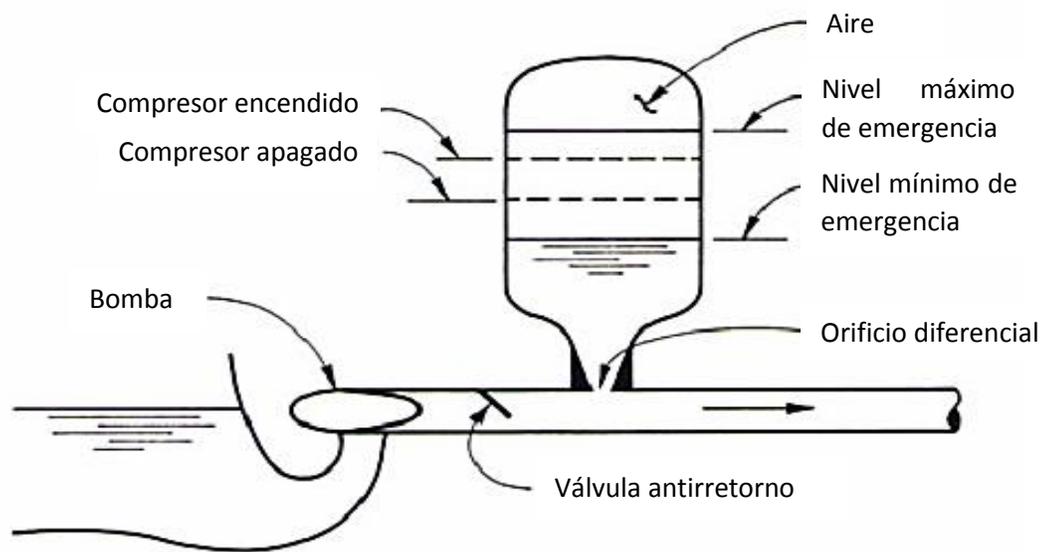


FIGURA 1.4-2 CÁMARA DE AIRE (CHAUDHRY, 2014, P. 351)

1. FENÓMENOS TRANSITORIOS.

La cámara tiene las siguientes ventajas:

- El efecto de la onda de presión negativa inicial no depende de la cota inicial de la superficie libre del agua. Por ello la cámara de aire es especialmente útil para instalaciones con topografía difícil que no permitirían otros dispositivos como torres de oscilación o tanques unidireccionales.
- El volumen que requiere la cámara de aire para mantener las presiones máximas y mínimas recomendables es menor que el que ocuparía una torre de oscilación.
- Puede instalarse con su eje paralelo al suelo, lo que reduce costos en cimentación.
- Puede instalarse cerca de la planta de bombeo. Para una torre de oscilación no es práctica esta ubicación.
- Es más económico tomar medidas para hacer trabajar la cámara de aire a bajas temperaturas que con una torre de oscilación, por su tamaño.

Sus desventajas son:

- En sistemas de bombeo relativamente grandes, si bien reduce la onda depresión inicial, no la suprime por completo, por lo que en ocasiones puede ser necesario instalar aguas abajo de la cámara de aire otros dispositivos de control secundarios, tales como tanques unidireccionales.
- La desventaja que quizás resulta más decisiva a la hora de rechazar la instalación de una cámara de aire es el costo económico que conlleva principalmente por los gastos de mantenimiento que origina, que se aplican en el compresor para mantener el volumen de aire necesario, en las válvulas de no retorno y regulación, que se instalan en la conexión de la cámara de aire y en general en toda la instalación complementaria que acompaña a la misma.
- Requiere constante mantenimiento mecánico.

(Comisión Nacional del Agua, 2015, págs. 25-28) (Chaudhry, 2014, pp. 351, 352)

1.4.3. TANQUE UNIDIRECCIONAL

La conexión entre un tanque unidireccional y la tubería que protege está condicionada mediante una válvula de retención que sólo permite flujo desde el tanque hacia la conducción, así entonces, el nivel de agua en el tanque puede estar por debajo del nivel de la línea piezométrica de operación normal.

Al incidir una onda de depresión en el conducto, esta onda no captará la presencia del tanque, ya que éste es aislado por la válvula, sólo cuando la línea piezométrica haya descendido lo suficiente para que la válvula abra, el tanque actuará como un reflector de la onda de baja presión, aportando un volumen de agua suficiente para controlarla. Después el tanque se vuelve a llenar por una tubería alterna.

Ventajas:

1. FENÓMENOS TRANSITORIOS.

- Al no depender de la línea piezométrica, la altura del dispositivo es baja, además puede instalarse en conducciones con topografía difícil donde una torre de oscilación sería inasequible.
- Como se refleja parcialmente la onda de baja presión, no hay sobre velocidades inversas que incidan en el equipo.

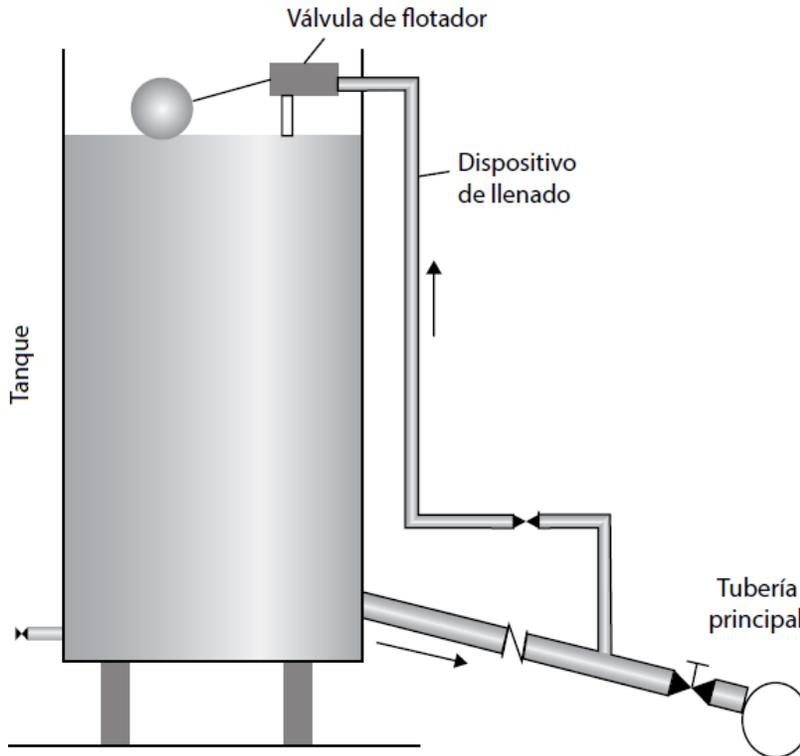


FIGURA 1.4-3 TANQUE UNIDIRECCIONAL (COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA, 2015, PÁG. 30)

(Comisión Nacional del Agua, 2015, pág. 29) (Cafaggi Félix, Rodal Canales, & Sánchez Huerta, 2011, pp. 324-326)

1.4.4. TANQUE BIDIRECCIONAL

Llamado también tanque unidireccional cerrado, consiste en un depósito cerrado conectado a la tubería, en su parte superior tiene válvulas de admisión rápida y expulsión lenta de aire.

Cuando la presión desciende a un valor menor que Δz (según la Figura 1.4-4), el agua comienza a fluir de tanque a la tubería e ingresa aire por las válvulas. Al aumentar nuevamente la presión en la tubería, vuelve a entrar agua en el tanque y el aire escapa por medio de las válvulas. Cuando todo el aire es expulsado las válvulas cierran. Si es que la expulsión de aire fuera demasiado rápida, en ese instante podría producirse una sobrepresión importante, por ello las válvulas deben admitir aire rápidamente y expulsarlo lento.

Desventajas:

- Necesita mantenimiento mecánico constante (válvulas de retención y vía de llenado).
- Implica solicitaciones importantes a la tubería localizada entre la planta de bombeo y el propio tanque.
- Aguas abajo del tanque pueden aparecer problemas por depresiones excesivas en la conducción. Esto origina que deban utilizarse otros dispositivos adicionales para protección de toda la línea. Comúnmente los mismos tanques unidireccionales son usados como medios de control secundarios.

1. FENÓMENOS TRANSITORIOS.

Las ventajas y desventajas son las mismas que en el tanque unidireccional, con la ventaja de no requerir válvula de no retorno ni un dispositivo de llenado, además, las válvulas de admisión y expulsión lenta de aire que suelen ser más seguras en su funcionamiento y no requieren tanto mantenimiento como una válvula de no retorno y un dispositivo de llenado.

(Comisión Nacional del Agua, 2015, págs. 29,30)

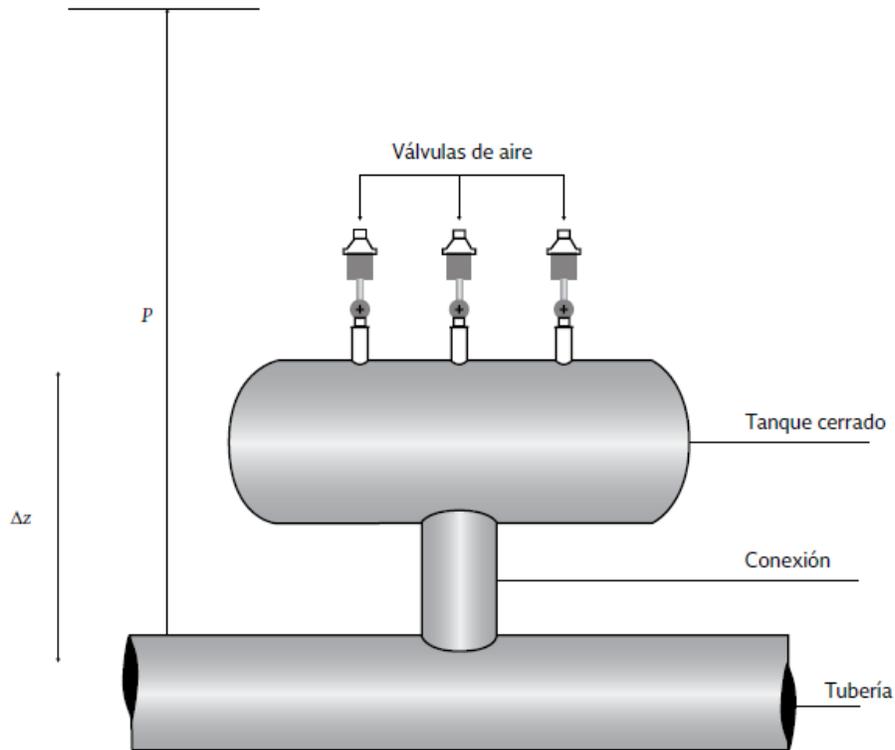


FIGURA 1.4-4 ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE TANQUE BIDIRECCIONAL (COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA, 2015, PÁG. 31)

1.4.5. VÁLVULAS

Las válvulas por sí solas no son un método de control de transitorios, sin embargo, su consideración se da debido a lo siguiente:

- Una válvula abre o cierra para reducir la tasa de cambio neto en la velocidad del flujo en la tubería.
- La válvula abre para permitir la entrada de aire en la tubería, previniendo que la presión disminuya al valor de la presión de vaporización.
- Si la presión excede un límite establecido, la válvula abre para dar lugar a una salida rápida de flujo haciendo que la presión en la línea disminuya, reduciendo así la presión máxima.

(Chaudhry, 2014, pp. 354,355)

Dentro de las válvulas más usadas para el control de transitorios se encuentran las que se explicarán a continuación:

1. FENÓMENOS TRANSITORIOS.

1.4.5.1. VÁLVULAS DE ALIVIO (DE SEGURIDAD).

Existen gran cantidad de tipos de válvulas de alivio, las hay de resorte, de contrapeso u otras más complicadas con complejos pivotajes y posibilidades de regulación.

La válvula de resorte es del tipo más sencillo. En ésta se sostiene un resorte a través de un vástago, el cual tiene un plato en su extremo que mantiene tapado un orificio que está comunicado con el agua en la tubería. Si la fuerza del empuje por la presión del agua que actúa sobre el plato sobrepasa la fuerza ejercida por el resorte, el plato se levanta y a través del orificio se descarga cierto gasto directamente al exterior o hacia un recipiente. Al disminuir la presión dentro de la tubería, por la acción del resorte, la válvula se cierra.

La presión a la que se abre una válvula puede regularse ajustando la tensión del resorte. Normalmente la válvula se ajusta para abrir cuando la presión en la conducción alcanza un valor entre 10 y 20 por ciento superior a la presión en régimen permanente.

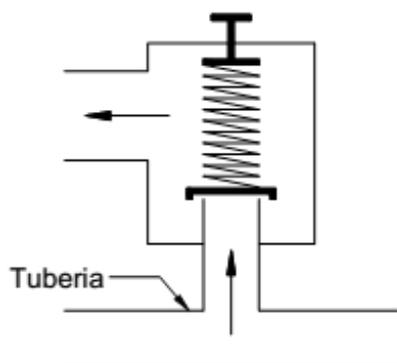


FIGURA 1.4-5 SECCIÓN TRANSVERSAL Y ESQUEMA DEL COMPORTAMIENTO DE DESCARGA DE UNA VÁLVULA DE SEGURIDAD.

Cuando se genera una depresión momentánea en la línea, la válvula se abre bruscamente para desfogar cierto gasto, lo que ocasiona que la presión baje y la válvula cierre rápidamente. Este cierre rápido genera a su vez una sobrepresión que abre la válvula de nuevo, y así sucesivamente, causando un golpeteo continuo que provoca pulsos de descarga a través de la tubería. El cierre abrupto de la válvula también podría generar un nuevo transitorio en la conducción.

Se sabe que un fenómeno transitorio presenta presiones dinámicas de muy corta duración. La válvula de resorte no responde inmediatamente ante esas presiones, por lo general cuando se abren lo hacen un tiempo después de producirse la sobrepresión en la tubería. Esto constituye su principal desventaja, ya que si la válvula no reacciona a tiempo las sobrepresiones del transitorio pasarán a otro punto de la conexión. Existen válvulas de alivio especialmente fabricadas para el control de transitorios que sí aseguran la apertura inmediata ante las sobrepresiones que se generen.

En algunos casos la apertura de la válvula puede ser comandada por medio de una válvula solenoide, la cual, en el caso de la interrupción de suministro eléctrico a las bombas, habilita un circuito hidráulico o neumático que abre la válvula instantes antes de que ocurra el ascenso de presión, garantizando su operación oportuna. (Cafaggi Félix, Rodal Canales, & Sánchez Huerta, 2011, pág. 332)

Si en la planta de bombeo se instalan más de una válvula de alivio, éstas deberán entrar en funcionamiento de una manera progresiva, con el fin de minimizar la depresión y en consecuencia la introducción de nuevas perturbaciones. (Comisión Nacional del Agua, 2015, págs. 34-37)

1.4.5.2. VÁLVULAS ANTICIPADORAS DE GOLPE DE ARIETE.

Las válvulas anticipadoras se utilizan sólo en sistemas en que el transitorio comienza con depresiones, por ejemplo, cuando ocurre un paro accidental en el equipo de bombeo.

Cuando la presión en la línea de conducción alcanza un valor inferior al que está ajustada la válvula anticipadora, ésta se abre rápidamente comunicando el agua de la tubería con el exterior. Si la presión continúa disminuyendo, a través de la válvula comienza a entrar aire. Después de haberse abierto la válvula va cerrando paulatinamente, de manera que en las siguientes fases de depresión y sobrepresión del transitorio se va permitiendo la entrada de aire hacia la tubería o bien la descarga de cierto gasto hacia el exterior.

(Comisión Nacional del Agua, 2015, pág. 37).

1.4.5.3. VÁLVULAS DE ADMISIÓN Y EXPULSIÓN DE AIRE.

Llamadas también válvulas rompedoras de vacío, permiten la entrada de aire en la tubería al momento en que el flujo alcanza una presión menor que la atmosférica. Posteriormente cuando la presión interna es mayor que en el exterior, el aire admitido es expulsado. Se debe proveer una lenta expulsión de aire ya que puede resultar en presiones muy altas.

Usualmente estas válvulas se instalan en los puntos más altos de una tubería, ya que es el principal sitio donde puede quedarse atrapado aire, asegurando así la expulsión de este durante el llenado de la tubería o bien su entrada durante el vaciado de la línea.

Una válvula introduce aire a la conducción para dos fines, el primero es ventilar la conducción y el segundo es controlar depresiones originadas durante el transitorio. Se debe tener muy claro el fin para el que se usa la válvula ya que una incorrecta elección ocasionaría problemas mayores a los que pudiera ayudar a resolver.

Cuando se tiene una válvula de aire para ventilar la conducción, ésta debe tener gran capacidad de expulsión y admisión de aire para que éste salga rápidamente al llenarse la conducción y entre rápidamente cuando la conducción se vacía. Durante la operación normal debe tener baja capacidad de expulsión de aire, para expulsar el aire que se libera del agua en los puntos más altos.

Cuando el fin que se busca para la válvula es el de mitigar depresiones durante un transitorio este dispositivo es muy eficaz, siempre y cuando exista una gran capacidad de admisión de aire y una baja capacidad de expulsión de aire. La admisión de aire debe ser suficiente para que en la línea no se llegue a la presión de vaporización, y la expulsión la adecuada para reducir la formación de altas presiones cuando las columnas de líquido se juntan luego de la separación de la columna, proporcionando así un amortiguador de aire en la línea.

(Chaudhry, 2014, p. 356) (Cafaggi Félix, Rodal Canales, & Sánchez Huerta, 2011, pág. 333)
(Comisión Nacional del Agua, 2015, págs. 38,39)

1.4.5.4. VÁLVULAS ANTIRRETORNO (CHECK).

Una válvula antirretorno, o de no retorno, se usa para prevenir el flujo en reversa hacia una bomba o un tramo de tubería. En su forma más simple consiste en una válvula con una solapa que abre en una dirección de flujo y si éste se invierte, se cierra bruscamente. Tal golpe puede dar como resultado un pico de presión y/o vibraciones en el sistema de tuberías. (Chaudhry, 2014, p. 356).

Para elegir la válvula de retención más conveniente en un transitorio, debe cuidarse entre otras cosas que sus partes móviles tengan baja inercia. Existe un tipo de válvula en el que se proporciona un cierre lento que se auxilia de resortes o bien de un sistema de palancas y un amortiguador de aceite. Estas válvulas se instalan con las bombas, en lugar de las válvulas antirretorno normales, con el objetivo de descargar cierto gasto a través de las bombas durante la presión alta que ocasiona el transitorio y así aliviar dichas sobrepresiones. En las bombas normalmente se colocan válvulas de no retorno para evitar el vaciado de la línea después de un paro.

En ciertas condiciones topográficas, las válvulas de no retorno pueden colocarse en puntos intermedios de la tubería para detener el flujo inverso resultante de un transitorio y así reducir las sobrepresiones en el inicio de la conducción y dividiendo a la tubería en zonas con transitorios independientes limitadas por las válvulas antirretorno.

Dentro de los puntos negativos a considerar está, que las válvulas de no retorno ubicadas en puntos intermedios de la conducción no tendrán efecto en la fase de depresión del transitorio, es por ello por lo que se necesitará otro tipo de válvulas auxiliares. Otra consideración es que si las válvulas se encuentran en puntos de la tubería donde haya difícil acceso, también será difícil su mantenimiento, lo que ocasiona que, si una de ellas falla, los efectos del transitorio previstos en ese tramo se acumulen en otro, ocasionando que la tubería se vea sometida a esfuerzos mayores a los considerados, con el consiguiente peligro de rotura.

Otra desventaja de las válvulas de no retorno son las pérdidas de carga generadas en la operación normal de la línea, con el consiguiente incremento en el costo de energía eléctrica para el bombeo.

En cuanto al modelado matemático de la línea con válvulas de no retorno en las cuales no se dispone de las características dinámicas, se recomienda tener cuidado si se va a suponer que las válvulas son ideales, es decir, que tendrán un cierre instantáneo cuando el flujo sea inverso, ya que si no se colocan esas válvulas ideales, las sobrepresiones reales que resultarán serán superiores a las que da el modelo.

(Comisión Nacional del Agua, 2015, págs. 30,31)

1.4.6. MEMBRANAS PROTECTORAS O FUSIBLES HIDRÁULICOS.

Son discos finos de metal u otros materiales que se destruyen cuando existe una determinada presión. Se colocan en desviaciones de tubería, cerca de la planta de bombeo o en sostenedores especiales después de una válvula de paso constantemente abierta. Cuando en la línea se alcanzan sobrepresiones inadmisibles, la membrana se rompe expulsando cierto volumen de líquido, reduciendo así la presión. Después la válvula se cierra hasta que se cambie la membrana por una nueva.

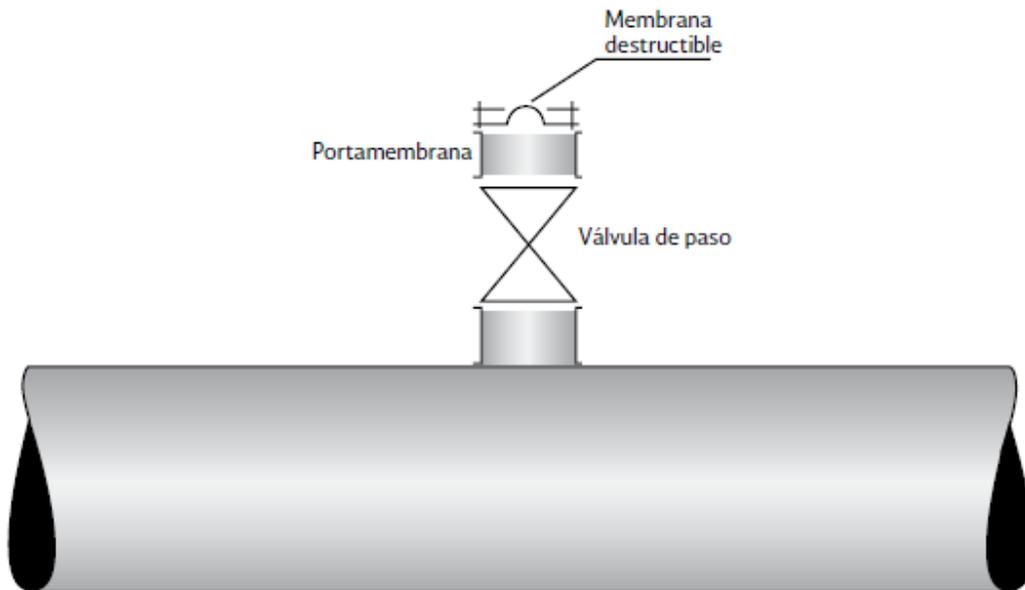


FIGURA 1.4-6 COLOCACIÓN DE MEMBRANA DESTRUCTIBLE

Debido a su bajo costo se recomienda su uso como dispositivo de protección adicional ante fallas de los equipos de protección de transitorios. Se recomienda su colocación cerca de plantas de bombeo u otros lugares que se desee proteger.

La gran desventaja de la membrana es que al romperse, la tubería seguirá descargando agua hasta que se le sustituya por una nueva. Esta deficiencia puede ser eliminada con la utilización de dispositivos especiales que aseguren el cierre automático de la válvula de paso posterior a la rotura de la membrana.

(Comisión Nacional del Agua, 2015, págs. 39,40)

2. ESTADO DEL ARTE DEL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

2.1. INTRODUCCIÓN Y BREVE REFERENCIA HISTÓRICA.

El empleo de cámaras de aire para la protección de grandes redes de tuberías de fenómenos transitorios ha hecho necesario el desarrollo de herramientas para su óptimo dimensionamiento, de tal manera que satisfagan el rubro de seguridad, pero también que ponderen los costos de su construcción y operación.

Existen varios métodos para el predimensionamiento de cámaras de aire, algunos de ellos basados en nomogramas y gráficos, también métodos heurísticos que se limitan a dimensionar cámaras para problemas simples en conductos a presión. Si bien se han realizado intentos para utilizar técnicas de optimización, no han tenido tanto éxito debido a sus requisitos computacionales poco prácticos.

Los primeros trabajos de investigación en la protección de conductos a presión fueron presentados por Allievi en 1937 y Evangelisti en 1938.

Allievi definió dos parámetros adimensionales, uno del golpe de ariete en la tubería definido como "una función de la relación de la energía cinética en estado estacionario con la energía potencial total en una longitud unitaria de tubo" y el segundo de la cámara de aire definido como relación de energía potencial de la cámara a la energía cinética de la columna líquida de descarga. Estos dos parámetros se desarrollaron suponiendo una expansión isotérmica ($n=1$) del aire y descuidando las pérdidas por fricción en el sistema, así como las pérdidas de entrada y salida de la cámara.

Evangelisti, desarrolló gráficas para el dimensionamiento de cámaras de aire, utilizando la teoría del flujo incompresible, despreciando la fricción de la tubería y suponiendo la expansión adiabática del aire ($n=1.41$). Las ecuaciones que desarrolló permiten una solución analítica si se

2. ESTADO DEL ARTE DEL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

desprecia la fricción en la tubería e introduce una constante adimensional (relación de la pérdida de carga en estado permanente con la presión absoluta en estado permanente) para usar en procedimientos de integración numérica cuando se considere la fricción de la tubería. Estos gráficos demostraron el papel favorable de las pérdidas de fricción en la tubería en la atenuación de las oscilaciones de presión.

Evans y Crawford (1954) desarrollaron diagramas de diseño para el dimensionamiento de las cámaras de aire utilizando parámetros de Allievi, un método gráfico para análisis transitorios en tuberías y un orificio diferencial (La relación entre las pérdidas en el orificio de entrada al de salida eran de 2.5). Introdujeron además un tercer parámetro (en adición a los mostrados por Allievi en 1937) para incorporar pérdidas por fricción en el procedimiento de diseño y usaron una constante politrópica de 1.2 (a la mitad de las condiciones isotérmicas $n = 1$ y las adiabáticas $n = 1.4$).

En 1955 Parmakian desarrolló un sistema para el cálculo del volumen de la cámara a través de gráficos. Los cambios de volumen y presión en la cámara se toman también entre la expansión adiabática e isoterma. La relación del total de las pérdidas de carga del flujo que entra al que sale, es de 2.5 a 1. La simpleza del método es que coloca sus gráficos en términos de parámetros básicos determinantes de los efectos de golpe de ariete. La desventaja es que sólo tiene gráficos para ciertos parámetros, si se obtienen resultados distintos se deberá extrapolar.

A principios de los años 70 las soluciones a computadora se hicieron comunes en el análisis de transitorios hidráulicos. Graze y Forrest (1974) utilizaron una solución computarizada del método de características para el análisis de transitorios al distribuir las pérdidas por fricción a lo largo de la tubería y recrearon las tablas desarrolladas por Evans y Crawford (1954) para proteger una conducción a presión. Las sobrepresiones máximas se redujeron notablemente y las depresiones máximas fueron ligeramente incrementadas debido a la distribución de la fricción de la línea. Ruus (1977) extendió estos gráficos para mostrar perfiles de presión extrema desde la cuarta parte de la línea junto al depósito. Fok (1978) desarrolló gráficos que mostraban presiones extremas en cualquier punto de la tubería y además advirtió que el uso del valor politrópico de 1.2 era más realista. También afirmó que estos gráficos se pueden aplicar a redes de tuberías si la energía cinética de estado permanente de la red se puede representar mediante un flujo equivalente de una sola línea.

Graze y Horlacher (1982) eliminaron la resistencia del orificio del análisis e incluyeron la constante politrópica (n) como variable y desarrollaron gráficos basados en el método de las características. Usaron la "ecuación termodinámica racional" desarrollada en 1968 en un estudio por Graze. Esta ecuación trató la constante politrópica como una variable de tiempo durante la fase transitoria dentro de la cámara de aire. Los resultados teóricos y experimentales concordaron muy bien. A pesar de ello el método no fue utilizado por otros investigadores debido a la dificultad de aplicarlo en la práctica. Los gráficos desarrollados por Graze y Horlacher presentaron presiones extremas a lo largo de toda la tubería. En 1986, los mismos autores reintrodujeron la resistencia del orificio en el análisis, pero la trataron por separado de la

2. ESTADO DEL ARTE DEL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

fricción en la línea. Este estudio indicó que la relación entre la pérdida de la cabeza del orificio de entrada y la del orificio de salida podría ser de 10-30 en comparación con el 2.5 empleado hasta entonces para un diseño económico de la cámara. Thorley y Enever (1984) obtuvieron valores altos similares.

Thorley y Lastowiecki (1985) presentaron el primer procedimiento iterativo computarizado para el dimensionamiento de cámaras de aire para sistemas de tuberías.

Mancebo (1987) con base en la solución de ecuaciones diferenciales establecidas para sistemas hidráulicos con fricción obtuvo unas cartas mediante las cuales se puede predimensionar una torre de oscilación, así como también una cámara de aire.

En 1989, Graze y Horlacher desarrollaron gráficos para escenarios con cierre de válvulas sin contar la resistencia del orificio, siguiendo después otros donde sí consideraron la resistencia del orificio. En ese trabajo, Graze y Horlacher (1989) también mostraron cómo la resistencia de salida de la cámara se puede utilizar para el control eficiente de las turbinas.

En el 2002, Stephenson utilizó la teoría de flujo incompresible para desarrollar nomogramas para el dimensionamiento de cámaras para los problemas de disparo de bomba asociados a la línea de conducción a presión y comparó los resultados con los del análisis elástico completo. Enfatizó la importancia de las resistencias del orificio en el dimensionamiento económico de las cámaras y concluyó que la resistencia del orificio es más importante en el proceso de diseño de las cámaras de aire que el índice politrópico.

Di Santo et al. (2002) desarrollaron gráficas de diseño para el dimensionamiento de cámaras para el escenario de disparo accidental de la bomba cuando la condición de frontera aguas abajo es un tanque vertical que descarga libremente a la atmósfera en lugar de la clásica hipótesis del depósito con carga constante utilizado en otros estudios. Para validar los resultados utilizaron el método de columna rígida de agua realizaron mediciones de campo.

Además de limitarse a problemas en conducciones a presión, los diagramas de diseño pueden aplicarse solo en la etapa de diseño preliminar debido a sus hipótesis simplificadoras (por ejemplo, despreciar las pérdidas por fricción), selección y alcance de sus parámetros, precisión e integridad limitada de las soluciones.

Thorley (1991) enfatizó que los diagramas de diseño solo podían usarse para proveer datos básicos preliminares para un análisis transitorio más detallado y estableció que generalmente se debe usar un factor de seguridad de 1.2 o 1.25.

Zarco (2000, 2002) presenta un método simplificado para el predimensionamiento de cámaras de aire; así como un método analítico que permite calcular los volúmenes de las cámaras de aire para controlar depresiones durante los transitorios hidráulicos presentados por paro de equipo de bombeo, ambos métodos basados en ecuaciones paramétricas.

Últimamente se ha presentado un enfoque de optimización bi-nivel basado en algoritmos genéticos (GA) para el diseño de tanques de oscilación y cámaras de aire en redes de distribución de agua. Los modelos de optimización populares (Kapelán et. al 2003, Vitkowsky et.

2. ESTADO DEL ARTE DEL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

al 2000, Lingireddy et. al 2000, Nash y Karney 1999, Wang et. al 1997, y Bong y Karney 2006) ejecutaron modelos de simulación de transitorios cientos de veces para obtener una solución óptima. Bong y Karney (2006) estudiaron el problema de la ubicación óptima de los tanques de oscilación y válvulas de alivio de presión y el tamaño de las válvulas de alivio de presión para una red de distribución de agua de 29 tuberías para protección contra las presiones transitorias creadas por cierres repentinos de válvulas. No se realizó el dimensionamiento de las cámaras de aire.

Ramalingam (2007) desarrollo un marco de trabajo para generar herramientas de diseño que ayuden a optimizar el tamaño de las cámaras de aire para proteger redes de tuberías de los transitorios hidráulicos a través de técnicas de optimización computarizadas.

(Ramalingam, 2007), (Jimenez Magaña, Espinosa Peralta, Rodríguez Vazquez, & Sosa Rodríguez, 2013)

En el presente capítulo se abordan algunos de los principales métodos de diseño de cámaras de aire.

2.2. PARMAKIAN (1955).

El diseño mediante los criterios de Parmakian se basa en la asunción de que luego de ocurrir un paro en el equipo de bombeo la válvula antirretorno cierra de manera inmediata; resultando entonces que todo el flujo de la línea de descarga es de, o va hacia la cámara. Asumir esto elimina las características de la bomba de los cálculos computacionales, pero introduce una onda abrupta de presión correspondiente a la caída instantánea de la carga a través del orificio diferencial en la base de la cámara.

Los cambios de volumen y presión en la cámara se toman a la mitad de entre la expansión adiabática e isoterma, como se muestra:

$$H^*C^{1.2} = H_0^*C_0^{1.2} = cte.$$

ECUACIÓN 2.2-1

Donde C es el volumen de aire comprimido en la cámara; H* es la carga de presión absoluta en la cámara.

Es decir:

$$h^*c^{1.2} = 1$$

ECUACIÓN 2.2-2

Dónde:

$h^* = H^*/H_0^*$ (Relación de la carga de presión absoluta en la cámara en cualquier tiempo a la carga de presión inicial) y $c = C/C_0$ (Cociente del volumen de aire comprimido respecto al volumen inicial en la cámara a cualquier tiempo)

El volumen de aire comprimido en la cámara a cualquier instante t_2 en términos de volumen en un tiempo previo es:

$$C_{t_2} = C_{t_1} - A \int_{t_1}^{t_2} V dt.$$

ECUACIÓN 2.2-3

A es el área de la sección transversal en la línea de descarga de la bomba.

$$C_{t_2} = C_{t_1} - \frac{A(V_{t_1} + V_{t_2})\Delta t}{2}$$

ECUACIÓN 2.2-4

Donde el intervalo de tiempo $\Delta t = t_2 - t_1$

Para usar la Ecuación 2.2-4 con la solución gráfica del “golpe de ariete” es necesario escoger Δt como una fracción del tiempo de viaje de la onda en la línea de descarga, es decir $\Delta t = \delta(L/a)$, así entonces:

$$\frac{C_{t_2}}{C_0} = \frac{C_{t_1}}{C_0} - \frac{A(V_{t_1} + V_{t_2})}{2 C_0} \cdot \frac{Q_0}{A V_0} \cdot \frac{L\delta}{a} \quad \text{Ó:}$$

2. ESTADO DEL ARTE DEL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

$$C_{t_2} = C_{t_1} - \frac{(v_{t_1} + v_{t_2})\delta}{2 C_0 a / Q_0 L}$$

ECUACIÓN 2.2-5

Como los cambios en el volumen de aire en la cámara se definen en términos de presión absoluta, es preferible definir las características de la línea de descarga en términos de presión absoluta, es decir:

$$\rho^* = \frac{a V_0}{2gH_0^*}$$

ECUACIÓN 2.2-6

Donde a es la celeridad y V_0 la velocidad del régimen

SOLUCIÓN GRÁFICA.

El diseño de una cámara de aire se basa en la utilización de cuatro Gráficas (Anexo A), en las cuales las sobrepresiones o depresiones máximas en la línea de descarga se colocan en términos de los parámetros básicos determinantes de los efectos del golpe de ariete en la línea de descarga de una bomba con cámara de aire, los cuales son $2\rho^*$ y $2C_0 a / Q_0 L$.

Dichas gráficas se construyeron luego de un gran número de soluciones posibles para dimensionamiento de cámaras de aire, asumiendo lo siguiente.

- La cámara de aire está localizada cerca del equipo de bombeo
- El cierre de la válvula antiretorno es inmediato al fallo de la bomba
- La relación de presión-volumen para el aire comprimido en la cámara $H^* C^{1.2} = a$ constante
- La relación del total de las pérdidas de carga del flujo que entra al que sale, es 2.5 a 1

El coeficiente de pérdidas mediante el cual se seleccionará la gráfica a usar, se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$K = \frac{h_f + h_{by\ pass}}{H_0^*}$$

ECUACIÓN 2.2-7

Donde el dividendo corresponde a las pérdidas en la línea de descarga más las pérdidas en el orificio diferencial cuando un flujo de reversa Q_0 pasa hacia la cámara.

Para obtener el valor de la pendiente característica de la ecuación de propagación, se procede a despejar la Ecuación 2.2-6, quedando como sigue:

$$2\rho^* = \frac{a V_0}{gH_0^*}$$

Con este valor se seleccionará la curva correspondiente en la gráfica.

2. ESTADO DEL ARTE DEL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

Ubicando estos dos parámetros y trazando una horizontal sobre el eje de las ordenadas, se obtiene el valor la máxima sobrepresión.

Para asegurarse que el aire no entrará a la línea de descarga cuando se alcance la máxima depresión, el volumen total de aire debe ser mayor que C'

$$C' = C_0 \left(\frac{H_0^*}{H_{\min}^*} \right)^{1/1.2} \approx \frac{C_0 H_0^*}{H_{\min}^*}$$

ECUACIÓN 2.2-8

Donde $H_{\min}^* = H_0^* - \text{depresión máxima adyacente a la bomba}$

Control del nivel de agua.

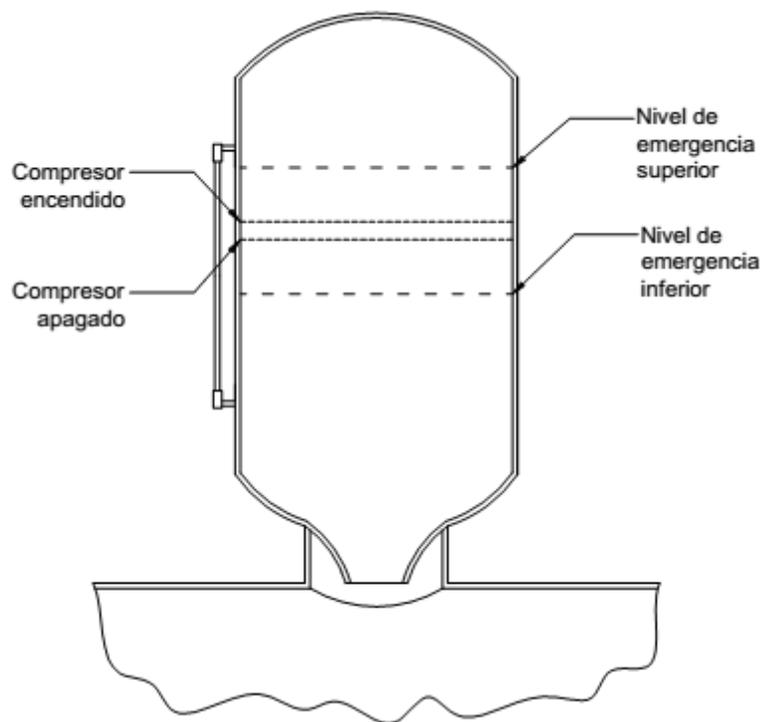


FIGURA 2.2-1 CONTROL DE NIVELES EN LA CÁMARA DE AIRE

Se sabe que a medida que ocurra el fenómeno transitorio, el aire de la cámara se irá disolviendo en el agua, inclusive el compresor de aire no podrá mantener un estricto nivel constante de aire dentro, es por ello que el nivel de la superficie libre del agua fluctuará en el tiempo. Estos cambios de nivel del agua pueden ser usados para accionar controles en la planta de bombeo. Usualmente se requieren dos grupos de controles, los de niveles de emergencia superior e inferior y los de niveles encendido y apagado del compresor como se muestra en la Figura 2.2-1. Cuando el nivel de agua en la cámara alcanza cualquiera de los niveles de emergencia, la planta de

bombeo se detiene automáticamente. El volumen de aire en la cámara debe ser estar por encima del nivel superior de emergencia y el nivel de agua en la cámara debe estar por debajo del nivel inferior de emergencia para prevenir que entre aire de la línea de descarga. Así C_0 se calcula con las gráficas vistas y se incrementa por una cantidad igual al volumen de la cámara entre los niveles de emergencia superior e inferior. Un nuevo valor de H_{\min}^* en la base de la cámara se obtiene de las gráficas. El volumen total de la cámara se obtiene con la Ecuación 2.2-8 donde el volumen C' se determina de nuevo con los nuevos valores H_{\min}^* y C_0 .

(Parmakian, 1963, págs. 131-143)

2.3. RUUS E. (1977).

Para determinar el volumen de aire que requiere una cámara de aire para una determinada línea de descarga Ruus E. presenta una serie de gráficos para la sobrepresión y depresión máximas luego de un paro en el equipo de bombeo, en tres casos: al final de la bomba, a la mitad de la longitud de la línea y a la cuarta parte de la línea de descarga del lado del depósito (Anexo B, Gráficas 5, 6, 7, 8, 9 y 10).

Los gráficos asumen lo siguiente:

- La cámara de aire está localizada cerca de la planta de bombeo.
- La válvula check cierra de manera simultánea a la falla del equipo de energía.
- La fórmula de Darcy Weisbach para calcular las pérdidas de fricción en flujo permanente es válida durante el estado transitorio.
- La carga absoluta de presión H^* y el volumen de aire, C , dentro de la cámara, corresponden a la relación $H^*C^{1.2}=\text{Cte}$.

a	Celeridad
V_0	Velocidad inicial en estado permanente
g	Aceleración debido a la gravedad
H_0	Carga estática (Elevación del depósito – Elevación de la cámara de aire)
H_0^*	Carga estática absoluta ($H_0 + 10.36$ SI; $H_0 + 34$ Sistema Inglés)
H_{f_0}	Pérdidas de carga iniciales en la línea de descarga en estado permanente ($fLV_0^2/2gD$)
C_0	Volumen de aire inicial en la cámara en estado permanente
Q_0	Descarga inicial en la línea de descarga en estado permanente
L	Longitud de la línea de descarga
D	Diámetro de la línea de descarga
ρ^*	$aV_0/[2g(H_0^* + H_{f_0})]$

La depresión y sobrepresión máximas están sobre y debajo del nivel del depósito, y las cargas de presión absoluta se obtienen sumando o restando la sobrepresión o depresión al nivel del depósito más la carga barométrica.

Para determinar el tamaño de la cámara de aire:

- Determinar el valor de la expresión $2C_0a/(Q_0L)$ de las Gráficas correspondientes a Ruus E. (Anexo B) para la máxima depresión permitida en cualquier punto crítico a lo largo de la tubería (Se puede usar interpolación lineal si dicho punto no está a la mitad o cuarta parte de la tubería).

2. ESTADO DEL ARTE DEL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

- De $2C_0\alpha/(Q_0L)$ calcular volumen de aire inicial mínimo en estado permanente $C_{0\ min}$, este volumen corresponde al nivel de emergencia superior en la cámara de aire.
- Adicionar el volumen de la cámara entre los niveles de emergencia superior e inferior al volumen mínimo de aire. Para este volumen entre los niveles de emergencia superior e inferior se sugiere el 10% para cámaras grandes y 20% para cámaras chicas.
- Para el nuevo volumen de aire $C_{0\ max}$, determinar la máxima depresión al final de la bomba de las Gráficas correspondientes a Ruus E. (Anexo B) y después determinar la carga absoluta mínima H_{min} al final de la bomba al restar la depresión máxima en la bomba de la carga estática absoluta H_0^*
- El volumen de aire máximo en estado transitorio C_{max} se puede determinar a través de la ecuación:

$$C_{max} = C_{0\ max} \left(\frac{H_0^* + H_{f_0}}{H_{min}^*} \right)^{1/1.2}$$

ECUACIÓN 2.3-1

Donde:

$H_0^* + H_{f_0}$ es la carga absoluta inicial en estado permanente

- El volumen de la cámara se puede seleccionar en torno al 120% del volumen de aire máximo C_{max} , para cámaras de aire pequeñas y aproximadamente 110% para cámaras de aire grandes.

(Chaudhry, 2014, pp. 506-510, 515-517)

2.4. GUARGA (1985).

Guarga expone un método para el diseño de una cámara de aire, la cual determina de manera preliminar los parámetros fundamentales para después completar los valores necesarios con su modelo teórico.

Se considera un acueducto con un gasto de régimen Q_0 . Para la presión absoluta de operación en régimen P_0 la cámara tiene volumen V_0 de aire. Cuando ocurre un paro en el equipo de bombeo, la piezométrica cae, el aire se expande y el agua de la cámara es expulsada hacia la línea de conducción hasta llegar a un volumen V_{max} . Por lo tanto el volumen de agua entregada queda como:

$$V_e = V_{max} - V_0$$

ECUACIÓN 2.4-1

Se admite la siguiente evolución politrópica para la masa de aire en la cámara

$$V_0^{1.2} P_0 = V_{max}^{1.2} P_{min}$$

ECUACIÓN 2.4-2

Donde P_{min} es la presión absoluta mínima del gas.

Dicho volumen entregado, en función de V_0 y P_0/P_{min} es:

$$V_e = V_0 \left[\left(P_0 / P_{min} \right)^{1/1.2} - 1 \right]$$

ECUACIÓN 2.4-3

Para estimar en una primera aproximación este volumen:

$$V_e = Q_0 T$$

ECUACIÓN 2.4-4

Donde $T=2L/a$ ya que la cámara se diseña para que alimente el acueducto con un gasto de agua igual al del régimen Q_0 durante el tiempo T que la onda tarda en ir al depósito y regresar, transformando así al fenómeno rápido en uno lento.

Sustituyendo, se obtiene un resultado preliminar del volumen de aire que se requiere dentro de la cámara cuando el acueducto opera en régimen:

$$V_0 = \frac{2LQ_0}{a \left[\left(\frac{P_0}{P_{min}} \right)^{1/1.2} - 1 \right]}$$

ECUACIÓN 2.4-5

2. ESTADO DEL ARTE DEL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

El proyectista debe definir P_{min} en función del perfil del acueducto y de que la línea piezométrica estimada quede siempre por encima de dicho perfil. P_0 y P_{min} son presiones absolutas.

Una vez definido V_0 y conocidas P_0 y P_{min} se calcula V_{max} con la Ecuación 2.4-2

El volumen total de la cámara se define como:

$$V_T = 1.2V_{max}$$

ECUACIÓN 2.4-6

Para definir el coeficiente de llenado K_{LL} , Guarga plantea una serie de ecuaciones dinámicas donde después de ciertos razonamientos para el fenómeno de oscilación en masa obtiene la siguiente ecuación para hallar el periodo de oscilación natural del sistema con la cámara de manera preliminar, T_c .

$$T_c = 2\pi \left[\frac{gA}{LA_c} \left(1 + \frac{P_0}{\gamma} \cdot \frac{A_c}{V_0} \right) \right]^{-\frac{1}{2}}$$

ECUACIÓN 2.4-7

Como primera aproximación considerar:

$$A_c = \frac{V_0}{D_c}$$

$$D_c = \left(\frac{4V_0}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Donde P_0 es la presión absoluta del aire comprimido en la cámara, A_c es el área de la sección de la cámara, A es el área de la sección de la tubería, D_c es el diámetro de la cámara (Si este valor resultase muy grande, el proyectista deberá adaptarlo a condiciones constructivas reales, puede dividir el volumen V_0 en dos cámaras de mitad área).

El razonamiento matemático que se emplea para determinar el valor del coeficiente de pérdida de carga para el llenado, K_{LL} se basa en la disipación de la energía potencial para que las presiones en la cámara no adquieran valores excesivos, así, la fórmula que se obtiene para determinar K_{LL} de manera preliminar, es la siguiente:

$$K_{LL} = \left(\Delta z + \frac{P_a}{\gamma} - \frac{P_{min}}{\gamma} \right)^3 \left\{ \frac{T_c}{\left[2\Delta z V_0 \left(\frac{P_0}{P_{min}} \right)^{\frac{1}{1.2}} - 1 \right]} \right\}^2$$

ECUACIÓN 2.4-8

2. ESTADO DEL ARTE DEL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

Donde P_0 , P_{\min} y Δz son datos, V_0 se estima con la Ecuación 2.4-5 y T_c con la Ecuación 2.4-7 (Todas las presiones son absolutas)

A partir de los dos valores estimados de manera preliminar, T_c y K_{LL} , se aplica un modelo teórico en el que un sistema de ecuaciones diferenciales se transforma en un sistema algebraico, el cual se escribe en diferencias finitas para un instante actual, t . Después se obtiene un modelo algebraico no lineal que se resuelve mediante un algoritmo numérico, arrojando datos que indican si la cámara se está vaciando o llenando.

Cuando el modelo teórico se incorpora como parte del modelo de una instalación de bombeo, para cada pareja V_0 , K_{LL} puede estudiarse la respuesta global de la instalación, es decir el lugar de cargas piezométricas máximas y mínimas y la velocidad de rotación inversa de la máquina.

Para la exploración paramétrica de Guarga se sugiere fijar V_0 de manera preliminar con la Ecuación 2.4-5 e ir variando K_{LL} hasta obtener la presión máxima más baja en la descarga de la bomba. Ahora entonces se fijará ese valor de K_{LL} y se variará V_0 para determinar el V_0 min que dé depresiones compatibles con el perfil del acueducto puesto que a menor V_0 menor costo de la cámara.

(Instituto de Ingeniería, 1985)

2.5. GRAZE & HORLACHER (1989).

Graze & Horlacher desarrollaron una serie de gráficas de diseño para estimar la capacidad de la cámara de aire. Entre las ventajas de su uso se encuentran:

- Habilitan la sensibilidad del diseño para comprobar el índice politrópico asumido
- Permiten la optimización de las pérdidas en el orificio de entrada. Esto tiene la ventaja de que, con una reducción adecuada, el tamaño de la cámara se puede disminuir

Graze & Horlacher tienen otras gráficas de diseño donde proveen un indicador de las presiones extremas incidentes a lo largo de la tubería.

El propósito de tener todos estos resultados estimados, es proveer de datos básicos a los programas de cómputo que modelan el comportamiento de los transitorios de manera mucho más precisa.

2.5.1. CÁMARAS DE AIRE SIN REDUCCIÓN DE DIÁMETRO DE CONEXIÓN.

Los gráficos de diseño se presentan en una forma adimensional (Ver Anexo C) y se usan bajo los siguientes parámetros:

- Parámetro de fricción:

$$\bar{h}_f = \frac{h_L}{h_j}$$

ECUACIÓN 2.5-1

- Carga de Zhukovski

$$h_f = \frac{cv_0}{g}$$

ECUACIÓN 2.5-2

$$\bar{h}_0 = \frac{h_0^*}{h_j} = \frac{h_0 + h_{atm}}{h_j} = \frac{h_s + h_L + h_{atm}}{h_j}$$

ECUACIÓN 2.5-3

h_0^* denota presión absoluta

- Razón de carga máxima

$$HR_{max} = \frac{h_{max} - h_s}{h_j}$$

ECUACIÓN 2.5-4

- Razón de carga mínima

2. ESTADO DEL ARTE DEL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

$$HR_{min} = \frac{h_{min} - h_s}{h_j}$$

ECUACIÓN 2.5-5

- Parámetro, K, tanto de la cámara de aire como de la tubería

$$K = \frac{cC_0}{nAv_0L}$$

ECUACIÓN 2.5-6

Dónde:

A = Área transversal de la tubería

c = celeridad

C₀ = Volumen inicial de aire en la cámara (parámetro desconocido a ser calculado)

g = aceleración de la gravedad

h_{atm} = Carga local atmosférica

h_L = Pérdidas de carga por fricción en la línea

h₀ = Suma de la carga estática y cargas de fricción

h_s = Carga estática en la descarga de la bomba

L = Longitud de la tubería

n = Índice politrópico

v₀ = Suma de la carga estática y cargas de fricción

Los parámetros h_{max} y h_{min} son las respectivas cargas límites permitidas en la tubería en la vecindad de la conexión de la tubería con la cámara, los cuales usualmente son especificados por el diseñador del sistema.

El índice politrópico medio, n, usualmente se toma entre el rango de 1 a 1.4. Se refiere a él como “medio” porque bajo condiciones dinámicas en la cámara de aire es improbable que este valor sea constante. En una instalación típica oscila sin un rango aparente de aproximadamente 0.6 a 2.0, que asociado con variaciones en la presión y en la temperatura va de 4 a 13 bar y de -45 a 50°C respectivamente.

Para los presentes propósitos se considerará apropiado asumir un valor para n de 1.3 a 1.4 cuando se espera ocurra una pequeña transferencia de calor en la línea, mientras que para una transferencia significativa de calor, es decir, cuando se espera casi un comportamiento isotérmico, debería ser usado un valor entre 1.05 y 1.1. En un arreglo inicial se debería usar un valor entre 1.175 y 1.2

Las Gráficas 11, 12, 13, 14 y 15 del Anexo C, son para cargas de presión extremas en la tubería en la vecindad con la cámara de aire donde se asume que no haya salida diferencial para el flujo. El gráfico de diseño apropiado se selecciona en base al parámetro de fricción (Ecuación

2. ESTADO DEL ARTE DEL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

2.5-1). Las gráficas se usan para obtener una estimación del volumen de aire requerido bajo condiciones estáticas de flujo.

Las Gráficas 16, 17 y 18 presentadas en el Anexo C, presentan una selección de las envolventes de cargas máximas y mínimas que actúan a lo largo de la conducción, las cuales podrían ser usadas para verificar que los puntos altos o bajos no experimenten presiones extremas inaceptables.

Habiendo determinado el volumen inicial de aire (C_0), el volumen total (V_T) de la cámara se puede determinar a través del volumen máximo (C') al cual el aire se expande en la onda de depresión.

Asumiendo un comportamiento politrópico del aire en la cámara se tiene:

$$C' = C_0 \left(\frac{h_0^*}{h_{min}^*} \right)^{1/n}$$

ECUACIÓN 2.5-7

Donde:

$$h_0^* = h_s + h_L + h_{atm}$$

$$h_{min}^* = h_{min} + h_{atm}$$

$$V_T = C' * \text{Factor de seguridad}$$

ECUACIÓN 2.5-8

Un valor típico para el factor de seguridad es 1.2 o 1.25, dado para cuando ocurre que la presión en la cámara es mínima.

La escala de tiempo de las oscilaciones de presión en un sistema protegido por una cámara de aire es mucho más larga que sin ella. Las Gráficas 19 y 20 del Anexo C, proporcionan el tiempo en dónde las cargas máximas y mínimas ocurren, esto en sistemas con pérdidas de carga pequeñas. Si no hay fricción en el sistema la carga mínima y máxima ocurren según las expresiones:

$$t_{h_{min}} = \frac{T}{4} \text{ y } t_{h_{max}} = \frac{3T}{4}$$

ECUACIÓN 2.5-9

Donde el periodo de oscilación es:

$$T = \frac{2\pi L}{c} \sqrt{\frac{K}{h_0}}$$

ECUACIÓN 2.5-10

2.5.2. CÁMARAS DE AIRE CON ORIFICIO DIFERENCIAL.

La carga a través de la salida diferencial está dada por la siguiente ecuación:

$$h_{or} = \varepsilon \frac{v^2}{2g}$$

ECUACIÓN 2.5-11

ε es un coeficiente adimensional

Después de un gran número de simulaciones por computadora, Graze & Horlacher crearon las gráficas de diseño Gráficas 21 Y 22 (Anexo C), basadas en los coeficientes óptimos de pérdidas. Dónde la carga en el orificio diferencial para el flujo entrante, y la carga óptima en dicho orificio diferencial, quedan como sigue:

$$\bar{h}_{oren} = \frac{h_{orin} \text{ óptimo}}{h_j}$$

ECUACIÓN 2.5-12

$$h_{oren} \text{ óptimo} = \varepsilon \frac{v^2}{2g}$$

ECUACIÓN 2.5-13

(Thorley, 2004, págs. 168-190)

2.6. ZARCO HERNÁNDEZ (2000; 2002).

2.6.1. MÉTODO SIMPLIFICADO PARA EL PREDIMENSIONAMIENTO DE CÁMARAS DE AIRE.

En su trabajo de tesis para Licenciatura, José Ángel Zarco Hernández presenta el planteamiento y validación de un método simplificado para el dimensionamiento preliminar de cámaras de aire.

Los fundamentos teóricos empleados se basan en las ecuaciones de columna rígida (Ecuación 2.6-1), de estado de gas (Ecuación 2.6-2), de conservación de la masa (Ecuación 2.6-3) y la relación entre la carga manométrica y la presión absoluta (Ecuación 2.6-4), mismas que representan el transitorio hidráulico en un acueducto con una cámara de aire como dispositivo de control, como se muestra en la Figura 2.6-1.

$$\frac{L}{gA} \frac{dQ}{dt} = h_1 - h_2 - \frac{fL}{2gDA^2} |Q|Q$$

ECUACIÓN 2.6-1

$$P\forall^n = P_0\forall_0^n$$

ECUACIÓN 2.6-2

$$\frac{d\forall}{dt} = Q$$

ECUACIÓN 2.6-3

$$h_1 = \frac{P}{\gamma} - \frac{P_{atm}}{\gamma} + z$$

ECUACIÓN 2.6-4

Dónde:

- f Coeficiente de fricción
- A Sección transversal de la conducción
- D Diámetro de la conducción
- L Longitud de la conducción
- n Coeficiente politrópico
- γ Peso específico del fluido
- P Presión absoluta
- P_0 Presión absoluta de referencia
- \forall_0 Volumen inicial de aire, o de referencia, m³

2. ESTADO DEL ARTE DEL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

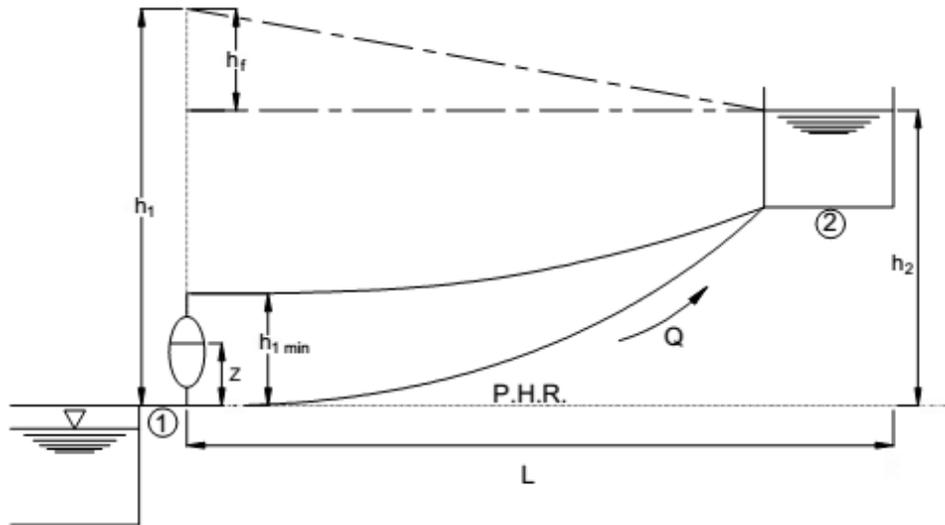


FIGURA 2.6-1 ARREGLO GENERAL DE UN ACUEDUCTO CON CÁMARAS DE AIRE.

h_1 Carga piezométrica con respecto al plano de referencia en 1, m.

$h_{1\ min}$ Carga mínima 1 para un V_{max} de aire, m.

h_2 Nivel del espejo de agua en el tanque aguas abajo (2), m.

h_f Pérdida de carga por fricción entre los puntos 1 y 2, m.

L Longitud, m.

P.H.R. Plano Horizontal de Referencia.

Z Nivel del espejo de agua en la cámara.

Primeramente, propone la siguiente ecuación como solución del sistema de ecuaciones anterior planteado para la variación del gasto a lo largo del tiempo, t :

$$Q(t) = Q_0 e^{\beta t} \cos(\omega t)$$

ECUACIÓN 2.6-5

$$\beta = -\frac{fQ_0}{2DA}$$

Para obtener el volumen de aire en el interior de la cámara a cualquier instante de tiempo t se tiene:

$$V = V + \frac{Q_0}{\omega^2 + \beta^2} [e^{\beta t} (\beta \cos(\omega t) + \omega \sin(\omega t)) - \beta]$$

ECUACIÓN 2.6-6

La cámara deja de aportar gasto cuando:

$$\cos(\omega t^*) = 0$$

$$\therefore t^* = \frac{\pi}{2\omega} \rightarrow \omega = \frac{\pi}{2t^*}$$

ECUACIÓN 2.6-7

2. ESTADO DEL ARTE DEL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

Para ese instante de tiempo el volumen de aire en la cámara es máximo:

$$V_{max} = V_0 + \frac{Q[e^{\beta t}(\pi/2t^*) - \beta]}{\omega^2 + \beta^2}$$

ECUACIÓN 2.6-8

De la Ecuación 2.6-2 de estado de Gas se tiene que:

$$V_{max} = V_0 \left(\frac{P_0}{P_{min}} \right)^{\frac{1}{n}}$$

ECUACIÓN 2.6-9

Dónde:

$$P_0 = \gamma(h_{10} - Z_{10}) + P_{atm}$$

h_{10} Carga en la cámara en $t=0$

Z_{10} Nivel del espejo de agua dentro de la cámara en $t=0$

Como una primera aproximación de la presión mínima se considera que el área de la sección transversal de la cámara (A_c) es muy grande, por lo que:

$$P_{min} = \gamma(h_{1min} - Z_{10}) + P_{atm}$$

Despreciando pérdidas, Zarco encontró que:

$$V_0 = \frac{\frac{gA}{L}(h_2 - h_{1min}) - \beta Q_0}{(\omega^2 + \beta^2) \left[\left(\frac{P_0}{P_{min}} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right]}$$

ECUACIÓN 2.6-10

Para calcular el valor de t^* se tiene:

$$\beta t^* e^{-\beta t^*} = \frac{\pi Q_0 \beta L}{2gA(h_2 - h_{1min})}$$

ECUACIÓN 2.6-11

Debido al inconveniente de que no es posible calcular el factor t^* de forma explícita se propone también la siguiente alternativa que conducirá a resultados semejantes a la solución exacta. (Cuando $t^* < 10s$ esta expresión presenta diferencias del orden del 15%)

$$t^{*'} = \frac{1}{\frac{1}{C} + 0.22(-\beta)^{0.7}}$$

ECUACIÓN 2.6-12

Teniendo el valor de t^* se prosigue a calcular el valor de ω y con la Ecuación 2.6-10 se puede estimar el volumen inicial de la cámara de aire, conocidas las presiones inicial y mínima.

El volumen total se calcula como sigue:

$$V_T = 1.25 V_{max}$$

ECUACIÓN 2.6-13

Para validar este método Zarco comparó los resultados obtenidos con la solución numérica de las Ecuación 2.6-1 a Ecuación 2.6-4 mediante un esquema de diferencias finitas, en el cual se encontró que la solución simplificada está sobreamortiguada, es decir, la amplitud de las oscilaciones es menor y tiende a amortiguarse más rápido que la solución numérica.

El método simplificado propuesto por Zarco es un método analítico que presenta mayor sencillez en comparación con otros métodos ya mencionados dado que los parámetros conocidos se sustituyen directamente en fórmulas. Además se puede obtener información de cargas mínimas y máximas a lo largo del tiempo, aunque no hay muy buena precisión en la estimación de estas últimas.

(Zarco Hernández, Método simplificado para el predimensionamiento de cámaras de aire, 2000)

2.6.2. MÉTODO ANALÍTICO PARA PREDIMENSIONAMIENTO DE DISPOSITIVOS DE CONTROL.

En su tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, José Ángel Zarco Hernández presenta un método basado en ecuaciones paramétricas que permite calcular los volúmenes de las cámaras de aire para controlar depresiones durante los transitorios hidráulicos presentados por paro de equipo de bombeo.

El modelo matemático empleado asume lo siguiente:

- La cámara de aire tiene capacidad suficiente para que después de un paro de bombas, el transitorio sea representado como de oscilación en masa.
- Las cámaras de aire se conectan a la tubería inmediatamente aguas abajo del múltiple de descarga de las bombas.

El transitorio lento con cámaras de aire se modeló con un sistema de ecuaciones que considera:

- Parámetro α : cociente de la energía potencial almacenada en el dispositivo de control entre la energía cinética en la conducción
- Variación de la presión sobre la superficie libre del agua, que depende de la expansión y compresión del aire contenido en la cámara.

Las ecuaciones usadas son las mismas que en el MÉTODO SIMPLIFICADO PARA EL PREDIMENSIONAMIENTO DE CÁMARAS DE AIRE., con la variación en la Ecuación 2.6-1 a como se indica:

$$\frac{l}{gS} \frac{dQ}{dt} = h_1 - h_2 - k|Q|Q = \Delta h - \frac{\Delta h_0}{Q_0^2} |Q|Q$$

ECUACIÓN 2.6-14

2. ESTADO DEL ARTE DEL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

Con respecto a la Ecuación 2.6-2 el coeficiente politrópico cambia de notación a α y se asume con el valor de 1.2, y las Ecuación 2.6-3 y Ecuación 2.6-4 permanecen sin cambios.

En su procedimiento de modelación Zarco recurre al teorema de Π Buckingham, el cual se emplea para determinar relaciones entre las variables dependientes e independientes que intervienen en un problema físico, reduciendo el número de variables y simplificándolo. Una vez aplicado el teorema las variables adimensionales resultantes se sustituyen en el sistema de ecuaciones inicial obteniendo el siguientes sistema de ecuaciones adimensionales con los parámetros α (coeficiente politrópico), a (relación de energía potencial a cinética) y r (relación de compresión inicial del aire en las cámaras)

$$\frac{dq}{dT} = z - qq$$

ECUACIÓN 2.6-15

$$\hat{p}v^a = 1$$

ECUACIÓN 2.6-16

$$z = \hat{p} + \frac{\hat{p} - 1}{r - 1}$$

ECUACIÓN 2.6-17

$$\frac{dv}{dT} = \frac{2}{p_0V_0 \left(1 - \frac{1}{r}\right)} \left(\gamma l \frac{Q_0^2}{2gS} \right) q$$

ECUACIÓN 2.6-18

El segundo paréntesis representa la energía cinética en el agua en la tubería y el primer factor está relacionado con el trabajo requerido para comprimir el aire desde V_f hasta V_0 .

Dónde:

$$p_0V_0 = RE_r$$

Con:

$$R = \frac{1 - \alpha}{r^{\frac{1-\alpha}{\alpha}} - 1}$$

ECUACIÓN 2.6-19

De la solución numérica del sistema de ecuaciones adimensionales se obtiene la variación del parámetro α en función de la presión mínima permitida (z_{\min}) en la conexión de la cámara con la línea principal. Para ajustar una función analítica a dicha variación a respecto a z_{\min} se propone una solución de donde después de ciertos razonamientos matemáticos se obtienen las siguientes expresiones:

2. ESTADO DEL ARTE DEL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

$$T^* e^{T^*} = -\frac{\pi}{2 z_{min}}$$

ECUACIÓN 2.6-20

$$K = \frac{1 + \left(\frac{\pi}{2T^*}\right)^2}{1 - z_{min}} \left[\frac{1}{\left(z_{min} + \frac{1 - z_{min}}{r}\right)^{\frac{1}{\alpha}}} - 1 \right]$$

ECUACIÓN 2.6-21

$$a^* = \frac{2}{R \left(1 - \frac{1}{r}\right) K}$$

ECUACIÓN 2.6-22

Zarco muestra la relación entre el parámetro a^* obtenido a través de la solución propuesta y del parámetro a resultado de la solución numérica del sistema de ecuaciones Ecuación 2.6-14, Ecuación 2.6-2, Ecuación 2.6-3 y Ecuación 2.6-4, en ambos casos, cuando se ha fijado un valor para z_{min} , quedando la relación representada de la siguiente forma:

$$\frac{a^*}{a} = f(r) [-z_{min}^{g(r)}]$$

ECUACIÓN 2.6-23

Donde $f(r)$ y $g(r)$ son polinomios de 4º cuyas expresiones y gráficas se muestran a continuación.

$$f(r) = 0.038149r^4 - 0.497170r^3 + 1.624898r^2 - 1.525450r + 0.804374$$

ECUACIÓN 2.6-24

$$g(r) = -2.42881r^4 - 15.288723r^3 - 36.0706r^2 + 37.970545r - 14.49464$$

ECUACIÓN 2.6-25

Las funciones $f(r)$ y $g(r)$ permiten obtener una solución analítica con muy buena precisión en el cálculo del volumen inicial de aire en las cámaras donde el parámetro a está dado por la expresión:

$$a = \frac{2}{R \left(1 - \frac{1}{r}\right) K} \cdot \frac{1}{f(r) [-z_{min}^{g(r)}]}$$

ECUACIÓN 2.6-26

Para estimar el volumen de agua que ingresa a la línea de conducción proveniente de la cámara de aire se tiene:

$$V_W = V_{max} - V_0$$

ECUACIÓN 2.6-27

2. ESTADO DEL ARTE DEL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

Si se sustituye la expresión para volumen máximo (Ecuación 2.6-9) en la Ecuación 2.6-27 se tiene una expresión para estimar el volumen de agua:

$$V_W = V_0 \left[\left(\frac{P_0}{P_{min}} \right)^{\frac{1}{\alpha}} - 1 \right]$$

ECUACIÓN 2.6-28

En resumen, Zarco obtiene sus resultados mediante el siguiente algoritmo:

1. Se fija z_{min} y se calcula el parámetro r
2. Se calcula R con la Ecuación 2.6-19
3. Se obtiene implícitamente el valor de T^* con la Ecuación 2.6-20
4. Se calcula K con la Ecuación 2.6-21
5. Se encuentra los valores de $f(r)$ y de $g(r)$ con la Ecuación 2.6-24 y Ecuación 2.6-25
6. Se obtiene el valor de a de la Ecuación 2.6-26
7. Se encuentra la energía cinética

$$Ec = \gamma l \frac{Q_0^2}{2gS}$$

8. Se calcula el volumen inicial como

$$V_0 = \frac{a \cdot Ec}{p_0}$$

9. Se estima la cantidad de agua que ingresa a la cámara con la Ecuación 2.6-28
10. Finalmente, se calcula el volumen total de las cámaras de aire:

$$V_T = V_0 + V_W$$

En sus conclusiones, Zarco compara el empleo de su método propuesto con el método de las características, aplicando en acueductos reales el cálculo del volumen de cámaras de aire necesarios para mantener una carga mínima fijada (z_{min}) hallando diferencias de tan solo el 10%, excepto para casos donde la celeridad de la onda es muy baja.

Zarco también comparó sus resultados con los métodos convencionales de diseño, encontrando que los mejores resultados se obtienen con el método de Ruus E. para la estimación del volumen inicial de aire en las cámaras, mientras que el método analítico que él desarrolla, se permite obtener los mejores volúmenes totales de las cámaras.

(Zarco Hernández, Predimensionamiento de dispositivos de control de transitorios en plantas de bombeo, 2002)

2.7. RAMALINGAM (2007).

Ramalingam propone un marco de trabajo donde desarrolla una herramienta para el dimensionamiento óptimo de cámaras de aire para proteger las redes de grandes tuberías contra las altas presiones transitorias generadas por los cierres rápidos en válvulas. La esencia del marco propuesto radica en la identificación de parámetros clave de respuesta de transitorios en redes de tuberías que influyen en el tamaño de las cámaras. Dichos parámetros clave se identificaron utilizando un modelo de red neuronal artificial (ANN) en una *base de conocimiento* desarrollada a partir de modelos de red optimizados. El modelo ANN desarrollado se aplicó para dimensionar cámaras de aire para redes de tuberías grandes con datos de respuesta de transitorios como entrada. El alcance de su estudio se limitó a demostrar el potencial del marco propuesto para el desarrollo de herramientas de diseño en lugar de desarrollar una herramienta general de dimensionamiento de cámaras de aire.

Marco de trabajo para herramientas de diseño.

Las siguientes observaciones surgen luego de un amplio estudio de la presión y flujo en redes de tuberías complejas para diversos eventos de generación de transitorios, con y sin dispositivos de protección:

- El perfil de presión transitoria en cualquier ubicación de la red refleja los efectos de las condiciones de frontera cercanas y la complejidad de la red cercana.
- El dimensionamiento óptimo se basa principalmente en las condiciones de presión transitoria predominantes en la región a proteger y no necesita estar hidráulicamente influenciada por condiciones lejanas a dicha región.
- Los gráficos de variación de presión/flujo en la ubicación planeada para el dispositivo de protección reflejan adecuadamente la gravedad de los transitorios de presión en esa región.
- Si los gráficos de variación de presión/flujo en alguna ubicación A no reflejan los graves transitorios que se originan en otra ubicación B de la red de tuberías, entonces el tamaño del dispositivo de protección en la ubicación A tendría poca o ninguna influencia para mitigar las presiones transitorias en la ubicación B.
- Un solo dispositivo puede no ser capaz de proteger una gran red de tuberías por completo o de forma económica. Así, varias regiones pueden necesitar ser protegidas de forma individual.
- Uno de los objetivos de cualquier ejercicio de optimización es proteger el sistema contra las presiones de cavitación. Cualquier solución que resulte en presiones por debajo de las presiones de vaporización líquido deberá ser tratada como una solución no factible. Por ende, los efectos de las cavidades de vapor no necesitan considerarse en la simulación transitoria.

Para desarrollar el marco de trabajo para herramientas de diseño se utilizaron las siguientes tres hipótesis:

2. ESTADO DEL ARTE DEL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

- A. El perfil de presión/flujo transitorio en un punto que se necesita proteger se puede utilizar para identificar los parámetros clave que influyen en el tamaño requerido por la cámara de aire.
- B. La fase inicial del perfil de presión/flujo transitorio capta la gravedad de las presiones transitorias, por ello cualquier protección que mitigue las presiones transitorias en esta fase tiene buenas posibilidades de ser una medida de protección adecuada.
- C. La respuesta de transitorios de subsecciones de grandes sistemas de redes se puede aproximar mediante la respuesta de transitorios de sistemas simples siempre que éstos tengan uniones múltiples de tuberías u otras condiciones de contorno simples, como depósitos y bombas.

Los pasos para el desarrollo del marco de trabajo propuesto son:

1. Crear modelos de red simples y generar eventos transitorios que produzcan una gran variedad de perfiles de respuesta de transitorios.
2. Utilizar un optimizador basado en Algoritmos Genéticos (GA) para alcanzar parámetros de cámaras de aire que proporcionen una protección óptima para cada uno de los modelos de redes simples (Base de conocimiento).
3. Identificar rasgos comunes de aquellos modelos que capturen la esencia de las características de la respuesta de transitorios independientemente del tamaño o la complejidad de los modelos de red.
4. Compilar los rasgos comunes en variables de entrada de un modelo de red neuronal artificial (ANN) que puede ser entrenado para aprender las relaciones entre las características de respuesta de transitorios y los parámetros óptimos de cámaras de aire asociados.
5. Use el modelo ANN entrenado para dimensionar las cámaras de aire para proteger los sistemas más grandes y complejos.

Herramientas computacionales utilizadas para el marco de trabajo propuesto.

El programa de simulación de transitorios desarrollado para este estudio se basó en el preciso y eficiente "Método de Plan de onda".

Un software de modelado de redes neuronales artificiales llamado NeuroSort (2004), desarrollado en la Universidad de Kentucky, se utilizó para este estudio.

Base de conocimiento.

Los datos para el desarrollo del modelo de ANN se generaron utilizando tres modelos diferentes de pequeñas redes de tuberías. Las características de las redes se variaron de tal forma que resultaron en una variedad de perfiles de presión/flujo transitorios que requieren cámaras de aire de diversos tamaños. Esto se logró variando una o más de las características físicas e hidráulicas de la red. Los escenarios transitorios se crearon a partir de cierres rápidos de válvulas.

2. ESTADO DEL ARTE DEL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

Para la protección óptima del conjunto de modelos se usó un optimizador basado en Algoritmos Genéticos (GA), con una función objetivo que minimiza el volumen total de la cámara. Los límites de presiones máximas y mínimas se usaron como restricciones de diseño. En todas las simulaciones se permitió que las presiones en la red cayeran por debajo de la presión de vaporización, eliminando así la necesidad de modelar la cavitación y añadir la posibilidad de obtener una representación más eficiente de la severidad de las presiones negativas. Cualquier violación a las restricciones se incorporó al valor de la aptitud mediante una simple función de penalización.

El tiempo total de simulación del transitorio se seleccionó de tal manera que permitiera capturar las principales acciones/reacciones del transitorio que ocurren alrededor del punto donde se necesita ubicar la cámara de aire. El diseño óptimo se llevó a cabo para conseguir un conjunto de parámetros económicos para cámaras de aire (volumen de la cámara, volumen de gas inicial, resistencia para entrada y salida de flujo).

Variables de entrada para el modelo ANN

Luego de la gran cantidad de modelos de red y parámetros óptimos de cámaras de aire asociados, obtenidos en el proceso de optimización anterior. El siguiente paso consiste en identificar los parámetros de respuesta de transitorios asociados a la red que constituyan variables de entrada para el modelo ANN.

Para construir un modelo eficiente de ANN hay que identificar aquellos parámetros de respuesta de transitorios que sean comunes entre sistemas complejos y simples. Los parámetros seleccionados son aquellos que capturen la esencia de la respuesta del transitorio independientemente del tamaño y complejidad de la red. Todos los parámetros que representan características físicas de la red, como las características de la tubería, la elevación de los nodos, etc., se descartaron. Para cada ejecución de los modelos generados previamente, se extrajo una serie de parámetros de los gráficos de presión/flujo transitorios que caracterizaron el evento transitorio y a la respuesta del modelo.

Las variables de entrada que fueron identificadas inicialmente se clasificaron de la siguiente manera:

- a) Criterios de diseño.
- b) Condiciones en estado permanente en la ubicación de la cámara de aire
- c) Parámetros que capturan medidas estadísticas del perfil de la carga de presión en la ubicación de la cámara de aire.
- d) Parámetros del lapso de tiempo que capturan información volumétrica.
- e) Parámetros que capturan la pendiente (inicial, máxima positiva y máxima negativa) del perfil de presión y flujo transitorios.
- f) Parámetros que capturan el cambio en la magnitud de la carga y flujo asociados a cada pendiente.

2. ESTADO DEL ARTE DEL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

- g) Parámetros que capturan la magnitud absoluta de las cargas y flujos al inicio y final de cada pendiente.

Modelo ANN

El ejercicio de optimización arrojó cientos de diversos modelos de red. Las variables de entrada para los modelos de ANN se extrajeron de esos modelos. Del conjunto de datos obtenido, la mayor parte se usó para entrenamiento y los sobrantes para probar el modelo de ANN. Las características óptimas de las cámaras de aire: resistencia de entrada y salida de flujo, volumen de la cámara de aire y volumen de gas inicial, forman el vector de salida para el modelo de ANN.

A las variables de entrada que pudieran tener valores potencialmente negativos se les asignó una variable con indicador y se les incluyó en el vector de entrada del ANN. *Numerosos modelos de ANN*, con diferentes variables de entrada, número de neuronas de capa oculta, orden de los datos y tipo de procedimiento de ajuste de peso *se desarrollaron para llegar a un modelo de ANN mejor entrenado*. El conjunto de datos usado en cada modelo ANN se combinó aleatoriamente asegurándose que los datos con las variables de entrada y salida más altas y más bajas se encontraran en el conjunto de entrenamiento en lugar de en el conjunto de prueba. Esto evitaría la necesidad de extrapolación en el proceso de prueba.

El rendimiento de cada modelo ANN fue evaluado y las variables de entrada menos importantes, descartadas. Los modelos capacitados de ANN se probaron para asegurar que su rendimiento no se debiera al sobreaprendizaje, sino más bien al aprendizaje y generalización de las relaciones entre las características de respuesta transitoria y los parámetros de las cámaras de aire.

Las pocas variables que tuvieron poco o ningún cambio de magnitud también se descartaron de la lista de variables de entrada, ya que podían ser físicamente significativos impactando en el tamaño de la cámara, pero no contribuían a mejorar el aprendizaje del conjunto de datos del ANN.

El modelo ANN final obtenido comprendió variables de entrada, neuronas de capa oculta y variables de salida. Además no obtuvo un patrón claro para la resistencia de entrada de flujo tanto en el entrenamiento como en las pruebas. El hecho de que la resistencia del flujo de entrada no sea tan importante en casos de alta presión se refleja en los datos generados por el optimizador de GA; en el modelo de ANN muestra un comportamiento similar.

Aplicación del modelo de ANN entrenado.

La aplicabilidad y eficacia del modelo ANN entrenado para el dimensionamiento de cámaras de aire se demostró probándola en tres modelos de red diferentes con escenarios transitorios creados a partir del cierre de válvulas. Se cuidó que las variables críticas de entrada extraídas de estos modelos no excedieran las condiciones de frontera usadas en el modelo entrenado ni el lapso de tiempo de la fase inicial de respuesta transitoria. El modelo entrenado se usó para

2. ESTADO DEL ARTE DEL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

predecir los parámetros óptimos de la cámara de aire para cada conjunto de variables de entrada.

La predicción del ANN se verificó comparando los valores pronosticados con los de un optimizador con base en GA, siempre que la optimización fuera computacionalmente factible. Las predicciones del ANN estuvieron razonablemente cerca de los valores obtenidos con el optimizador con GA para parámetros distintos a la resistencia de entrada. Cabe señalar que la resistencia de salida al flujo y el volumen de gas inicial son los parámetros más importantes para atenuar las sobretensiones positivas. Las predicciones de resistencia del flujo de entrada fueron acordes al rendimiento del modelo ANN en entrenamiento.

Resultados y discusión.

Al analizar el rendimiento del modelo ANN en los tres casos propuestos Ramalingam obtuvo las siguientes observaciones:

2. Para los modelos de redes grandes de los casos estudiados, los parámetros de las cámaras de aire previstos por el ANN redujeron las presiones transitorias más altas hasta dentro del 3% del límite de diseño.
3. Los perfiles de presión transitoria de los modelos de red son altamente sensibles al volumen de gas inicial y a la resistencia de salida del flujo.
4. El ANN predijo el volumen inicial de gas dentro del 20% de la solución óptima en promedio, y dentro del 10% para los dos modelos de redes grandes.
5. La resistencia de salida del flujo es un parámetro importante de las cámaras de aire en la protección de las redes de tuberías ante presiones transitorias y el ANN pudo predecir bien tanto los valores altos como los bajos de la resistencia del flujo de salida.
6. El ANN parece haber aprendido la relación inversa entre el volumen de gas inicial y la resistencia del flujo de salida para una protección óptima. Si el valor previsto por el ANN para el volumen de gas inicial es mayor que el valor del optimizador con GA, la resistencia de salida de flujo correspondiente previsto por el ANN es menor que la del optimizador con GA.
7. El ANN ha reconocido la insensibilidad de la respuesta transitoria a las resistencias de entrada de flujo.

Dichas observaciones demostraron que el modelo ANN desarrollado aprendió y generalizó las relaciones críticas entre las características de respuesta transitoria y los parámetros de las cámaras de aire asociados para la protección óptima de las redes de grandes tuberías. Los parámetros clave utilizados como variables de entrada para el modelo de ANN capturaron la dinámica del fenómeno transitorio y el cómo las cámaras de aire cambian la respuesta transitoria. Las predicciones cercanas a las soluciones óptimas por el modelo de ANN permiten a los modeladores minimizar el número de ensayos para llegar a una protección óptima de redes de tuberías grandes. Incluso en los casos en que las predicciones ANN fueron significativamente diferentes, las presiones más altas en el sistema estuvieron fuera en solo un 3%, lo que implica

2. ESTADO DEL ARTE DEL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

que el ANN es capaz de proporcionar una solución que, si no es óptima está muy cerca de los límites de diseño.

Dichas predicciones cercanas a pesar de la naturaleza altamente sensible del volumen de gas inicial y la resistencia del flujo de salida en la respuesta transitoria, muestran la eficacia del marco propuesto y el modelo ANN resultante como una herramienta de diseño para el dimensionamiento de cámaras de aire.

Consideraciones del método

El marco como se presenta para generar herramientas de diseño que ayuden a optimizar el tamaño de las cámaras de aire tiene las siguientes limitaciones:

Optimizador del algoritmo genético: Para alcanzar una mejor solución conviene aumentar el tamaño de la población y el número de generaciones.

Identificación y extracción de parámetros: Las predicciones del ANN podrían fallar para aquellos sistemas que tengan un tiempo de respuesta transitoria diferente al usado en la base de datos para entrenar el modelo ANN.

Redes neuronales artificiales: el rendimiento del modelo ANN podría mejorar si hay más datos disponibles para capacitar al ANN. Mejores modelos de ANN se pueden obtener recurriendo a más de una capa oculta, más número de neuronas en la capa oculta, otros algoritmos de entrenamiento, etc.

Normalización: Si se normalizan las variables de entrada con respecto al incremento del tiempo de simulación transitoria (Δt), en lugar de variables dimensionales se podría mejorar el aprendizaje del ANN y su capacidad de generalización.

(Ramalingam, 2007)

3. FUNDAMENTOS SOBRE MÉTODOS METAHEURÍSTICOS.

3.1. INTRODUCCIÓN.

Un algoritmo es un conjunto ordenado y finito de operaciones que permiten solucionar un problema. Para la teoría de la complejidad computacional, la capacidad de un algoritmo para resolver un problema la determina el número de operaciones aritméticas necesarias para su ejecución. Un problema se considera fácil si existe un algoritmo que lo resuelva en tiempo polinomial; es decir, si el número de operaciones necesarias para que el algoritmo resuelva el problema es una función polinomial del tamaño del problema. Si esto no es así, se dice que el algoritmo es no polinomial y el problema se considera difícil.

Saber si un problema se puede resolver en tiempo polinomial nos permite conocer si es posible encontrar una solución óptima en unos cuantos segundos, minutos, o si por el contrario, son necesarios años o incluso siglos para hacerlo. En el último caso surge la necesidad de desarrollar estrategias para encontrar soluciones buenas a un costo computacional razonable.

Los algoritmos se clasifican en exactos o completos y de aproximación o heurísticos. Los algoritmos exactos son aquellos en los que existe la garantía de que encontrarán la solución óptima; mientras que para los algoritmos de heurísticos se encontrará una solución aceptable, no necesariamente óptima.

Los algoritmos exactos más eficientes conocidos en la actualidad para resolver problemas combinatorios requieren un número exponencial de operaciones. Entre estos algoritmos se encuentran, la programación dinámica y el algoritmo de ramificación y acotamiento, pero implican un costo computacional en ocasiones tan elevado que hace que deban descartarse como alternativa de solución. (Vélez & Montoya, 2007)

3. FUNDAMENTOS SOBRE MÉTODOS METAHEURÍSTICOS.

Gary D. Eppen y F. J. Gould ya a finales de la década de los 80, explicaban que un problema podía llegar a ser tan complejo que el modelo diseñado para resolverlo no podía afrontarse mediante métodos tradicionales; lo cual se presenta por la conjunción de dos circunstancias: un modelo “demasiado grande, no lineal en extremo o demasiado complejo en el aspecto lógico”, unido a la imposibilidad de recurrir al empleo de supuestos simplificadores o aproximaciones que hicieran el problema más manejable, debido a que se destruiría demasiado la estructura del problema, alejándolo de la realidad. A este tipo de problemas difíciles de resolver se les denota como NP-hard en el contexto de la complejidad algorítmica. (Márquez Gómez, 2014)

Debido a que la mayoría de los problemas de optimización combinatoria se clasifican como difíciles, la investigación se ha concentrado en desarrollar algoritmos heurísticos. (Vélez & Montoya, 2007)

La Inteligencia Artificial (IA), se refiere a cualquier tipo de inteligencia manifestada por máquinas. En ella se emplea el calificativo heurístico, en un sentido muy genérico, para aplicarlo a todos aquellos aspectos que tienen que ver con el empleo de conocimiento en la realización dinámica de tareas.

La concepción más común en la IA es interpretar a un método heurístico como el calificativo apropiado para los procedimientos que, empleando conocimiento acerca de un problema y de las técnicas aplicables, tratan de aportar soluciones de alta calidad (o acercarse a ellas) con un coste computacional (generalmente tiempo) razonable, aunque no se garantice su optimalidad o su factibilidad. En un problema de optimización, aparte de las condiciones que deben cumplir las soluciones factibles del problema, se busca la que es óptima según algún criterio de comparación entre las diferentes alternativas.

En aplicaciones de ingeniería, la existencia de múltiples soluciones conduce a cierta ambigüedad en la toma de decisiones. Para superar esta elección se puede minimizar o maximizar la función objetivo, llevando a una solución optimizada. (Obaihnahatti, 2018)

En la resolución de problemas específicos han surgido procedimientos heurísticos exitosos, de los que se ha tratado de extraer lo esencial en su éxito para aplicarlo a otros problemas o en contextos más extensos. Como ha ocurrido claramente en diversos campos de la IA, en especial con los sistemas expertos, esta línea de investigación ha contribuido al desarrollo científico del campo de las heurísticas y a extender la aplicación de sus resultados. De esta forma se han obtenido, tanto técnicas y recursos computacionales específicos, como estrategias de diseño generales para procedimientos heurísticos de resolución de problemas. Estas estrategias generales para construir algoritmos, que quedan por encima de las heurísticas, y van algo más allá, se denominan metaheurísticas. Las metaheurísticas pueden integrarse como un sistema experto para facilitar su uso genérico a la vez que mejorar su rendimiento. (Melián, Moreno Pérez, & Moreno Vega, 2003)

3. FUNDAMENTOS SOBRE MÉTODOS METAHEURÍSTICOS.

El término metaheurístico lo introdujo Fred Glover (1986) al definir una clase de algoritmos de aproximación que combinan heurísticos tradicionales con estrategias eficientes de exploración del espacio de búsqueda. (Vélez & Montoya, 2007)

Los metaheurísticos son métodos aproximados diseñados para resolver problemas de optimización combinatoria, en los que los heurísticos clásicos no son efectivos. Los metaheurísticos proporcionan un marco general para crear nuevos algoritmos híbridos, combinando diferentes conceptos derivados de la inteligencia artificial, la evolución biológica y los mecanismos estadísticos. (Vélez & Montoya, 2007)

La mayor ventaja de los métodos metaheurísticos frente a otros métodos está en su gran flexibilidad para abordar una amplia gama de problemas. (Vélez & Montoya, 2007)

Entre los metaheurísticos más usados se encuentran la lógica difusa (FL), el sistema multiagente (MAS), las redes neuronales artificiales (ANN), y algoritmos de optimización, como los algoritmos evolutivos (EA), Sistemas inmunes artificiales (AIS), Recocido simulado (SA), Búsqueda de tabú (TS), así como la inteligencia de enjambre (SI).

La inteligencia de enjambre (SI) es un campo emergente desarrollado por primera vez por Gerardo Beni y Jing Wang en 1989 en el contexto del desarrollo de sistemas robóticos celulares. La popularidad de estos sistemas se debe principalmente a la flexibilidad y versatilidad que ofrecen. La capacidad de autoaprendizaje y la adaptabilidad a las variaciones externas son características clave exhibidas por estos algoritmos. En la Figura 3.1-1 se muestra una división propuesta por Amrita Chakraborty y Arpan Kumar Kar (2017) donde se enuncian algunos de estos algoritmos.

(Patnaik, Yang, & Nakamatsu, 2017, pp. 476-478) (Bozorg Haddad, 2018)

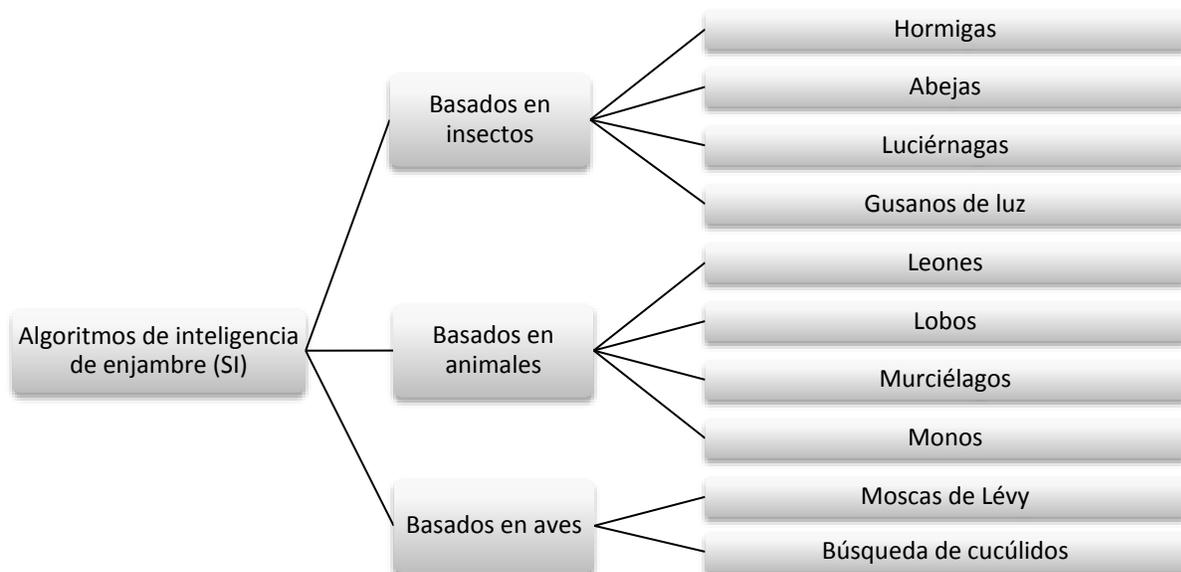


FIGURA 3.1-1 CATEGORIZACIÓN BÁSICA DE LA INTELIGENCIA DE ENJAMBRE.

3. FUNDAMENTOS SOBRE MÉTODOS METAHEURÍSTICOS.

En los últimos años el crecimiento agigantado de la informática y computación ha llevado al desarrollo de estos nuevos métodos de inteligencia computacional los cuales siguen progresando y logrado una popularidad sin precedentes demostrado por numerosos estudios en diversos campos. Sus aplicaciones ya consideran casi todas las áreas de ciencias, ingeniería e industria; desde minería de datos hasta la optimización, inteligencia computacional, planificación de negocios, bioinformática, aplicaciones industriales y de negocios, análisis de resultados médicos, procesamiento de imágenes, gráficos por computadora, sistemas basados en energía renovable, predicción del comportamiento de compra del cliente, predicción de los intereses personales de los usuarios de la Web, optimización de procesos de fabricación, predicción de tendencias en los mercados bursátiles, análisis financieros y evaluación de inversiones inmobiliarias de propiedades y ventas de terrenos, etc.

En este capítulo se explicarán algunos de estos algoritmos de optimización, haciendo especial énfasis en los algoritmos genéticos, que es el tema principal de interés para este trabajo.

3.2. RECOCIDO SIMULADO (SA) (SIMULATED ANNEALING).

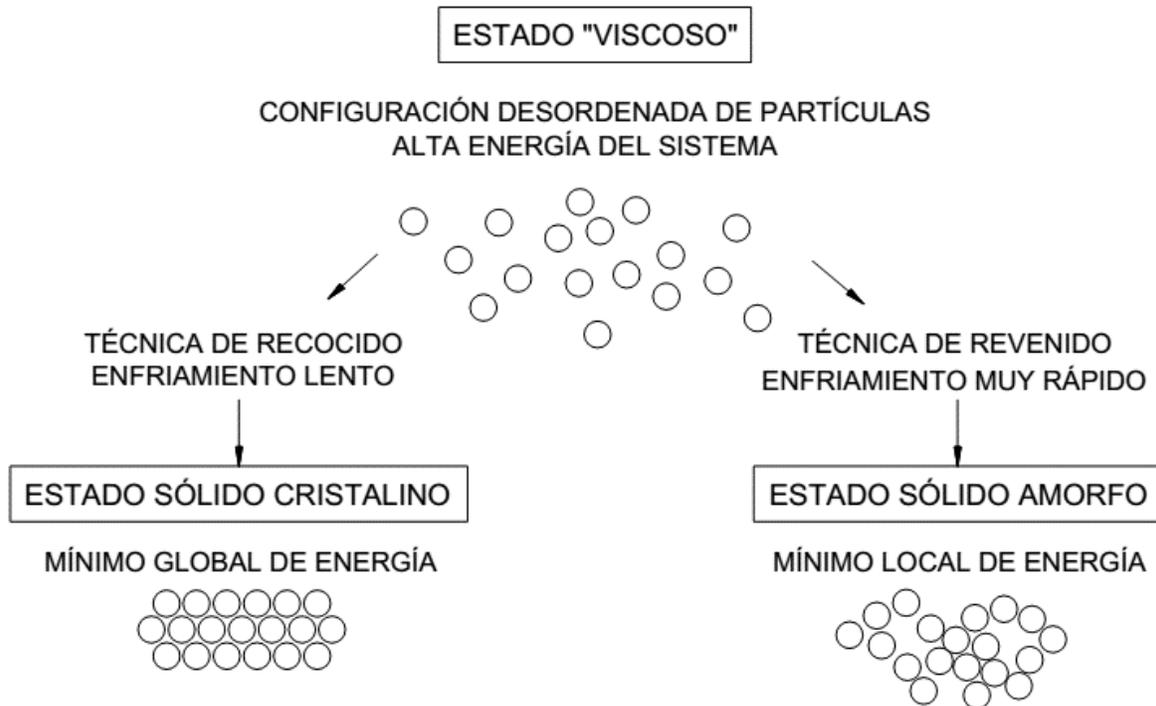


FIGURA 3.2-1 COMPARACIÓN ENTRE LAS TÉCNICAS DE TEMPLADO Y REVENIDO

S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, Jr. y M. P. Vecchi, especialistas en física estadística se interesaron en las configuraciones de baja energía de materiales magnéticos desordenados, conocidos como vidrios de spin. La determinación numérica de estas configuraciones implicaba portentosos problemas de optimización, debido a que el escenario energético de un vidrio de spin presenta valles de profundidades desiguales; Así, S. Kirkpatrick et al. e independientemente, V. Cerny, propusieron tratar este problema tomando como referencia la técnica experimental del recocido, utilizada en la industria metalúrgica para obtener un estado sólido "bien ordenado" con la mínima energía (evitando estructuras metaestables). El recocido metalúrgico consiste en llevar al material a alta temperatura para luego enfriarlo lentamente y de una manera controlada, lo cual reduce defectos relacionados a la energía termodinámica libre del material.

Así, el método "*simulated annealing*" traslada el proceso del recocido a la solución de un problema de optimización: la función objetivo del problema, similar a la energía del material, es minimizada con la ayuda de la introducción de una temperatura ficticia, que es, en este caso, un simple parámetro controlable del algoritmo. De esta forma la energía es interpretada como la aptitud y el proceso de enfriamiento lento como la disminución de la probabilidad de aceptar las peores soluciones mientras se explora el panorama completo de aptitud para el problema de optimización. El criterio de aceptación se conoce como condición de Metrópolis.

A través del algoritmo de Metrópolis se puede describir el comportamiento de un sistema termodinámico en "equilibrio" a una cierta temperatura. Sobre la base de una configuración dada (por ejemplo, una colocación inicial de la totalidad de componentes electrónicos), el

3. FUNDAMENTOS SOBRE MÉTODOS METAHEURÍSTICOS.

sistema está sujeto a una modificación elemental (por ejemplo, la reubicación un componente, o el intercambio de dos componentes). Si esta transformación hace que disminuya la función objetivo (o energía) del sistema, se acepta. Por otro lado, si causa un aumento de δE de la función objetivo, se puede aceptar también, pero con una probabilidad $e^{-\delta E/T}$. La alta aceptación de las peores soluciones al inicio de la búsqueda, cuando la temperatura es mayor, permite una exploración más extensa del espacio de búsqueda. Operando de esta forma, se desarrolla una iteración manteniendo la temperatura constante hasta que se alcanza el equilibrio termodinámico luego de un número "suficiente" de modificaciones. En seguida, la temperatura se reduce, antes de implementar una nueva serie de transformaciones. Tan pronto como la temperatura disminuye, las peores soluciones tienen menores probabilidades de ser aceptadas, lo que conduce a la convergencia del algoritmo. La disminución por etapas de la temperatura suele ser empírica, al igual que el criterio de terminación del programa.

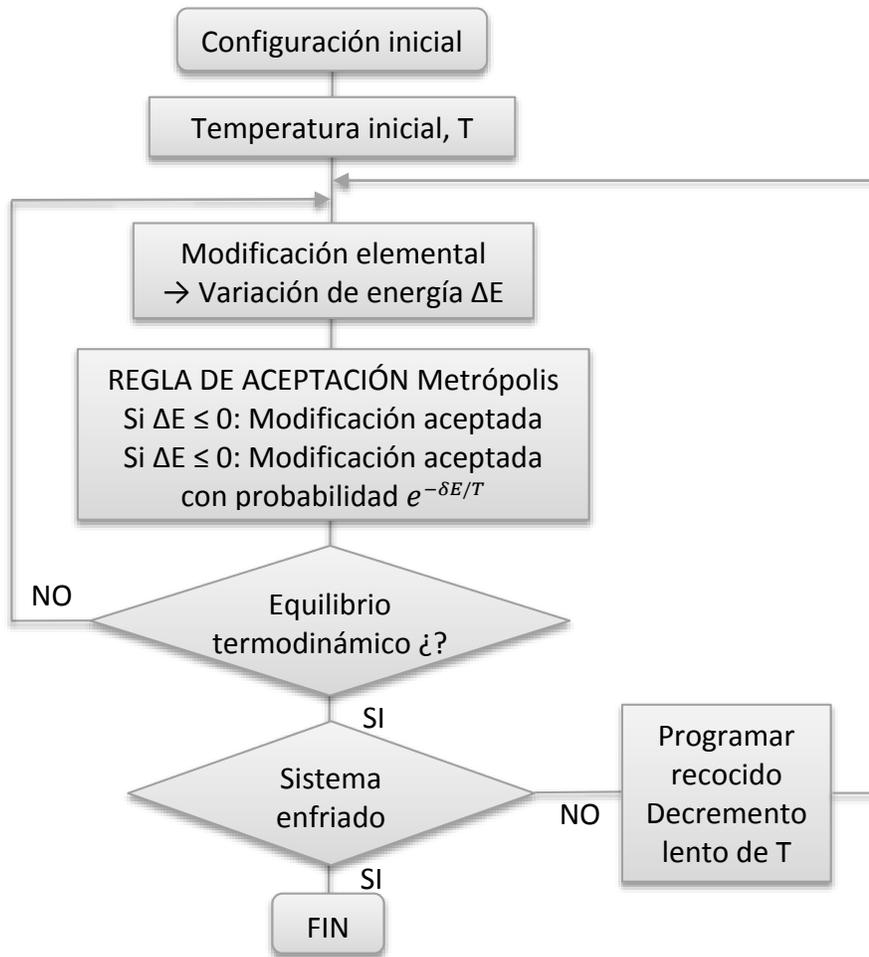


FIGURA 3.2-2 DIAGRAMA DE FLUJO DEL RECOCIDO SIMULADO

Cuando el recocido simulado se aplica a un problema de colocación de componentes electrónicos, el algoritmo opera una transformación de desorden a orden, que se representa de manera gráfica en la Figura 3.2-3. También se pueden visualizar algunas etapas de este

3. FUNDAMENTOS SOBRE MÉTODOS METAHEURÍSTICOS.

ordenamiento aplicando el método para la colocación de componentes en los nodos de una cuadrícula en la Figura 3.2-4, donde se muestra la evolución del sistema a diferentes temperaturas, L indica la longitud de las conexiones.

Las desventajas del recocido simulado se encuentran, por un lado, en los "ajustes", como la gestión de la disminución de la temperatura, el usuario debe saber el cómo de los "buenos" ajustes. Además, el tiempo de cómputo puede llegar a ser muy significativo, lo que llevó a implementaciones paralelas del método. Por otro lado, el método de recocido simulado tiene la ventaja de ser flexible con respecto a las evoluciones del problema y fácil de implementar. Para una serie de problemas, generalmente de gran envergadura, arrojó excelentes resultados.

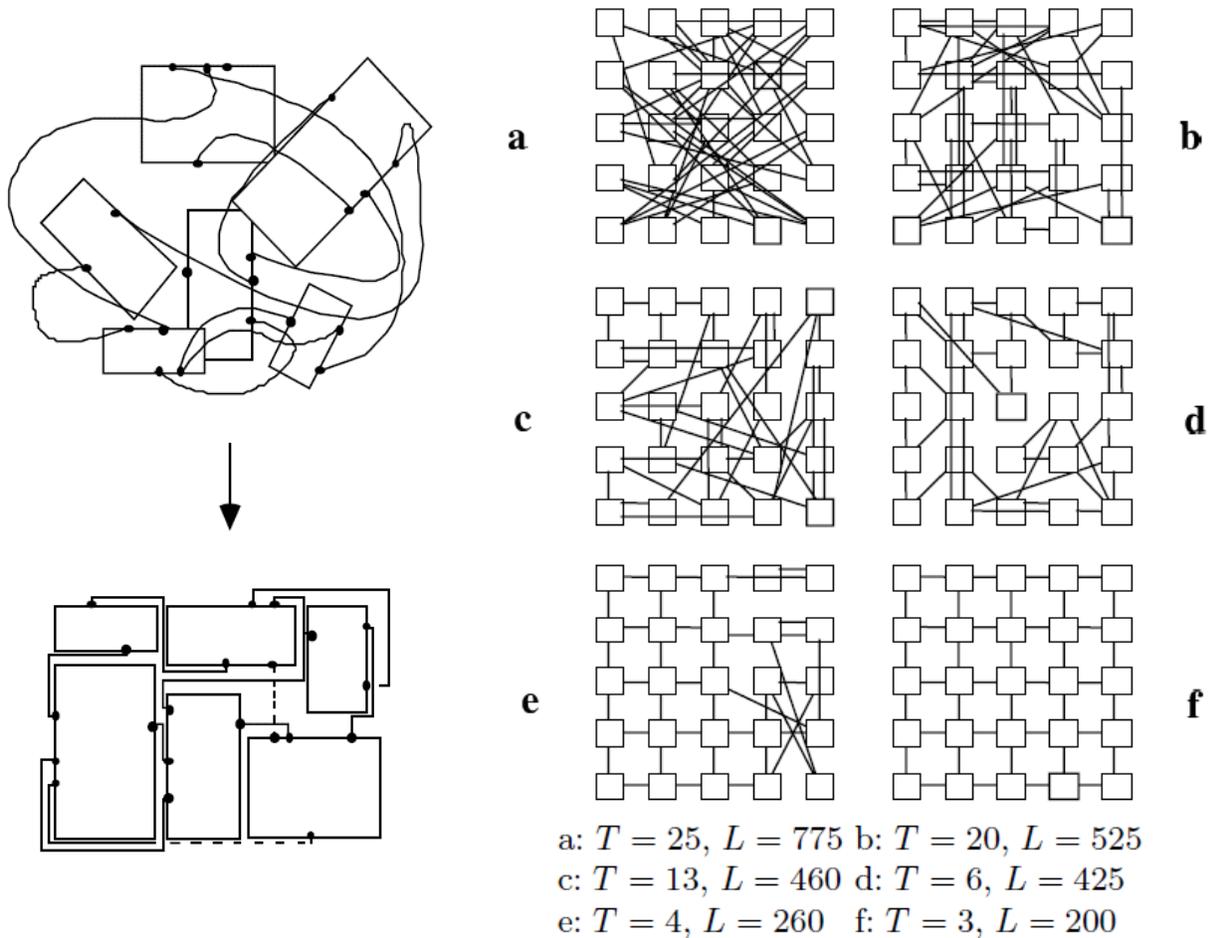


FIGURA 3.2-3

FIGURA 3.2-4

(Patnaik, Yang, & Nakamatsu, 2017, pp. 7-9, 12) (Dréo, Pétrowski, Siarry, & Taillard, 2006, pp. 5-9)

3.3. ALGORITMO DE COLONIA DE HORMIGAS (ACO) (ANT COLONY OPTIMIZATION).

Los algoritmos de colonias de hormigas forman una clase de métodos metaheurísticos recientemente propuestos para problemas de optimización difíciles. Estos algoritmos están inicialmente inspirados en los comportamientos colectivos del depósito y seguimiento de rastros observados en las colonias de hormigas.

Alberto Coloni, Marco Dorigo y Vittorio Maniezzo (1992), trataron de simular la capacidad colectiva para resolver ciertos problemas, como se observa en una colonia de hormigas, cuyos miembros están individualmente equipados con facultades muy limitadas.

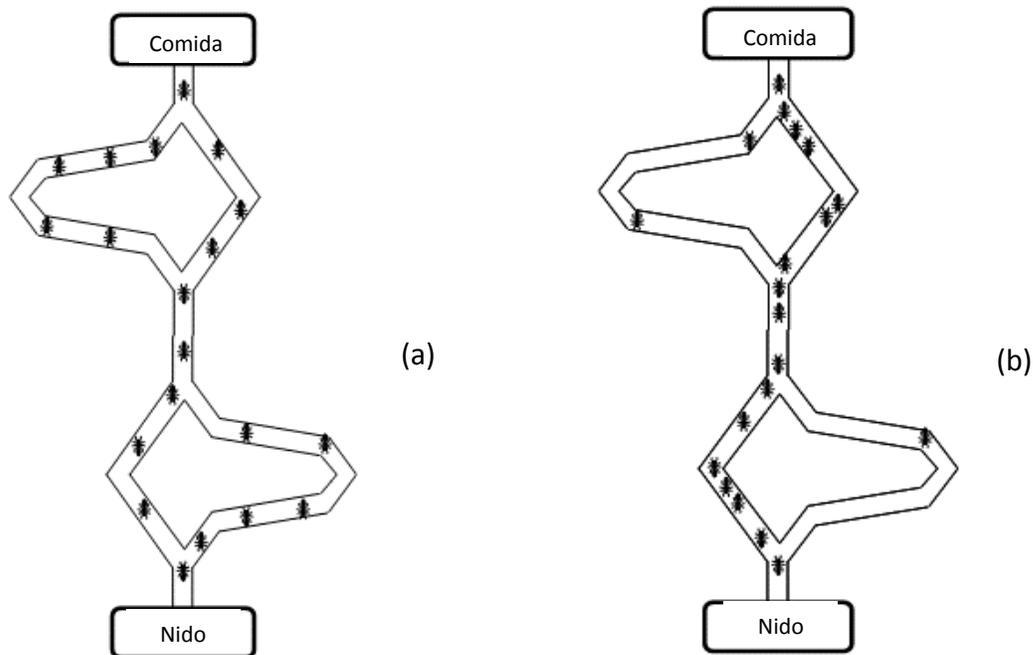


FIGURA 3.3-1 EXPERIMENTO DE SELECCIÓN DEL CAMINO MÁS CORTO POR UNA COLONIA DE HORMIGAS: (A) AL COMIENZO DEL EXPERIMENTO, (B) AL FINAL DEL EXPERIMENTO

Las hormigas existen en la tierra desde hace más de 100 millones de años y son una de las especies más prósperas con miles de millones de individuos en todo el planeta. Su peso total es de la misma magnitud que la de los humanos. Es por ello que su éxito plantea muchas preguntas. Los entomólogos han analizado la colaboración que se establece entre las hormigas para su búsqueda de alimentos fuera del hormiguero. Es notable que las hormigas sigan siempre el mismo camino y que éste sea el más corto posible. Ese control es el resultado de un modo de comunicación indirecta por medio del ambiente: la llamada "estigmergia". Cada hormiga deposita a lo largo de su camino una sustancia química llamada "feromona". Todos los miembros de la colonia perciben esta sustancia y de manera preferente, caminan hacia las áreas más "olorosas". Esto resulta en una facultad colectiva de encontrar el camino más corto rápidamente. Este comportamiento se tomó como punto de partida para modelar el algoritmo.

3. FUNDAMENTOS SOBRE MÉTODOS METAHEURÍSTICOS.

Los algoritmos de colonia de hormigas poseen varias características interesantes como su flexibilidad, pues pueden ser útiles para problemas dinámicos (una colonia de hormigas es capaz de adaptarse a las modificaciones del entorno), solidez, ya que tienen la capacidad de continuar funcionando en caso de avería de uno de sus componentes (una colonia está lista para mantener su actividad incluso si algunos individuos fallan), su descentralización (una colonia no obedece a una autoridad centralizada) y su auto-organización (una colonia encuentra por sí misma una solución, que no se conoce de antemano, basadas en su experiencia colectiva). Este método es particularmente útil para los problemas distribuidos en la naturaleza o problemas de evolución dinámica que demandan una fuerte tolerancia a fallas. La transposición con cada problema de optimización de estos algoritmos no es trivial, debe ser objeto de un tratamiento específico, que puede ser difícil.

Cuando una colonia explora aleatoriamente el paisaje en busca de alimento, cada hormiga va dejando un camino de feromonas a medida que avanza, el cual se evapora con el tiempo. Así, las hormigas forman una red que pueden unir cualquier punto. Este proceso forma parte de la fase global. Una vez que es encontrada una fuente de comida el sistema cambia a una fase local. Los caminos que conducen a una fuente de alimento se ven reforzados a medida que más hormigas los siguen, haciéndose más fuertes y directos; los caminos improductivos en cambio, se van evaporando. La retroalimentación positiva en el sistema recae en el efecto del refuerzo y la evaporación de caminos.

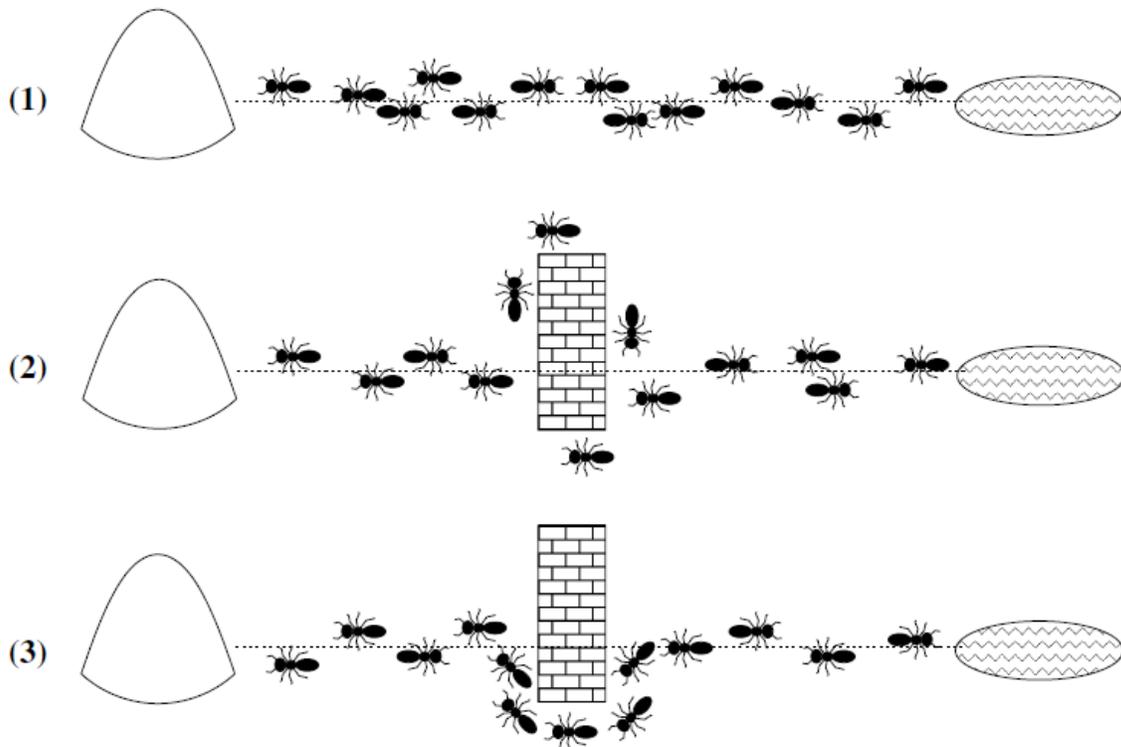


FIGURA 3.3-2 LAS HORMIGAS ENCUENTRAN EL CAMINO MÁS CORTO INCLUSO SI ÉSTE ES BLOQUEADO FORTUITAMENTE POR UN OBSTÁCULO.

3. FUNDAMENTOS SOBRE MÉTODOS METAHEURÍSTICOS.

Las aplicaciones de la optimización mediante colonia de hormigas se centran en la manera en la que los caminos evolucionan una vez que se haya encontrado comida.

En los ACO, una red de estados reemplaza a los puntos en un paisaje y agentes reemplazan a las hormigas. Mientras que las hormigas usan un rastro de feromonas para marcar los lugares que han visitado, los agentes modifican un valor numérico en los estados que han visitado (feromona artificial). Cualquier otro agente que visite el mismo estado puede acceder a este valor numérico. Dicho valor puede ser tomado en cuenta en el proceso de decisión y, posteriormente, actualizado y almacenado en el estado. En las colonias de hormigas artificiales un mecanismo de descomposición similar a la descomposición con el tiempo de las feromonas por evaporación, es utilizado para permitir la exploración de nuevas soluciones de problemas y evitar los mínimos locales. Para transitar de un estado a otro adyacente, de manera similar a las colonias de hormigas naturales, en las artificiales se usa una política de decisión probabilística, la cual solo incorpora información local sin ninguna vista de funcionalidad con respecto a los estados posteriores.

Al inicio del algoritmo, es decir, en la fase de exploración, los agentes pueden seguir una gran variedad de caminos que son iniciados con el mismo valor de feromonas. A medida que se van efectuando iteraciones en el algoritmo, las rutas van cambiando al encontrarse con transiciones donde hay mayor cantidad de feromonas. Es así como disminuye la probabilidad de elegir transiciones de menor calidad y en contraste, las transiciones directas se van reforzando y volviendo más atractivas. El resultado del proceso, al igual que en la naturaleza, es que ciertas secciones de senderos se vuelven en desuso, limitando cada vez más las opciones. Eventualmente la conectividad de la red de senderos cae por debajo de un umbral crítico, limitando a los agentes a un pequeño conjunto de senderos.

(Dréo, Pétrowski, Siarry, & Taillard, 2006, pp. 13-14,123-129)

(Patnaik, Yang, & Nakamatsu, 2017, pp. 11-12, 21-22, 60-61)

3.4. REDES NEURONALES ARTIFICIALES (ANN) (ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS).

En la búsqueda de científicos de diversas disciplinas por tratar de comprender el funcionamiento del cerebro humano, los ingenieros informáticos han tenido éxito al usar los modelos cerebrales hasta ahora descubiertos para introducir métodos heurísticos en el modelado algorítmico computacional.

Las redes neuronales artificiales (ANN), en términos simples, son un modelo computacional con inspiración biológica que consiste en elementos de procesamiento (llamados neuronas) y conexiones entre ellos con coeficientes (pesos) vinculados. Estas conexiones constituyen la estructura neuronal, a la cual se encuentran anexos algoritmos de entrenamiento y memoria.

En 1998, T. Kohonene y G. Deboeck describieron las redes neuronales como una colección de técnicas matemáticas que pueden ser usadas para el procesamiento, pronóstico y agrupamiento de señales, y lo denominaron como técnicas de regresión paralela, no lineal y multi-capas.

A pesar de las muchas funciones del cerebro humano aún desconocidas, las siguientes características principales se consideran como funciones comunes en las redes artificiales y reales:

- Aprendizaje y adaptación.
- Generalización
- El paralelismo masivo.
- Robustez
- Almacenamiento asociativo de información.
- Procesamiento de información espacio temporal.

Intrigados por el potencial de los ANN, profesionistas de casi todos los campos están encontrando métodos mediante la creación de nuevos modelos utilizando todas las combinaciones posibles de paradigmas simbólicos y sub-simbólicos, muchos de ellos con técnicas difusas para adaptarse a gran variedad de aplicaciones dentro de sus propias disciplinas.

W. Pitts, W.S. McCulloch, en el año de 1943, se convirtieron en los primeros en introducir un modelo matemático de una neurona. La mayor parte de su trabajo incluía un modelo de neurona simple, a estos sistemas de red se les denominó perceptrones. En general, estos modelos consisten en una sola capa. La unidad Σ multiplica cada entrada x por un peso w , y suma las entradas ponderadas. Si esta suma es mayor que un límite predefinido, la salida es uno, de lo contrario es cero.

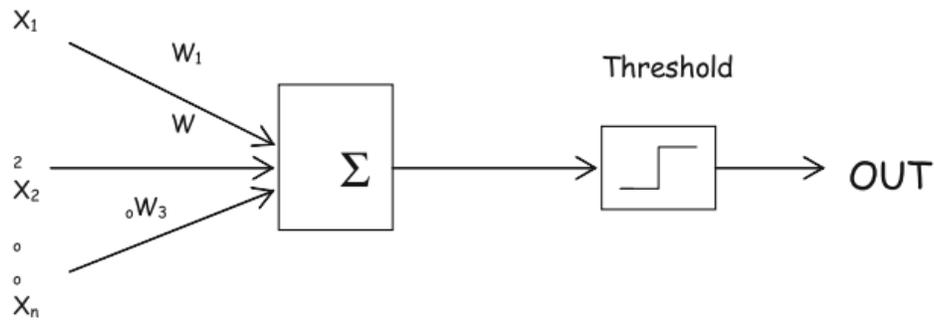


FIGURA 3.4-1 NEURONA PERCEPTRÓN DE PITTS & MCCULLOCH

A principios de los años 60, luego de trabajos desarrollados por el neurobiólogo Rosenblatt como sus teoremas acerca del aprendizaje del perceptrón se creó gran interés por los ANN. Muchos investigadores se encontraban estudiando el potencial de esos perceptrones pero eventualmente, a medida que se encontró que estos sistemas de una sola capa fallaban en ciertas tareas simples de aprendizaje, se fue perdiendo el interés.

M.L. Minsky y S. Papert probaron que una capa simple de perceptrones tenía severas restricciones en su capacidad para representar y aprender. Además, dudaban que se pudiera encontrar un algoritmo de aprendizaje para redes neuronales de múltiples capas, lo que casi eclipsó la investigación de los ANN pero, a su vez causó un desarrollo de sistemas y métodos simbólicos de inteligencia artificial, es decir, “sistemas expertos”.

A partir de 1977, se introdujeron nuevos modelos conexionistas, tales como memorias asociativas, perceptrón multicapa (MLP), algoritmo de aprendizaje de propagación inversa, teoría de la resonancia adaptativa (ART), redes auto-organizadas, etcétera. Estos nuevos modelos conexionistas atrajeron el interés de muchos más investigadores en sistemas sub-simbólicos y, como resultado, muchas más redes fueron diseñadas y usadas desde entonces, por ejemplo, la memoria asociativa bidireccional, función de base radial, redes neuronales probabilísticas de RAM, neuronas difusas y redes difusas, neuronas oscilatorias y redes neuronales oscilatorias y muchas más. Basados en estos diferentes modelos se han desarrollado enormes aplicaciones que se han usado con éxito en múltiples disciplinas.

El uso de los ANN se está incrementando para una gran variedad de áreas donde existen datos imprecisos o relaciones de atributos complejos que son difíciles de cuantificar utilizando métodos analíticos tradicionales.

Los parámetros que describen una neurona artificial (Figura 3.4-2 Modelo de una neurona artificial.), son:

1. Conexiones de entrada (entradas): x_1, x_2, \dots, x_n ; con pesos vinculados w_1, w_2, \dots, w_n . Una entrada a la neurona, llamada sesgo, tiene un valor constante de 1 y es usualmente representado como una entrada separada.

3. FUNDAMENTOS SOBRE MÉTODOS METAHEURÍSTICOS.

2. Funciones de entrada f : Calcula la señal de entrada neta agregada a la neurona $u = f(x, w)$, donde x y w son los vectores de entrada y de peso correspondientes; f es usualmente la función de suma; $u = \sum_{i=1}^n x_i \cdot w_i$.
3. Una función de activación (señal) s , calcula el nivel de activación de la neurona $a = s(u)$
4. Una función de salida calcula el valor de la señal de salida emitida a través de la salida de la neurona; $o = g(a)$; la señal de salida se supone generalmente igual al nivel de activación de la neurona, o sea, $o = a$.

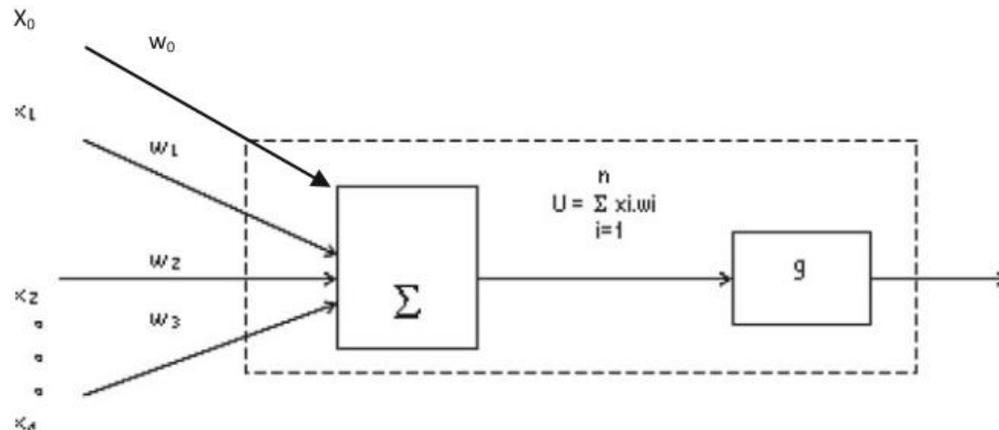


FIGURA 3.4-2 MODELO DE UNA NEURONA ARTIFICIAL.

Una red neuronal artificial está definida por los siguientes cuatro parámetros:

1. Tipo de neurona
2. Arquitectura de conexión. Es decir, la organización de las conexiones entre las neuronas, lo cual define la topología del ANN.
La arquitectura de conexión se puede distinguir dependiendo del número de neuronas de entrada y salida y las capas de neuronas utilizadas en autoasociativa y heteroasociativa.
3. Algoritmo de aprendizaje. Con el que se entrena a las redes, los más usados se clasifican en tres grupos: Aprendizaje supervisado, sin supervisión y aprendizaje reforzado.
4. Algoritmo de recuperación: Por el cual el conocimiento aprendido se extrae de la red.

Las siguientes son las aplicaciones actuales de los ANN en general:

1. Aproximación de funciones, cuando se presenta un conjunto de datos.
2. Asociación de patrones.
3. Agrupamiento de datos, categorización y conceptualización.
4. Aprendizaje de parámetros estadísticos.
5. Acumulación de conocimientos a través del entrenamiento.
6. "Extracción" de conocimiento analizando los pesos de conexión.
7. Insertar el conocimiento en una estructura de red neuronal para obtener un razonamiento aproximado.

3. FUNDAMENTOS SOBRE MÉTODOS METAHEURÍSTICOS.

El proceso de resolución de problemas con redes neuronales consta de dos fases principales:

- Fase de entrenamiento: La red se entrena con ejemplos y se insertan reglas en su estructura.
- Fase de memoria: Cuando se ingresan nuevos datos a la red entrenada, el algoritmo de memoria se utiliza para calcular los resultados.

El proceso de resolución de problemas se describe como el mapeo del dominio del problema, conocimiento del problema y espacio de solución.

La construcción de una red neuronal podría dividirse en los siguientes pasos:

1. Identificación del problema
2. Elegir un modelo de red neuronal apropiado para resolver el problema.
3. Preparar datos para entrenar la red, proceso que puede incluir análisis estadístico, discretización y normalización.
4. Entrenamiento de una red, si los datos para el entrenamiento están disponibles. Este paso puede incluir la creación de un entorno de aprendizaje en el que las redes neuronales son los "pupilos".
5. Probar la capacidad de generalización de la red neuronal entrenada y validar los resultados.

(Shanmuganathan & Samarasinghe , 2016, págs. 1-11)

3.5. ALGORITMOS GENÉTICOS (GA) (GENETIC ALGORITHMS).

Los algoritmos genéticos (GA) pertenecen al área de la informática relacionada con las máquinas y programas computacionales. Puesto que son parte de diversos sistemas inteligentes, los algoritmos genéticos se cuentan frecuentemente entre las áreas de inteligencia computacional e inteligencia artificial, cuyo objetivo es construir métodos que imiten e incluso superen la inteligencia humana.

Los algoritmos genéticos son una clase de algoritmos de optimización probabilística inspirados en el proceso de evolución biológica. Al igual que Darwin usan los conceptos de selección natural, herencia genética y supervivencia del más apto.

Cuando de un problema de optimización se trata, es decir, cuando se requiere minimizar un error, minimizar energía, desperdicio, costos, esfuerzo y maximizar el beneficio, resultados, éxito y marcajes, etc., y los métodos de optimización clásicos fallan debido a características muy complejas en el problema o a la escasa información en espacios de búsqueda subyacentes; cuando se requiere resolver una amplia gama de problemas de búsqueda, optimización y aprendizaje automático; o simplemente cuando el problema es muy complejo y ofrece múltiples soluciones que si se calcularan manualmente representarían mucho tiempo consumido; los algoritmos genéticos representan la opción ideal de solución.

En ingeniería civil ha habido múltiples aplicaciones de algoritmos genéticos para problemas de optimización. Lingireddy (1996 y 1998) ha aplicado GA para problemas en irrigación y estudios de aguas subterráneas. Lingireddy y Ormsbee (1998) usaron GA para obtener calibrar redes de distribución de agua. Diversos autores han utilizado con éxito los GA para obtener parámetros de calibración de calidad del agua en redes de distribución de agua utilizando el módulo de análisis hidráulico de EPANET (Rossman 2000) para evaluar la aptitud de los individuos (Ramalingam et al. 2004). Bong y Karney (2006) han aplicado los GA para optimizar la ubicación de los dispositivos de protección contra transitorios en redes de tuberías. Zhang (1999) utilizó GA para el diseño óptimo de las redes de distribución de agua, incluido el análisis de transitorios.

(Kramer, 2017, pp. 3-4) ; (Spillman, 1993); (Ramalingam, 2007, pág. 25)

3.5.1. DESARROLLO HISTÓRICO.

El surgimiento de los algoritmos evolutivos (EA) comenzó en la década de 1960. Casi de manera independiente, se desarrollaron cuatro corrientes principales de la familia de los algoritmos evolutivos: Algoritmos genéticos (GA), Estrategia evolutiva (ES), programación evolutiva (EP) y programación genética (GP).

A mediados de 1960 Ingo Rechenberg y Hans-Paul Schwefel desarrollaron en Europa, sistemas artificiales con algoritmos a los cuales llamaron estrategias de evolución (ES). Los cuales siguen siendo una famosa rama de investigación con énfasis en espacios de soluciones continuas.

En 1975, John Holland introdujo el concepto de los algoritmos genéticos (GA) en los Estados Unidos a través de su libro *"Adaptation in Natural and Artificial Systems"*. Se basaban principalmente en representaciones de cadenas binarias, en ellos los operadores de cruce desempeñaban un papel más importante que la mutación, la mutación se hacía cambiando los bits de ceros a unos y viceversa, con una probabilidad establecida. Originalmente Holland no creó los GA para resolver problemas, él simplemente quería incorporar los mecanismos de adaptación natural en la programación de computadoras. Uno de los estudiantes de Holland, John Koza, se convirtió en uno de los primeros en crear aplicaciones comerciales para los GA. Koza escribió varios libros sobre programación genética y fundó una compañía llamada Scientific Games.

En 1966 L.J. Fogel, Owens y Walsh introdujeron la programación evolutiva (EP), para hacer evolucionar la estructura de robots de estado finito con selecciones y mutaciones iteradas. Se deseaba ser una alternativa para la inteligencia artificial de la época. Más tarde la programación evolutiva se extendió para la optimización en espacios de soluciones binarias y continuas, y también se equipó con técnicas de adaptación de tasas de mutación.

Al día de hoy las variantes citadas han crecido de la mano haciendo difícil distinguir entre ellas debido a que la mayoría de los conceptos, representaciones y mecanismos se les han aplicado a todas.

La única vertiente que sí puede ser distinguida es la programación genética (GP), la cual desarrolla programas de aprendizaje automático. Durante la evaluación de la calidad de una solución, el programa se ejecuta y se mide su rendimiento.

(Kramer, 2017, pp. 6-7) ; (Biscontini, 2017) ; (Dréo, Pétrowski, Siarry, & Taillard, 2006, p. 76).

3.5.2. METODOLOGÍA.

Los AG ofrecen una gran variedad de posibles soluciones a un problema. Estas soluciones son llamadas "población". Las soluciones son elegidas en función de su "nivel de condición física" o de qué tan bien resuelvan un problema. Dos soluciones que son adecuadas tienen la oportunidad de "aparearse" y producir "hijos". *Las soluciones que no sean aptas no se usan.* Se espera que los hijos, o sea, las nuevas soluciones, sean incluso mejores que los originales. El proceso puede continuar hasta que se encuentren soluciones casi óptimas. Los AG son convenientes porque generan rápidamente una lista de soluciones potenciales, en lugar de una sola solución.

El ciclo básico de un algoritmo genético consta de seis pasos: (1) iniciación, (2) evaluación, (3) selección, (4) cruce, (5) mutación, y (6) repetición. Figura 3.5-1.

La iniciación comienza con unas primeras soluciones o población generada aleatoriamente. Una población puede ser de cualquier tamaño, pero la mayoría son enormes e incluyen miles de soluciones. Las soluciones suelen representarse como listas de valores y, en general, se basan

en conjuntos de símbolos. Si son continuos, se llaman vectores, si consisten en bits, se llaman cadenas de bits que son series de ceros y unos. A esta representación se le llama genotipo o cromosoma.



FIGURA 3.5-1 CICLO BÁSICO DEL ALGORITMO GENÉTICO

Durante el proceso de evaluación, cada miembro de la población es valorado, asignándole un nivel de aptitud física. Cuanto más alto sea el nivel de aptitud física de una solución, mejor será ésta. Los criterios para determinar un nivel de aptitud física pueden ser simples o complejos, requiriendo mucho menos tiempo la evaluación del criterio simple que utilizando el criterio complejo. De esta evaluación, las soluciones pobres, o sea, con bajo nivel de aptitud, se descartan y las mejores soluciones son las elegidas.

En el proceso de cruce dos soluciones aptas o cadenas de bits (los "padres") se fusionan para crear nuevas soluciones ("hijos"). Si la longitud de cada cadena de bits es r , se selecciona un número aleatorio entre 1 y r , al que se llamará s . El proceso de apareamiento implica el intercambio $s + 1$ a r del primer padre con los bits $s + 1$ a r del segundo padre. De esta forma, se crean dos nuevas cadenas, como en la Figura 3.5-2. Se espera que los mejores rasgos de cada padre se transmitan a los hijos, creando así soluciones cada vez más adecuadas que las originales.

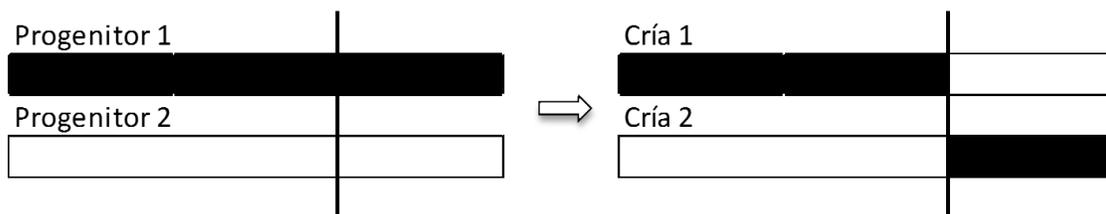


FIGURA 3.5-2 PROCEDIMIENTO DE CRUZA

El proceso de mutación añade aleatoriedad a la genética. Al comienzo del algoritmo se establece una probabilidad de mutación pequeña y fija. Los bits en todas las cadenas nuevas están sujetos a cambios al azar en función de esta probabilidad de mutación, evitando la

3. FUNDAMENTOS SOBRE MÉTODOS METAHEURÍSTICOS.

obtención de muchos hijos idénticos. Así entonces la mutación es vital para asegurar la diversidad de una nueva población. En la Figura 3.5-3, los bits 6 y 10 están mutados. (El bit 6 pasa de oscuro a claro, y el bit 10 pasa de claro a oscuro). El resultado es una nueva generación de cadenas.

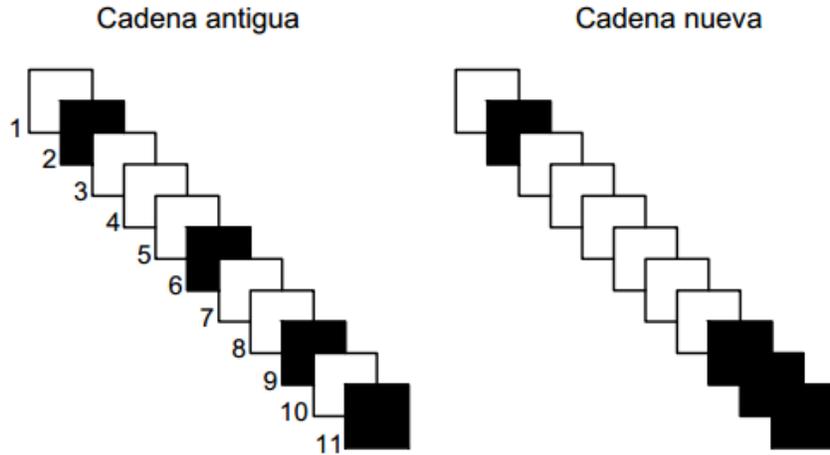


FIGURA 3.5-3 PROCESO DE MUTACIÓN.

La mayoría de los GA se ejecutan más de una vez. Así cada nueva población generada se somete nuevamente a evaluación, selección, etc. A cada población se le llama generación.

Un programador computacional usualmente terminará una GA cuando se encuentre una solución que sea "suficientemente buena" dependiendo de la cantidad de tiempo disponible. También se termina cuando toda una población tiene un nivel de aptitud física aceptable o cuando se alcanza alguna condición de detención (como un número máximo de generaciones).

Este algoritmo ha demostrado ser muy eficaz para resolver algunos problemas de búsqueda difíciles. Si bien puede parecer una búsqueda aleatoria, de hecho, la mejora en cada generación indica que el algoritmo proporciona una técnica de búsqueda dirigida efectiva.

Una desventaja de los GA es que, aunque ejecutarlos sea mucho más rápido que hacer cálculos manuales, requieren mucho tiempo. Otro problema es que a veces generan muchas soluciones aceptables pero no una solución óptima, requiriendo intervención humana.

(Biscontini, 2017) (Dréo, Pérowski, Siarry, & Taillard, 2006)

4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORÍTMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

4.1. METODOLOGÍA.

La metodología que se presenta a continuación está enfocada en la optimización mediante el empleo de algoritmos genéticos de las dimensiones de la cámara de aire, buscando minimizar su volumen, y por ende, reducir los costos de construcción e instalación.

Aunque cada línea de conducción requiere un estudio particular para determinar el medio de protección contra transitorios, en esta metodología se da por hecho que se requiere de una cámara de aire como estructura mitigadora de los efectos del transitorio hidráulico.

Para el procedimiento de cálculo se debe contar con los datos siguientes:

- a. Perfil topográfico de la línea de conducción, diámetro, material, espesor, y presión de trabajo de la tubería.
- b. Niveles de agua en la toma y descarga de la bomba.
- c. Momento de inercia del conjunto motor-bomba.
- d. Punto de operación de máxima eficiencia de la bomba a flujo permanente.

Inicialmente la conducción se analiza para flujo permanente, con el objeto de definir las condiciones iniciales para el análisis del transitorio y poder determinar la situación más desfavorable. Después se realiza un análisis del evento transitorio sin medios de control.

Para ejecutar la simulación de transitorios hidráulicos para el diseño del sistema de conducción de agua con tuberías a presión se utilizó el programa TRANS: Sistema de Simulación de

4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

Transitorios Hidráulicos en Tuberías a Presión, desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

TRANS está basado en la aplicación del método de las características para resolver las ecuaciones hiperbólicas en derivadas parciales (ecuaciones dinámica y de continuidad) y las ecuaciones que simulan las condiciones de frontera de los elementos y eventos que forman una conducción a presión. (Carmona Paredes & Carmona Paredes, 2013)

En cuanto al empleo del algoritmo genético, se genera una población inicial de triple cromosoma, donde:

- 1º cromosoma. Volumen total de la cámara de aire.
- 2º cromosoma. Volumen inicial de aire (Porcentaje del Vol. total).
- 3º cromosoma. Altura de la cámara.

Cada uno de los individuos generados representa una opción de cámara diferente que se simulará en TRANS.

De los resultados que arroje el programa se obtienen envolventes de presiones máximas y mínimas, variación de nivel en la cámara de aire, flujo de entrada y salida, evolución de la velocidad de giro de las bombas una vez que se ha dado el corte en el suministro eléctrico y la evolución en el tiempo del flujo descargado por las bombas.

Con base en los resultados obtenidos se determina un “factor de aptitud” para cada individuo, este factor f_a , es una función que evalúa el comportamiento hidráulico de la cámara de aire, otorgando una visión global de qué tan óptima sería su utilización.

Para el cálculo de f_a se emplea la Ecuación 4.4-1, donde se sustituyen los valores de las sobrepresiones máximas y mínimas, el costo de cada cámara, así como un factor que penaliza a las sobrepresiones mayores y que a su vez regula el porcentaje de influencia del costo respecto al comportamiento ante las presiones críticas obtenidas. Esto se explica a detalle en la sección 4.4.2.

Para realizar el proceso de selección y cruce de los individuos mediante el algoritmo genético, se utiliza la técnica de la ruleta, en ella, a través de la valoración que obtenga el individuo en el factor de aptitud, se le asignará un porcentaje para ser elegido, lo cual decidirá su pase a la siguiente generación. La cruce se ejecuta en un solo punto con una probabilidad de 70 % y el operador de mutación se aplica con una probabilidad de 5 %.

Finalmente el ciclo es repetido por un número de generaciones especificado por el usuario, en este caso se realizaron 20 generaciones.

Debido a la particularidad de los algoritmos genéticos de evolucionar rápidamente hacia el resultado óptimo para el cual son programados, se realizó un análisis de sensibilidad con diferentes consideraciones para las sobrepresiones y en el cromosoma de altura. Finalmente se analizaron los resultados de cada modelación, presentando los mejores.

4.2. DATOS DEL PROBLEMA.

La metodología anteriormente descrita se aplicó a una línea de conducción cuya estación de bombeo cuenta con tres bombas de 15 HP cada una, se debe suministrar un caudal de 39 l/s existiendo un desnivel topográfico de 40.05 m. Los primeros 30 metros de tubería son de acero, los siguientes 570 metros de tubería son de polietileno de alta densidad, ambos con el mismo diámetro de 6 pulgadas. Se considera una temperatura de 20 °C para el agua.

Los datos del perfil topográfico de la línea de conducción se presentan a continuación.

Longitud (m)	0	14.77	26.1	28.71	38.02	47.18	56.75	65.71
Elevación (msnm)	2395.7	2396.01	2398.4	2409.38	2410.83	2412.36	2413.86	2415.14
Longitud (m)	74.37	82.98	90.43	101.19	110.8	120.46	130.23	149.53
Elevación (msnm)	2416.4	2417.52	2417.5	2418.72	2419.11	2419.5	2420.78	2423.8
Longitud (m)	157.67	160	165.19	176.64	182.39	191.04	199.16	209.11
Elevación (msnm)	2425.1	2425.54	2426.3	2427.56	2428.86	2430.14	2430.5	2430.41
Longitud (m)	225.61	235.55	245.44	255.07	265.41	275.73	285.36	294.82
Elevación (msnm)	2430.3	2430.16	2430.1	2429.98	2429.27	2428.56	2427.95	2427.1
Longitud (m)	305.45	318.79	320	328.77	339.13	346.6	347.64	354.9
Elevación (msnm)	2426.7	2425.9	2425.5	2426.4	2427.26	2428.01	2428.14	2428.83
Longitud (m)	357.91	364.99	375.46	384.98	393.41	403.06	413.57	422.8
Elevación (msnm)	2429.1	2429.47	2429.6	2429.85	2430.19	2430.59	2431.03	2431.46
Longitud (m)	431.02	440.91	450.65	460.3	469.72	479.09	480	488.66
Elevación (msnm)	2431.8	2432.29	2432.8	2433.25	2433.74	2434.22	2434.22	2434.67
Longitud (m)	495.62	501.44	513.94	526	540.52	550.31	560.39	579.66
Elevación (msnm)	2434.9	2435.07	2435.5	2435.61	2435.6	2435.64	2435.72	2435.72
Longitud (m)	589.64	600						
Elevación (msnm)	2435.7	2435.72						

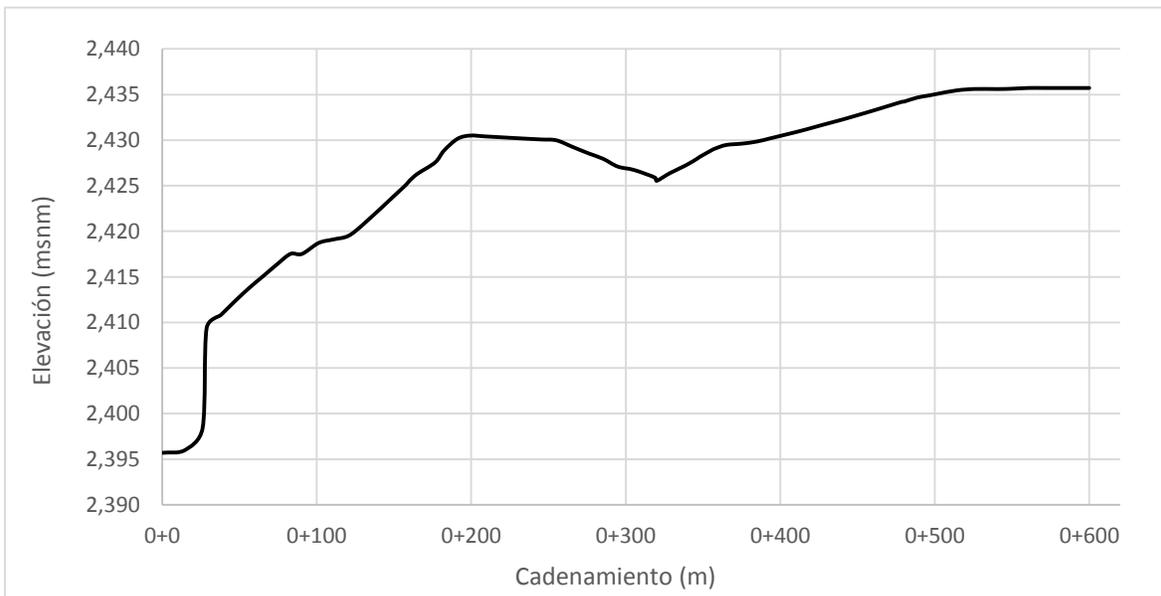


FIGURA 4.2-1 PERFIL TOPOGRÁFICO DE LA LÍNEA DE CONDUCCIÓN.

4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

Las tres bombas seleccionadas para la línea son centrifugas tipo multietapa vertical marca Barmesa Modelo BMV32-42-1503 de 4 pasos. (Barnes de México, S.A. de C.V.)

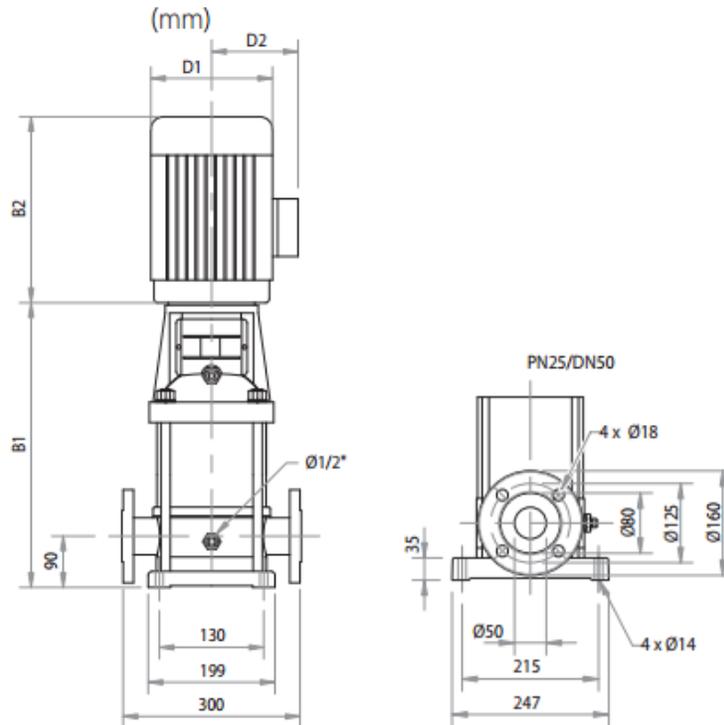


FIGURA 4.2-2 DIBUJO DE INSTALACIÓN DE LAS BOMBAS SELECCIONADAS.

La tubería seleccionada para la línea posee las características siguientes:

Acero:

Longitud	30 m
Diámetro nominal	6"
Diámetro exterior	168.3 mm
Espesor de la pared	6.35 mm
Cédula	40 STD
Rugosidad absoluta (ϵ)	0.05 mm
Coefficiente de Poisson (ν)	0.27

Polietileno VALTIC Premium PE 4608:

Longitud	570 m
Diámetro nominal	6"
Diámetro exterior	168.3 mm
Espesor de la pared	6.5 mm
RD	26
Rugosidad absoluta (ϵ)	0.0015 mm
Coefficiente de Poisson (ν)	0.46
Presión de trabajo	4 kg/cm ²

4.3. ARMADO DEL ARCHIVO DE DATOS PARA TRANS.

De acuerdo al manual para uso de TRANS, para modelar la línea con una cámara de aire se requieren los siguientes datos:

- 1) Número de tubos que forman el sistema: 2
- 2) Número de divisiones del primer tubo: 6

Para obtener este dato, se requiere cumplir con la condición de estabilidad de Courant y que el modelo sea estable:

$$\Delta x \geq a\Delta t$$

De acuerdo a dicha expresión se desarrolló una tabla para conocer intervalos de tiempo y longitud viables (Anexo D)

De acuerdo al manual de uso de TRANS, bajo las siguientes fórmulas se determinan las dimensiones de la malla de cálculo por el método de las características:

$$\Delta t = \min\left(\frac{l_1}{nc_1}, \frac{l_i}{c_i}, 0.1\right)$$

Donde: l_i denota la longitud del tramo i , c_i la celeridad de la onda en el mismo tramo, los subíndices 1 y mín se refieren al primer tramo y al de menor longitud, respectivamente, n se calcula con la siguiente fórmula:

$$n = \frac{l_1}{l_{min}}$$

Sustituyendo valores de intervalos previamente evaluados:

$$\Delta t = \left(\frac{30 \text{ m}}{6(1300.127749 \text{ m/s})}\right) = 0.0038 \text{ s}$$

$$n = \frac{30 \text{ m}}{5 \text{ m}} = 6$$

Una vez que se conoce el valor de Δt , se calcula Δx_1 como sigue:

$$\Delta x_1 = c_i \Delta t$$

$$\Delta x_1 = 1300.1277 \text{ m/s} (0.0038 \text{ s})$$

$$\Delta x_1 = 5 \text{ m}$$

Para obtener el número de divisiones del primer tramo:

$$\frac{l_1}{\Delta x_1} = \frac{30 \text{ m}}{5 \text{ m}} = 6$$

4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

- 3) Grabación de resultados cada: 10 segundos
- 4) Tiempo de simulación: 100 segundos
- 5) Evento o elemento en la frontera aguas arriba considerado: Disparo de equipos de bombeo o paro no programado de las bombas (Código -1)
- 6) Cadenamiento del inicio del tramo de estudio: 0
- 7) Elevación de succión: 2395.7 msnm

Evento: Disparo de equipos de bombeo o paro no programado de las bombas (-1)

- 1) Número de bombas: 3
- 2) Instante del disparo de las bombas: 0
- 3) Tipo de válvula en la descarga de las bombas: Válvula de retención (1)
- 4) Número de tubo siguiente: 1
- 5) Datos de la válvula de descarga:
 - 1) Coeficiente mínimo de pérdida: $0.001 (s^2/m^5)$
 - 2) Coeficiente máximo de pérdida: $100'000,000 (s^2/m^5)$
- 6) Datos de las bombas:
 - 1) Número de puntos que describen cada curva característica de las bombas (carga y momento): 72
 - 2) Incremento angular entre los puntos de las curvas características: 5
 - 3) Gasto nominal de las bombas: $0.01319 (m^3/s)$
 - 4) Presión nominal de las bombas: 50.18 (m)
 - 5) Velocidad nominal de las bombas: 3500 (rpm)

Para conocer Q y H en el punto de operación, se procede a calcular la carga dinámica a través de las siguientes fórmulas:

$$H_D = H_E + \Sigma h$$

Donde H_E es la carga estática, Σh es la sumatoria de las pérdidas de carga

$$\Sigma h = h_{f \text{ acero}} + h_{f \text{ PEAD}}$$

Pérdidas por fricción mediante la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g}$$

Factor de fricción mediante la ecuación de Swamee-Jain:

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2}$$

ε es el coeficiente de rugosidad, el número de Reynolds se calcula mediante la Ec. 1.1-4.

Para calcular el número de Reynolds se considera una viscosidad cinemática de $1.004 \times 10^{-6} m^2/s$ para una temperatura media del agua de 20 °C.

4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORÍTMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

Q (l/s)	V (m/s)		Re		f		h _f (Darcy)		H _E	H _D
	Acero	PEAD	Acero	PEAD	Acero	PEAD	Acero	PEAD		
1	0.0485	0.0486	7830.6075	7837.8670	0.0336	0.0332	0.0007	0.0141	40.0200	40.0348
3	0.1456	0.1459	23491.8224	23513.6009	0.0256	0.0248	0.0051	0.0949	40.0200	40.1200
6	0.2913	0.2918	46983.6447	47027.2019	0.0222	0.0211	0.0178	0.3224	40.0200	40.3602
9	0.4369	0.4377	70475.4671	70540.8028	0.0207	0.0193	0.0372	0.6635	40.0200	40.7207
12	0.5825	0.5836	93967.2895	94054.4037	0.0197	0.0181	0.0632	1.1100	40.0200	41.1932
15	0.7282	0.7295	117459.1118	117568.0047	0.0191	0.0173	0.0956	1.6567	40.0200	41.7722
18	0.8738	0.8754	140950.9342	141081.6056	0.0186	0.0167	0.1342	2.3000	40.0200	42.4542
21	1.0195	1.0213	164442.7565	164595.2066	0.0183	0.0162	0.1792	3.0371	40.0200	43.2362
24	1.1651	1.1673	187934.5789	188108.8075	0.0180	0.0158	0.2303	3.8657	40.0200	44.1160
27	1.3107	1.3132	211426.4013	211622.4084	0.0177	0.0155	0.2877	4.7839	40.0200	45.0916
30	1.4564	1.4591	234918.2236	235136.0094	0.0175	0.0151	0.3512	5.7902	40.0200	46.1614
33	1.6020	1.6050	258410.0460	258649.6103	0.0174	0.0149	0.4208	6.8832	40.0200	47.3240
36	1.7476	1.7509	281901.8684	282163.2112	0.0172	0.0146	0.4966	8.0616	40.0200	48.5782
39	1.8933	1.8968	305393.6907	305676.8122	0.0171	0.0144	0.5785	9.3244	40.0200	49.9230
42	2.0389	2.0427	328885.5131	329190.4131	0.0170	0.0142	0.6666	10.6707	40.0200	51.3573
45	2.1845	2.1886	352377.3354	352704.0141	0.0169	0.0141	0.7607	12.0995	40.0200	52.8802

TABLA 4.3-1 DATOS PARA OBTENER LA CURVA DEL SISTEMA

6) Eficiencia de las bombas: 0.583

El cálculo de la curva de eficiencia (η) considerando un arreglo en paralelo con 3 bombas, se efectúa siguiendo las siguientes fórmulas y consideraciones.

El gasto total es igual a la suma de los gastos de cada bomba individual:

$$Q_P = \sum_{i=1}^n Q_i$$

La carga de un arreglo en paralelo es igual a las cargas individuales:

$$H_{mP} = H_{m1} = H_{m2} = H_{m3} = \dots = H_{mn}$$

La eficiencia de un arreglo de bombas en paralelo es un promedio armónico de las eficiencias parciales:

$$\frac{1}{\eta_P} = \frac{1}{Q_P} \sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{\eta_i}$$

(Guaycochea Guglielmi, 2009)

Dichas fórmulas fueron aplicadas para obtener la Tabla 4.3-2. Los valores para η se obtuvieron de la gráfica de eficiencia ubicada en el catálogo de la Bomba BMW32-42-1503.

4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

Q (l/s)	Q ₁ , Q ₂ , Q ₃ (l/s)	η ₁ , η ₂ , η ₃	$\frac{Q_1}{\eta_1}, \frac{Q_2}{\eta_2}, \frac{Q_3}{\eta_3}$	η
1	0.3333	5.47889441	0.06083953	5.478894406
3	1	15.8134583	0.06323727	15.81345834
6	2	29.7572421	0.06721053	29.75724205
9	3	41.8313511	0.07171655	41.83135113
12	4	52.0357856	0.07687018	52.03578558
15	5	60.3705454	0.08282185	60.3705454
18	6	66.8356306	0.08977248	66.83563059
21	7	71.4310411	0.09799661	71.43104114
24	8	74.1567771	0.10787955	74.15677707
27	9	75.0128384	0.11997946	75.01283837
30	10	73.999225	0.13513655	73.99922503
33	11	71.1159371	0.154677	71.11593707
36	12	66.3629745	0.18082372	66.36297447
39	13	59.7403372	0.21760841	59.74033724
42	14	51.2480254	0.27318126	51.24802538
45	15	40.8860389	0.3668734	40.8860389

TABLA 4.3-2 VALORES PARA OBTENER GRÁFICA DE EFICIENCIA DE LAS 3 BOMBAS CON ARREGLO PARALELO.

Graficando la curva de la bomba, junto con la del sistema y la de eficiencia se obtiene:

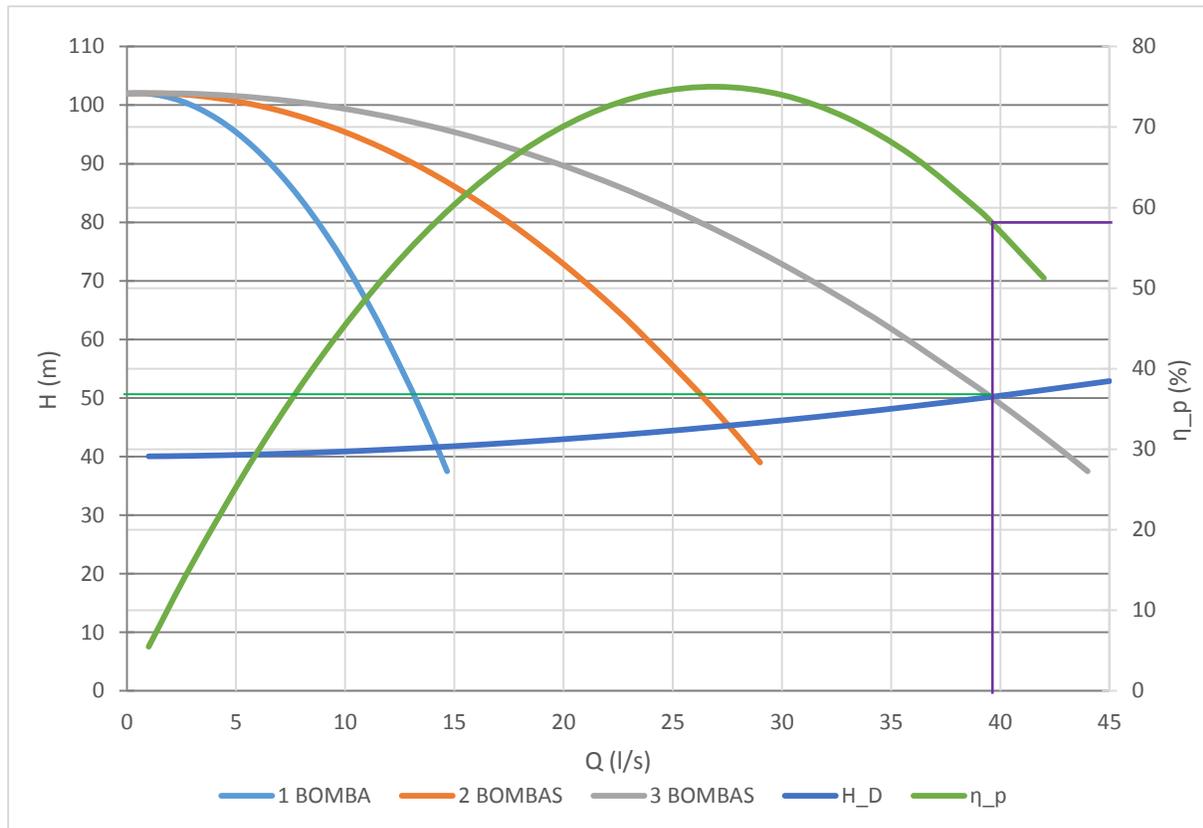


FIGURA 4.3-1 GRÁFICA PARA OBTENCIÓN DE PUNTO DE OPERACIÓN.

4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

Del punto de operación en la Figura 4.3-1 se puede leer:

$$Q = 39.56 \text{ l/s,}$$

$$H = 50.18 \text{ m}$$

$$\eta = 58.30 \%$$

$$7) \text{ Momento de inercia: } 0.0341 \text{ (kg}\cdot\text{m}^2\text{)}$$

El momento de inercia del conjunto motor-bomba es la suma de los momentos de inercia del motor y la bomba, éstos se pueden calcular a través de las ecuaciones siguientes:

$$I(\text{bomba}) = 0.03768 \left(\frac{P}{N^3} \right)^{0.9556}$$

ECUACIÓN 4.3-1

$$I(\text{motor}) = 0.0043 \left(\frac{P}{N} \right)^{1.48}$$

ECUACIÓN 4.3-2

Donde:

N velocidad de giro de las bombas, en miles de rpm

P potencia mecánica, en Watts.

(Thorley, 2004, págs. 211-214)

$$P = \frac{\rho g Q H}{\eta}$$

ECUACIÓN 4.3-3

Donde:

ρ – densidad del fluido en kg/m^3

g – la aceleración de la gravedad en m/s^2 ,

Q y H – gasto y carga en el punto de operación de máxima eficiencia en m^3/s y m , respectivamente

η – eficiencia de la bomba

Así, se procede a calcular el valor de la Potencia mecánica de cada bomba mediante la Ecuación 4.3-3

$$P = \frac{(998.2 \text{ kg/m}^3)(9.81 \text{ m/s}^2) (0.01319 \text{ m}^3/\text{s})(50.18 \text{ m})}{0.5830}$$

$$P = 11114.34064 \text{ [W]} = 11.11 \text{ [kW]}$$

El valor de la inercia de la bomba y del motor calcula a través de la Ecuación 4.3-1 y la Ecuación 4.3-2, respectivamente, como se indica a continuación:

4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORÍTMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

$$I(bomba) = 0.03768 \left(\frac{11.11}{3.5^3} \right)^{0.9556} = 0.0104$$

$$I(motor) = 0.0043 \left(\frac{11.11}{3.5} \right)^{1.48} = 0.0238$$

Por lo tanto el Momento de inercia del conjunto motor bomba es:

$$I = 0.0104 + 0.0238$$

$$I = \mathbf{0.0341 \text{ kg m}^2}$$

A continuación se solicitan datos de las curvas características, para determinarlos, primeramente se debe conocer la velocidad específica, como se expone a continuación:

$$N_s = \frac{N_R \sqrt{Q_R}}{H^{3/4}}$$

En el sistema métrico las unidades a manejar son las siguientes:

$$N_s = \frac{\text{rpm} \sqrt{\text{m}^3 / \text{s}}}{\text{m}^{3/4}}$$

Sustituyendo en dicha fórmula y considerando que “Para el caso de bombas con varios impulsores la carga se divide entre el número de impulsores” (Carmona Paredes & Carmona Paredes, 2013, pág. 75) se tiene:

$$N_s = \frac{3500 \sqrt{0.0132}}{\left(\frac{50.18}{4} \right)^{3/4}} = 60.3$$

La simulación de la operación transitoria de las bombas se realiza usando la información del N_s más cercano al de la bomba en cuestión, en este caso se recurrió a los valores calculados para un $N_s=63$ (Chaudhry, 2014):

7) Datos de la curva característica de carga (f_h):

-0.574	-0.517	-0.460	-0.403	-0.258	-0.112	0.033	0.189
0.344	0.500	0.655	0.809	0.964	1.070	1.176	1.282
1.351	1.419	1.488	1.476	1.464	1.452	1.441	1.429
1.418	1.401	1.383	1.366	1.327	1.289	1.250	1.202
1.153	1.105	1.061	1.016	0.972	0.904	0.837	0.769
0.692	0.616	0.539	0.501	0.463	0.425	0.412	0.398
0.385	0.346	0.307	0.268	0.232	0.197	0.161	0.124
0.088	0.051	-0.028	-0.106	-0.185	-0.280	-0.374	-0.469
-0.546	-0.624	-0.701	-0.758	-0.815	-0.872	-0.834	-0.795

4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

8) Datos de la curva característica de momento (f_{β}):

-1.053	-0.805	-0.558	-0.31	-0.141	0.028	0.197	0.298
0.399	0.5	0.56	0.621	0.681	0.698	0.715	0.732
0.749	0.766	0.783	0.804	0.824	0.845	0.872	0.899
0.926	1.024	1.123	1.221	1.288	1.355	1.422	1.413
1.403	1.394	1.35	1.306	1.262	1.201	1.139	1.078
0.939	0.799	0.66	0.557	0.455	0.352	0.191	0.031
-0.13	-0.306	-0.483	-0.659	-0.842	-1.025	-1.208	-1.309
-1.409	-1.51	-1.608	-1.707	-1.805	-1.87	-1.935	-2
-1.991	-1.982	-1.973	-1.855	-1.737	-1.619	-1.43	-1.241

Datos de cada tubo o de una batería de tubos en paralelo:

- 1) Longitud: 30 m ; 570 m
- 2) Diámetro: 0.16195 m ; 0.1683 m
- 3) Celeridad: 1336.6185 m/s ; 200.2970 m/s

ACERO:

Para saber qué fórmula se empleará, se determina si la tubería es de pared delgada o gruesa de acuerdo a la fórmula de la Tabla 1.2-1

$$\frac{e}{D} = \frac{0.00635 \text{ m}}{0.16195 \text{ m}} = 0.0392$$

Como la relación $e/D < 0.1$, la tubería se considera de pared delgada.

Para calcular la celeridad se emplea la Ecuación 1.2-1, a_0 se evalúa con la Ecuación 1.2-2 y en cuanto al parámetro φ se considera un tipo de anclaje totalmente restringido el movimiento en el sentido axial.

$$a_0 = \sqrt{2,275,350,000.00 \text{ N/m}^2 / 998.2 \text{ kg/m}^3}$$

$$\varphi = (1 - 0.27^2)$$

$$a = \frac{1509.78575 \text{ m/s}}{\sqrt{1 + \frac{0.16195 \text{ m} (2,275,350,000 \text{ N/m}^2)}{0.00635 \text{ m} (195,000,000,000 \text{ N/m}^2)} 0.9271}}$$

$$a_{\text{acero}} = 1336.6185 \text{ m/s}$$

POLIETILENO:

$$\frac{e}{D} = \frac{0.0065 \text{ m}}{0.1618 \text{ m}} = 0.0402$$

Como su relación $e/D < 0.1$, se considera una tubería de pared delgada.

4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORÍTMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

$$\varphi = (1 - 0.46^2)$$

$$a = \frac{1509.78575 \text{ m/s}}{\sqrt{1 + \frac{0.1618 \text{ m} (2,275,350,000 \text{ N/m}^2)}{0.0065 \text{ m} (800,000,000 \text{ N/m}^2)}}} 0.7884$$

$$a_{PEAD} = 200.2970 \text{ m/s}$$

4) Coeficiente de fricción (Darcy-Weisbach): 0.0171 ; 0.0144

Para calcular el factor de fricción se usa la ecuación de Swamee-Jain y el número de Reynolds descrito en la ECUACIÓN 1.1-4

$$f = \frac{0.25}{\log\left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}}\right)^2}$$

Se considera además una viscosidad cinemática de $1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ para agua a 20°C

ACERO:

$$Re = \frac{(1.9207 \text{ m/s})(0.16195 \text{ m})}{0.000001004 \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$f = \frac{0.25}{\log\left(\frac{0.00005 \text{ m}}{3.7(0.16195 \text{ m})} + \frac{5.74}{(309825.8145)^{0.9}}\right)^2} = 0.0171$$

POLIETILENO:

$$Re = \frac{(1.9243 \text{ m/s})(0.1618 \text{ m})}{0.000001004 \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$f = \frac{0.25}{\log\left(\frac{0.0000015 \text{ m}}{3.7(0.1618 \text{ m})} + \frac{5.74}{(310113.0449)^{0.9}}\right)^2} = 0.0144$$

5) Gasto que fluye por el tubo: $39.56 \text{ (m}^3/\text{s)}$.

6) Código del elemento o evento en el extremo final del tubo: (7) ; (20)

Cámara de Aire (7):

1) Coeficiente de pérdida de una válvula de salida de la cámara: $1 \text{ (s}^2/\text{m}^5)$

2) Volumen de aire inicial en la cámara (m^3):

* Este dato se irá cambiando a medida que se vaya haciendo la optimización a través de algoritmos genéticos como se indica en la sección 4.4

4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

3) Área de la cámara (m²)

* Este dato se irá cambiando a medida que se vaya haciendo la optimización a través de algoritmos genéticos como se indica en la sección 4.4

4) Cota del agua en la cámara: 2397 msnm

5) Coeficiente de pérdida de una válvula de entrada a la cámara: 1000 (s²/m⁵)

6) Longitud de la tubería de conexión cámara-conducción: 2 (m)

7) Diámetro de la tubería de conexión cámara-conducción: 0.1016 (m)

8) Número de tubo siguiente: 2.

Tanque de carga constante (20).

Último renglón de datos: 1 2 0

Así, con los datos calculados, se obtiene el archivo de datos para ejecutar TRANS.

Un ejemplo de una línea de conducción donde la cámara de aire tiene un volumen inicial de aire de 0.33 m³ y un área transversal de 0.25 m² se ilustra a continuación:

2	6	10	100	-1	0	2395.7	
3	0	1	1				
0.001	100000000						
72	5	0.01319	50.18	3500	0.583	0.0341	
-0.574	-0.517	-0.460	-0.403	-0.258	-0.112	0.033	0.189
0.344	0.500	0.655	0.809	0.964	1.070	1.176	1.282
1.351	1.419	1.488	1.476	1.464	1.452	1.441	1.429
1.418	1.401	1.383	1.366	1.327	1.289	1.250	1.202
1.153	1.105	1.061	1.016	0.972	0.904	0.837	0.769
0.692	0.616	0.539	0.501	0.463	0.425	0.412	0.398
0.385	0.346	0.307	0.268	0.232	0.197	0.161	0.124
0.088	0.051	-0.028	-0.106	-0.185	-0.280	-0.374	-0.469
-0.546	-0.624	-0.701	-0.758	-0.815	-0.872	-0.834	-0.795
-1.053	-0.805	-0.558	-0.310	-0.141	0.028	0.197	0.298
0.399	0.500	0.560	0.621	0.681	0.698	0.715	0.732
0.749	0.766	0.783	0.804	0.824	0.845	0.872	0.899
0.926	1.024	1.123	1.221	1.288	1.355	1.422	1.413
1.403	1.394	1.350	1.306	1.262	1.201	1.139	1.078
0.939	0.799	0.660	0.557	0.455	0.352	0.191	0.031
-0.130	-0.306	-0.483	-0.659	-0.842	-1.025	-1.208	-1.309
-1.409	-1.510	-1.608	-1.707	-1.805	-1.870	-1.935	-2.000
-1.991	-1.982	-1.973	-1.855	-1.737	-1.619	-1.430	-1.241
30	0.16195	1336.6185		0.0171	0.03956	7	
1	0.33	0.25	2410.88	1000	2	0.1016	2
570	0.1683	200.297	0.0144	0.03956	20		
1	2	0					

4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE CÁMARA DE AIRE.

De la simulación con TRANS de cualquier cámara, se obtienen diferentes archivos:

-  Camara 001
-  Camara 001_H
-  Camara 001_HEX
-  Camara 001_IMP
-  Camara 001_Q
-  Camara 001_RPM

En el archivo *NombreArchivoDatos_H.csv*, se indica la carga (m.c.a.) en la succión y descarga de las bombas a través del tiempo. En el archivo *NombreArchivoDatos_Q.csv*, el gasto (m^3/s) entregado por bomba. En el archivo *NombreArchivoDatos_RPM.csv*, la velocidad (rpm) de las bombas. En el archivo *NombreArchivoDatos_HEX.csv*, se graban en función de la distancia, las piezométricas de operación a gasto establecido y las máximas y mínimas que se obtienen durante el periodo de simulación (m.c.a.). Finalmente, en el archivo *NombreArchivoDatos_IMP.txt*, se encuentra información del archivo de datos, de las condiciones de operación previas al transitorio y de las presiones máximas y mínimas aguas arriba de cada tramo que se presentan durante el transitorio.

Al graficar en el programa TRANS los datos de la cámara ejemplificada, se obtiene el resultado ilustrado en la siguiente figura:

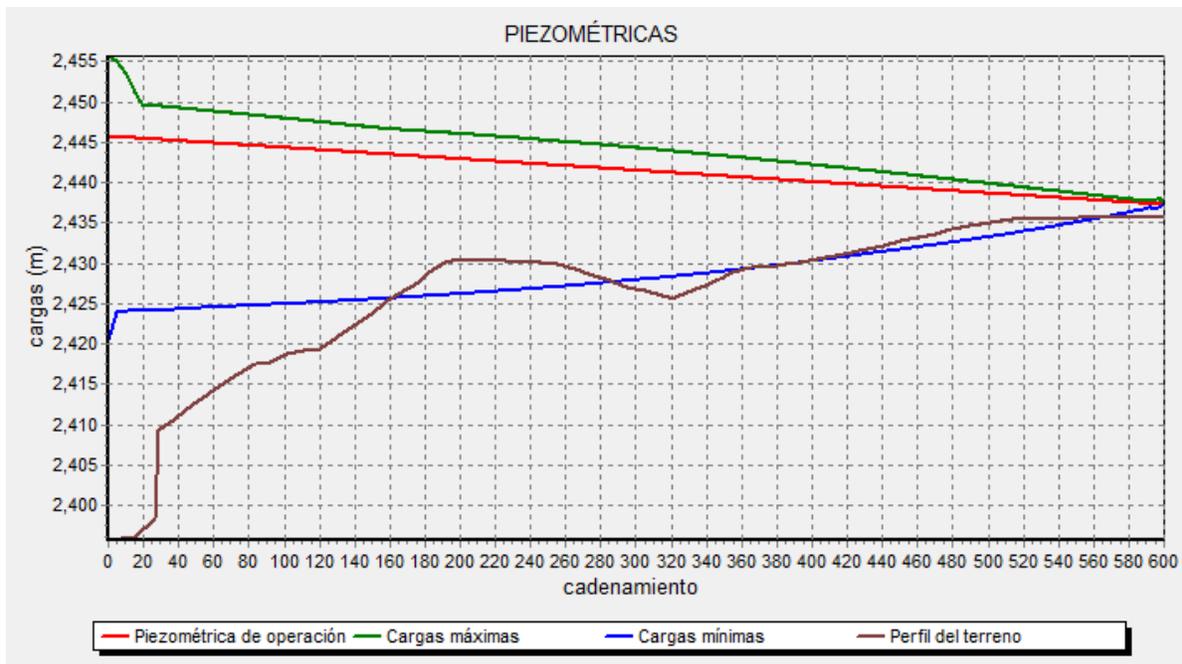


FIGURA 4.3-2 ENVOLVENTE DE SOBREPRESIONES MÁXIMAS Y MÍNIMAS CON CÁMARA DE AIRE $v=0.33$ $A=0.25$

Para saber si el comportamiento de la envolvente de sobrepresiones máximas y mínimas con cámara de aire como medio de protección es el deseado, se analizó la línea de conducción sin el dispositivo de protección, arrojando los resultados que se indican en la Figura 4.3-3:

4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

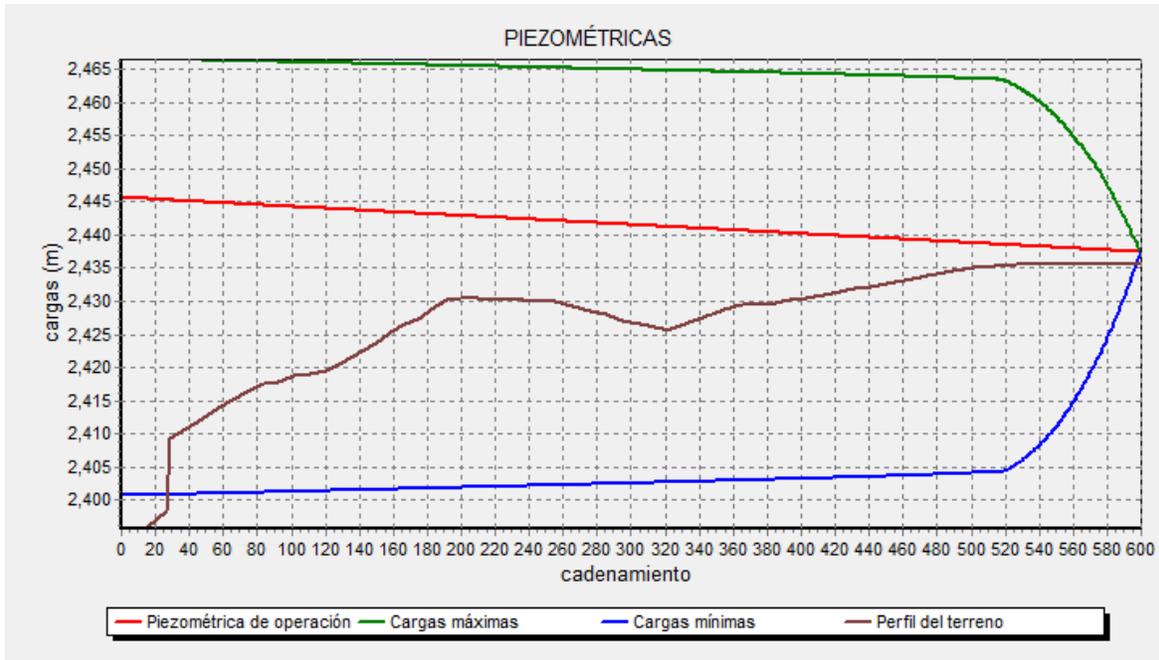


FIGURA 4.3-3 ENVOLVENTE DE SOBREPRESIONES MÁXIMAS Y MÍNIMAS EN LA LÍNEA SIN DISPOSITIVO DE PROTECCIÓN.

Como se observa, aproximadamente desde el cadenamiento 0+040 en adelante podrían presentarse depresiones, es por ello que la cámara de aire se coloca lo más cerca posible de la estación de bombeo, en este caso a 30 m de distancia del cadenamiento inicial.

En cuanto a los resultados obtenidos sin medio de protección, se observan sobrepresiones del orden de 20.615 m.c.a. y depresiones de 45.057 m.c.a. con respecto a la línea piezométrica de operación normal. Para las sobrepresiones tanto la tubería de acero como la de polietileno, no tienen inconveniente en soportarlas. El problema radica en las depresiones, las cuales, según lo indicado en el Tema 1.3.3 DEPRESIÓN, pueden ocasionar problemas como colapso de tubería, separación de columna líquida o entrada de aire en la tubería, con sus respectivas consecuencias. En cambio teniendo la cámara, las depresiones para ese ejemplo en particular, se reduce a 5 m.c.a.

Una vez constatados los beneficios de usar una cámara de aire como dispositivo de protección, surge el cuestionamiento de saber si el tamaño de la misma es óptimo para controlar el transitorio hidráulico y que a su vez sea económica de construir, ese es el objetivo de aplicar la metodología de algoritmos genéticos, la cual se describe en el siguiente apartado.

4.4. APLICACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO.

El algoritmo empleado en este trabajo está basado en el algoritmo genético simple o canónico propuesto por John Holland en los años 70, dicho método contiene 4 componentes principales: Una codificación binaria para la generación de la población, cruza en un solo punto, probabilidad de muta muy baja y selección proporcional.

El ciclo del algoritmo genético efectuado se realizó para una población de 24 individuos con una extensión de 20 generaciones.

4.4.1. GENERACIÓN DE POBLACIÓN INICIAL.

La población inicial se generó empleando un algoritmo genético de triple cromosoma.

El primer cromosoma representa el volumen total de la cámara de aire. Para ello se generó al azar y en código binario el volumen de la cámara (m^3):

Código binario	Volumen total de la Cámara de Aire equivalente
000	0.5
001	1
010	1.5
011	2
100	2.5
101	3
110	3.5
111	4

El segundo cromosoma empleado es para determinar el porcentaje del volumen de aire que tendrá la cámara al inicio de su operación. Se expresa como un porcentaje del volumen total de la cámara:

Código binario	Porcentaje inicial de volumen de aire equivalente
0	0.33
1	0.5

El volumen inicial de aire en la cámara se obtiene mediante la multiplicación del volumen total de la cámara por el porcentaje obtenido.

El tercer cromosoma determina la altura de la cámara. De acuerdo a las 12 versiones vistas anteriormente, las opciones para efectuar la simulación quedan como se indica:

3 bits	
Código binario	Altura equivalente
000	1
001	1.5
010	2
011	2.5
100	3
101	3.5
110	4
111	4.5

2 bits	
Código binario	Altura equivalente
00	1.5
01	2
10	2.5
11	3

4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

Para obtener el dato del área de la cámara solicitado por TRANS, se calcula el cociente del volumen total de la cámara obtenido en el primer cromosoma, entre la altura obtenida con el tercer cromosoma.

Una vez que se tiene el volumen de aire inicial y el área de la cámara generados aleatoriamente, se procede a colocarlos en el renglón correspondiente del archivo de datos para TRANS. Después se ejecuta el programa, y se grafican los resultados. Luego de la modelación, se genera un archivo *_HEX.csv* (Figura 4.4-1), del cual se obtienen las presiones máximas y mínimas a lo largo de todo el cadenamiento, con estos datos se obtienen la línea piezométrica y las elevaciones de las envolventes de presión positivas y negativas.

	A	B	C	D	E
1	Cadenamiento	H (máx)	H (mín)	Cadenamiento	H (op. est.)
2	0	2456.573	2420.466	0	2445.89
3	5	2456.022	2424.061	30	2445.294
4	10	2454.177	2427.806	30	2445.294
5	15	2452.045	2429.903	600	2437.434
6	20	2449.736	2429.928		
7	25	2447.399	2429.94		
8	30	2445.294	2429.943		
9	30	2445.294	2429.943		
10	30.75	2445.284	2429.873		
11	31.5	2445.274	2429.817		

FIGURA 4.4-1 ARCHIVO *_HEX.CSV*

4.4.2. ESTIMACIÓN DEL FACTOR DE APTITUD.

Como se ha mencionado, el factor de aptitud es un número que ofrece una visión global de qué tan óptima es una cámara, tanto en desempeño hidráulico, como en economía. Entre más grande es el factor de aptitud, se considera mejor la calificación otorgada al individuo evaluado.

El factor de aptitud se calcula mediante la siguiente expresión, en ella se evalúan los valores de $\Delta p_{máx}$ y $\Delta p_{mín}$, así como un factor de castigo, Kp y el costo de la cámara, Cu .

$$fa = \frac{1}{Cu + (\Delta p_{máx} + \Delta p_{mín})Kp}$$

ECUACIÓN 4.4-1

Donde:

Cu – Costo unitario de construcción e instalación de la cámara de aire de un cierto volumen total (MXN).

Δp_{max} – Sobrepresión máxima

Δp_{min} – Sobrepresión mínima

Kp – Factor de penalización

4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

El C_u se obtiene multiplicando el volumen total de la cámara obtenido, por el costo por m^3 de construcción e instalación de la cámara, que es de \$18,415.00 (actualizado a 2018), incluye material, mano de obra, membrana de butilo y accesorios.

Es importante observar la relación directa que en la expresión tiene el factor de penalización K_p con las sobrepresiones, ya que esta dependencia le ofrece la libertad de afectar positiva o negativamente al resultado del factor de aptitud.

Si se concede un valor muy alto al factor de penalización, al multiplicarlo por las sobrepresiones se obtendrá un número muy grande comparado con el costo, minimizando la influencia del precio en la elección de cámara. En cambio si el factor de penalización es demasiado pequeño, se tendría nula influencia castigando y/o restringiendo las presiones excesivas y la ecuación de aptitud no cumpliría su cometido. Por ejemplo, si se estableciera un $K_p=800,000$ y se multiplicara por las sobrepresiones, al sumarle luego el costo, no se tendría influencia significativa en el resultado final si el costo de la cámara fuera de \$5,000 o de \$50,000; por el contrario si se hiciera $K_p=1$, se obligaría a que el costo tuviera el protagonismo en la ecuación y las sobrepresiones quedarán rezagadas en la elección de la mejor cámara.

Al considerar los posibles efectos del valor del factor de penalización en la función de aptitud, se llegó a la conclusión de que para elegir una cámara óptima debían considerarse en primer lugar las presiones extremas de la línea en un transitorio, priorizando así resistencia y seguridad por encima del costo que la cámara pudiese representar. Para lograr lo anterior, el factor de penalización debe ser ajustado de manera tal, que el costo influya en la función de aptitud alrededor de un 30 % a 35 % con respecto a las presiones extremas, haciendo hincapié en que el objetivo es minimizar el costo, pero sobretodo que no existan problemas en la línea de conducción por efecto de fenómenos transitorios, así que la vigilancia de las depresiones y sobrepresiones en la línea de conducción es lo primordial.

Para calcular el valor de las sobrepresiones y depresiones máximas (Δp) se consideraron tres escenarios, el primero tomando como referencia los puntos máximos y mínimos de cada envolvente de presiones, positiva o negativa, y su distancia perpendicular a la línea piezométrica; el segundo, pensando en el tramo de la línea que no tiene medio de protección, es decir, del cadenamiento 0+000 al 0+030, ya que en dicho tramo se presentan las presiones extremas, así entonces, se calcula el promedio de los valores de cada envolvente de presiones, positivas o negativas en dicho segmento y su respectiva distancia al promedio de la línea piezométrica en ese mismo segmento; finalmente el tercer escenario considera el promedio del total de la línea de envolventes de presiones máximas y mínimas, y su distancia al promedio de la piezométrica, respectivamente.

Las anteriores consideraciones buscan obtener una cámara que arroje resultados donde las envolventes de presiones máximas y mínimas queden lo más cercanas posible a la línea piezométrica para que no exista riesgo de colapso o rotura. La desventaja radica en que al usar dichas consideraciones, la línea de conducción estaría sobredimensionada en cuanto a

4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORÍTMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

depresiones, haciendo cuestionable el uso de la tubería establecida ya que podría considerarse una de cédula menor y por ende más barata. Es por ello que se analizó otra alternativa a las tres anteriores donde se busca que únicamente la envolvente de depresiones se acerque lo más posible al perfil de la línea de conducción, en lugar de hacerlo a la de operación normal. Para lograrlo se eligió un nivel base representativo del nivel de la tubería instalada, calculado mediante el promedio del perfil de la línea de conducción en el tramo protegido por la cámara de aire, es decir, del km 0+030 al 0+600.

Así entonces, se tienen tres escenarios para el cálculo de Δp buscando que las envolventes de presiones de acerquen a la línea de operación normal más otros tres con las presiones negativas acercándose al perfil de la línea de conducción.

# Cám Aire	1	2	3	Codificación	Vol. CA	Vol Ini aire	% Vol ini air	Vol ini (m ³)	Altura de la cámara (m)	Área cámara	Factor de aptitud			fa						
											$\Delta p_{m\acute{a}x}$	$\Delta p_{m\acute{i}n}$	Cu							
1	0	1	0	010	2	1.5	1	0.5	0.75	1	0	1	101	5	3.5	0.43	10.549	25.441	\$27,623.00	5.8281E-06
2	1	0	1	101	5	3	1	0.5	1.50	1	1	0	110	6	4	0.75	10.883	25.409	\$55,247.00	4.9897E-06
3	1	0	0	100	4	2.5	0	0.33	0.83	0	1	0	010	2	2	1.25	10.609	25.433	\$46,039.00	5.2574E-06
4	1	0	1	101	5	3	1	0.5	1.50	0	1	0	010	2	2	1.50	10.891	25.409	\$55,247.00	4.9889E-06
5	1	1	1	111	7	4	0	0.33	1.33	1	0	0	100	4	3	1.33	10.834	25.412	\$73,662.00	4.5736E-06
6	1	1	1	111	7	4	0	0.33	1.33	0	0	1	001	1	1.5	2.67	10.839	25.412	\$73,662.00	4.5732E-06
7	0	0	0	000	0	0.5	0	0.33	0.17	0	0	0	000	0	1	0.50	10.815	25.663	\$ 9,208.00	6.4467E-06
8	0	0	1	001	1	1	1	0.5	0.50	1	0	1	101	5	3.5	0.29	10.275	25.476	\$18,416.00	6.1950E-06
9	1	1	0	110	6	3.5	0	0.33	1.17	0	0	1	001	1	1.5	2.33	10.769	25.417	\$64,455.00	4.7802E-06
10	0	0	0	000	0	0.5	1	0.5	0.25	1	1	0	110	6	4	0.13	9.294	25.574	\$ 9,208.00	6.7259E-06
11	1	1	0	110	6	3.5	0	0.33	1.17	0	0	1	001	1	1.5	2.33	10.769	25.417	\$64,455.00	4.7802E-06
12	0	1	0	010	2	1.5	1	0.5	0.75	0	0	1	001	1	1.5	1.00	10.559	25.440	\$27,623.00	5.8269E-06
13	1	1	1	111	7	4	1	0.5	2.00	0	0	1	001	1	1.5	2.67	11.003	25.401	\$73,662.00	4.5604E-06
14	1	1	0	110	6	3.5	0	0.33	1.17	0	1	0	010	2	2	1.75	10.768	25.417	\$64,455.00	4.7802E-06
15	0	1	1	011	3	2	1	0.5	1.00	1	0	1	101	5	3.5	0.57	10.679	25.424	\$36,831.00	5.5175E-06
16	0	0	1	001	1	1	1	0.5	0.50	0	1	0	010	2	2	0.50	10.286	25.474	\$18,416.00	6.1937E-06
17	1	0	0	100	4	2.5	0	0.33	0.83	1	0	1	101	5	3.5	0.71	10.605	25.434	\$46,039.00	5.2578E-06
18	0	1	0	010	2	1.5	1	0.5	0.75	1	0	1	101	5	3.5	0.43	10.549	25.441	\$27,623.00	5.8281E-06
19	1	1	0	110	6	3.5	0	0.33	1.17	1	1	0	110	6	4	0.88	10.760	25.417	\$64,455.00	4.7810E-06
20	0	0	1	001	1	1	1	0.5	0.50	1	1	0	110	6	4	0.25	10.271	25.476	\$18,416.00	6.1957E-06
21	1	1	1	111	7	4	1	0.5	2.00	0	0	0	000	0	1	4.00	11.004	25.401	\$73,662.00	4.5603E-06
22	1	0	1	101	5	3	1	0.5	1.50	0	0	0	000	0	1	3.00	10.895	25.408	\$55,247.00	4.9886E-06
23	1	1	1	111	7	4	0	0.33	1.33	0	1	0	010	2	2	2.00	10.837	25.412	\$73,662.00	4.5733E-06
24	1	1	0	110	6	3.5	0	0.33	1.17	1	1	0	110	6	4	0.88	10.760	25.417	\$64,455.00	4.7810E-06

FIGURA 4.4-2 GENERACIÓN DE LA POBLACIÓN INICIAL Y CÁLCULO DEL FACTOR DE APTITUD.

En la figura anterior se ilustra el acomodo de resultados durante la ejecución de la primera etapa del algoritmo genético y la estimación del factor de aptitud. Este proceso se repetirá por 20 generaciones, a lo largo de las cuales se podrá visualizar, según el resultado del factor de aptitud, cómo van mejorando los valores de la función de aptitud.

4.4.3. SELECCIÓN.

De acuerdo a la teoría, los individuos más aptos son los que tienen mayor probabilidad de ser seleccionados para aparearse y formar la siguiente generación, para ello se tomará en cuenta la evaluación arrojada por la función de aptitud, que se encuentra en la última columna de la

4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORÍTMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

Figura 4.4-3. Cuanto más alto sea el nivel de aptitud física de un individuo, mejor solución será ésta.

Para iniciar el proceso el número de individuo y su factor de aptitud se trasladan a una nueva tabla, como se ilustra en la Figura 4.4-3. Ahora bien, siguiendo la técnica de la ruleta, a cada factor de aptitud se le asigna un porcentaje de elegibilidad, teniendo un porcentaje mayor los que tengan mayor aptitud y los que tengan bajo nivel de aptitud, se descartan.

Se generan 24 números aleatorios que servirán para seleccionar a los mejores individuos. Las cámaras seleccionadas se colocan en la fila inferior, éstas fungirán como progenitoras de la siguiente generación.

# Cám Aire	fa	%	1	2	3	4	...	19	20	21	22	23	24
			0.43911	0.06267	0.03909	0.05499	...	0.66562	0.44393	0.14807	0.88181	0.85998	0.46274
1	5.8281E-06	4.59%	0.04590	0.04590	0.04590	0.04590	...	0.04590	0.04590	0.04590	0.04590	0.04590	0.04590
2	4.9897E-06	3.93%	0.08519	2	2	2	...	0.08519	0.08519	0.08519	0.08519	0.08519	0.08519
3	5.2574E-06	4.14%	0.12659	3	3	3	...	0.12659	0.12659	0.12659	0.12659	0.12659	0.12659
4	4.9889E-06	3.93%	0.16588	4	4	4	...	0.16588	0.16588	4	0.16588	0.16588	0.16588
5	4.5736E-06	3.60%	0.20190	5	5	5	...	0.20190	0.20190	5	0.20190	0.20190	0.20190
6	4.5732E-06	3.60%	0.23791	6	6	6	...	0.23791	0.23791	6	0.23791	0.23791	0.23791
7	6.4467E-06	5.08%	0.28868	7	7	7	...	0.28868	0.28868	7	0.28868	0.28868	0.28868
8	6.1950E-06	4.88%	0.33747	8	8	8	...	0.33747	0.33747	8	0.33747	0.33747	0.33747
9	4.7802E-06	3.76%	0.37511	9	9	9	...	0.37511	0.37511	9	0.37511	0.37511	0.37511
10	6.7259E-06	5.30%	0.42808	10	10	10	...	0.42808	0.42808	10	0.42808	0.42808	0.42808
11	4.7802E-06	3.76%	11	11	11	11	...	0.46572	11	11	0.46572	0.46572	11
12	5.8269E-06	4.59%	12	12	12	12	...	0.51161	12	12	0.51161	0.51161	12
13	4.5604E-06	3.59%	13	13	13	13	...	0.54752	13	13	0.54752	0.54752	13
14	4.7802E-06	3.76%	14	14	14	14	...	0.58517	14	14	0.58517	0.58517	14
15	5.5175E-06	4.35%	15	15	15	15	...	0.62862	15	15	0.62862	0.62862	15
16	6.1937E-06	4.88%	16	16	16	16	...	16	16	16	0.67739	0.67739	16
17	5.2578E-06	4.14%	17	17	17	17	...	17	17	17	0.71880	0.71880	17
18	5.8281E-06	4.59%	18	18	18	18	...	18	18	18	0.76469	0.76469	18
19	4.7810E-06	3.77%	19	19	19	19	...	19	19	19	0.80234	0.80234	19
20	6.1957E-06	4.88%	20	20	20	20	...	20	20	20	0.85114	0.85114	20
21	4.5603E-06	3.59%	21	21	21	21	...	21	21	21	21	21	21
22	4.9886E-06	3.93%	22	22	22	22	...	22	22	22	22	22	22
23	4.5733E-06	3.60%	23	23	23	23	...	23	23	23	23	23	23
24	4.7810E-06	3.77%	24	24	24	24	...	24	24	24	24	24	24
SUMA	0.000127	100%	11	2	2	2	...	16	11	4	21	21	11

FIGURA 4.4-3 SELECCIÓN MEDIANTE TÉCNICA DE LA RULETA

4.4.1. CRUZA.

Habiendo clasificado a las cámaras más aptas para cruce, estas se escogen de par en par para formar 12 parejas de progenitores, la cadena de bits del primer cromosoma de la cámara elegida se transcribe a la fila correspondiente como se muestra en la Figura 4.4-4.

Para saber si las parejas formadas se aparearán, se seleccionó una probabilidad del 70%. Después se procede a generar un número aleatorio, si ese número es menor a 0.7 se cruzará la codificación del primer cromosoma de cada individuo, si no, la codificación de cada pareja de individuos se conserva tal cual para pasar a la siguiente generación.

4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORÍTMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

Si se obtiene un resultado positivo para iniciar el proceso de cruce, se genera otro número aleatorio, dependiendo de ese número se sabe si el intercambio de bits comenzará en el bit uno, dos o tres, las tres opciones tienen las mismas probabilidades de ser elegidas.

P	# Cám Aire	1	2	3	PROB CRUZA 0.7	¿Se cruza?	¿Dónde?		CRUZADOS		
							Aleatorio	Cromosoma			
1	11	1	1	0	0.67085	SI	0.2911675	1	1	0	1
	2	1	0	1					1	1	0
2	2	1	0	1	0.43224	SI	0.2782561	1	1	0	1
	2	1	0	1					1	0	1
3	3	1	0	0	0.15666	SI	0.282338	1	1	0	1
	4	1	0	1					1	0	0
4	20	0	0	1	0.98659	NO	0.7197679	-	0	0	1
	22	1	0	1					1	0	1
5	10	0	0	0	0.57774	SI	0.1222018	3	0	0	1
	6	1	1	1					1	1	0
6	5	1	1	1	0.48942	SI	0.7264812	2	1	0	0
	17	1	0	0					1	1	1
7	24	1	1	0	0.23965	SI	0.5574809	2	1	0	0
	7	0	0	0					0	1	0
8	17	1	0	0	0.22747	SI	0.9658692	3	1	0	0
	11	1	1	0					1	1	0
9	22	1	0	1	0.92342	NO	0.1839191	-	1	0	1
	18	0	1	0					0	1	0
10	16	0	0	1	0.32521	SI	0.8351233	3	0	0	0
	11	1	1	0					1	1	1
11	4	1	0	1	0.85065	NO	0.8220944	-	1	0	1
	21	1	1	1					1	1	1
12	21	1	1	1	0.83607	NO	0.178409	-	1	1	1
	11	1	1	0					1	1	0

FIGURA 4.4-4 PROCESO DE CRUZA CON PROBABILIDAD DEL 70%

4.4.1. MUTACIÓN.

Para añadir aleatoriedad a la genética se procede a iniciar el último paso del algoritmo genético, la mutación. En este caso la probabilidad de muta elegida es del 5%. Para aplicarla, se trasladan a una nueva tabla los bits de los nuevos individuos formados en la cruce, después, se obtiene un número aleatorio que decidirá si hay muta o no. En el caso de que el número generado sea menor que 0.05 se generará de nueva cuenta otro número aleatorio que decidirá si el bit mutado es el uno, dos o tres.

El resultado de este proceso es una nueva población de cadenas de bits para el primer cromosoma, esta nueva población conformará la segunda generación (Figura 4.4-5).

4.4.2. NUEVA GENERACIÓN.

A completar el ciclo del algoritmo genético se obtiene una nueva población, que es mejor a la primera. En este caso, las cadenas de bits obtenidas para el primer cromosoma se trasladaran al formato de la tabla mostrada en la Figura 4.4-2 y se repetirá el proceso de selección, cruce y muta durante 20 generaciones, que es el criterio de paro utilizado en este trabajo.

4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

HIJOS	1	2	3	PROB. MUTA.	¿MUTA?	ALEATORIO	BIT MUTADO	NUEVA GENERACIÓN		
				0.05						
1	1	0	1	0.5255	NO	-	0	1	0	1
2	1	1	0	0.9956	NO	-	0	1	1	0
3	1	0	1	0.5072	NO	-	0	1	0	1
4	1	0	1	0.3283	NO	-	0	1	0	1
5	1	0	1	0.3193	NO	-	0	1	0	1
6	1	0	0	0.5785	NO	-	0	1	0	0
7	0	0	1	0.0667	NO	-	0	0	0	1
8	1	0	1	0.0543	NO	-	0	1	0	1
9	0	0	1	0.6171	NO	-	0	0	0	1
10	1	1	0	0.8079	NO	-	0	1	1	0
11	1	0	0	0.266	NO	-	0	1	0	0
12	1	1	1	0.7446	NO	-	0	1	1	1
13	1	0	0	0.0095	SI	0.19510624	1	0	0	0
14	0	1	0	0.9157	NO	-	0	0	1	0
15	1	0	0	0.0256	SI	0.16729955	1	0	0	0
16	1	1	0	0.0509	NO	-	0	1	1	0
17	1	0	1	0.9718	NO	-	0	1	0	1
18	0	1	0	0.9745	NO	-	0	0	1	0
19	0	0	0	0.9801	NO	-	0	0	0	0
20	1	1	1	0.5609	NO	-	0	1	1	1
21	1	0	1	0.6958	NO	-	0	1	0	1
22	1	1	1	0.4385	NO	-	0	1	1	1
23	1	1	1	0.2819	NO	-	0	1	1	1
24	1	1	0	0.0639	NO	-	0	1	1	0

FIGURA 4.4-5 PROCESO DE MUTA CON PROBABILIDAD ASIGNADA DEL 5%.

Air Cham	1	2	3	CODIFICACION	Vol. CA	Vol Inicial	% Vol ini air	Vol ini (m ³)	Altura de la cámara (m)	Área cámara	Factor de aptitud			fa						
											Δpmáx	Δpmín	Cu							
1	1	0	1	101	5	3	0	0.33	1.00	0	0	1	1	1.5	2.00	10.688	25.423	\$55,247.00	5.0080E-06	
2	1	1	0	110	6	3.5	1	0.5	1.75	0	0	0	0	0	1	3.50	10.958	25.404	\$64,455.00	4.7640E-06
3	1	0	1	101	5	3	0	0.33	1.00	1	1	0	110	6	4	0.75	10.682	25.424	\$55,247.00	5.0080E-06
4	1	0	1	101	5	3	1	0.5	1.50	1	1	0	110	6	4	0.75	10.883	25.409	\$55,247.00	4.9900E-06
5	1	0	1	101	5	3	1	0.5	1.50	1	0	0	100	4	3	1.00	10.887	25.409	\$55,247.00	4.9890E-06
6	1	0	0	100	4	2.5	1	0.5	1.25	0	1	1	11	3	2.5	1.00	10.799	25.415	\$46,039.00	5.2380E-06
7	0	0	1	1	1	1	0	0.33	0.33	0	0	0	0	0	1	1.00	9.844	25.523	\$18,416.00	6.2550E-06
8	1	0	1	101	5	3	1	0.5	1.50	0	0	0	0	0	1	3.00	10.895	25.408	\$55,247.00	4.9890E-06
9	0	0	1	1	1	1	1	0.5	0.50	1	1	1	111	7	4.5	0.22	10.266	25.477	\$18,416.00	6.1960E-06
10	1	1	0	110	6	3.5	1	0.5	1.75	1	1	0	110	6	4	0.88	10.947	25.405	\$64,455.00	4.7650E-06
11	1	0	0	100	4	2.5	0	0.33	0.83	1	0	1	101	5	3.5	0.71	10.605	25.434	\$46,039.00	5.2580E-06
12	1	1	1	111	7	4	1	0.5	2.00	1	0	1	101	5	3.5	1.14	10.997	25.401	\$73,662.00	4.5610E-06
13	0	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0.25	0	0	0	0	0	1	0.50	9.353	25.569	\$ 9,208.00	6.7160E-06
14	0	1	0	10	2	1.5	0	0.33	0.50	0	1	1	11	3	2.5	0.60	10.289	25.474	\$27,623.00	5.8590E-06
15	0	0	0	0	0	0.5	0	0.33	0.17	0	0	1	1	1	1.5	0.33	10.588	25.664	\$ 9,208.00	6.4840E-06
16	1	1	0	110	6	3.5	0	0.33	1.17	0	1	0	10	2	2	1.75	10.768	25.417	\$64,455.00	4.7800E-06
17	1	0	1	101	5	3	0	0.33	1.00	1	0	0	100	4	3	1.00	10.685	25.424	\$55,247.00	5.0080E-06
18	0	1	0	10	2	1.5	1	0.5	0.75	0	1	0	10	2	2	0.75	10.556	25.440	\$27,623.00	5.8270E-06
19	0	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0.25	0	0	0	0	0	1	0.50	9.353	25.569	\$ 9,208.00	6.7160E-06
20	1	1	1	111	7	4	0	0.33	1.33	1	1	0	110	6	4	1.00	10.831	25.413	\$73,662.00	4.5740E-06
21	1	0	1	101	5	3	1	0.5	1.50	1	1	1	111	7	4.5	0.67	10.881	25.409	\$55,247.00	4.9900E-06
22	1	1	1	111	7	4	1	0.5	2.00	0	1	0	10	2	2	2.00	11.001	25.401	\$73,662.00	4.5610E-06
23	1	1	1	111	7	4	0	0.33	1.33	1	1	1	111	7	4.5	0.89	10.829	25.413	\$73,662.00	4.5740E-06
24	1	1	0	110	6	3.5	1	0.5	1.75	0	1	1	11	3	2.5	1.40	10.953	25.404	\$64,455.00	4.7650E-06

FIGURA 4.4-6 SEGUNDA GENERACIÓN

Los resultados obtenidos del proceso se explican en el apartado 4.5.1.

4.5. ANALISIS DE SENSIBILIDAD.

Los algoritmos genéticos tienen la particularidad de evolucionar rápidamente hacia el resultado para el que son programados. Esta característica fue validada en el presente trabajo, permitiendo efectuar un análisis de sensibilidad a través de diversas modificaciones en la función de aptitud, probando las diferentes condiciones para las presiones Δp expuestas en el apartado 4.4.2, además de las variaciones en el cromosoma de altura de la cámara mencionados en el apartado 4.4.1.

Para el análisis de sensibilidad se modelaron 12 versiones de la función de aptitud, cada una con 20 generaciones de 24 individuos, resultando en las siguientes combinaciones:

Versión 1:	1-A	Versión 5:	1-E	Versión 9:	2-C
Versión 2:	1-B	Versión 6:	1-F	Versión 10:	2-D
Versión 3:	1-C	Versión 7:	2-A	Versión 11:	2-E
Versión 4:	1-D	Versión 8:	2-B	Versión 12:	2-F

Los números en los nombres de cada versión indican un número de bits usados para generar el cromosoma de altura de la cámara de aire, 1 para 3 bits y 2 para 2 bits; mientras que las letras asignadas tienen que ver con las consideraciones para Δp .

Tanto en la versión de dos bits, como en la de tres para el cromosoma de altura, las variaciones de Δp_{min} son las que se mencionan a continuación y que se clasificaron con letras, así entonces se tienen las variaciones siguientes:

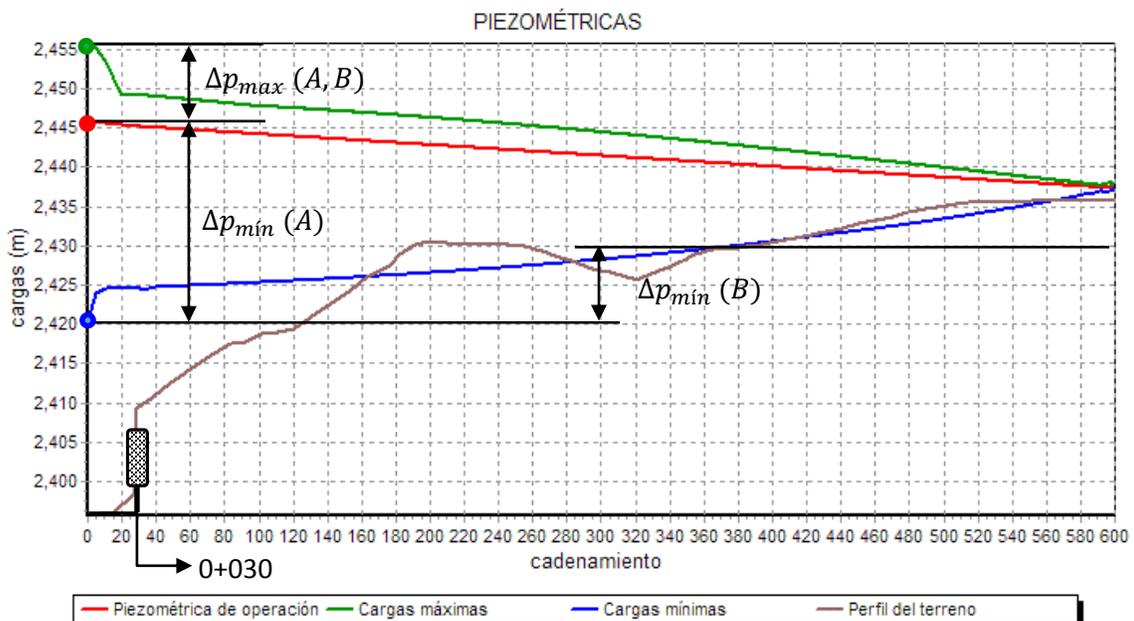


FIGURA 4.5-1 OPCIONES A Y B DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA EL FACTOR DE APTITUD

4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

- A. Δp_{max} = Distancia de la cota máxima en la línea de envolventes positivas a la cota en la línea piezométrica de operación normal perpendicular a ese punto.
 Δp_{min} = Distancia de la cota mínima en la línea de envolventes negativas a la cota en la línea piezométrica de operación normal perpendicular a ese punto.
- B. Δp_{max} = Distancia de la cota máxima en la línea de envolventes positivas a la cota en la línea piezométrica de operación normal perpendicular a ese punto.
 Δp_{min} = Distancia de la cota mínima en la línea de envolventes negativas al promedio de las cotas del perfil de la línea de conducción a partir del cadenamiento 0+030.

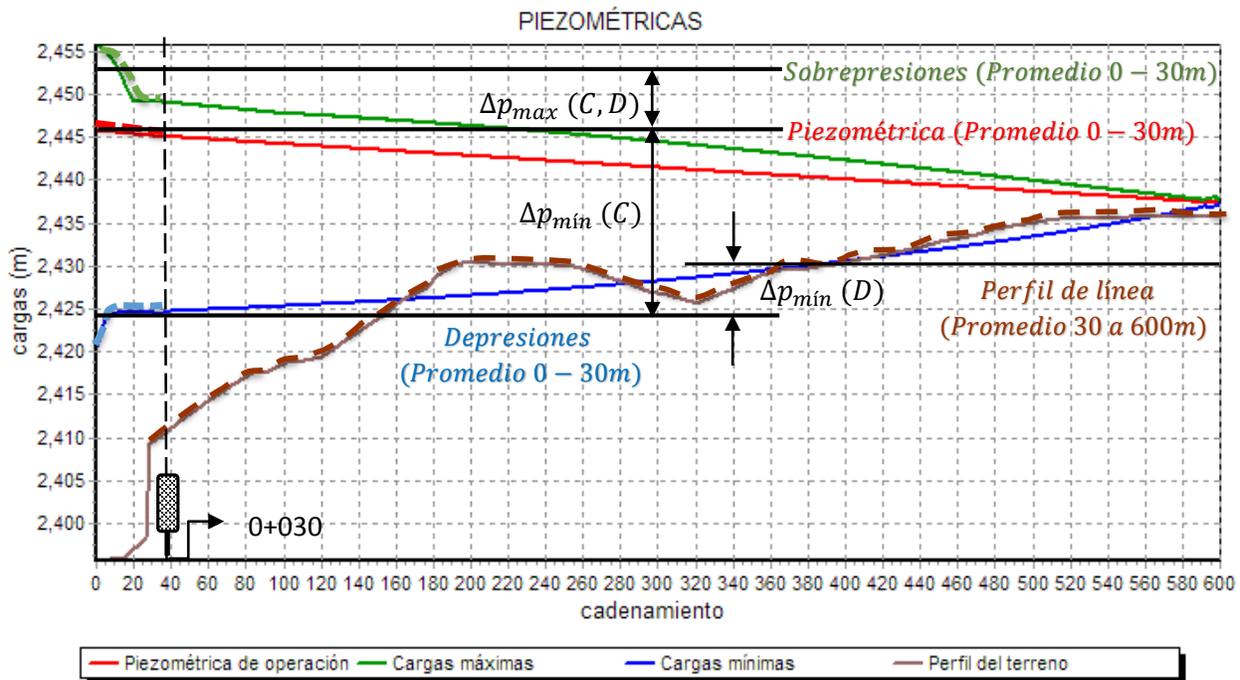


FIGURA 4.5-2 OPCIONES C Y D DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA EL FACTOR DE APTITUD

- C. Δp_{max} = Diferencia entre el promedio de las cotas máximas en la línea de envolventes positivas del cadenamiento 0+000 al 0+030 y el promedio de las cotas en la línea piezométrica de operación normal del cadenamiento 0+000 al 0+030.
 Δp_{min} = Diferencia entre el promedio de las cotas mínimas en la línea de envolventes negativas del cadenamiento 0+000 al 0+030 y el promedio de las cotas en la línea piezométrica de operación normal del cadenamiento 0+000 al 0+030.
- D. Δp_{max} = Diferencia entre el promedio de las cotas máximas en la línea de envolventes positivas del cadenamiento 0+000 al 0+030 y el promedio de las cotas en la línea piezométrica de operación normal del cadenamiento 0+000 al 0+030.
 Δp_{min} = Diferencia entre el promedio de las cotas mínimas en la línea de envolventes negativas del cadenamiento 0+000 al 0+030 y el promedio de las cotas del perfil de la línea de conducción a partir del cadenamiento 0+030.

4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

- E. Δp_{max} = Diferencia entre el promedio de las cotas en la envolvente de presiones positivas y el promedio de las cotas en la línea piezométrica.
 Δp_{min} = Diferencia entre el promedio de las cotas en la envolvente de presiones negativas y el promedio de las cotas en la línea piezométrica.
- F. Δp_{max} = Diferencia entre el promedio de las cotas en la envolvente de presiones positivas y el promedio de las cotas en la línea piezométrica.
 Δp_{min} = Diferencia entre el promedio de las cotas en la envolvente de presiones negativas y el promedio del perfil de la línea de conducción a partir del cadenamiento 0+030.

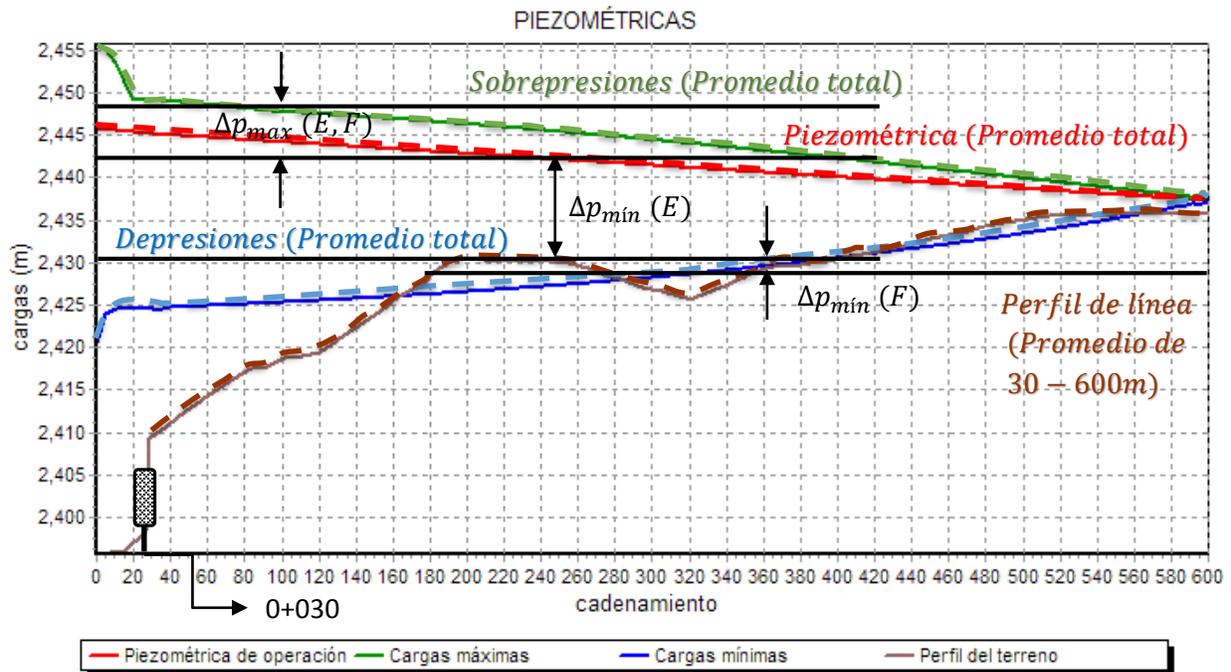


FIGURA 4.5-3 OPCIONES E Y F DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA EL FACTOR DE APTITUD

4.5.1. RESULTADOS.

A continuación se describe el comportamiento del algoritmo genético en cada versión de la función de aptitud y las diferentes consideraciones que se realizaron en cada una para llegar al resultado de la cámara óptima, las tablas con los resultados de las 20 generaciones de cada versión, se localizan en el ANEXO E. Resultados de análisis de sensibilidad.

4.5.1.1. 1-A (VERSIÓN 1).

En la versión uno se toma en cuenta la distancia perpendicular del punto máximo en la envolvente de sobrepresiones y del punto mínimo en la envolvente de depresiones a la línea piezométrica, esto con una altura de la cámara generada a partir de tres bits.

El valor de la constante K para la fórmula del factor de aptitud se probó con valores desde 4 mil hasta 20 mil, encontrando que la modificación de este factor no afecta en mayor proporción a las medidas de la cámara elegida como “óptima”, pero sí modifica el porcentaje de influencia que tendrá el costo respecto a las presiones máximas a la hora de elegir a la mejor cámara; mientras mayor es K, menor la influencia del costo respecto a las sobrepresiones; es por ello que se seleccionó un valor que ajustara alrededor de un 30% la participación del costo en la elección de la cámara óptima, respecto a las presiones máximas, recalcando que es el objetivo minimizar costos, pero sobretodo que no haya problemas por sobrepresiones en la línea de conducción.

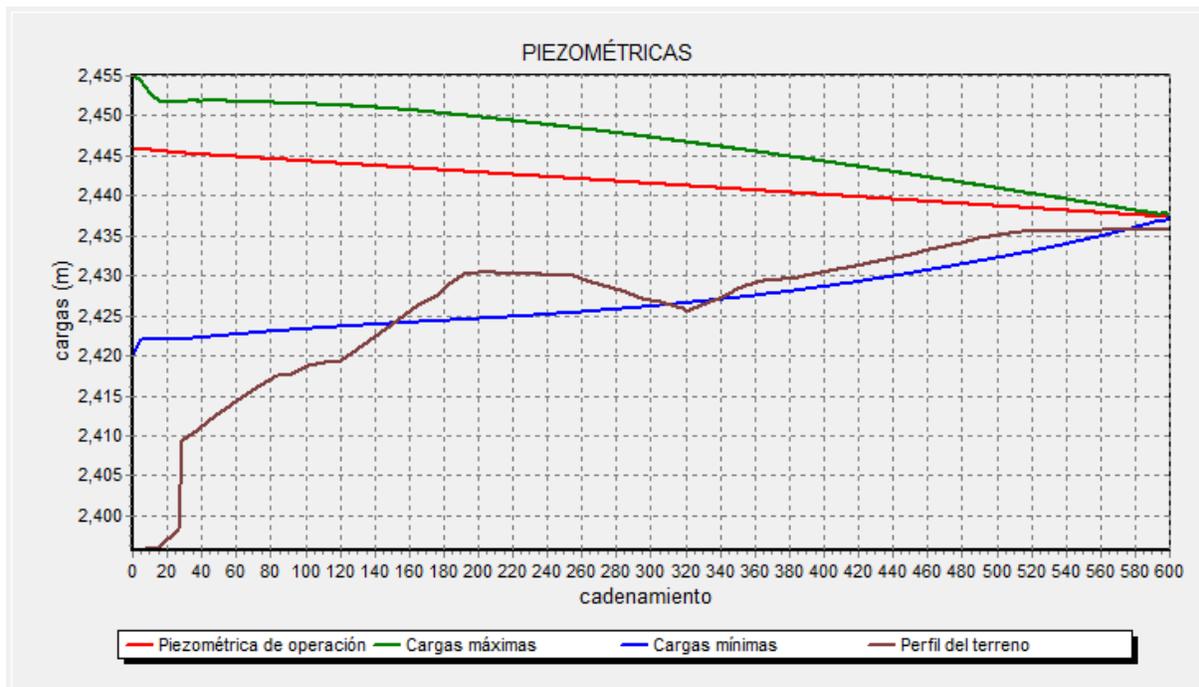


FIGURA 4.5-4 GRÁFICA DE PRESIONES DURANTE PARO DE EQUIPO DE BOMBEO EN LA CÁMARA ÓPTIMA OBTENIDA EN LAS VERSIONES 1A Y 1B.

4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

En esta modelación al pasar de generación en generación la evolución ordenada de los resultados, se mostró de manera regular con cada iteración realizada, por lo que en general no se requirió realizar tantas modelaciones para alcanzar buenos resultados.

Se usó un valor de $K=4000$, arrojando una cámara óptima con altura de 4.5 m, área transversal de 0.11 m^2 y un volumen total de 0.5 m^3 , con un costo de \$9,207.80. Las presiones máximas calculadas son de 9.279 m.c.a. para las sobrepresiones máximas y 25.575 m.c.a. para las depresiones máximas (Figura 4.5-4).

4.5.1.2. 2-A (VERSIÓN 7).

Al igual que la versión 1-A, la versión 2-A también considera la distancia perpendicular del punto máximo en la envolvente de sobrepresiones y del punto mínimo en la envolvente de depresiones, a la línea piezométrica, respectivamente, pero su cromosoma de altura tiene una cadena de dos bits de longitud.

La constante K para esta versión se modeló con valores desde 4000 hasta 9000. A medida que K incrementa, disminuye la relación costo-presiones en la ecuación del factor de aptitud. Si el valor de K es de 4000, el costo impacta en el factor de aptitud de un 6 a un 34 %, si $K=9000$, el costo impacta de 8 a 16 %. Además, mientras menor sea el valor de K , más rápida es la mejora del factor de aptitud al paso de las generaciones.

Para homogenizar el porcentaje costo-presiones con los resultados de la versión anterior, se eligió un valor de 4000; número que además, ofrecía mayor estabilidad a la mejora progresiva de cada generación.

La cámara más óptima elegida con estas restricciones, arroja una geometría de 3m de alto, con un área transversal de 0.17 m^2 , un volumen total de 0.5 m^3 , volumen de aire inicial de 0.25 m^3 y un costo es de \$9,207.80. Las sobrepresiones máximas calculadas son de 9.312 m.c.a. y las depresiones máximas de 25.572 m.c.a. (Figura 4.5-5).

4.5.1.3. 1-B (VERSIÓN 2).

En la versión 1-B, para sustituir las sobrepresiones en la fórmula del factor de aptitud, se consideró la diferencia entre la cota máxima en toda la envolvente de presiones positivas y la cota en la línea piezométrica de operación normal en el mismo cadenamiento. Para las depresiones se considera la cota mínima en la envolvente de presiones negativas y su distancia a la cota promedio del perfil de la línea desde el cadenamiento 0+038 al 0+600.

El valor de K se varió desde 5000 hasta 9000, se eligió 8000 para tener un porcentaje de influencia del costo de un 6 a un 33 %. Al variar este número, la mejora de cada generación se llevaba a cabo de manera casi gradual. No había necesidad de hacer tantas iteraciones.

4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

Los resultados obtenidos para esta versión con altura generada a partir de 3 bits, arrojaron una cámara de 4.5 m de altura, con 0.11 m² de área transversal, un volumen total de la cámara de 0.5 m³, volumen inicial de aire de 0.25 m³ y un costo total de \$9,207.80. Las sobrepresiones máximas calculadas son de 9.279 m.c.a. y las depresiones máximas de 7.927 m.c.a. (Figura 4.5-4).

4.5.1.4. 2-B (VERSIÓN 8).

Las características de la versión 2-B son las mismas que en 1-B, excepto que se usaron 3 bits para formar la altura de la cámara en el proceso de generación de la población.

El valor de K se varió desde 6000 hasta 10000, observando que en cualquiera de las opciones el resultado óptimo arrojado era el mismo. En cuanto a la evolución progresiva de los resultados se observó un comportamiento favorable de los resultados generación tras generación.

Para conservar la media elegida en la relación costo-sobrepresiones, se eligió un valor de K de 8000 para tener una influencia del costo de un 6 a un 33 %.

Los resultados arrojados con dichas restricciones evidencian una cámara de 3m de altura, 0.17 m² de área transversal, 0.5 m³ de volumen total, 0.25 m³ de volumen inicial de la cámara y un costo de \$9,207.80. Las sobrepresiones máximas calculadas fueron de 9.312 m.c.a. y las depresiones máximas de 7.924 m.c.a.

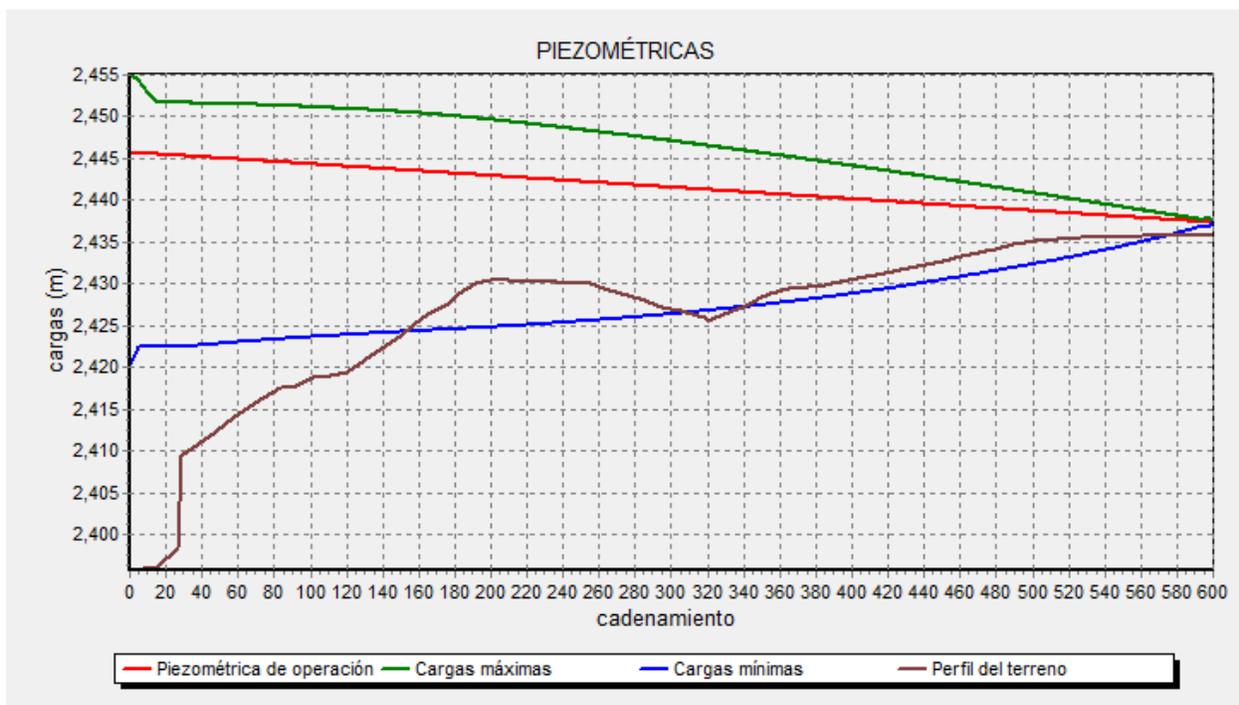


FIGURA 4.5-5 GRÁFICA DE PRESIONES DURANTE PARO DE EQUIPO DE BOMBEO EN LA CÁMARA ÓPTIMA OBTENIDA EN LAS VERSIONES 2A Y 2B.

4.5.1.5. 1-C (VERSIÓN 3).

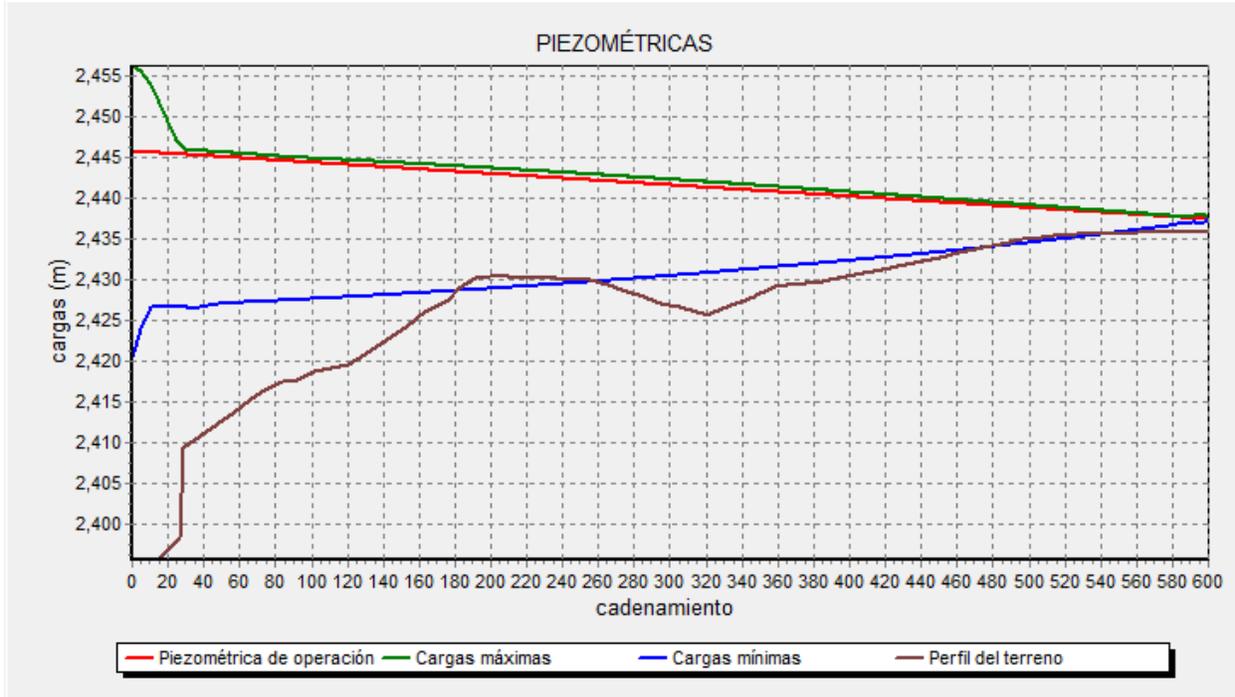


FIGURA 4.5-6 GRÁFICA DE PRESIONES DURANTE PARO DE EQUIPO DE BOMBEO EN LA CÁMARA ÓPTIMA OBTENIDA EN LA VERSIÓN 1C.

Esta versión toma en cuenta la fracción de tubería que no está protegida por la cámara de aire (cadenamiento 0+000 al 0+030), ya que es la parte de la línea que tendrá mayores presiones. Así entonces, se consideró el promedio de las sobrepresiones máximas y mínimas en ese fragmento de tubería y su respectiva distancia a la cota promedio de la línea piezométrica en ese mismo segmento. La longitud de la cadena de bits empleada para la altura de la cámara es de 3 bits.

El valor de K se varió desde 4000 hasta 8000, y se observó que la evolución y mejora en general de los resultados no era tan gradual, excepto con K=8000, donde los resultados evolucionaban de forma un poco más ordenada generación tras generación, pero el porcentaje de influencia $\$-\Sigma\Delta p$ era de un 4 a un 29 %, lo que se salía del rango promedio que se había estado eligiendo en versiones anteriores.

Al final se eligió K=6000, valor con el cual se obtuvo un porcentaje influencia $\$-\Sigma\Delta p$ de un 4 a máximo 35 %, una cámara óptima de 1m de altura, con 1 m² de área transversal, volumen total de 1 m³, volumen inicial de aire de 0.5 m³ y un costo total de \$18,415.60. Las sobrepresiones máximas calculadas fueron de 5.754 m.c.a. y las depresiones máximas de 20.309 m.c.a.

4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

4.5.1.6. 2-C (VERSIÓN 9).

La versión 2-C tiene las mismas consideraciones para sobrepresiones y depresiones que la 1C, la diferencia radica en que para obtener el cromosoma de altura se usaron 2 bits.

La constante K se probó con valores desde 4000 hasta 7000 en intervalos a cada 1000 para encontrar un porcentaje de influencia del costo de la cámara en la misma proporción que se había estado eligiendo (del orden de 30%).

En esta versión en específico, se encontró que la función es muy sensible al valor de K, ya que al cambiar la constante, también lo hacía la “mejor cámara” arrojada, por ejemplo, con un K=6000, la relación $\$-\Sigma\Delta p$ variaba de un 5 a un 34 % y la “mejor cámara” elegida era de 1.5 m de altura, 0.67 m² de área transversal y un volumen total de 1 m³. Sin embargo, al cambiar a K=7000, la relación $\$-\Sigma\Delta p$ iba de un 4 a un 31 % y arrojaba una cámara óptima de 1.5 m de altura, con 1 m² de área transversal y un volumen total de 1.5 m³. A diferencia de versiones anteriores en las que la K sólo altera la velocidad en que el algoritmo evoluciona hacia la elección de una determinada cámara; en ésta, el factor de penalización, con los mismos intervalos de 1000 en 1000, cambia la cámara óptima e inclusive el costo, por ejemplo, el cambio de K=6000 a K=7000 implica una diferencia de \$9,207.80.

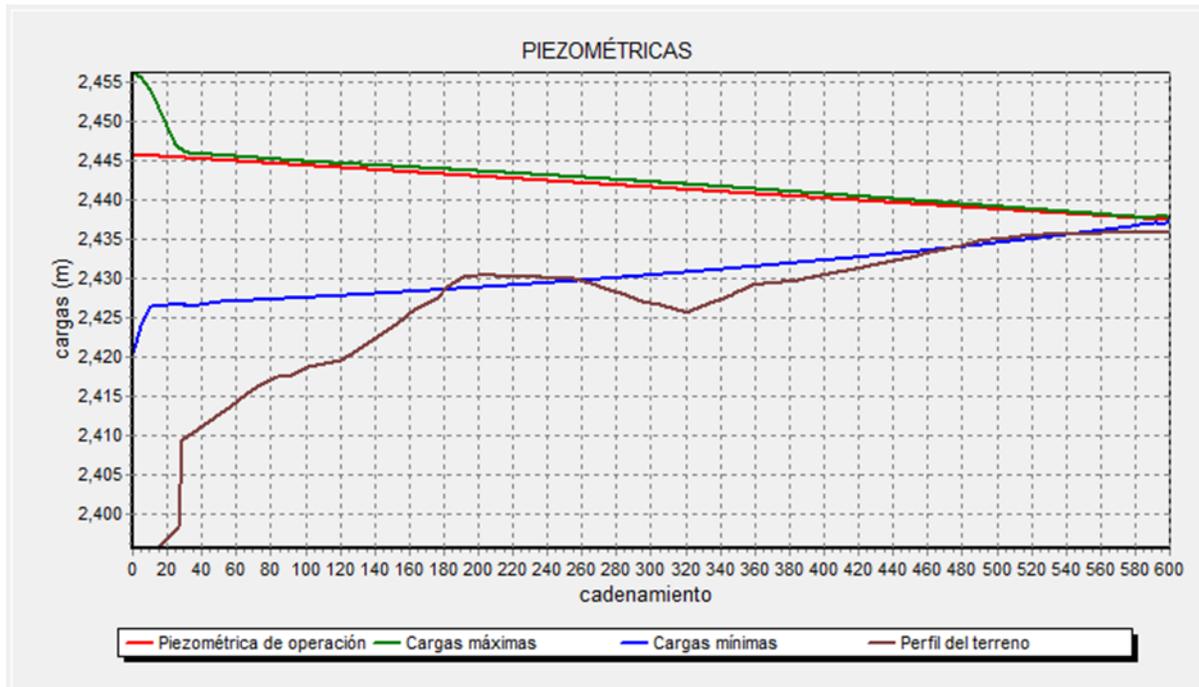


FIGURA 4.5-7 GRÁFICA DE PRESIONES DURANTE PARO DE EQUIPO DE BOMBEO EN LA CÁMARA ÓPTIMA OBTENIDA EN LA VERSIÓN 2C.

Se resolvió elegir K=6000 considerando un volumen inicial de aire de 0.5 m³ y una relación $\$-\Sigma\Delta p$ que va de un 5 a máximo 35 %. Con las medidas mencionadas anteriormente. Su costo es de \$18,415.60 y las sobrepresiones y depresiones máximas calculadas son de 5.758 m.c.a. y 20.369 m.c.a., respectivamente.

4.5.1.7. 1-D (VERSIÓN 4)

La versión D es derivada de la C; también toma en cuenta el promedio de las cotas máximas y mínimas en el segmento de la línea de conducción que no está protegida por la cámara de aire, la única distinción es que en las depresiones, en lugar de tomar la distancia a la cota promedio de la línea piezométrica en ese segmento, se toma la distancia al promedio de las cotas del perfil de la línea de 0+030 a 0+600. La longitud de la cadena de bits para obtener la altura de la cámara es de 3.

Para el análisis de sensibilidad se tomaron valores para K de 15, 18, 20, 22, 23 y 24 mil, obteniendo una gama de porcentajes desde un 40 % de influencia máxima del costo respecto a las presiones extremas, hasta un 33 %. Con relación al comportamiento con cada K probada, se observó que los resultados no evolucionaban fácilmente de manera progresiva, requiriendo varias iteraciones. Además, los costos de las cámaras óptimas iban de \$27,623.40 a \$46,039.00, mayoritariamente.

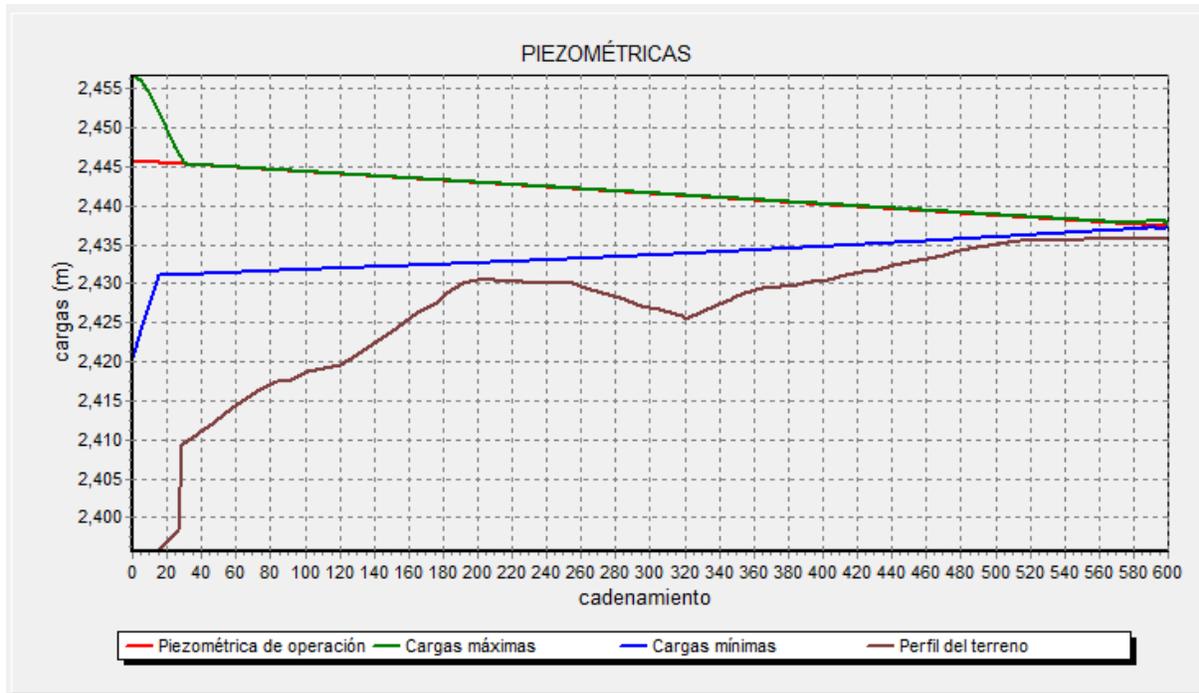


FIGURA 4.5-8 GRÁFICA DE PRESIONES DURANTE PARO DE EQUIPO DE BOMBEO EN LA CÁMARA ÓPTIMA OBTENIDAS EN LAS VERSIONES 1D Y 1E.

Finalmente, se eligió el factor $K=23000$ para sustituir en la ecuación del factor de aptitud, ya que en comparación, ofrecía una evolución de resultados más ordenada. Así, la modelación ejecutada seleccionó a una cámara de 1m de altura, 2.5 m^2 de área transversal, volumen total de 2.5 m^3 , volumen inicial de aire de 1.25 m^3 , una relación $\frac{\Delta p}{p}$ que varía de un 3 a un 34 %, lo cual concuerda con las anteriores versiones y un costo de \$46,039.00. Su sobrepresión máxima es de 6.100 m.c.a. su depresión máxima, de 0.123 m.c.a.

4.5.1.8. 2-D (VERSIÓN 10)

La versión 10 es la misma que la 4, excepto que la longitud de la cadena de bits para el cromosoma de altura es de 2.

Para el análisis de sensibilidad de la función de aptitud, se tomaron valores para el factor K desde 20000 hasta 24000, con intervalos a cada 1000, consiguiendo una relación máxima de $\frac{\Delta p}{p}$ del 37 % al 33 %; estos valores encajan con los seleccionados hasta el momento.

En cuanto a la evolución de los resultados, se advirtió que en general no había una mejora gradual al avanzar de generación en generación, más bien los resultados eran aleatorios, sin embargo, la cámara “óptima” arrojada para cada caso siempre fue la misma.

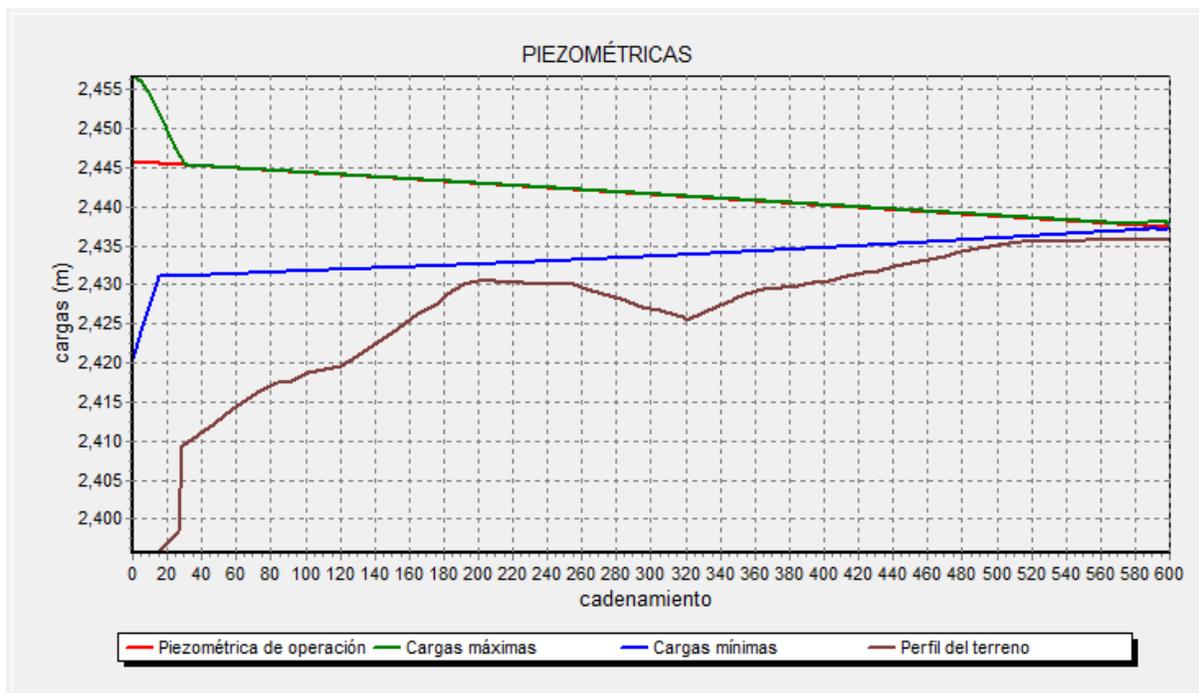


FIGURA 4.5-9 GRÁFICA DE PRESIONES DURANTE PARO DE EQUIPO DE BOMBEO EN LA CÁMARA ÓPTIMA OBTENIDA EN LA VERSIÓN 2D.

De todos los valores probados para K, los que mejor comportamiento mostraron fueron K=23000 y K=24000. Se eligió K=23000, obteniendo una cámara óptima de 1.5 m de altura, 1.67 m² de área transversal, un volumen total de 2.5 m³, volumen inicial de aire de 1.25 m³ con una relación $\frac{\Delta p}{p}$ que varía de un 34 a un 3 % y un costo de \$46,039.00. Las sobrepresiones y depresiones máximas son 6.099 m.c.a y 0.155 m.c.a., respectivamente.

4.5.1.9. 1-E (VERSIÓN 5)

En la versión E, las presiones máximas y mínimas para sustituir en la función de aptitud se obtienen con la diferencia entre el promedio de la envolvente de presiones positivas al promedio de la línea piezométrica y la diferencia entre el promedio de las cotas en la

4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

envolvente de presiones negativas al promedio de las cotas en la línea piezométrica. La longitud de la cadena de bits para obtener el cromosoma de altura es de 3.

Para hacer el análisis de sensibilidad, se modificó el factor K con los valores 15, 18, 20, 21, 22 y 24 mil, obteniendo relaciones máximas de $\$-\Sigma\Delta p$ desde 42 % hasta 32 %. Se encontró que la evolución general de los resultados fue mucho más ordenada que en las versiones "D".

La mejor evolución entre generaciones se dio con K=20000 y K=24000. Referente a los costos arrojados para la cámara óptima de cada K, éstos iban de \$36,831.00 hasta \$55,246.80.

A pesar de que K=24000 poseía una mejor evolución en cada iteración que se hacía, el costo de \$55,246.80 que arrojaba para la cámara óptima se elevaba demasiado comparado con los anteriores individuos óptimos elegidos de otras versiones. Por otro lado K=20000 ofrecía también una buena evolución de resultados tras cada iteración, pero el porcentaje de influencia del costo respecto a las sobrepresiones iba de 36 a 2%, lo cual se salía del rango elegido en las anteriores versiones. Es por ello que se resolvió elegir para la modelación final K=22000, ya que su porcentaje $\$-\Sigma\Delta p$ es de 33-2 % y está dentro de los rangos elegidos, además, el precio de la cámara óptima se mantiene en \$46,039.00, obtenido también en la versión "D". Las medidas de esta cámara óptima son de 1 m de altura, 2.5 m² de área transversal, un volumen total de 2.5 m³ y un volumen inicial de aire de 1.25 m³. Las sobrepresiones y depresiones máximas calculadas para a línea de conducción con las consideraciones de esta versión son de 0.071 m.c.a. y 7.518 m.c.a. (Figura 4.5-8).

4.5.1.10. 2-E (VERSIÓN 11)

Esta versión se diferencia de la 1-E en que la longitud de la cadena de bits para obtener el cromosoma de altura es de 2.

Para hallar factores K que continuasen con el porcentaje de influencia hasta ahora mantenido de $\$-\Sigma\Delta p$ rondando por el 33 %, se probó con valores para K desde 18, hasta 24 mil, obteniendo relaciones máximas de $\$-\Sigma\Delta p$ desde 38 hasta 32 %. Cabe mencionar que el algoritmo genético mostraba una mejora en los resultados generación tras generación con cada K probada, incluso mejor que en la versión 1-E. La parte menos favorable con esta versión, son los costos de la cámara elegida como óptima, ya que son mayores que en otras versiones, rondando entre \$46,039.00 y \$55,246.80

Para la fórmula del factor de aptitud se resolvió utilizar una K=23000 por mostrar la mejor evolución de resultados, además, la relación del costo respecto a las presiones iba de 33 % a un 2 %, ajustándose a versiones anteriores.

Las medidas de la cámara óptima de esta versión son de 1.5 m de altura, 2 m² de área transversal, volumen total de 3 m³ y volumen inicial de aire de 1.5 m³. El costo de la cámara es de \$55,246.80. Las sobrepresiones y depresiones máximas calculadas para la línea de conducción son de 0.073 m.c.a. y 7.127 m.c.a., respectivamente.

4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

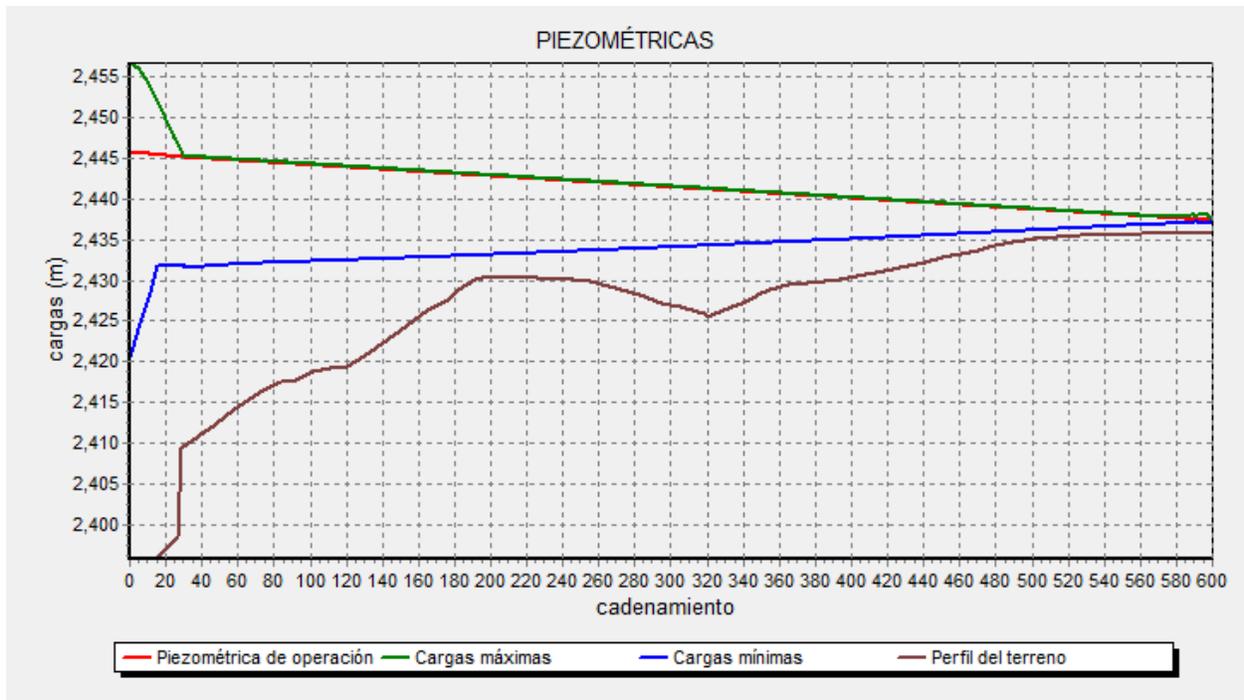


FIGURA 4.5-10 GRÁFICA DE PRESIONES DURANTE PARO DE EQUIPO DE BOMBEO EN LA CÁMARA ÓPTIMA OBTENIDA EN LA VERSIÓN 2E.

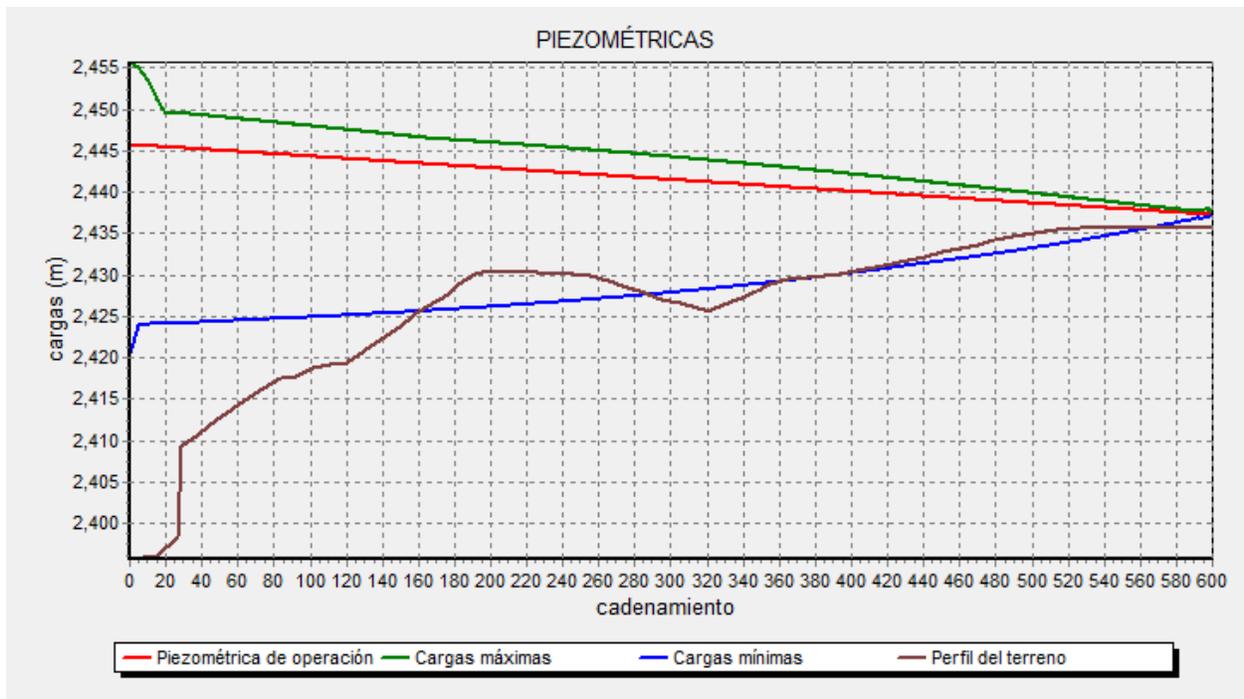


FIGURA 4.5-11 GRÁFICA DE PRESIONES DURANTE PARO DE EQUIPO DE BOMBEO EN LA CÁMARA ÓPTIMA OBTENIDA EN LA VERSIÓN 1F.

4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

4.5.1.11. 1-F (VERSIÓN 6).

La versión F es una subversión de la E, las consideraciones para el cálculo de las sobrepresiones son las mismas, pero para calcular las depresiones en lugar de tomar la diferencia del promedio de la línea de presiones negativas al promedio de la línea piezométrica, se hizo hacia el promedio del perfil de la línea de conducción, del cadenamiento 0+030 al 0+600. La longitud de la cadena de bits es de 3.

Para encontrar un porcentaje de influencia del costo respecto a las sobrepresiones del orden del 33 %, se hicieron modelaciones para el factor K desde K=18000 hasta K=27000, obteniendo relaciones máximas para $\$-\Sigma\Delta p$ desde 41 % hasta 32 %. El comportamiento de las modelaciones para esta versión fue muy bueno, ya que los resultados de cada generación iban evolucionando de manera uniforme.

Para conservar el porcentaje de influencia del costo respecto a las sobrepresiones del orden del 33 %, se eligió un factor de penalización K=26000, que, sustituido en la función de aptitud arrojó una cámara óptima de 4.5 m de altura, 0.22 m² de área transversal, un volumen total de 1 m³, volumen inicial de aire de 0.33 m³, un costo de \$18,415.60 y un valor de 2.380 m.c.a. para las sobrepresiones máximas y de 0.745 m.c.a. para las depresiones máximas.

4.5.1.12. 2-F (VERSIÓN 12).

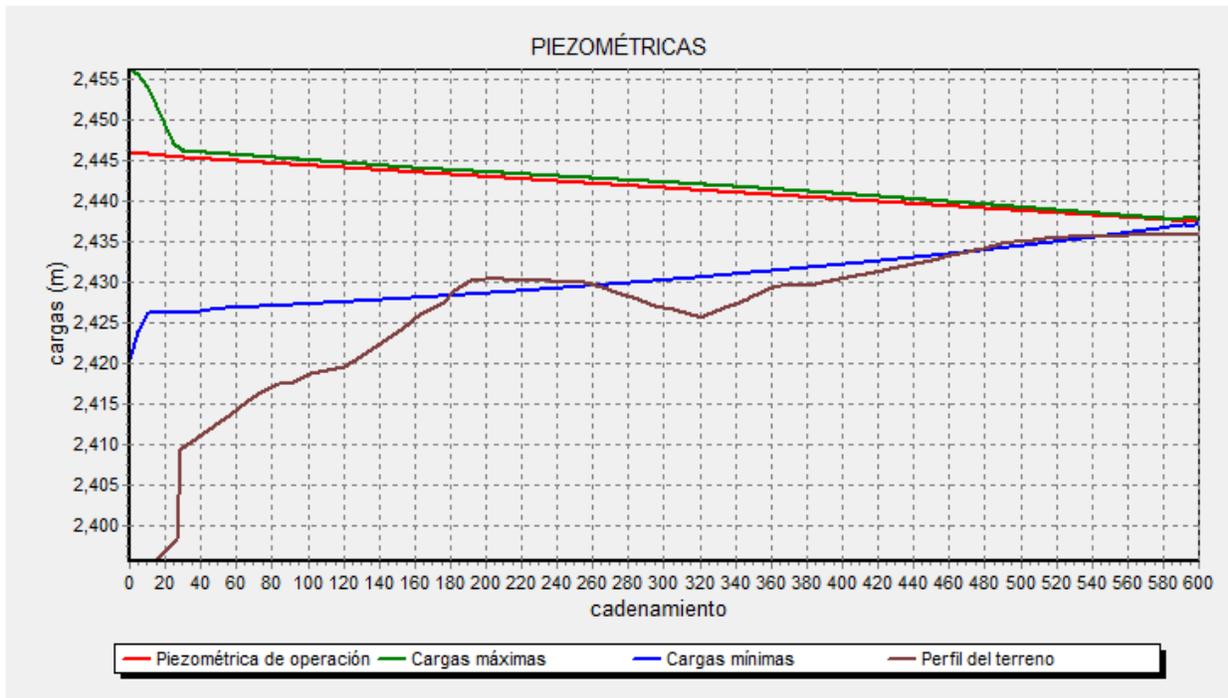


FIGURA 4.5-12 GRÁFICA DE PRESIONES DURANTE PARO DE EQUIPO DE BOMBEO EN LA CÁMARA ÓPTIMA OBTENIDA EN LA VERSIÓN 2F.

La diferencia de esta versión con la 1-F es que el número de bits usados para obtener el cromosoma de altura es de 2.

4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

Para encontrar un valor de K que mostrara una relación $\dot{V}-\Sigma\Delta p$ similar a las anteriores versiones, se hicieron modelaciones con K desde 17 hasta 21 mil con intervalos a cada 1000. Los resultados del algoritmo genético para cada K mostraron en general una buena evolución de los factores de aptitud a través de cada generación. Además, los costos de la cámara óptima fueron de \$18,415.60 en todos los casos.

Finalmente, el valor elegido para el factor de penalización en la simulación final de esta versión fue K=19000, ya que hacía que los resultados evolucionaran de mejor manera tras cada iteración. El porcentaje de influencia de costo respecto a las presiones se mantuvo de 34 al 7%, lo cual está dentro de los estándares elegidos con anterioridad. La cámara óptima seleccionada bajo esta versión tiene 3 m de altura, 0.33 m² de área transversal, 1 m³ de volumen total, 0.5 m³ de volumen inicial de aire y un costo de \$18,415.60, con 0.584 m.c.a. para las sobrepresiones máximas y de 4.334 m.c.a. para las depresiones máximas.

4.5.1.13. RESUMEN.

A través de la Tabla 4.5-1 se puede percibir cuánto influyen las características de la presión sustituidas en la función de aptitud, para la obtención de la cámara de aire óptima.

Dentro de los aspectos más resaltables está que la mayor parte de los resultados ofrecen cámaras económicas y con sobrepresiones y depresiones definitivamente tolerables considerando la tubería que se eligió para la línea de conducción.

Versión	# bits	K	Altura (m)	Área (m ²)	Diám (m)	Vol. Total (m ³)	Vol ini aire (m ³)	Costo (MXN)	Sobre-presión MAX (m.c.a.)	Depresión MAX (m.c.a.)
1A	3	4000	4.5	0.11	0.37	0.5	0.25	\$ 9,207.80	9.279	25.575
2A	2	4000	3	0.17	0.47	0.5	0.25	\$ 9,207.80	9.312	25.575
1B	3	8000	4.5	0.11	0.37	0.5	0.25	\$ 9,207.80	9.279	7.927
2B	2	8000	3	0.17	0.47	0.5	0.25	\$ 9,207.80	9.312	7.924
1C	3	6000	1	1	1.13	1	0.50	\$ 18,415.60	5.754	20.309
2C	2	6000	1.5	0.67	0.92	1	0.50	\$ 18,415.60	5.758	20.369
1D	3	23000	1	2.5	1.78	2.5	1.25	\$ 46,039.00	6.1	0.123
2D	2	23000	1.5	1.67	1.46	2.5	1.25	\$ 46,039.00	6.099	0.155
1E	3	22000	1	2.5	1.78	2.5	1.25	\$ 46,039.00	0.071	7.518
2E	2	23000	1.5	2	1.60	3	1.5	\$ 55,246.80	0.073	7.127
1F	3	26000	4.5	0.22	0.53	1	0.33	\$ 18,415.60	2.38	0.745
2F	2	19000	3	0.33	0.65	1	0.5	\$ 18,415.60	0.584	4.334

TABLA 4.5-1 CARACTERÍSTICAS DE LAS CÁMARAS DE AIRE ÓPTIMAS OBTENIDAS EN EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.

En cuanto a los aspectos desfavorables, se tiene que los resultados más económicos ofrecen geometrías complicadas, por ejemplo, para la cámara de aire obtenida en la versión 1A y 1B de 4.5 m y diámetro de 0.37 m se tendría que pensar en un sistema de soporte especial, ya sea mediante puntales o apoyos secundarios, sin mencionar que aunque no sea objeto de estudio del presente trabajo, el espesor de la cámara tendría que ser considerable, lo cual podría anular el efecto de ahorro obtenido. Es por ello que se pensó en elegir una alternativa que “castigara”

4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORÍTMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

a la calificación del factor de aptitud, si es que la cámara de aire seleccionada obtenía una relación de esbeltez demasiado grande, es decir, si la cámara era demasiado alta y delgada a la vez, desarrollando así la versión 1-A BIS, que es una versión de prueba partiendo de las condiciones originales en la versión 1-A.

4.5.1.14. 1-A BIS (VERSIÓN 13)

La versión 1-A BIS, se deriva de la versión 1-A, las presiones máximas en la función de aptitud también se consideran como las diferencias entre los puntos de presión máximo y mínimo y la línea piezométrica y la cámara también se genera a través de tres bits.

Para contrarrestar la elección de cámaras demasiado delgadas, se decidió que el costo es el que se iba a ver afectado por un factor adicional, correspondiente a la relación de esbeltez, quedando la expresión de la siguiente manera:

$$fa = \frac{1}{Cu \cdot RE + (\Delta p_{m\acute{a}x} + \Delta p_{m\acute{i}n})Kp}$$

ECUACIÓN 4.5-1 FUNCIÓN DE APTITUD EMPLEADA EN VERSIÓN 1-A BIS.

$$RE = \frac{h_c}{a_c}$$

Donde:

RE – Relación de esbeltez de la cámara de aire

h_c – Altura de la cámara de aire (m)

a_c – Área de la cámara de aire (m²)

# Cam Aire	1	2	3	Codificación	Vol. CA	Vol Ini aire	% Vol ini air	Vol ini (m ³)	Altura de la cámara (m)	Área cámara	Factor de aptitud			Rel. esbeltez		fa	% \$-\Delta p	
											$\Delta p_{m\acute{a}x}$	$\Delta p_{m\acute{i}n}$	Cu					
1	1	1	1	111	7	4	0	0.33	1.33	0 0 0 000	0 1	4.00	10.84	25.412	\$ 73,662	0.443113	1.6322E-06	5%
2	0	0	0	000	0	0.5	1	0.50	0.25	0 1 1 011	3 2.5	0.20	9.322	25.572	\$ 9,208	4.954159	1.6558E-06	8%
3	0	0	0	000	0	0.5	1	0.50	0.25	0 0 1 001	1 1.5	0.33	9.342	25.57	\$ 9,208	2.314085	1.7244E-06	4%
4	1	0	0	100	4	2.5	0	0.33	0.83	1 1 1 111	7 4.5	0.56	10.602	25.434	\$ 46,039	5.329217	1.2167E-06	30%
5	1	1	0	110	6	3.5	1	0.50	1.75	0 0 1 001	1 1.5	2.33	10.956	25.404	\$ 64,455	0.87088	1.5677E-06	9%
6	1	1	0	110	6	3.5	0	0.33	1.17	1 1 1 111	7 4.5	0.78	10.759	25.417	\$ 64,455	4.515545	1.1496E-06	33%
7	1	1	1	111	7	4	0	0.33	1.33	0 0 0 000	0 1	4.00	10.84	25.412	\$ 73,662	0.443113	1.6322E-06	5%
8	0	0	1	001	1	1	0	0.33	0.33	1 0 0 100	4 3	0.33	9.826	25.525	\$ 18,416	4.628169	1.5365E-06	13%
9	0	0	1	001	1	1	1	0.50	0.50	0 0 0 000	0 1	1.00	10.294	25.473	\$ 18,416	0.886227	1.699E-06	3%
10	0	0	1	001	1	1	1	0.50	0.50	1 0 1 101	5 3.5	0.29	10.275	25.476	\$ 18,416	5.759887	1.4747E-06	16%
11	1	0	0	100	4	2.5	1	0.50	1.25	1 1 0 110	6 4	0.63	10.791	25.415	\$ 46,039	4.466164	1.274E-06	26%
12	0	0	0	000	0	0.5	0	0.33	0.17	0 1 0 010	2 2	0.25	11.051	25.665	\$ 9,208	3.544908	1.6127E-06	5%
13	0	1	1	011	3	2	0	0.33	0.67	1 1 1 111	7 4.5	0.44	10.488	25.449	\$ 36,831	6.012168	1.2556E-06	28%
14	1	1	0	110	6	3.5	0	0.33	1.17	0 1 1 011	3 2.5	1.40	10.766	25.417	\$ 64,455	1.872496	1.4293E-06	17%
15	0	1	0	010	2	1.5	1	0.50	0.75	0 0 0 000	0 1	1.50	10.561	25.44	\$ 27,623	0.723601	1.6778E-06	3%
16	1	0	0	100	4	2.5	1	0.50	1.25	0 0 0 000	0 1	2.50	10.806	25.414	\$ 46,039	0.560499	1.652E-06	4%
17	0	1	0	010	2	1.5	0	0.33	0.50	0 1 0 010	2 2	0.75	10.292	25.474	\$ 27,623	2.046653	1.5904E-06	9%
18	0	1	1	011	3	2	1	0.50	1.00	1 0 1 101	5 3.5	0.57	10.679	25.424	\$ 36,831	4.108427	1.3718E-06	21%
19	0	1	1	011	3	2	0	0.33	0.67	0 1 1 011	3 2.5	0.80	10.495	25.448	\$ 36,831	2.47708	1.5008E-06	14%
20	1	0	1	101	5	3	0	0.33	1.00	1 1 0 110	6 4	0.75	10.682	25.424	\$ 55,247	4.093307	1.244E-06	28%
21	1	1	1	111	7	4	0	0.33	1.33	1 1 0 110	6 4	1.00	10.831	25.413	\$ 73,662	3.544908	1.189E-06	31%
22	1	0	1	101	5	3	1	0.50	1.50	0 1 1 011	3 2.5	1.20	10.889	25.409	\$ 55,247	2.022527	1.444E-06	16%
23	1	1	1	111	7	4	0	0.33	1.33	1 0 0 100	4 3	1.33	10.834	25.412	\$ 73,662	2.305369	1.3338E-06	23%
24	1	1	1	111	7	4	1	0.50	2.00	1 1 1 111	7 4.5	0.89	10.994	25.401	\$ 73,662	4.227294	1.1189E-06	35%

FIGURA 4.5-13 GENERACIÓN DE LA POBLACIÓN INICIAL Y CÁLCULO DEL FACTOR DE APTITUD EN VERSIÓN 1-A BIS.

4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

Para mantener la condición de que el factor de aptitud estuviera conformado con una influencia de aproximadamente 30 % por parte del costo y el restante con las sobrepresiones, en esta versión dicho porcentaje se alcanzó mediante la comparación del $Cu \cdot RE$ respecto a $(\Delta p_{m\acute{a}x} + \Delta p_{m\acute{i}n})K$. Así entonces, después de varias iteraciones fue el factor $K=5000$ el seleccionado, obteniendo una gama de porcentajes de influencia $\$ - \Delta p$ desde 3 hasta 35 %, lo cual concuerda con las anteriores versiones.

La eficacia de la modificación propuesta a la función de aptitud original se constató una vez terminado el proceso de aplicación del algoritmo genético, ya que a la 20° generación se obtuvo una cámara óptima con 1 m altura, 0.5 m² de área, 0.5 m³ de volumen total, 0.25 m³ de vol. inicial de aire y con un costo de \$9,207.80. Respecto a las presiones máximas y mínimas se obtuvieron valores de 9.353 m.c.a. y 25.569 m.c.a., respectivamente. La línea de sobrepresiones, depresiones y la piezométrica se ilustran en la Figura 4.5-14.

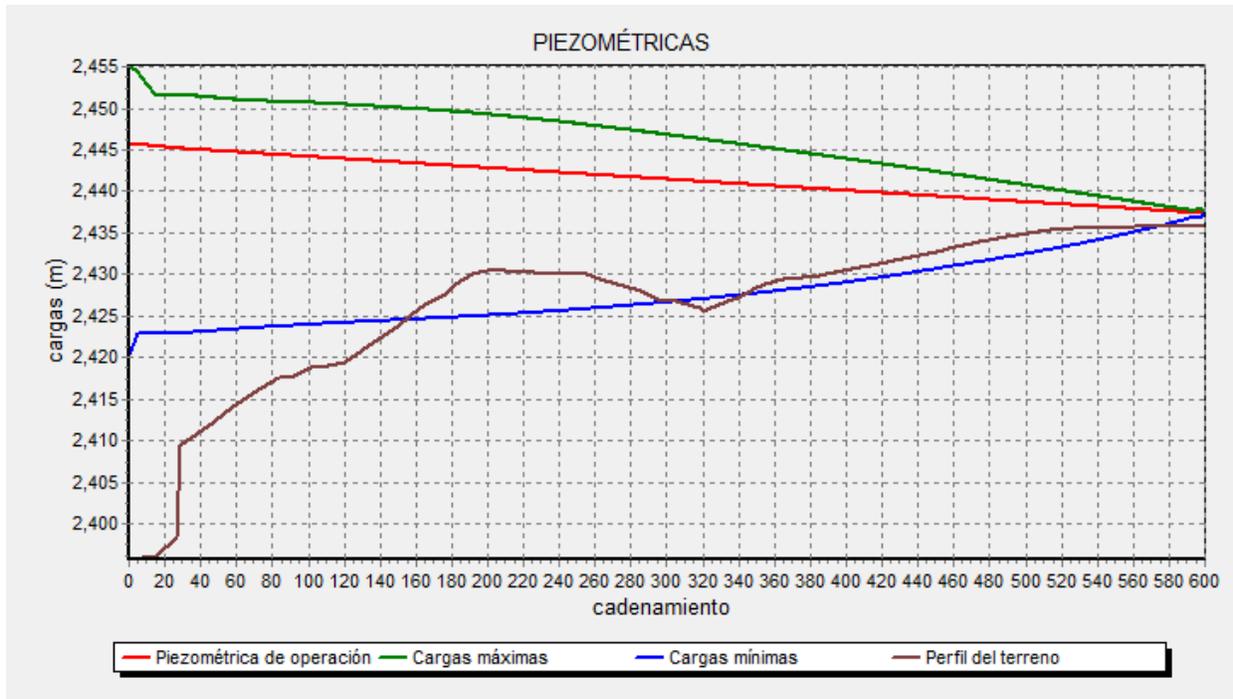


FIGURA 4.5-14 GRÁFICA DE PRESIONES DURANTE PARO DE EQUIPO DE BOMBEO EN LA CÁMARA ÓPTIMA OBTENIDA EN LA VERSIÓN 1A BIS.

La cámara óptima obtenida en 1-A BIS tiene 0.8 m de diámetro y una relación de esbeltez de 1.25, la cual es más realista que la cámara óptima de la versión 1-A con una relación de esbeltez de 12.02 derivada de sus 4.5 m de altura y 0.37 m de diámetro.

Versión	# bits	K	Altura (m)	Área (m ²)	Diám (m)	Vol. Total (m ³)	Vol ini aire (m ³)	Costo (MXN)	Sobrepresión MAX (m.c.a.)	Depresión MAX (m.c.a.)
1A BIS	3	5000	1	0.5	0.8	0.5	0.25	\$ 9,207.80	9.353	25.559

TABLA 4.5-2 CARACTERÍSTICAS DE LA CÁMARAS DE AIRE ÓPTIMA OBTENIDA EN EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD 1A-BIS.

4.5.2. SELECCIÓN DE CÁMARA DE AIRE ÓPTIMA.

A continuación se presentan una serie de fotografías de cámaras de aire instaladas en acueductos reales, donde se pueden observar distintos tipos de geometrías.



FIGURA 4.5-15 CÁMARA DE AIRE INSTALADAS EN UN ACUEDUCTO EN LINARES-MONTERREY (IZQ.) Y CHAPALA-GUADALAJARA (DER.).



FIGURA 4.5-16 CÁMARA DE AIRE INSTALADAS EN UN ACUEDUCTO UBICADO EN ACAPULCO, GUERRERO.

Las cámaras de aire ilustradas poseen una relación de esbeltez aproximada de 3.5, 5.6, 2.2 y 1.6 en orden de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo. Ahora bien, si se toman dichas dimensiones para efectuar una primera selección de entre las cámaras de aire obtenidas en el análisis de sensibilidad con base en dimensiones realistas, se tiene que las versiones 2-C, 2-F y 1-A BIS son las versiones que mejor se ajustan a los parámetros reales, como se puede ilustra en la siguiente tabla comparativa.

Versión	1A	2A	1B	2B	1C	2C	1D	2D	1E	2E	1F	2F	1A BIS
Rel. Esbeltez	12.0	6.4	12.0	6.4	0.9	1.6	0.6	1.0	0.6	0.9	8.5	4.6	1.3

TABLA 4.5-3 COMPARATIVO DE RELACIÓN DE ESBELTEZ POR VERSIÓN.

Después de elegir las cámaras con las mejores relaciones de esbeltez, se procede a realizar otra selección, ésta vez evaluando el costo. Como se observa en la Tabla 4.5-3 las versiones seleccionadas 2C y 2F proyectan cámaras de \$18,415.60, mientras que la versión 1-A BIS arroja un costo de \$ 9,207.80.

4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

En términos relativos, los costos obtenidos en las tres versiones señaladas son asequibles, así que si la elección se hiciera considerando el factor económico las tres opciones serían propicias, pero como debe elegirse una sola cámara se procederá a analizar las condiciones tomadas del análisis de sensibilidad.

Es menester recalcar lo mencionado en el apartado 4.5 acerca del valor Δp en la función de aptitud, ya que es mejor hacer mínima la diferencia entre la línea de presiones negativas y el perfil a la línea de conducción a hacer a dicha línea de presiones negativas acercarse a la línea piezométrica; esto debido a que si se busca acercar las depresiones a la piezométrica, de cierta manera se estaría obligando al algoritmo a obtener cámaras de aire más grandes y por ende más costosas, ya que una cámara grande tiene mayores probabilidades de amortiguar mejor las presiones extremas; en cambio si la línea de presiones negativas se acerca al perfil de la tubería de conducción, se tendría una cámara justa, evitando la selección de una cámara de aire sobrediseñada para soportar valores de depresiones. Así entonces, se descartan las versiones 2-C Y 1-A BIS, ya que evalúan a Δp con la diferencia entre línea de presiones negativas y piezométrica.

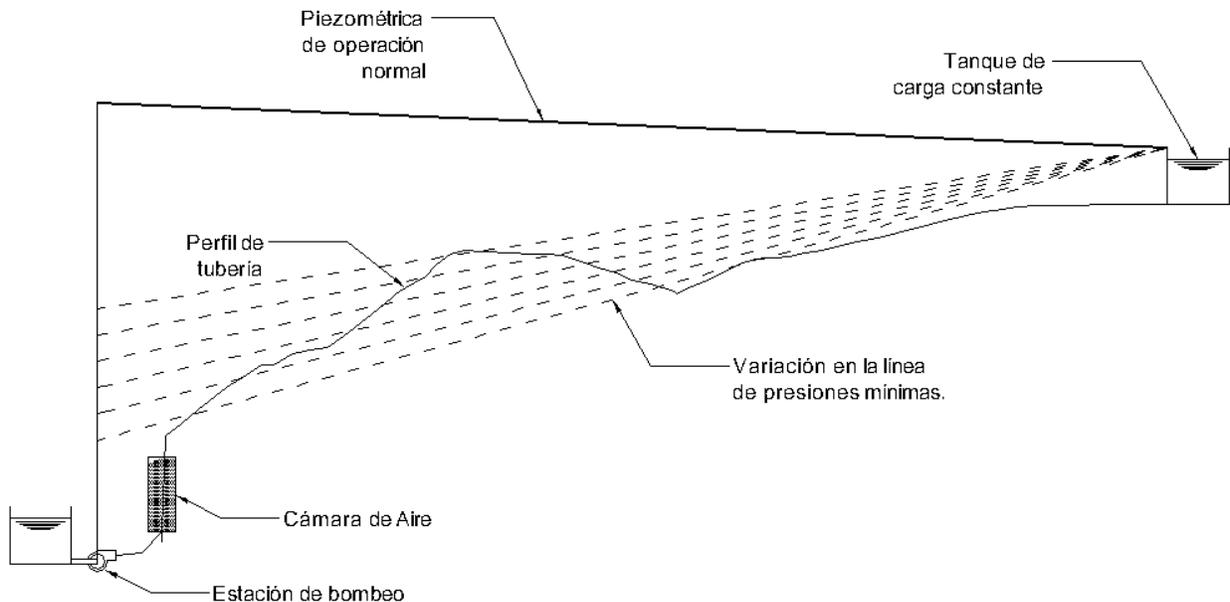


FIGURA 4.5-17 VARIACIÓN DE LA LÍNEA DE PRESIONES MÍNIMAS.

Lo ideal sería obtener una cámara de aire que ofreciera una línea de presiones negativas que sea igual al perfil de la conducción, por ello se considera como una solución favorable a una que esté cercana. Si hay tramos en los que el perfil de la tubería está por encima de la línea de depresiones, no habrá mayor problema de funcionamiento si esa diferencia es de 8m.c.a. máximo, ya que la presión negativa debe ser mucho menor que la atmosférica para que se presentara un colapso.

4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE CÁMARAS DE AIRE.

Luego de todas las consideraciones efectuadas para elegir una cámara óptima, se obtiene a la proveniente de la versión 2-F, de la cual se hablará a continuación.

La cámara de aire óptima resultante de este trabajo tiene muchas ventajas sobre las demás, en primer lugar, las consideraciones para el cálculo de su factor de aptitud tomaron en cuenta a todos los valores de presiones arrojadas por la cámara, no sólo de un tramo o de un punto, obteniendo un panorama más amplio del comportamiento de la línea ante el transitorio que en otras versiones; sin mencionar que también el comportamiento de la cámara ante las sobrepresiones es ideal, como puede observarse en la Figura 4.5-12, ya que la diferencia de niveles entre la línea de presiones positivas máximas y la línea piezométrica de operación normal es mínima; asimismo la línea de presiones negativas está también muy cercana al perfil de la tubería, obteniendo una diferencia de aproximadamente 2 m.c.a. que en términos técnicos no presenta riesgo de colapso por depresión; aunado a que su geometría es óptima también, ya que su relación de esbeltez ofrece un valor intermedio al de las cámaras ilustradas en los dos acueductos mencionados en la Figura 4.5-15; finalmente, también resultó con un costo prudente de \$18,415.60, logrando que la finalidad de aplicación del algoritmo genético se cumpliera, ya que se tiene una cámara de aire de 1 m³ de volumen, 3 m de altura, 0.65 m de diámetro, y con un porcentaje inicial de aire de un 50 % que protege efectivamente a la línea de conducción y que además es económica.

5. CONCLUSIONES.

En el presente trabajo se pudo constatar la eficacia del algoritmo genético al emplearse como medio de diseño. Su uso permitió encontrar soluciones optimizadas para los criterios para los cuales fue programado; en este caso se obtuvieron diferentes propuestas de cámaras de aire con excelentes resultados minimizando los efectos del golpe de ariete y además, con el mínimo de inversión posible para la construcción de la estructura hidráulica. Es importante resaltar que la gama de posibles soluciones obtenidas tuvo una calidad y desempeño excepcional y ello sin necesidad de tener experiencia previa en dimensionamiento de cámaras de aire. Además, la metodología desarrollada tiene la posibilidad de ser aplicable al diseño de otras estructuras hidráulicas de protección, como la torre de oscilación y el tanque unidireccional.

El ciclo del algoritmo genético efectuado, se realizó para una población de 24 individuos con una extensión de 20 generaciones. Además de ello se realizaron 13 versiones con diferentes maneras de evaluar el factor de aptitud. Estas consideraciones implicaron el análisis de cientos de posibles combinaciones y miles de cálculos realizados para la obtención de un resultado ideal. Si esto se hiciera por métodos tradicionales, el tiempo a emplear haría inviable el análisis, en cambio al usar algoritmos genéticos se vuelve realizable. Así entonces, el hecho de poder aplicar una metodología como la aquí presentada permite al calculista ahorrar no sólo en el aspecto financiero, sino en el tiempo dedicado.

Para comenzar a enunciar las mejoras futuras que se pueden hacer a esta tesis se propone como primera instancia programar el algoritmo genético en un lenguaje computacional tipo Matlab o similar para tener la posibilidad de explorar más opciones de cámaras, ya que hacerlo automatizará el proceso de cálculo en lugar de hacer cada paso del algoritmo genético con procedimientos manuales en una hoja de cálculo.

Al automatizar el procedimiento se puede incorporar la opción de minimizar no sólo el volumen de la cámara de aire sino también el minimizar los coeficientes de pérdida de entrada y salida de la cámara y así hacer más eficiente su funcionamiento.

Como se mencionó en el quinto capítulo, el algoritmo genético que se empleó en este trabajo está basado en el algoritmo genético simple de John Holland, dicha versión ofrece simplicidad de cálculo y requiere poca cantidad y tratamiento de datos para su funcionamiento, por ello si

5. CONCLUSIONES.

además se incorporara la automatización de la programación computacional, se podría aumentar la cantidad de cámaras de aire evaluadas para realizar la optimización. Por ejemplo, para el primer cromosoma en lugar de evaluar cámaras con intervalos a cada 0.5 m^3 de capacidad, podrían hacerse a cada 0.05 m^3 , lo mismo para el segundo y tercer cromosoma, donde se podrían evaluar diferentes porcentajes de volumen de aire inicial y por supuesto diferentes alturas posibles a menores intervalos.

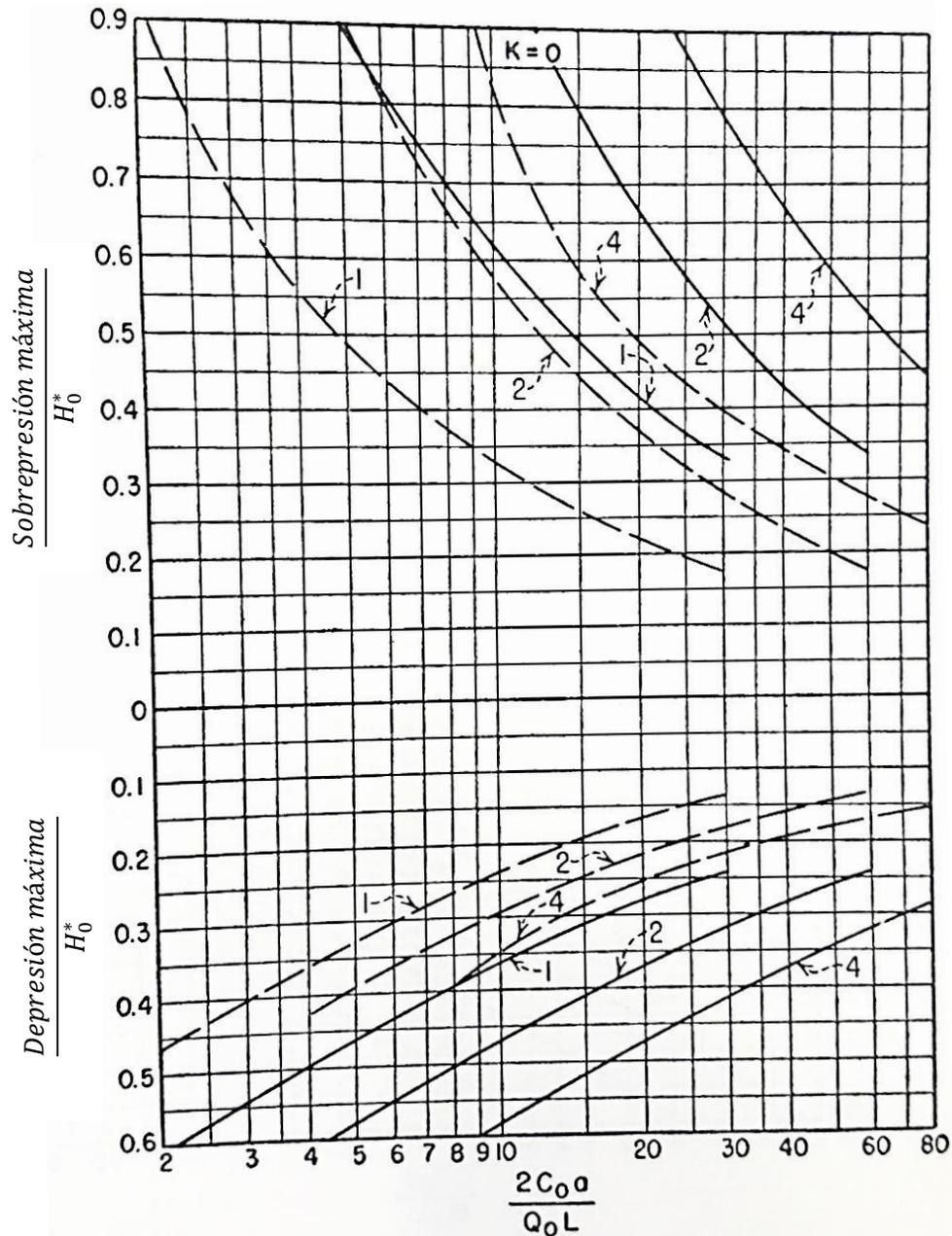
Si además se quisiera perfeccionar el método de cálculo, se podría manejar alguna versión alterna del algoritmo genético, donde en lugar de emplear una codificación binaria pueda emplearse una codificación real, o en lugar de usar la cruce en un solo punto podría usarse la cruce multipunto, inclusive se podría hacer uso de distintas técnicas de selección, por ejemplo por torneo.

El programa TRANS usado en esta metodología calcula los transitorios a través del Método de las Características, un método Euleriano que requiere un entrenamiento matemático formal y numerosos pasos o cálculos para resolver un problema de transitorios simple en una tubería, además, a medida que el sistema de tuberías se vuelve más complejo, el número de cálculos requeridos incrementa, hasta que para aplicaciones prácticas la programación computacional es requerida. Debido a la complejidad de dicho método se plantea sustituirlo por un método más moderno, como el Método Lagrangiano "*Wave Characteristic Method*" que provee un entendimiento intuitivo de los transitorios en una conducción, resultando en una mejora en el diseño y operación del acueducto, además al ser comparado con el método Euleriano de las características ofrece idénticas soluciones.

Al final de este trabajo uno de los puntos más importantes a resaltar son los grandes avances que se están dando en el desarrollo y aplicación de métodos matemáticos para el cálculo de problemas complejos, como los métodos metaheurísticos abordados en esta tesis. En específico los algoritmos genéticos están tomando un auge destacable en la industria para resolver problemáticas reales de optimización, tal es el caso del diseño de pantalones en la industria textil, o el diseño de turbinas, de lavadoras, de sistemas de cableado eléctrico, de diseño estructural de edificios, cajas de transmisión de autos y por supuesto, el diseño de redes, en fin, las posibilidades de aplicación son tan extensas como los problemas reales que requieren optimización. En tiempos donde los problemas diarios se van haciendo cada vez más complicados y donde la vida moderna demanda un tiempo de resolución cada vez más corto, la opción idónea es la implementación de métodos metaheurísticos como los algoritmos genéticos.

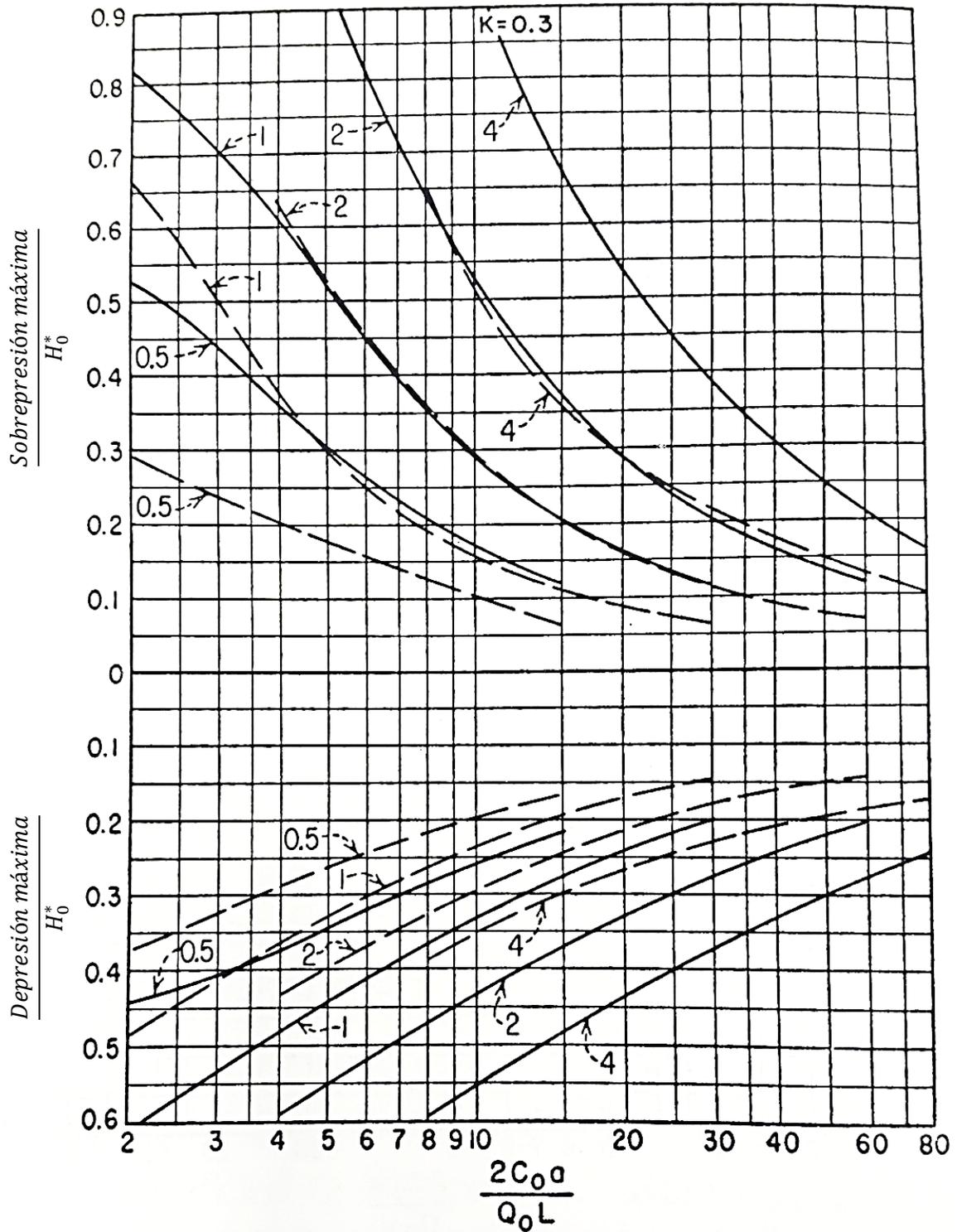
ANEXOS

A. PARMAKIAN.



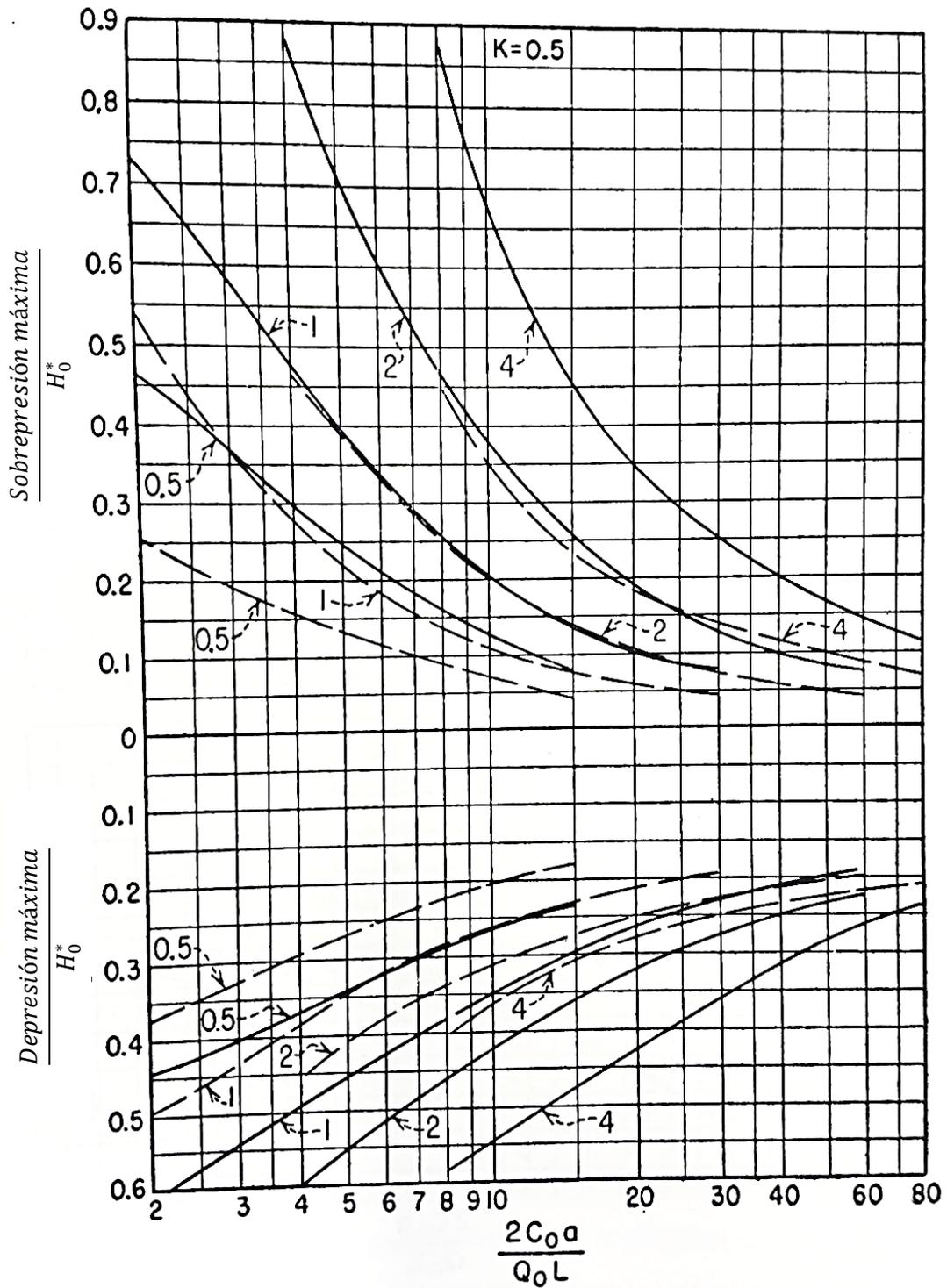
Los números en las curvas son valores de $2\rho^*$
 _____ adyacente a la bomba
 - - - - - en el punto medio

GRÁFICA A-1 . K=0



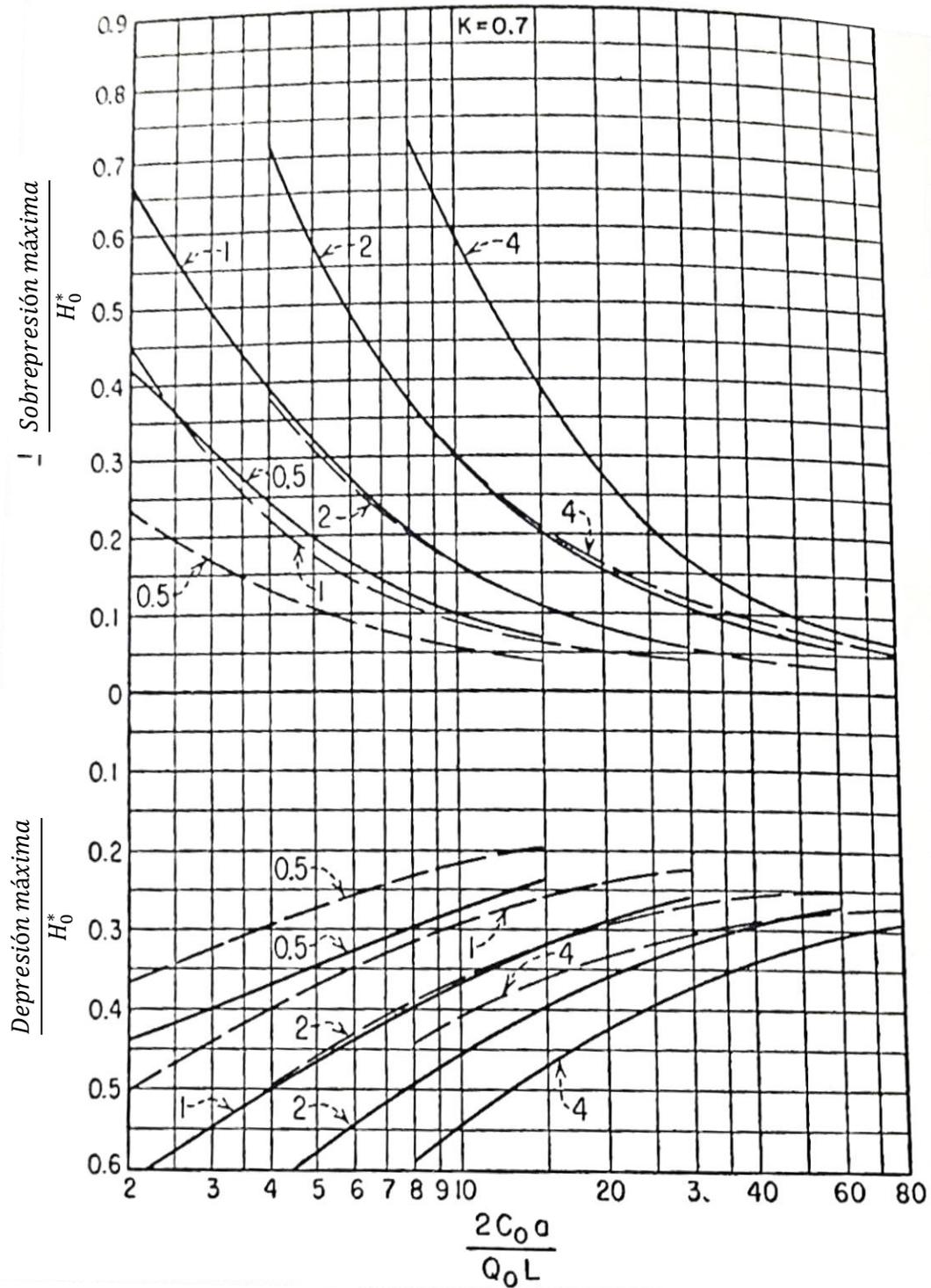
Los números en las curvas son valores de $2\rho^*$
 ————— adyacente a la bomba
 - - - - - en el punto medio

GRÁFICA A-2. $K=0.3$



Los números en las curvas son valores de $2\rho^*$
 ————— adyacente a la bomba
 - - - - - en el punto medio

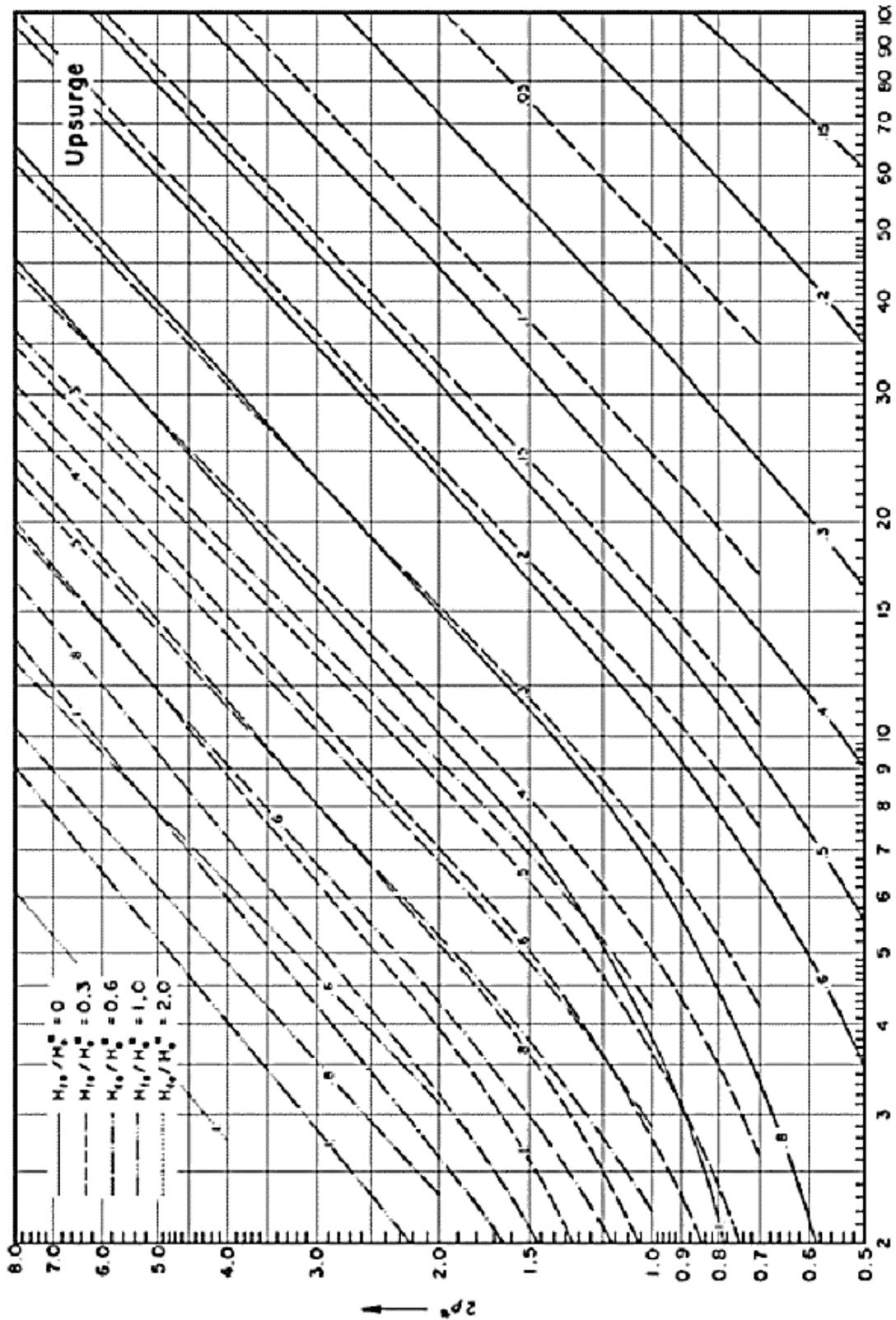
GRÁFICA A-3. $K=0.5$



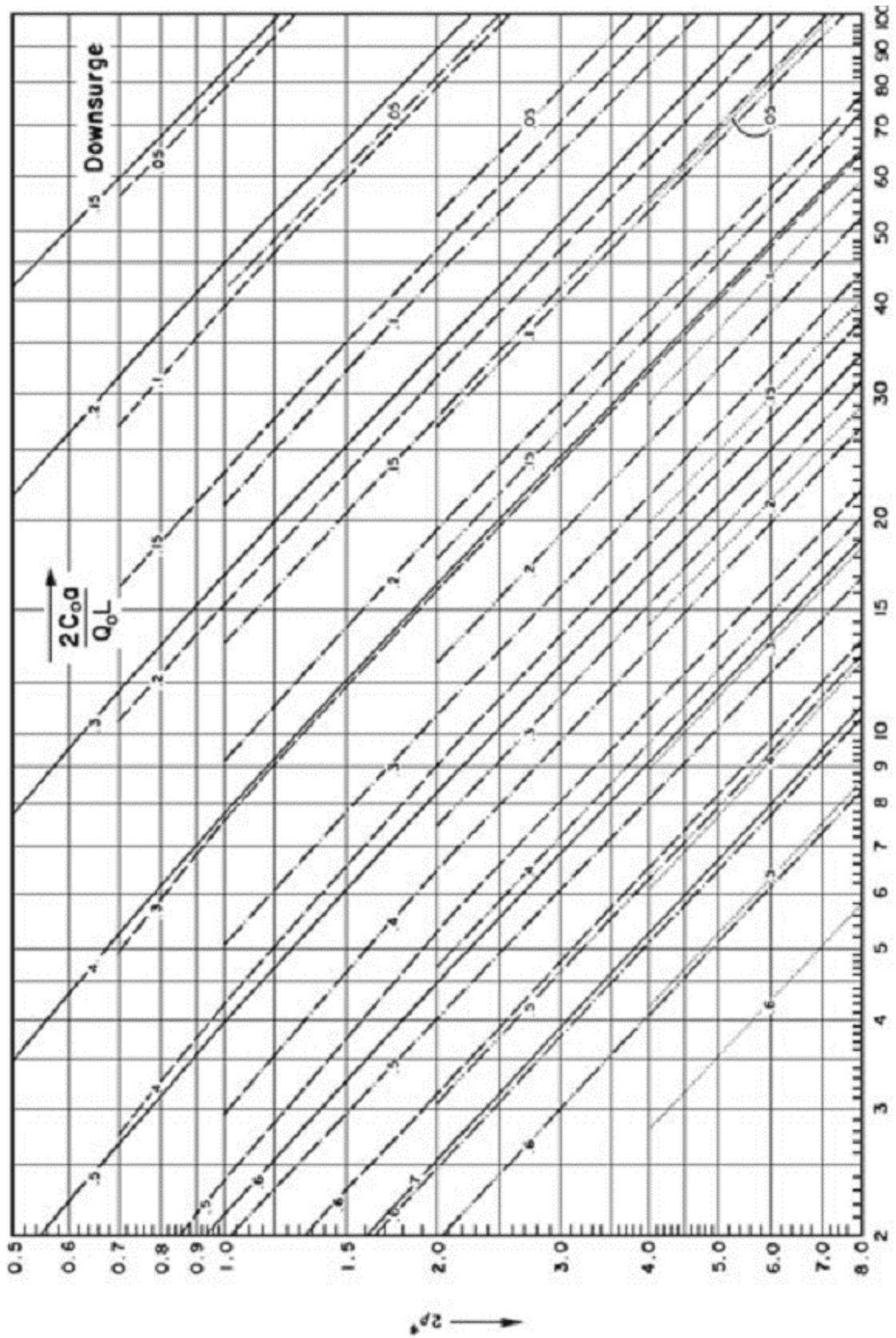
Los números en las curvas son valores de $2\rho^*$
 _____ adyacente a la bomba
 - - - - - en el punto medio

GRÁFICA A-4. $K=0.7$

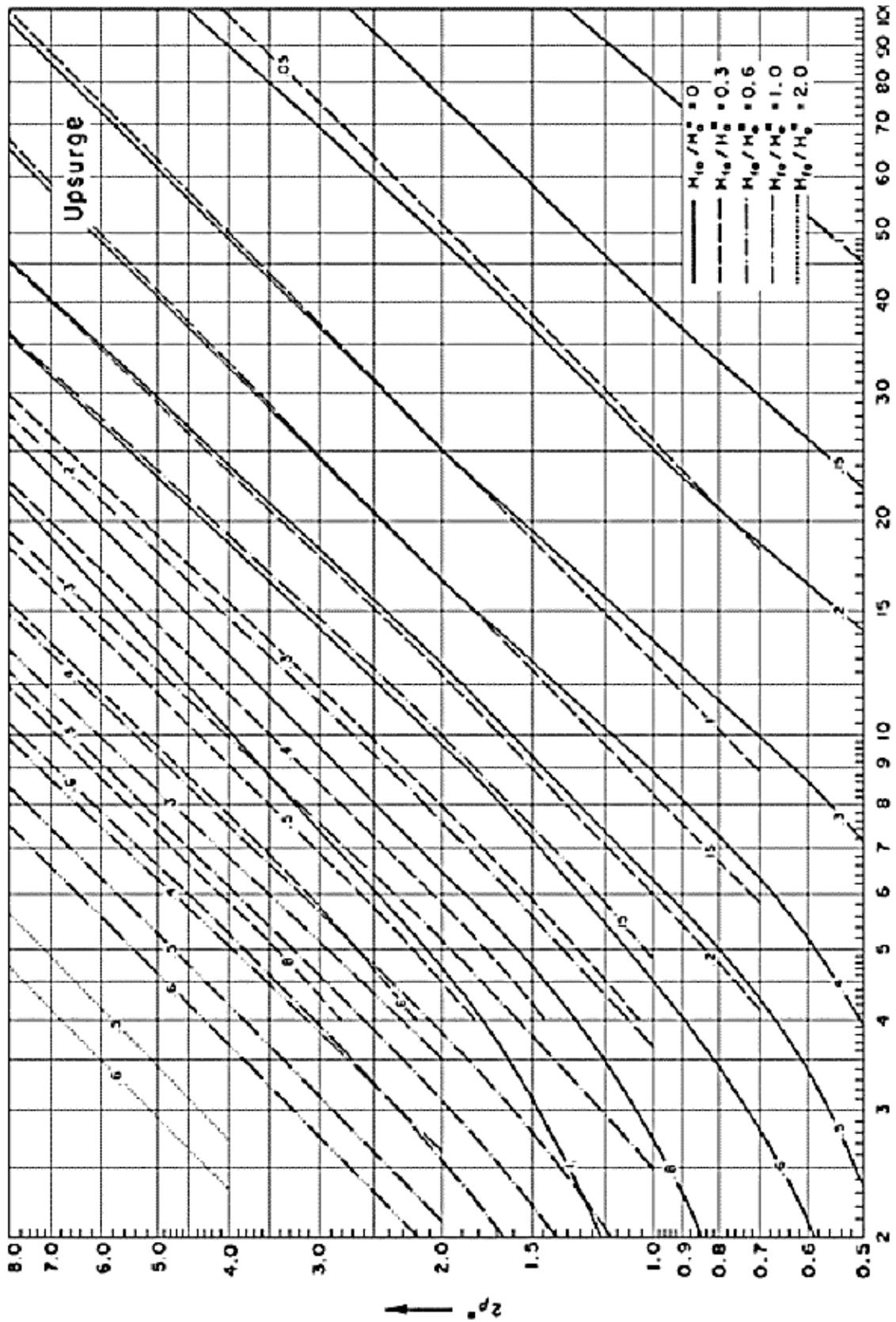
B. RUUS E.



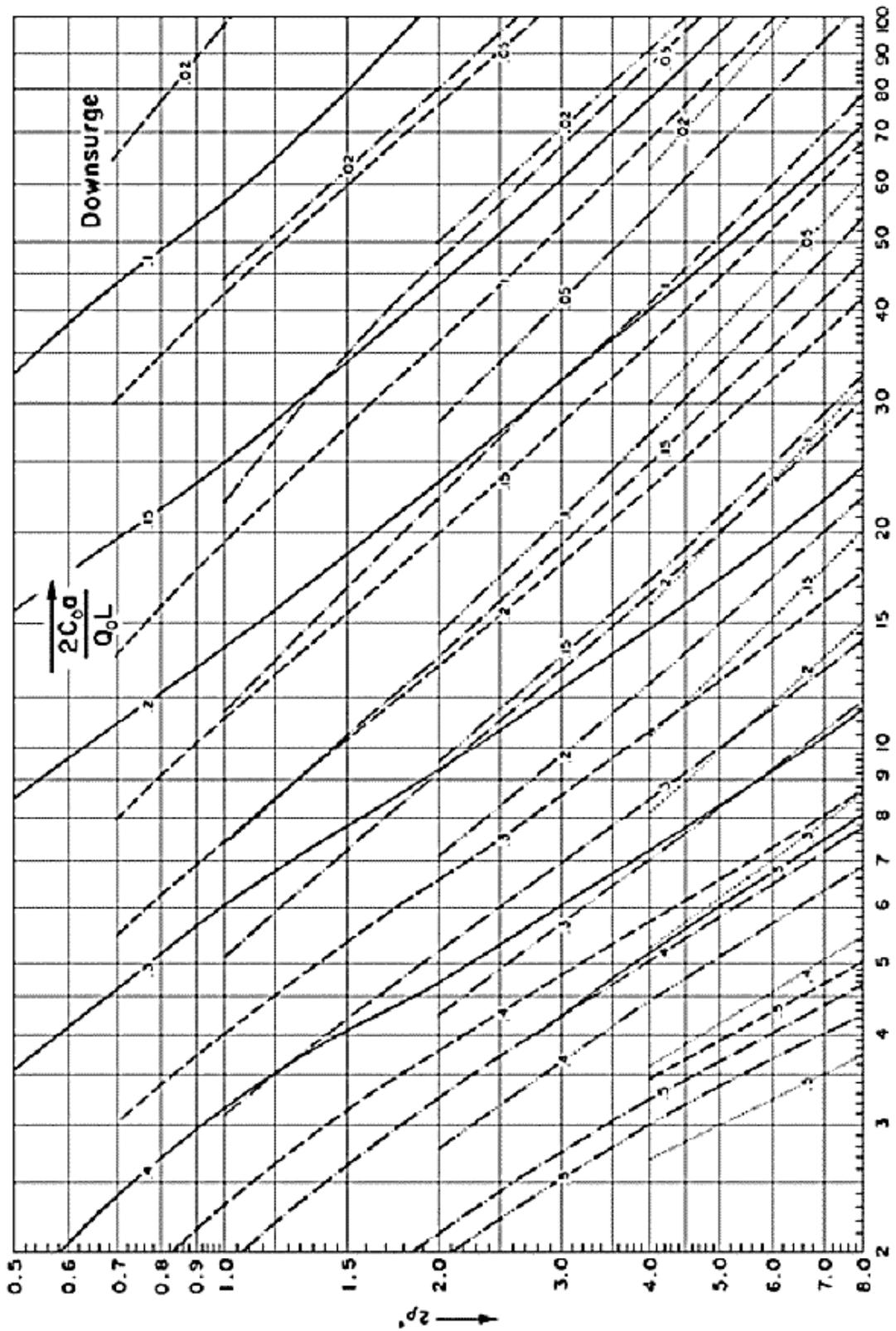
GRÁFICA B-1. MÁXIMA SOBREPRESIÓN EN LA BOMBA.



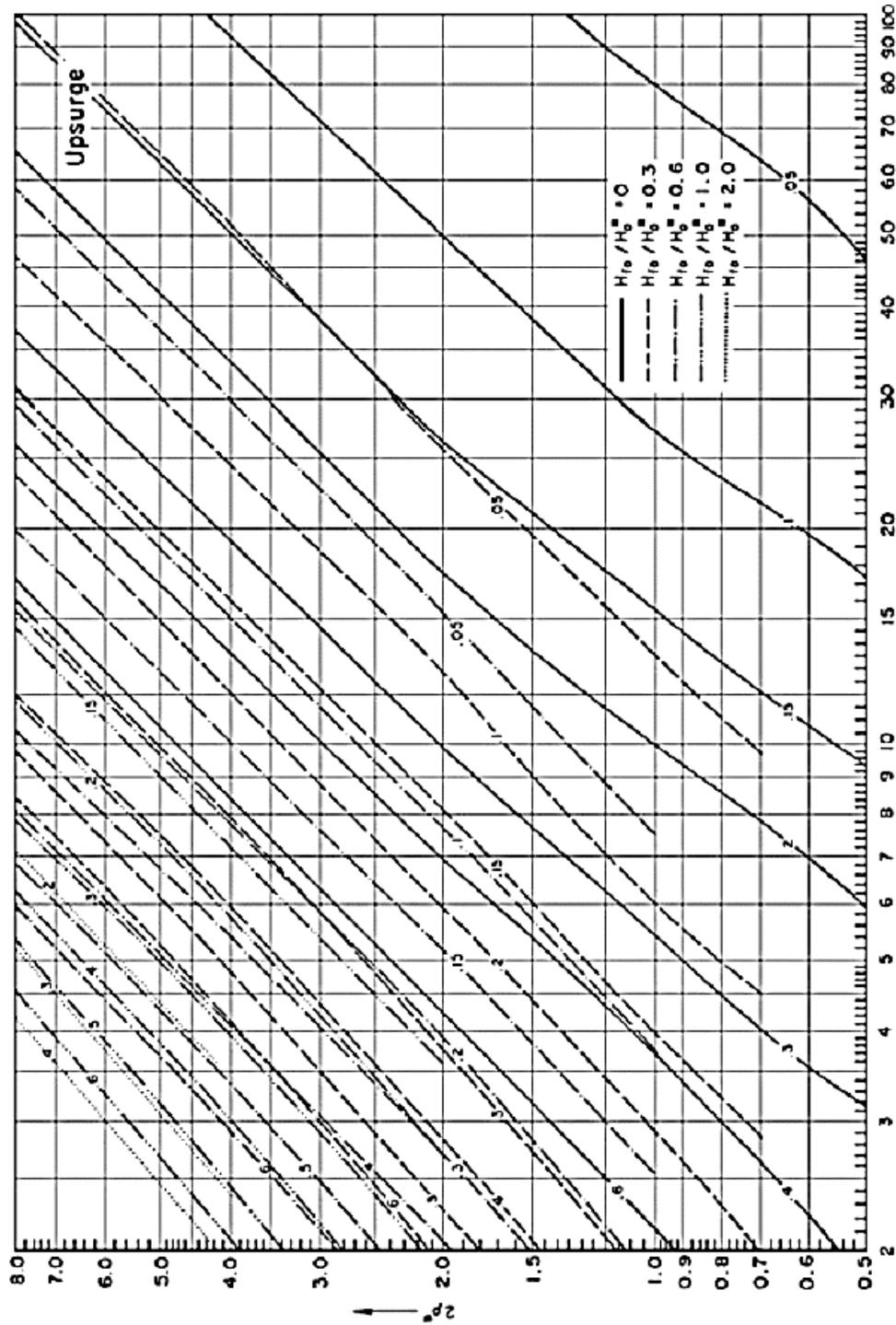
GRÁFICA B-2. MÁXIMA DEPRESIÓN EN LA BOMBA.



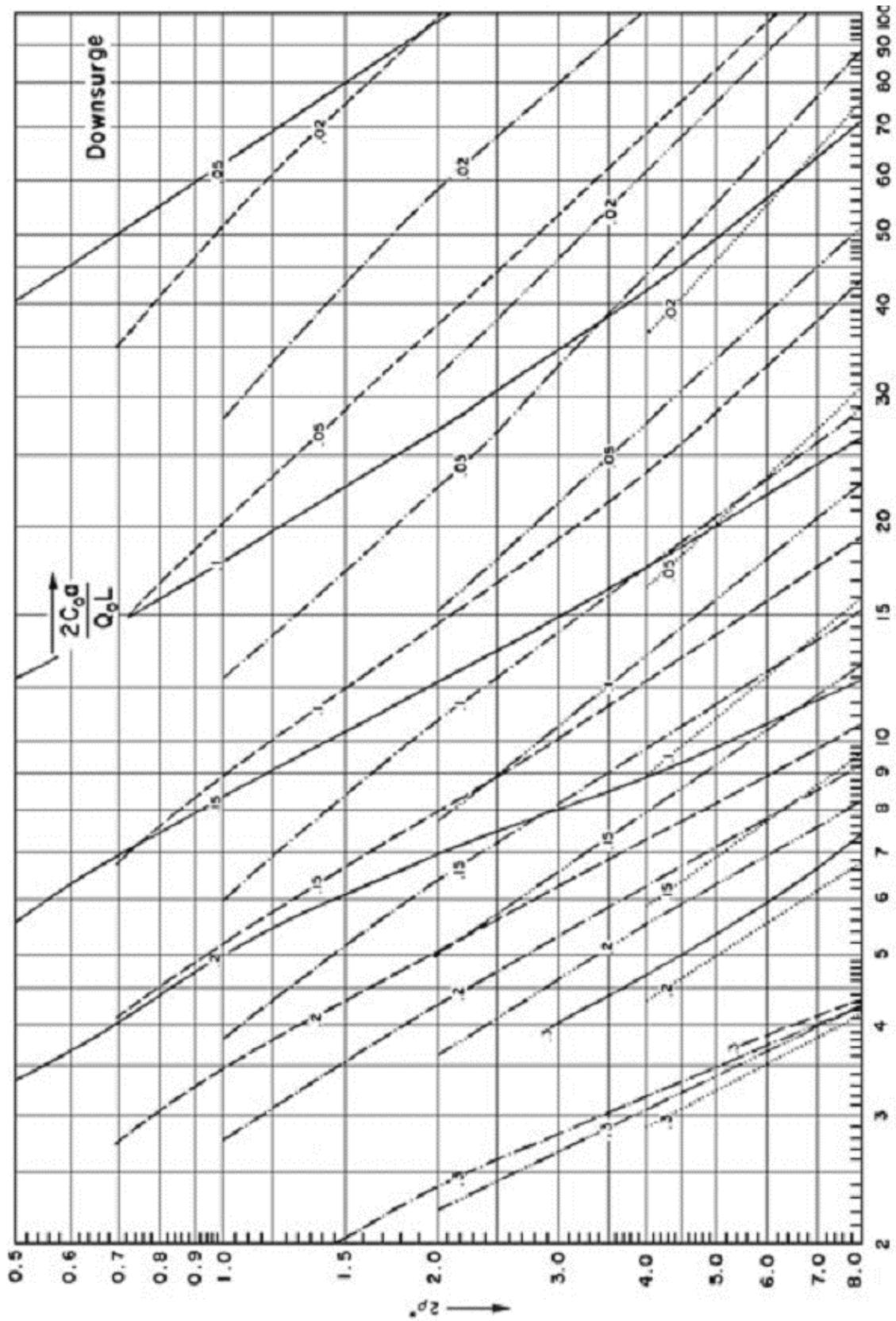
GRÁFICA B-3. MÁXIMA SOBREPRESIÓN A LA MITAD DE LA LÍNEA DE DESCARGA.



GRÁFICA B-4. MÁXIMA DEPRESIÒN A LA MITAD DE LA LÍNEA DE DESCARGA.

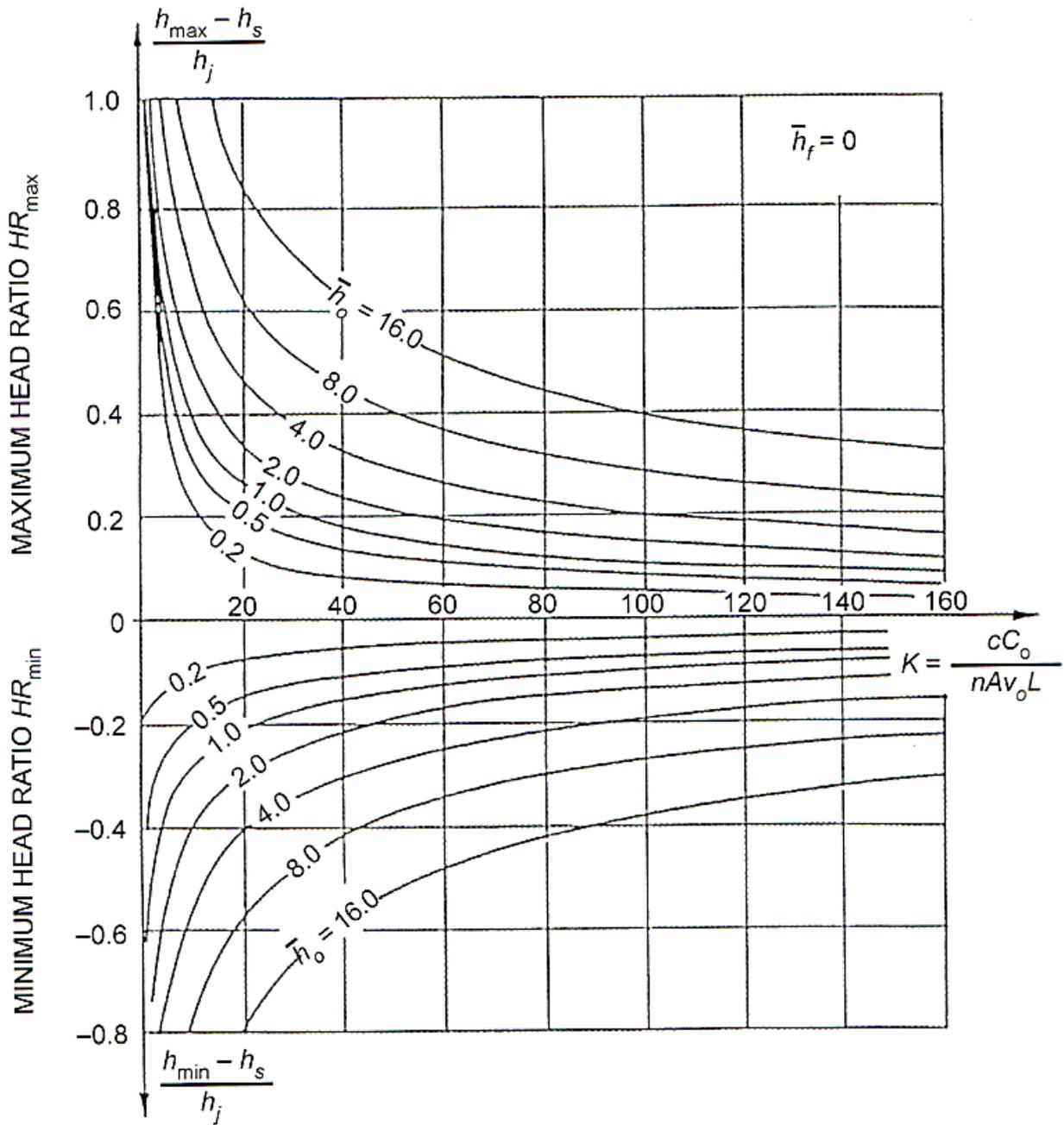


GRÁFICA B-5. MÁXIMA SOBREPRESIÓN A LA CUARTA PARTE DE LA LÍNEA DE DESCARGA DEL LADO DEL DEPÓSITO (RUSS E.).

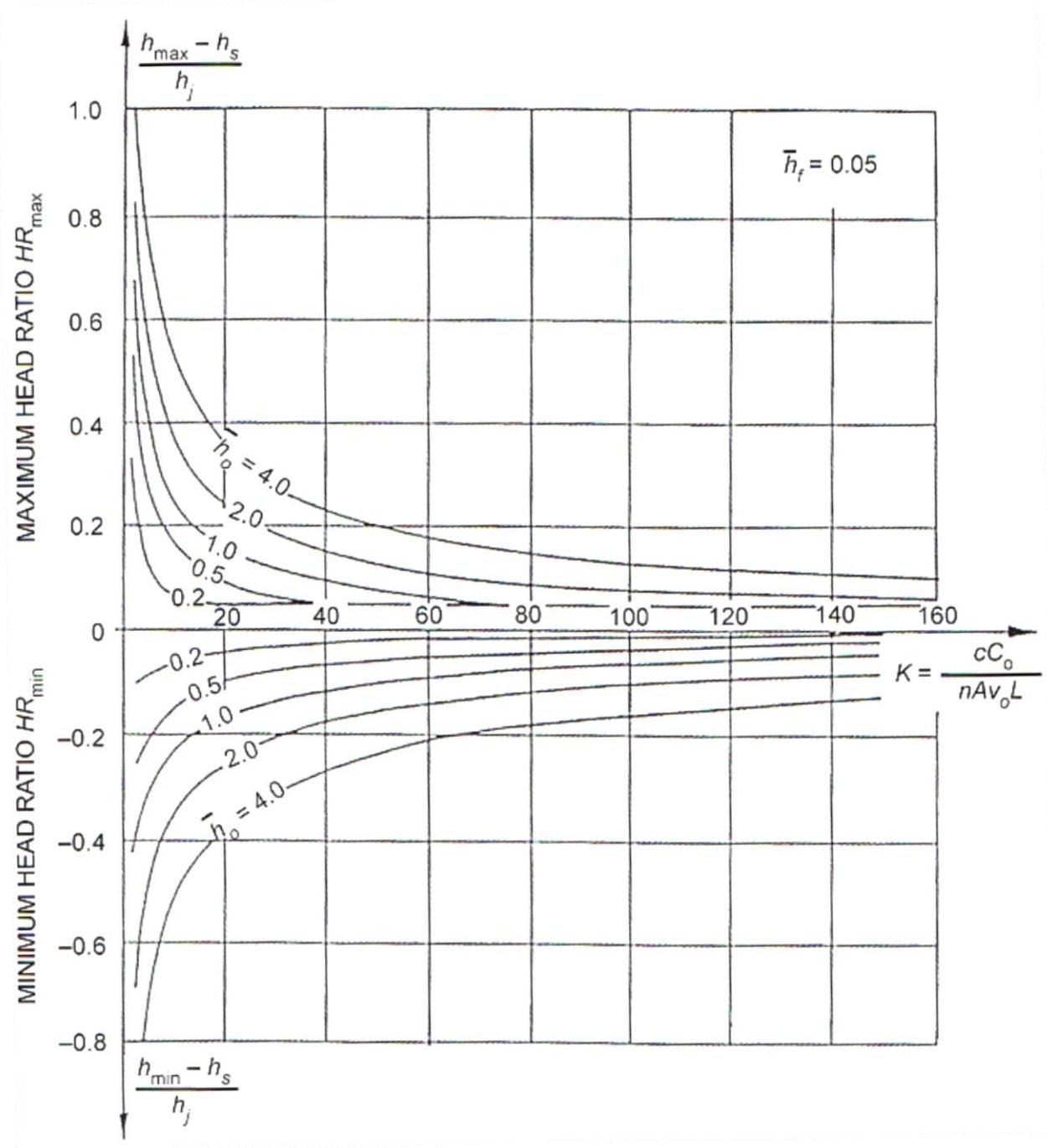


GRÁFICA B-6. MÁXIMA DEPRESIÓN A LA CUARTA PARTE DE LA LÍNEA DE DESCARGA DEL LADO DEL DEPÓSITO.

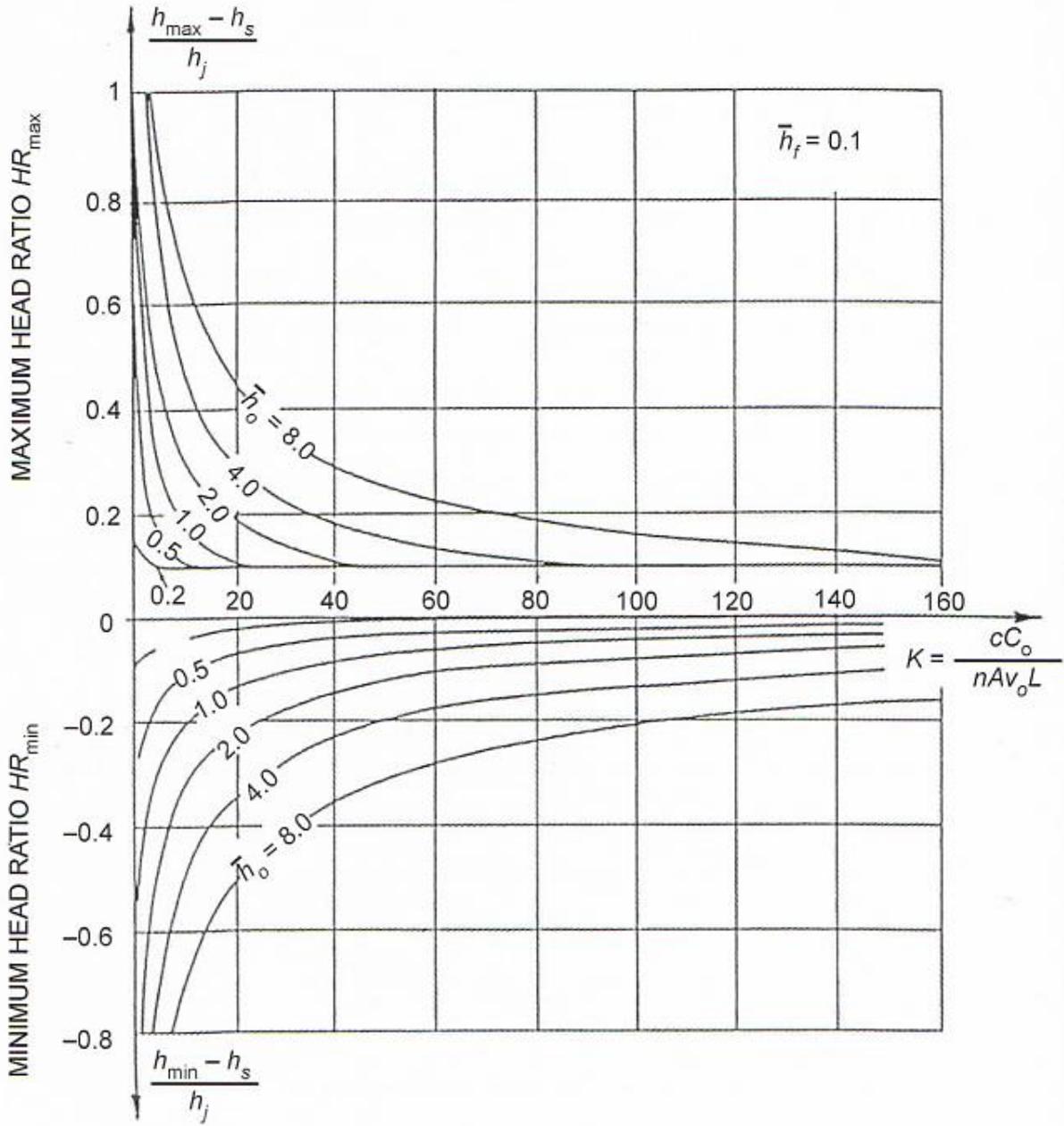
C. GRAZE & HORLACHER



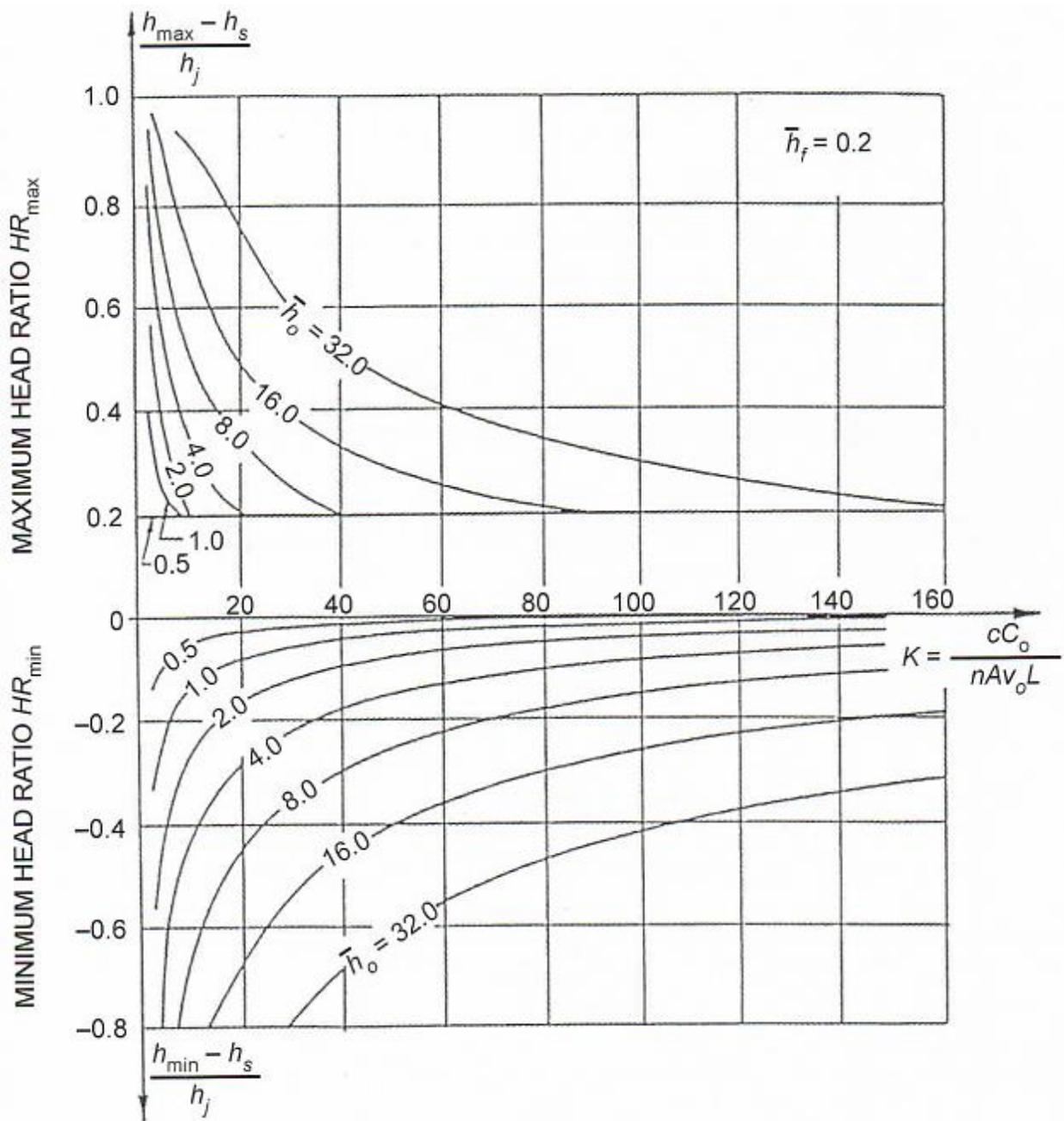
GRÁFICA C-1. RELACIÓN DE CARGA DE PRESIÓN MÁXIMA Y MÍNIMA CUANDO EL PARÁMETRO DE FRICCIÓN $\bar{h}_f=0$ Y SIN REDUCCIÓN DE DIÁMETRO DE CONEXIÓN.



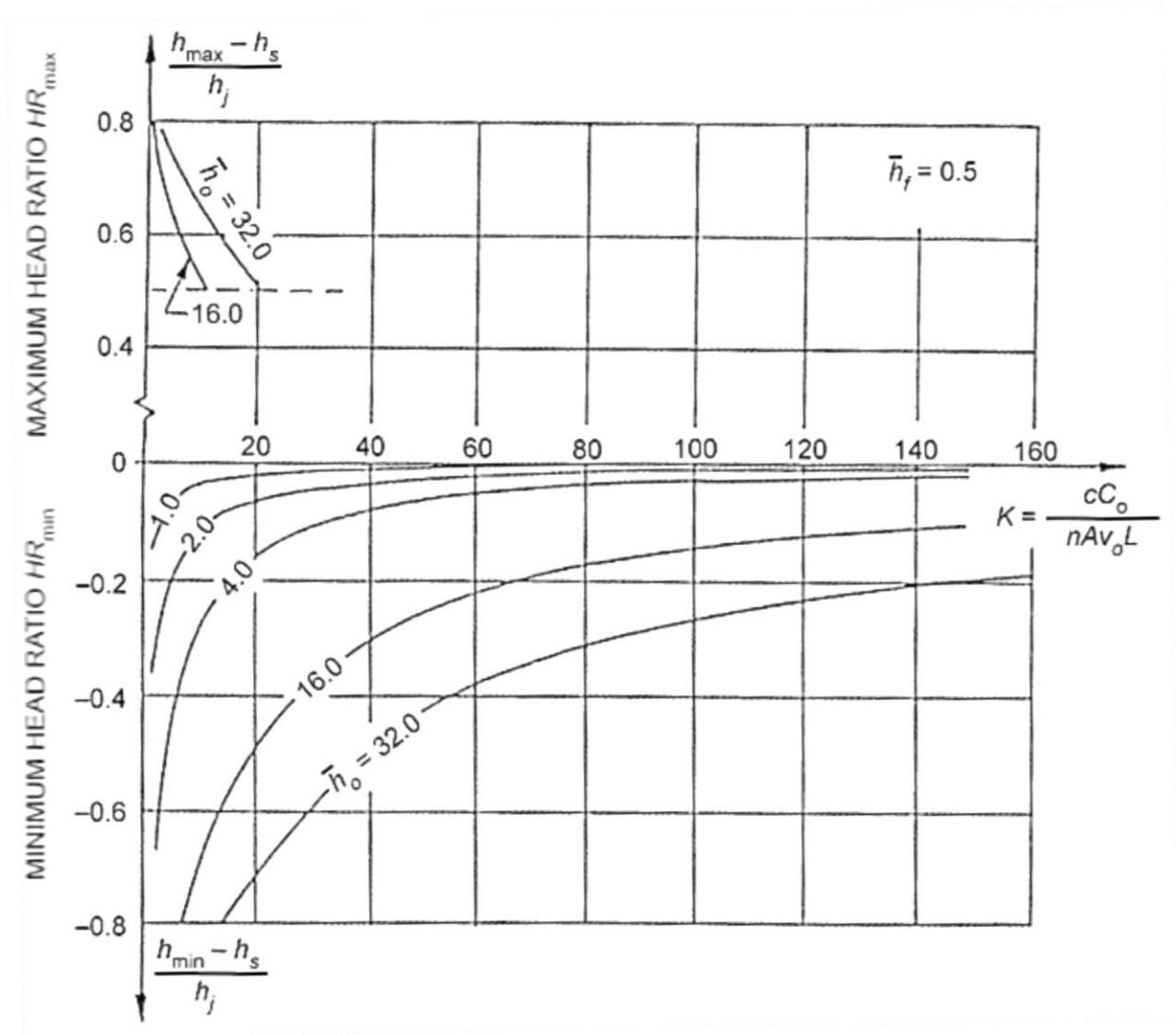
GRÁFICA C-2. RELACIÓN DE CARGA DE PRESIÓN MÁXIMA Y MÍNIMA CUANDO EL PARÁMETRO DE FRICCIÓN $h_f=0.05$ Y SIN REDUCCIÓN DE DIÁMETRO DE CONEXIÓN.



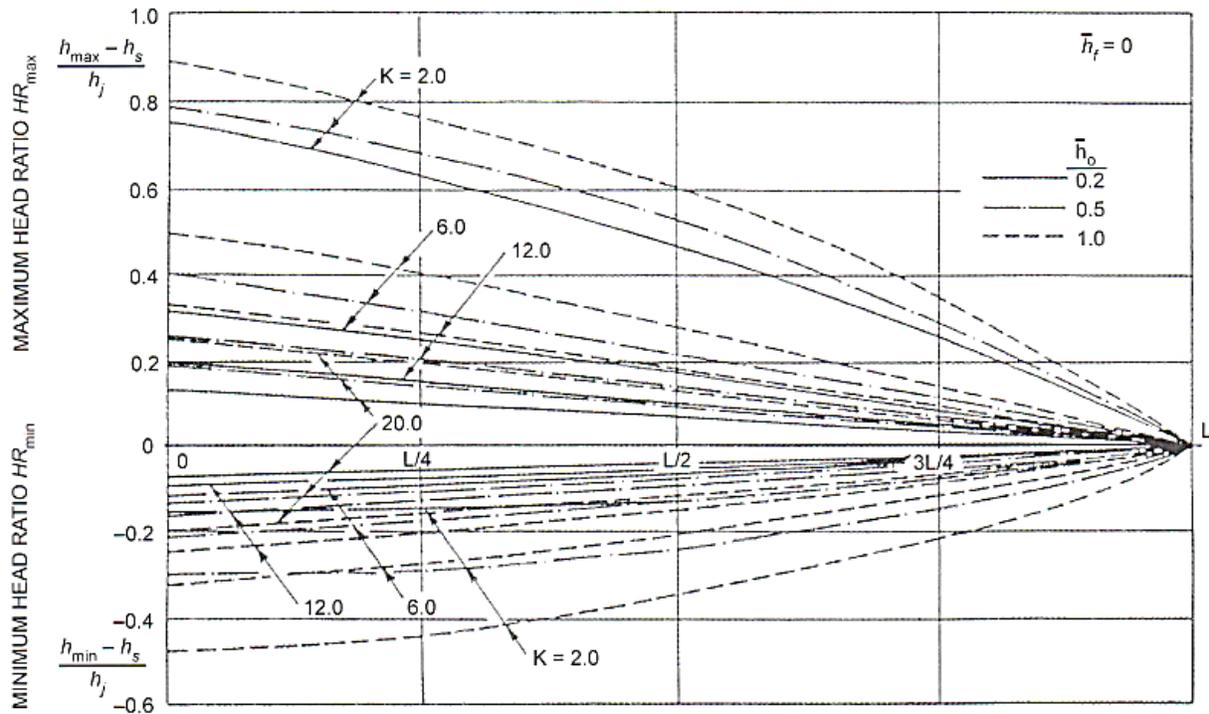
GRÁFICA C-3. RELACIÓN DE CARGA DE PRESIÓN MÁXIMA Y MÍNIMA CUANDO EL PARÁMETRO DE FRICCIÓN $h_f=0.1$ Y SIN REDUCCIÓN DE DIÁMETRO DE CONEXIÓN.



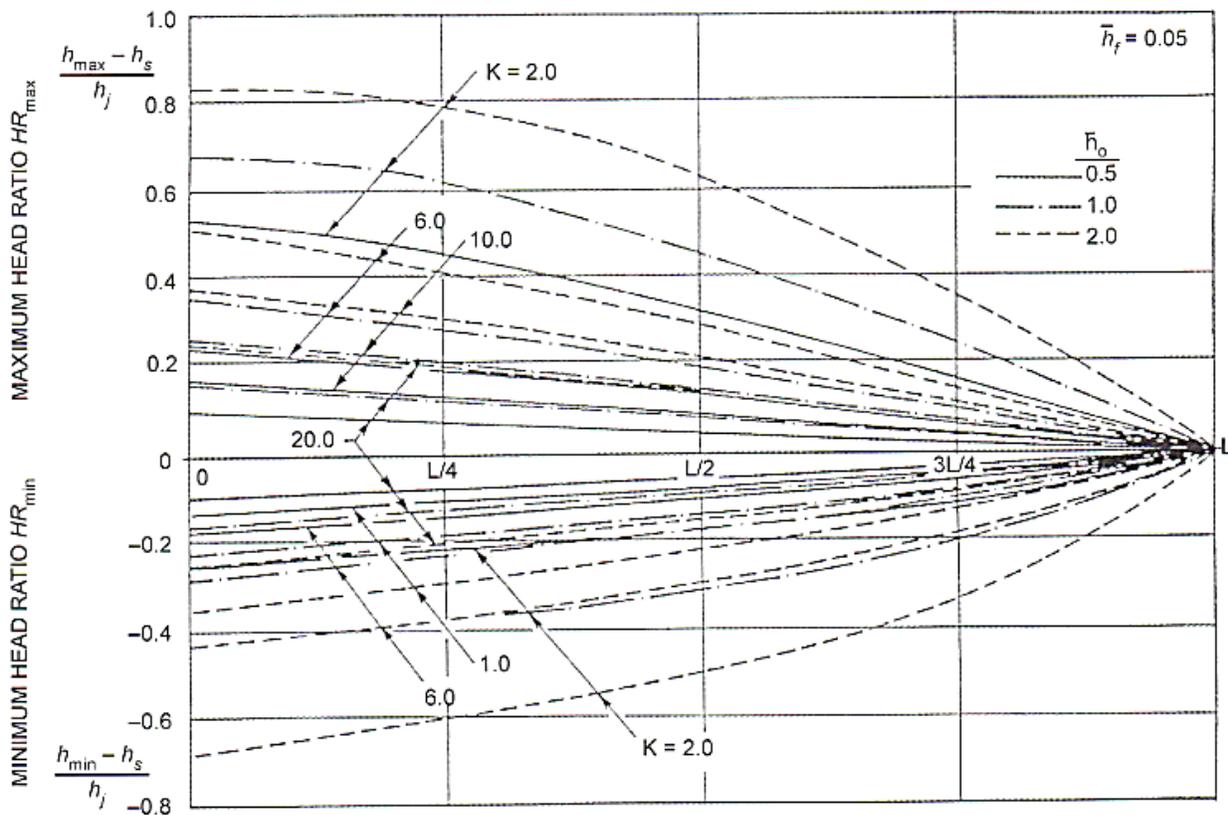
GRÁFICA C-4. RELACIÓN DE CARGA DE PRESIÓN MÁXIMA Y MÍNIMA CUANDO EL PARÁMETRO DE FRICCIÓN $h_f=0.2$ Y SIN REDUCCIÓN DE DIÁMETRO DE CONEXIÓN.



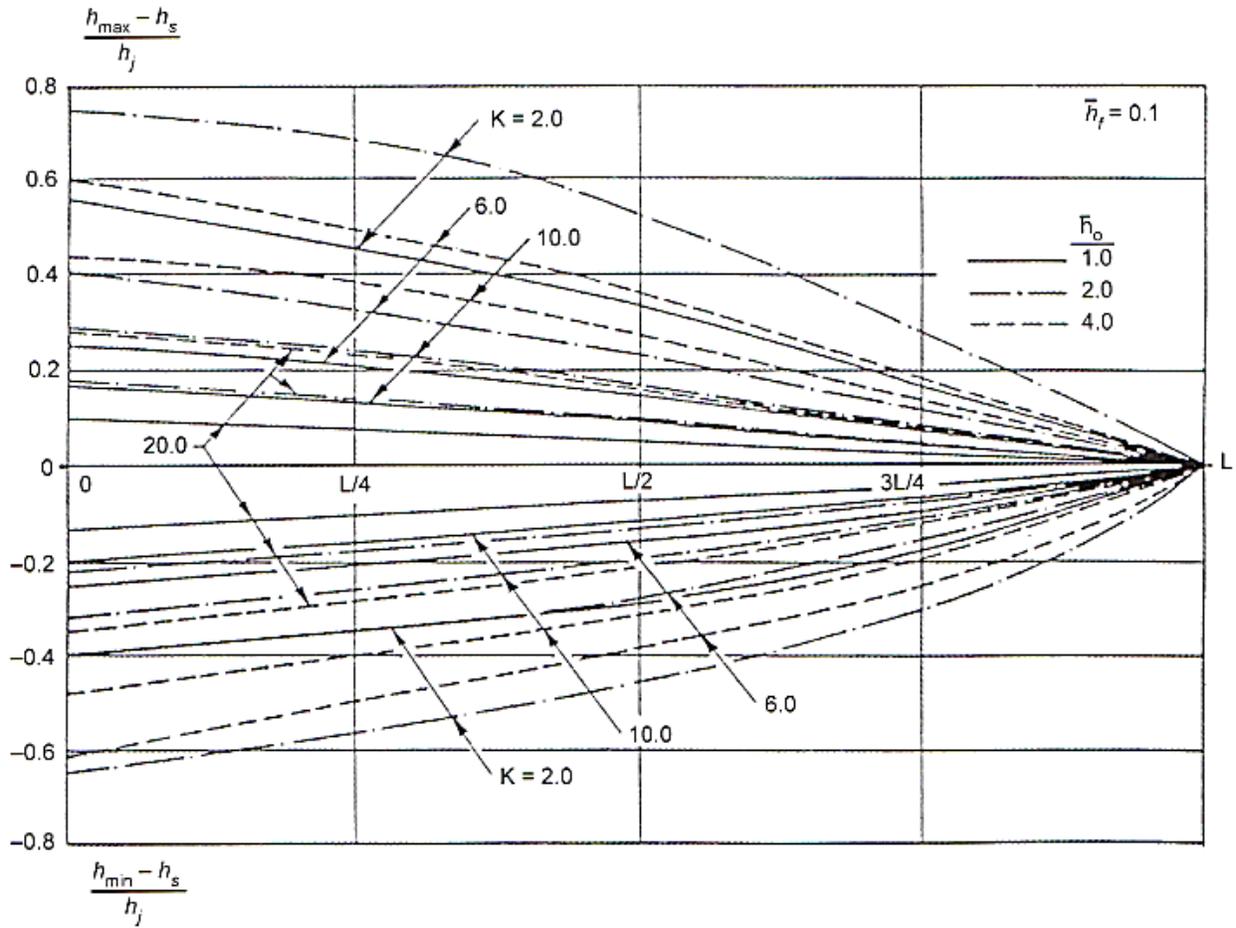
GRÁFICA C-5. RELACIÓN DE CARGA DE PRESIÓN MÁXIMA Y MÍNIMA CUANDO EL PARÁMETRO DE FRICCIÓN $h_f=0.5$ Y SIN REDUCCIÓN DE DIÁMETRO DE CONEXIÓN.



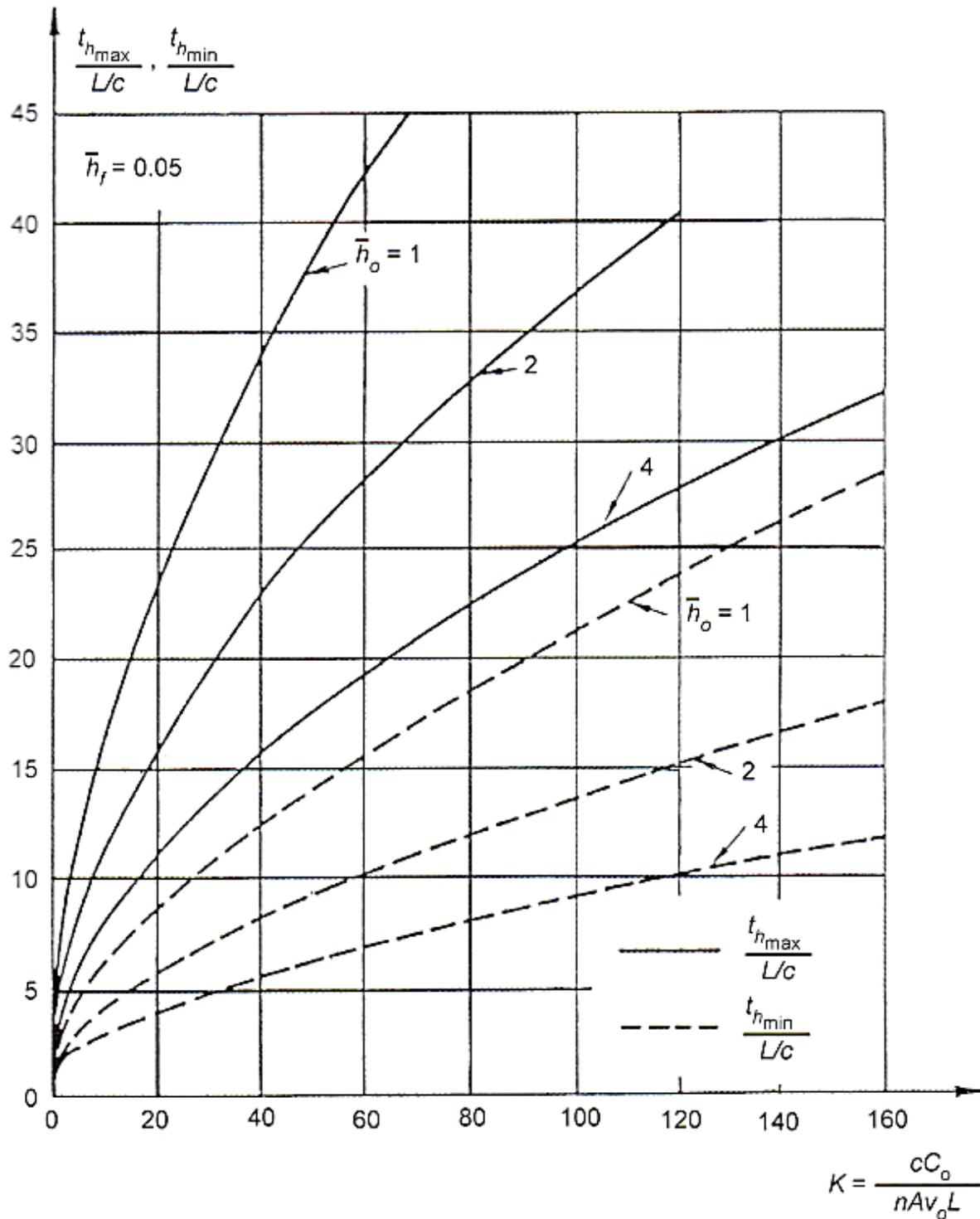
GRÁFICA C-6. RELACIÓN DE ENVOLVENTES DE CARGA DE PRESIÓN MÁXIMA Y MÍNIMA CONTRA LA LONGITUD DE LA TUBERÍA, CUANDO EL PARÁMETRO DE FRICCIÓN $h_f=0$.



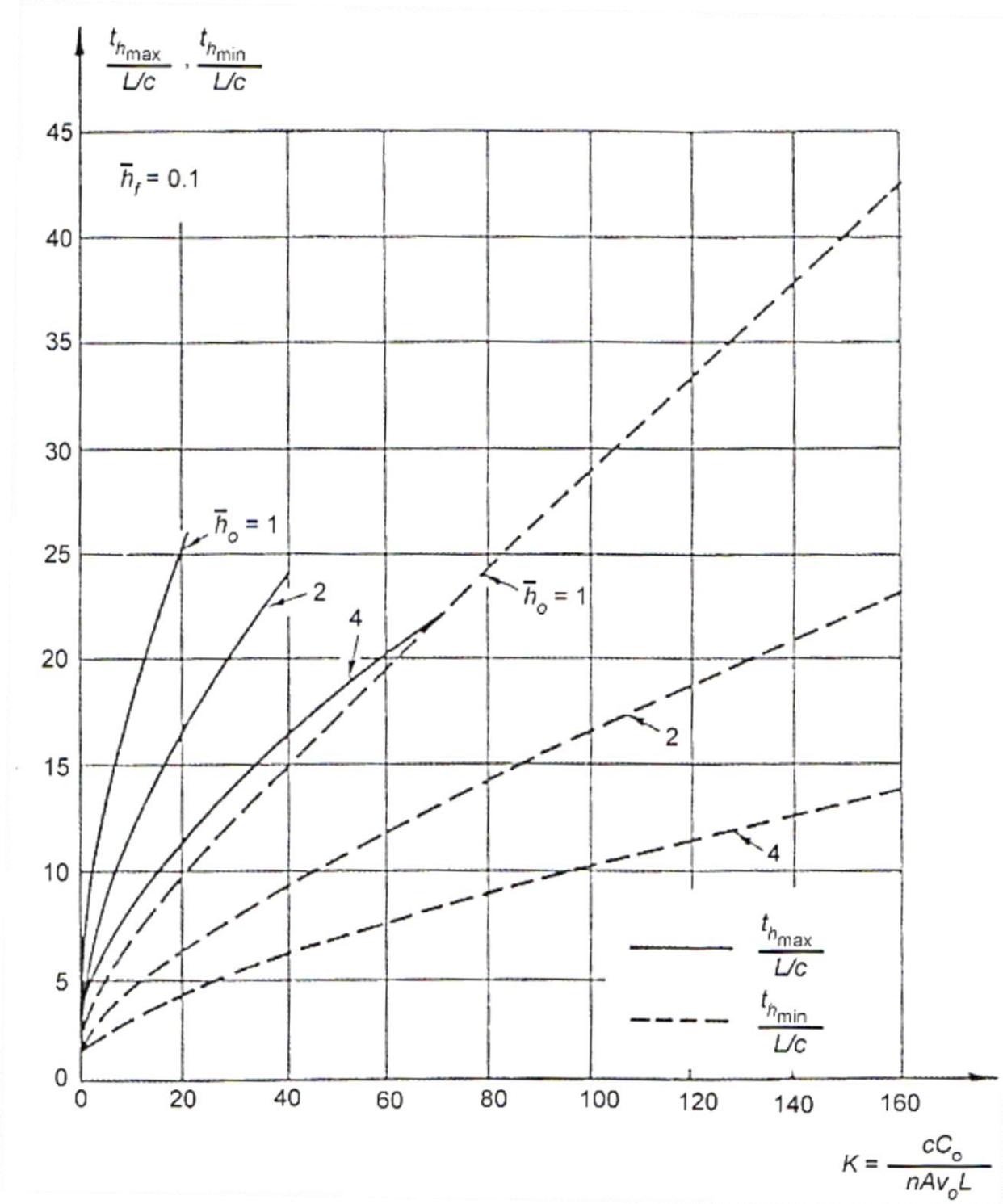
GRÁFICA C-7. RELACIÓN DE ENVOLVENTES DE CARGA DE PRESIÓN MÁXIMA Y MÍNIMA CONTRA LA LONGITUD DE LA TUBERÍA, CUANDO EL PARÁMETRO DE FRICCIÓN $h_f=0.05$.



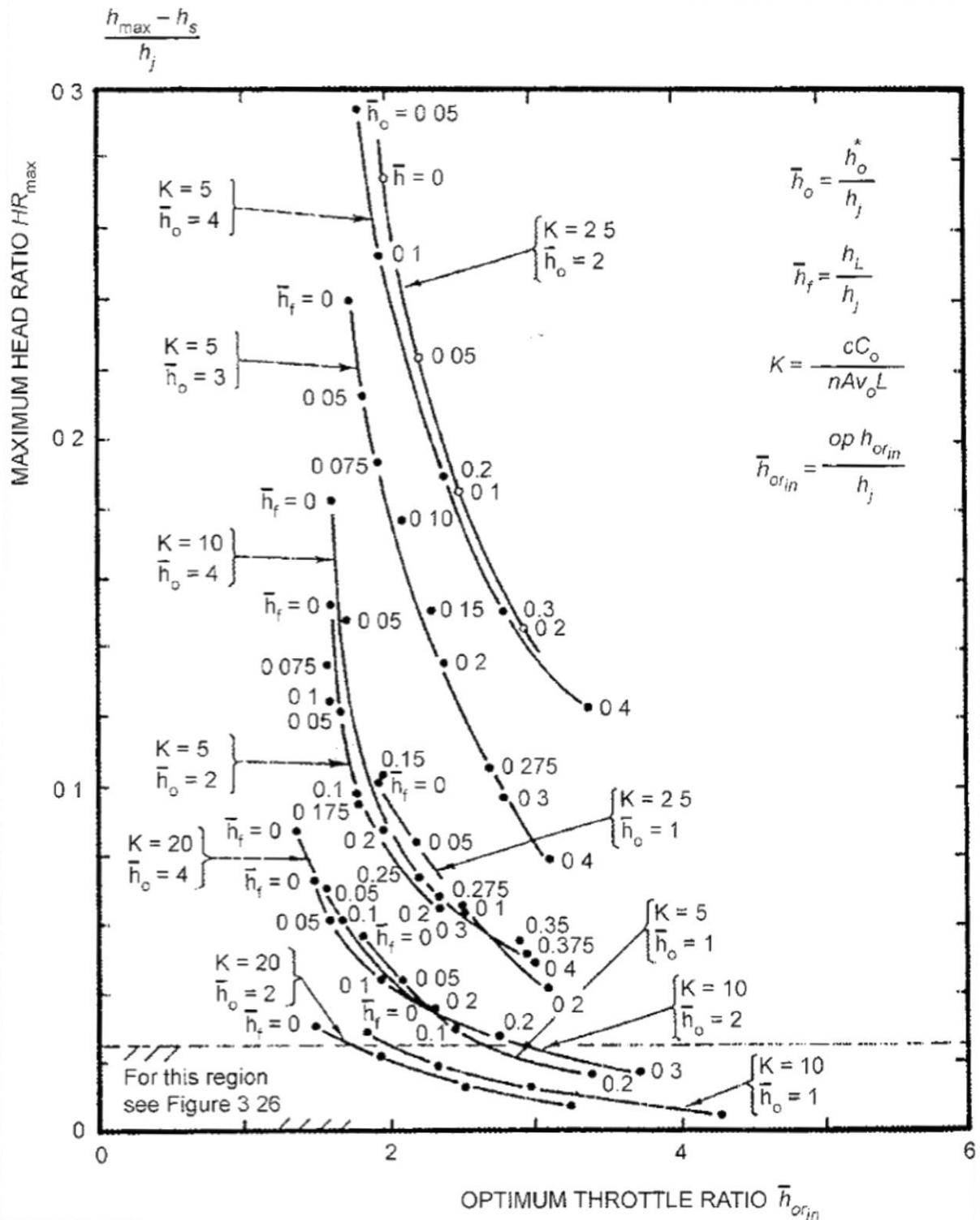
GRÁFICA C-8. RELACIÓN DE ENVOLVENTES DE CARGA DE PRESIÓN MÁXIMA Y MÍNIMA CONTRA LA LONGITUD DE LA TUBERÍA, CUANDO EL PARÁMETRO DE FRICCIÓN $\bar{h}_f=0.1$.



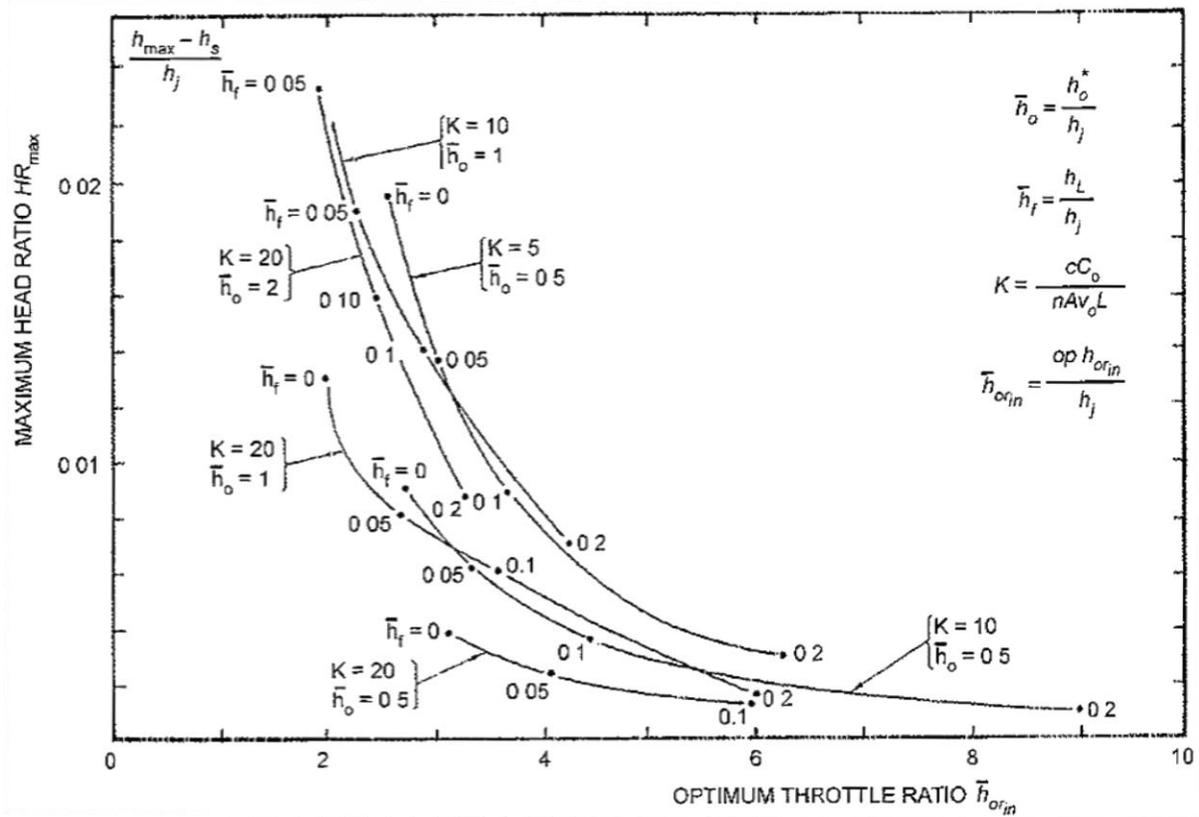
GRÁFICA C-9. TIEMPO (NO DIMENSIONAL) HASTA LA APARICIÓN DE LAS CARGAS DE PRESIÓN MÁXIMA Y MÍNIMA EN LA DESCARGA DE LA BOMBA LUEGO DE UN DISPARO DE BOMBA. PARÁMETRO DE FRICCIÓN $h_f = 0.05$



GRÁFICA C-10. TIEMPO (NO DIMENSIONAL) HASTA LA APARICIÓN DE LAS CARGAS DE PRESIÓN MÁXIMA Y MÍNIMA EN LA DESCARGA DE LA BOMBA LUEGO DE UN DISPARO DE BOMBA. PARÁMETRO DE FRICCIÓN $\bar{h}_f = 0.1$



GRÁFICA C-11. DIAGRAMA GENERALIZADO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE CÁMARAS DE AIRE CON UNA ÓPTIMA REDUCCIÓN DEL DIÁMETRO DE CONEXIÓN PARA ENTRADA DE FLUJO EN LAS INSTALACIONES DE BOMBEO - PARA GRANDES RELACIONES DE PRESIÓN MÁXIMA



GRÁFICA C-12. DIAGRAMA GENERALIZADO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE CÁMARAS DE AIRE CON UNA ÓPTIMA REDUCCIÓN DEL DIÁMETRO DE CONEXIÓN PARA ENTRADA DE FLUJO EN LAS INSTALACIONES DE BOMBEO - PARA GRANDES RELACIONES DE PRESIÓN MÁXIMA

E. RESULTADOS DE ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.

Opción 1 - A

Cota máxima en la envolvente de sobrepresiones - Cota en línea piezométrica perpendicular a ese punto

Cota mínima en la envolvente de depresiones - Cota en línea piezométrica perpendicular a ese punto

(Altura 3 bits)

	Generaciones																				
	1ra	2da	3ra	4ta	5ta	6ta	7ma	8va	9na	10ma	11ma	12ma	13ra	14ta	15ta	16ta	17ma	18va	19na	20ma	
1	4.9891E-06	4.7802E-06	4.7641E-06	4.7641E-06	6.1963E-06	5.2680E-06	6.1963E-06	6.3565E-06	5.2581E-06	6.7284E-06	6.2558E-06	6.2933E-06	6.4073E-06	6.3706E-06	6.1947E-06	6.7250E-06	6.2550E-06	6.4073E-06	6.7250E-06	6.7212E-06	28%
2	6.2571E-06	5.2580E-06	5.8887E-06	5.2574E-06	6.3197E-06	4.9888E-06	6.2564E-06	6.7179E-06	6.2546E-06	6.3560E-06	5.2577E-06	5.0079E-06	6.2591E-06	5.3372E-06	6.1937E-06	6.1937E-06	6.1937E-06	6.7284E-06	6.4465E-06	6.2550E-06	12%
3	4.9897E-06	4.5731E-06	5.5370E-06	5.2388E-06	5.2380E-06	5.2378E-06	6.2591E-06	4.9895E-06	6.2550E-06	6.7250E-06	4.9888E-06	6.7284E-06	6.7284E-06	4.5672E-06	6.2564E-06	6.2583E-06	6.1956E-06	6.4073E-06	6.4845E-06	6.7179E-06	28%
4	5.5377E-06	5.3721E-06	5.2580E-06	6.7230E-06	4.9888E-06	5.2572E-06	6.7179E-06	5.2388E-06	6.3565E-06	6.2583E-06	6.3668E-06	4.9897E-06	5.0082E-06	6.7161E-06	6.1930E-06	6.2558E-06	6.2583E-06	6.1930E-06	6.4465E-06	6.7161E-06	20%
5	4.9893E-06	6.7212E-06	6.2550E-06	6.2591E-06	6.7161E-06	5.2381E-06	6.3197E-06	6.7179E-06	6.2583E-06	5.2394E-06	4.9895E-06	4.9897E-06	6.3560E-06	6.1930E-06	6.1930E-06	6.2546E-06	6.2583E-06	6.2583E-06	6.4845E-06	6.1940E-06	28%
6	4.5612E-06	5.5167E-06	4.9889E-06	5.2578E-06	4.9897E-06	5.0082E-06	5.0078E-06	6.3706E-06	5.2388E-06	6.9893E-06	6.7179E-06	6.7179E-06	4.5611E-06	6.2564E-06	6.4465E-06	6.7212E-06	6.7195E-06	6.1950E-06	6.2550E-06	6.7212E-06	34%
7	5.8587E-06	4.7802E-06	4.9888E-06	5.2380E-06	5.2388E-06	5.2388E-06	6.3560E-06	6.3560E-06	6.2546E-06	6.2546E-06	6.4465E-06	6.4073E-06	5.5177E-06	6.1937E-06	6.3197E-06	6.2546E-06	6.4845E-06	6.7195E-06	6.1920E-06	6.1956E-06	16%
8	6.2571E-06	4.7802E-06	4.7800E-06	5.2388E-06	5.2574E-06	5.0078E-06	6.3560E-06	6.2571E-06	6.4465E-06	6.2546E-06	6.7179E-06	6.2577E-06	5.5170E-06	6.1937E-06	6.1937E-06	6.2546E-06	6.4845E-06	6.7195E-06	6.1920E-06	6.3706E-06	12%
9	5.2572E-06	6.4467E-06	4.7643E-06	4.9897E-06	6.3706E-06	6.3706E-06	6.7179E-06	6.3197E-06	5.0082E-06	6.7284E-06	6.3565E-06	4.9888E-06	6.2577E-06	6.4073E-06	6.3706E-06	6.4845E-06	6.2558E-06	6.2577E-06	6.7195E-06	6.4465E-06	16%
10	5.8286E-06	4.9899E-06	6.2546E-06	5.0078E-06	5.0078E-06	5.0078E-06	6.4845E-06	5.2578E-06	6.4073E-06	5.2388E-06	5.2390E-06	6.1963E-06	6.2577E-06	6.4073E-06	5.0076E-06	6.7179E-06	6.3565E-06	6.4465E-06	6.7195E-06	6.3565E-06	16%
11	4.9886E-06	5.2572E-06	5.2572E-06	6.2558E-06	5.2572E-06	5.2383E-06	5.2581E-06	5.2390E-06	5.0079E-06	6.4073E-06	4.9888E-06	4.9888E-06	5.0082E-06	6.3197E-06	5.5363E-06	6.7284E-06	6.7161E-06	4.9893E-06	6.2583E-06	6.7179E-06	28%
12	5.2577E-06	4.7643E-06	4.5738E-06	4.7651E-06	5.0082E-06	4.7386E-06	6.7284E-06	6.4845E-06	6.3197E-06	6.7259E-06	5.5165E-06	6.2546E-06	4.9888E-06	6.4073E-06	6.7179E-06	6.2577E-06	6.7230E-06	6.3706E-06	5.2571E-06	6.7284E-06	28%
13	5.8281E-06	5.0079E-06	5.2396E-06	5.0079E-06	5.0079E-06	4.7651E-06	6.2564E-06	6.1930E-06	5.2383E-06	4.9895E-06	6.7284E-06	6.7284E-06	6.2558E-06	6.7212E-06	6.1930E-06	6.2583E-06	6.3560E-06	6.3706E-06	6.4073E-06	6.4073E-06	16%
14	5.5375E-06	5.2396E-06	5.2388E-06	6.1926E-06	6.4073E-06	5.0078E-06	4.9893E-06	6.1940E-06	6.3706E-06	5.0083E-06	6.7230E-06	6.2564E-06	6.2558E-06	6.7212E-06	6.4465E-06	6.4073E-06	6.1937E-06	6.2591E-06	6.1950E-06	6.4465E-06	24%
15	4.7645E-06	4.5733E-06	4.9889E-06	4.9889E-06	6.7259E-06	5.2384E-06	6.3706E-06	6.1937E-06	5.0079E-06	5.2394E-06	4.9893E-06	6.3197E-06	6.3197E-06	6.4845E-06	6.7284E-06	6.7179E-06	6.1930E-06	6.4073E-06	6.4465E-06	6.1940E-06	31%
16	5.2577E-06	6.7250E-06	6.7250E-06	6.7259E-06	5.0077E-06	6.2384E-06	5.0077E-06	4.9891E-06	5.0076E-06	6.4073E-06	6.7230E-06	6.7259E-06	6.7179E-06	5.0082E-06	5.0082E-06	6.4465E-06	6.7230E-06	6.1930E-06	6.1930E-06	6.4465E-06	24%
17	4.7647E-06	5.0079E-06	4.9899E-06	6.2568E-06	5.2388E-06	5.2380E-06	5.254E-06	6.4073E-06	5.0076E-06	6.7230E-06	6.7212E-06	6.7259E-06	6.7179E-06	6.1947E-06	6.4845E-06	6.7284E-06	6.4465E-06	6.4845E-06	6.7250E-06	6.1947E-06	31%
18	4.9893E-06	5.2383E-06	5.2388E-06	5.0077E-06	5.2380E-06	6.1937E-06	5.2388E-06	6.7259E-06	5.2581E-06	6.4073E-06	6.1963E-06	4.9899E-06	6.1950E-06	6.2564E-06	6.2564E-06	6.4845E-06	6.7230E-06	6.7230E-06	6.2571E-06	6.2571E-06	28%
19	5.8585E-06	5.2394E-06	4.5608E-06	5.2378E-06	5.2380E-06	5.0077E-06	5.2580E-06	6.4073E-06	6.4073E-06	6.7284E-06	5.0083E-06	6.1940E-06	6.2564E-06	6.3706E-06	6.2574E-06	6.7212E-06	6.7195E-06	6.2550E-06	5.8995E-06	6.7179E-06	16%
20	6.1937E-06	4.9891E-06	6.3706E-06	6.7250E-06	6.7250E-06	6.1956E-06	6.1956E-06	6.9888E-06	5.0082E-06	6.7250E-06	5.0083E-06	6.7250E-06	6.4073E-06	6.4073E-06	6.1930E-06	6.1926E-06	6.4073E-06	6.7284E-06	6.7284E-06	6.4845E-06	11%
21	4.5612E-06	6.2583E-06	4.7651E-06	6.4073E-06	5.0083E-06	6.7212E-06	6.3706E-06	6.3706E-06	6.3565E-06	6.4073E-06	5.2388E-06	5.2381E-06	6.7161E-06	6.1950E-06	6.45734E-06	6.4467E-06	6.2564E-06	6.7161E-06	6.1930E-06	6.7259E-06	34%
22	6.4467E-06	4.7804E-06	4.7802E-06	6.2564E-06	5.2388E-06	5.2378E-06	6.1963E-06	6.2591E-06	6.4073E-06	6.2568E-06	6.2568E-06	6.7212E-06	6.7212E-06	6.3565E-06	6.7212E-06	6.3706E-06	6.7284E-06	6.7212E-06	6.7284E-06	6.2591E-06	6%
23	5.2574E-06	5.3721E-06	4.5737E-06	5.2580E-06	5.2577E-06	6.3560E-06	4.7645E-06	4.9888E-06	6.2550E-06	6.7195E-06	6.1930E-06	6.7284E-06	6.7212E-06	5.2574E-06	6.2550E-06	6.1930E-06	6.7230E-06	6.1956E-06	6.1956E-06	6.1940E-06	24%
24	5.4344E-06	5.3025E-06	5.2300E-06	5.4615E-06	5.5793E-06	5.5672E-06	5.9518E-06	5.9412E-06	5.8536E-06	6.0784E-06	5.9610E-06	6.0085E-06	5.9574E-06	6.1057E-06	6.1706E-06	6.4305E-06	6.3933E-06	6.3933E-06	6.3933E-06	6.4845E-06	6%

	4000	98%	99%	100%	103%	102%	108%	109%	108%	112%	110%	111%	110%	112%	110%	111%	110%	112%	118%	117%	118%	119%
B	4000	98%	99%	100%	103%	102%	108%	109%	108%	112%	110%	111%	110%	112%	110%	111%	110%	112%	118%	117%	118%	119%
C	6.4467E-06	6.7250E-06	6.3706E-06	6.7230E-06	6.7259E-06	6.7284E-06	6.4845E-06	6.7259E-06	6.4845E-06	6.7284E-06	6.7284E-06	6.7284E-06	6.7284E-06	6.7230E-06	6.7284E-06	6.7284E-06						
D	1.0.50.5	3.50.140.5	3.50.170.5	4.0.130.5	4.50.110.5	4.50.110.5	1.50.330.5	4.0.130.5	4.50.110.5	4.50.110.5	4.50.110.5	4.50.110.5	4.50.110.5	3.0.170.5	4.50.110.5	4.50.110.5	4.50.110.5	4.50.110.5	4.50.110.5	4.50.110.5	4.50.110.5	4.50.110.5
E	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	

A Promedio de los factores de aptitud, para ver como van evolucionando por generación las cámaras
 B Factor K elegido respecto a la Relación $\Sigma \Delta p \cdot K$
 C Factor de aptitud máximo de cada generación
 D Altura - Área - Volumen total para la cámara con mejor factor de aptitud de cada generación
 E Precio de la cámara con mejor factor de aptitud de cada generación
 F Porcentaje de mejora de cada generación, con respecto a la 1ra Generación

TABLA D-2 SIMULACIÓN VERSIÓN 1.

Opción 1 - B
 Cota máxima en la envolvente de sobrepresiones - Cota en la piezométrica perpendicular a ese punto
 Cota mínima en la envolvente de depresiones - Promedio de cotas del perfil de la línea de 0+038 a 0+600
 (Altura 3 bits)

Ira	Generaciones																			
	2da	3ra	4ta	5ta	6ta	7ma	8va	9na	10na	11na	12na	13ta	14ta	15ta	16ta	17ma	18va	19na	20na	
1	4.470E-06	6.804E-06	5.176E-06	5.738E-06	6.794E-06	6.282E-06	5.734E-06	6.739E-06	6.282E-06	6.789E-06	6.023E-06	6.176E-06	6.126E-06							
2	5.175E-06	5.421E-06	5.140E-06	6.088E-06	6.794E-06	5.174E-06	6.255E-06	6.327E-06	6.255E-06	6.126E-06										
3	5.457E-06	5.797E-06	5.797E-06	5.176E-06	5.170E-06	5.141E-06	6.087E-06	5.140E-06	6.128E-06	6.088E-06	6.794E-06	6.126E-06								
4	6.809E-06	4.928E-06	6.182E-06	5.738E-06	5.170E-06	5.734E-06	6.248E-06	6.248E-06	6.124E-06	6.809E-06	6.794E-06	6.126E-06								
5	4.470E-06	6.128E-06	4.892E-06	6.802E-06	6.259E-06	6.259E-06	5.786E-06	5.138E-06	6.262E-06	5.140E-06	6.243E-06	6.126E-06								
6	4.928E-06	4.928E-06	5.735E-06	5.138E-06	6.259E-06	6.259E-06	5.786E-06	5.138E-06	6.262E-06	5.140E-06	6.243E-06	6.126E-06								
7	5.738E-06	5.176E-06	4.700E-06	6.327E-06	4.892E-06	4.927E-06	5.170E-06	5.140E-06	6.259E-06	6.259E-06	6.04E-06	6.126E-06								
8	4.927E-06	6.124E-06	5.420E-06	4.891E-06	6.124E-06	6.124E-06	5.732E-06	5.732E-06	6.259E-06	6.259E-06	6.04E-06	6.126E-06								
9	5.738E-06	5.419E-06	4.928E-06	5.774E-06	6.809E-06	6.126E-06	6.255E-06	6.255E-06	6.126E-06											
10	4.700E-06	5.738E-06	5.738E-06	6.794E-06	6.794E-06	6.794E-06	6.327E-06	6.327E-06	6.126E-06											
11	4.891E-06	5.794E-06	5.794E-06	6.802E-06	6.259E-06	6.259E-06	5.786E-06	5.138E-06	6.262E-06	5.140E-06	6.243E-06	6.126E-06								
12	6.087E-06	5.176E-06	6.023E-06	6.259E-06	5.738E-06	5.140E-06	4.892E-06	6.802E-06	6.023E-06	6.327E-06	6.794E-06	6.126E-06								
13	4.670E-06	5.141E-06	5.140E-06	5.175E-06	6.794E-06	4.892E-06	5.786E-06	5.138E-06	6.262E-06	5.140E-06	6.243E-06	6.126E-06								
14	6.023E-06	6.802E-06	6.256E-06	5.739E-06	6.087E-06	6.794E-06	6.114E-06	5.138E-06	6.262E-06	5.140E-06	6.243E-06	6.126E-06								
15	4.700E-06	6.794E-06	6.243E-06	6.794E-06	5.735E-06	4.927E-06	5.176E-06	6.255E-06	6.248E-06	6.248E-06	6.126E-06									
16	4.700E-06	6.789E-06	5.459E-06	5.798E-06	6.182E-06	5.140E-06	4.700E-06	6.088E-06	6.259E-06	6.126E-06										
17	6.127E-06	5.176E-06	6.798E-06	5.138E-06	5.734E-06	5.138E-06	6.088E-06	5.141E-06	6.126E-06											
18	4.927E-06	6.114E-06	5.419E-06	4.700E-06	5.170E-06	5.141E-06	6.088E-06	5.177E-06	6.023E-06	6.087E-06	6.127E-06	6.126E-06								
19	4.892E-06	4.890E-06	4.470E-06	6.806E-06	5.734E-06	6.182E-06	4.927E-06	5.141E-06	6.088E-06	5.140E-06	6.243E-06	6.126E-06								
20	5.739E-06	6.248E-06	6.125E-06	6.088E-06	6.794E-06	6.809E-06	5.176E-06	6.802E-06	6.259E-06	5.140E-06	6.243E-06	6.126E-06								
21	6.248E-06	6.256E-06	5.176E-06	6.182E-06	6.802E-06	6.256E-06	4.890E-06	6.259E-06	6.259E-06	5.176E-06	6.259E-06	6.126E-06								
22	5.459E-06	5.419E-06	5.419E-06	5.419E-06	4.700E-06	6.243E-06	5.175E-06	5.140E-06	6.804E-06	6.127E-06	6.126E-06									
23	5.421E-06	6.251E-06	6.259E-06	5.794E-06	6.794E-06	6.023E-06	6.804E-06	6.794E-06	6.794E-06	6.794E-06	6.794E-06	6.126E-06								
24	6.114E-06	5.732E-06	5.798E-06	4.679E-06	4.891E-06	6.088E-06	5.797E-06	6.794E-06	5.457E-06	6.088E-06	6.794E-06	6.126E-06								
A→	5.365E-06	5.796E-06	5.637E-06	5.729E-06	5.990E-06	5.812E-06	5.627E-06	5.838E-06	6.007E-06	6.126E-06	6.346E-06	6.126E-06								
B→	8000	108%	105%	107%	112%	109%	105%	109%	112%	114%	119%	118%	119%	119%	119%	119%	118%	118%	118%	122%

A Promedio de los factores de aptitud, para ver como van evolucionando por generación las cámaras
 B Factor K elegido respecto a la Relación s - ZapK
 C Factor de aptitud máximo de cada generación

D Altura - Área - Volumen para la cámara con mejor factor de aptitud de cada generación
 E Precio de la cámara con mejor factor de aptitud de cada generación
 F Porcentaje de mejora de cada generación, con respecto a la 1ra Generación

TABLA D-3 SIMULACIÓN VERSIÓN 2.

Opción 1 - C

Promedio de las cotas de la envolvente de sobrepresiones del cadenamiento 0+000 al 0+030 - Promedio de las cotas de la línea piezométrica de operación normal del cadenamiento 0+000 al 0+030.
 Promedio de las cotas en la envolvente de depresiones del cadenamiento 0+000 al 0+030 - Promedio de las cotas en la línea piezométrica de operación normal del cadenamiento 0+000 al 0+030.
 (Altura 3 bits)

	Generaciones																					
	1a	2da	3ra	4ta	5ta	6ta	7ma	8va	9na	10ma	11ma	12ma	13ra	14a	15a	16a	17ma	18va	19na	20ma		
1	4.929E-06	4.730E-06	5.366E-06	5.684E-06	4.466E-06	5.4194E-06	5.4349E-06	4.3900E-06	5.6840E-06	5.6740E-06	5.3807E-06	5.6878E-06	5.6878E-06	5.6840E-06	5.4271E-06	5.3975E-06	4.8248E-06	5.6677E-06	5.6559E-06	5.194E-06	32%	
2	5.1599E-06	5.1598E-06	5.4349E-06	5.6840E-06	5.4349E-06	5.4117E-06	5.4117E-06	5.4117E-06	5.6801E-06	5.1261E-06	5.3979E-06	5.6740E-06	5.6801E-06	5.6599E-06	5.4194E-06	5.4271E-06	5.6840E-06	5.3979E-06	5.6740E-06	5.6801E-06	5%	
3	5.4720E-06	5.6840E-06	5.6740E-06	5.3458E-06	4.9293E-06	5.4194E-06	5.6878E-06	5.3975E-06	5.6559E-06	5.6878E-06	5.2227E-06	5.6677E-06	5.6801E-06	5.4428E-06	5.6801E-06	5.4428E-06	4.8248E-06	5.6840E-06	5.4117E-06	5.6740E-06	20%	
4	5.1652E-06	5.1261E-06	5.1677E-06	5.6599E-06	5.6740E-06	5.4349E-06	4.3298E-06	4.3298E-06	5.6801E-06	5.4117E-06	5.4271E-06	5.6740E-06	5.6740E-06	5.6840E-06	5.4428E-06	4.3298E-06	5.3975E-06	5.4428E-06	5.4271E-06	5.6677E-06	24%	
5	5.4619E-06	5.1652E-06	5.6740E-06	5.6599E-06	5.4271E-06	5.4428E-06	4.276E-06	4.276E-06	5.6801E-06	5.4043E-06	5.6677E-06	5.4194E-06	5.4349E-06	5.6840E-06	5.4428E-06	5.3887E-06	5.4271E-06	5.6616E-06	5.4349E-06	5.6616E-06	15%	
6	5.4671E-06	4.8248E-06	5.4271E-06	5.3286E-06	5.4271E-06	5.4271E-06	5.4271E-06	5.4271E-06	5.6801E-06	5.6616E-06	5.1261E-06	5.6840E-06	5.6878E-06	5.3033E-06	5.6878E-06	5.6616E-06	5.4428E-06	5.3887E-06	5.6488E-06	5.6740E-06	20%	
7	5.3130E-06	5.1684E-06	5.4271E-06	5.4271E-06	5.4271E-06	5.4271E-06	5.4271E-06	5.4271E-06	5.6801E-06	5.4043E-06	5.6801E-06	5.6840E-06	5.6878E-06	5.6840E-06	5.6801E-06	5.3887E-06	5.3887E-06	5.6616E-06	5.4349E-06	5.4271E-06	16%	
8	5.6740E-06	4.4075E-06	4.9242E-06	4.3900E-06	4.8333E-06	5.6840E-06	4.3857E-06	4.8168E-06	5.4349E-06	4.4075E-06	5.4428E-06	5.6740E-06	5.6740E-06	5.6840E-06	5.6801E-06	5.3975E-06	5.6740E-06	5.6740E-06	5.4043E-06	5.4117E-06	16%	
9	4.7291E-06	5.4874E-06	5.4271E-06	5.6599E-06	5.6740E-06	5.6740E-06	5.4194E-06	4.3554E-06	5.4271E-06	4.3554E-06	5.3975E-06	5.6740E-06	5.6740E-06	5.6840E-06	5.6801E-06	5.3975E-06	5.4428E-06	5.4428E-06	5.4349E-06	5.6840E-06	35%	
10	5.4619E-06	4.8162E-06	5.3975E-06	5.1677E-06	4.9242E-06	5.2588E-06	5.6878E-06	4.4664E-06	5.1261E-06	5.1261E-06	5.6840E-06	5.6878E-06	5.6878E-06	5.4349E-06	5.6878E-06	4.9271E-06	5.3975E-06	5.6488E-06	5.4194E-06	5.3975E-06	20%	
11	4.8333E-06	4.4075E-06	5.3501E-06	5.4982E-06	5.3501E-06	4.4276E-06	5.6878E-06	4.4462E-06	5.6488E-06	5.6488E-06	5.6878E-06	5.6616E-06	5.6616E-06	5.4428E-06	5.6559E-06	5.4043E-06	5.4428E-06	5.4428E-06	5.4349E-06	5.3887E-06	31%	
12	4.8189E-06	4.8275E-06	5.3501E-06	5.4349E-06	5.4349E-06	5.4428E-06	5.6677E-06	5.3887E-06	5.6559E-06	5.4271E-06	4.3857E-06	4.4664E-06	5.6488E-06	5.4428E-06	5.4043E-06	5.4271E-06	5.4194E-06	5.6488E-06	5.6488E-06	5.3975E-06	31%	
13	4.7349E-06	4.9267E-06	5.3501E-06	5.6616E-06	5.4874E-06	5.3975E-06	5.4428E-06	4.4664E-06	5.6616E-06	5.4194E-06	5.6878E-06	5.6488E-06	5.6488E-06	5.6740E-06	5.6740E-06	5.4043E-06	4.9271E-06	5.6559E-06	5.6677E-06	5.6488E-06	35%	
14	5.4619E-06	4.3298E-06	5.4271E-06	5.6801E-06	4.4075E-06	5.1581E-06	5.4117E-06	5.1041E-06	5.6840E-06	5.6801E-06	5.4043E-06	5.3887E-06	5.4428E-06	5.6740E-06	5.6559E-06	5.4075E-06	5.6616E-06	5.4271E-06	5.6677E-06	5.6677E-06	35%	
15	4.7362E-06	5.3374E-06	5.6677E-06	4.4075E-06	5.6740E-06	5.6740E-06	4.9887E-06	5.1900E-06	5.6677E-06	5.6559E-06	5.6677E-06	4.3900E-06	4.4462E-06	5.6616E-06	5.6616E-06	5.2888E-06	5.4271E-06	5.6616E-06	5.6740E-06	5.6801E-06	35%	
16	5.4827E-06	4.3554E-06	5.1677E-06	4.9121E-06	5.4349E-06	5.6801E-06	4.3554E-06	5.4043E-06	5.6677E-06	5.6488E-06	5.428E-06	5.6878E-06	5.3887E-06	4.3900E-06	5.6488E-06	5.6559E-06	5.6878E-06	5.3975E-06	5.6488E-06	5.6677E-06	20%	
17	4.9242E-06	5.3667E-06	5.4271E-06	5.3374E-06	5.3286E-06	5.4271E-06	5.1730E-06	5.6801E-06	5.3887E-06	5.4271E-06	5.6559E-06	5.4194E-06	5.4043E-06	5.6801E-06	5.6801E-06	5.4194E-06	5.4194E-06	5.4271E-06	5.3887E-06	5.6878E-06	32%	
18	5.6878E-06	5.354E-06	5.2886E-06	5.2400E-06	5.2051E-06	5.1684E-06	5.6878E-06	4.3657E-06	5.4428E-06	4.4462E-06	5.4043E-06	5.6840E-06	5.3887E-06	5.4043E-06	5.6801E-06	5.4194E-06	5.4428E-06	4.9168E-06	5.4194E-06	5.4271E-06	16%	
19	4.8304E-06	4.9271E-06	5.3079E-06	5.4194E-06	5.3887E-06	4.8304E-06	4.3298E-06	4.9283E-06	5.3975E-06	5.6488E-06	5.4194E-06	4.4075E-06	5.4349E-06	5.4194E-06	5.6616E-06	5.6677E-06	5.4428E-06	5.4428E-06	5.3975E-06	5.6801E-06	16%	
20	5.6830E-06	5.354E-06	4.9242E-06	5.4982E-06	5.4428E-06	5.6677E-06	4.9283E-06	4.276E-06	5.4428E-06	4.276E-06	5.3887E-06	5.6616E-06	5.6599E-06	5.3887E-06	5.6488E-06	5.6740E-06	5.6677E-06	5.3887E-06	5.4271E-06	5.4271E-06	10%	
21	4.3298E-06	5.4619E-06	4.4462E-06	5.6801E-06	5.6840E-06	5.1041E-06	5.4194E-06	4.3657E-06	5.3887E-06	4.3554E-06	5.4428E-06	5.6677E-06	5.6677E-06	5.6677E-06	5.4117E-06	5.6488E-06	5.4117E-06	5.6488E-06	5.4271E-06	5.6559E-06	4%	
22	4.9271E-06	4.4462E-06	5.4117E-06	5.6801E-06	4.8275E-06	5.3339E-06	5.1900E-06	5.4271E-06	5.2400E-06	5.4271E-06	5.4043E-06	5.4043E-06	5.4043E-06	5.4428E-06	5.4349E-06	5.3975E-06	5.6740E-06	5.6488E-06	5.6559E-06	5.4194E-06	32%	
23	5.4827E-06	5.6488E-06	5.1589E-06	5.4720E-06	5.3975E-06	5.4194E-06	5.6878E-06	5.1684E-06	4.3554E-06	5.6740E-06	5.1589E-06	5.1589E-06	5.1589E-06	5.1589E-06	5.1589E-06	5.3975E-06	5.6740E-06	5.6559E-06	5.4271E-06	5.6559E-06	20%	
24	4.3657E-06	5.4117E-06	4.9293E-06	5.1677E-06	5.1128E-06	4.3554E-06	5.2051E-06	5.4194E-06	5.6677E-06	5.6801E-06	5.4349E-06	5.3900E-06	5.4349E-06	5.6616E-06	5.6878E-06	5.4043E-06	5.4194E-06	5.3887E-06	5.6801E-06	5.6740E-06	4%	
A>	5.1289E-06	5.0298E-06	5.2843E-06	5.3503E-06	5.1739E-06	5.3073E-06	5.1866E-06	5.0416E-06	5.3947E-06	5.3398E-06	5.4186E-06	5.3628E-06	5.4710E-06	5.4594E-06	5.4538E-06	5.4057E-06	5.4144E-06	5.5363E-06	5.5209E-06	5.5728E-06		
B>	6000	98%	103%	104%	101%	103%	101%	98%	105%	104%	106%	105%	107%	108%	106%	105%	108%	108%	108%	109%	F+*	
C>	5.6878E-06	5.6840E-06	5.6740E-06	5.6840E-06	5.6840E-06	5.6840E-06	5.6878E-06	5.6801E-06	5.6840E-06	5.6878E-06												
D>	1-1.5-1.5	1.5-1.5	2.5-0.6-1.5	1.5-1.5	1.5-1.5	1.5-1.5	1.5-1.5	2.0-7.5-1.5	1.5-1.5	1.5-1.5	1.5-1.5	1.5-1.5	1.5-1.5	1.5-1.5	1.5-1.5	2.5-0.6-1.5	1.5-1.5	1.5-1.5	1.5-1.5	1.5-1.5	1-1.5-1.5	
E>	\$27.623-40	\$27.623-40	\$27.623-40	\$27.623-40	\$27.623-40	\$27.623-40	\$27.623-40	\$27.623-40	\$27.623-40	\$27.623-40	\$27.623-40	\$27.623-40	\$27.623-40	\$27.623-40	\$27.623-40	\$27.623-40	\$27.623-40	\$27.623-40	\$27.623-40	\$27.623-40	\$27.623-40	

A Promedio de los factores de aptitud, para ver como van evolucionando por generación las cámaras
 B Factor K elegido respecto a la Relación s - ZapK
 C Factor de aptitud máximo de cada generación
 D Altura - Area - Volumen para la cámara con mejor factor de aptitud de cada generación
 E Precio de la cámara con mejor factor de aptitud de cada generación
 F Porcentaje de mejora de cada generación, con respecto a la 1ra Generación

TABLA D-4 SIMULACIÓN VERSIÓN 3.

Promedio de las cotas en la envolvente de sobrepresiones del cadenamamiento 0+000 al 0+030 - Promedio de las cotas en la línea piezométrica del cadenamamiento 0+000 al 0+300.
 Promedio de las cotas en envolvente de depresiones del cadenamamiento 0+000 al 0+030 - Promedio de las cotas de la línea de conducción del cadenamamiento 0+030 al 0+600
 (Altura 3 bits)

Opción 1 - D

	Generadores																				# Cámara de aire
	1ra	2da	3ra	4ta	5ta	6ta	7ma	8va	9na	10na	11na	12na	13a	14a	15ta	16ta	17na	18va	19na	20na	
1	4.323E-06	4.729E-06	4.405E-06	5.0064E-06	4.7174E-06	5.1419E-06	4.7128E-06	4.8294E-06	4.6731E-06	4.3940E-06	4.6392E-06	4.6161E-06	5.1738E-06	4.3041E-06	4.3093E-06	4.6440E-06	4.6541E-06	5.0285E-06	4.7105E-06	5.1557E-06	32%
2	3.263E-06	4.347E-06	3.263E-06	5.0064E-06	5.1657E-06	2.1730E-06	4.6775E-06	5.2863E-06	4.729E-06	4.6677E-06	5.0009E-06	4.6677E-06	4.6221E-06	4.6631E-06	5.0622E-06	4.6801E-06	5.2863E-06	4.6867E-06	4.6677E-06	5.1898E-06	3%
3	4.347E-06	5.090E-06	3.673E-06	4.3033E-06	4.3033E-06	5.0064E-06	4.6405E-06	4.7028E-06	4.6729E-06	5.1738E-06	4.3041E-06	4.6341E-06	4.9745E-06	4.6405E-06	5.2278E-06	4.6221E-06	5.0285E-06	4.6801E-06	5.2278E-06	5.1557E-06	12%
4	5.1605E-06	4.9892E-06	3.6627E-06	3.1922E-06	4.3235E-06	5.0138E-06	5.1557E-06	4.7128E-06	5.0009E-06	5.0009E-06	4.9745E-06	4.6221E-06	5.1898E-06	4.6731E-06	4.6392E-06	4.6392E-06	5.1898E-06	4.6801E-06	4.6946E-06	5.1557E-06	19%
5	4.2729E-06	4.2729E-06	4.9745E-06	4.9745E-06	4.2989E-06	5.2864E-06	4.6221E-06	4.6317E-06	4.6317E-06	4.6248E-06	12%										
6	5.266E-06	4.366E-06	5.1243E-06	2.289E-06	4.3093E-06	4.342E-06	4.6541E-06	4.694E-06	5.1738E-06	4.6248E-06	12%										
7	4.2940E-06	3.673E-06	3.7411E-06	3.7246E-06	4.3666E-06	4.3321E-06	4.6775E-06	4.6248E-06	4.6248E-06	4.6248E-06	4.6248E-06	4.6248E-06	4.6248E-06	4.6248E-06	4.6248E-06	4.6248E-06	4.6248E-06	4.6248E-06	4.6248E-06	4.6248E-06	12%
8	4.6824E-06	4.229E-06	5.0064E-06	5.0064E-06	4.3033E-06	4.9892E-06	5.0622E-06	4.6248E-06	4.6248E-06	4.6248E-06	4.6248E-06	4.6248E-06	4.6248E-06	4.6248E-06	4.6248E-06	4.6248E-06	4.6248E-06	4.6248E-06	4.6248E-06	4.6248E-06	7%
9	4.6824E-06	4.229E-06	3.7246E-06	4.3033E-06	4.4784E-06	4.3666E-06	4.3093E-06	4.3235E-06	4.3940E-06	4.2989E-06	28%										
10	4.6127E-06	5.0138E-06	4.6127E-06	4.5706E-06	4.6127E-06	5.0570E-06	4.7028E-06	4.7277E-06	4.6494E-06	5.0009E-06	4.6494E-06	30%									
11	5.6507E-06	4.5084E-06	4.6677E-06	4.9674E-06	4.3041E-06	3.7765E-06	4.6440E-06	4.6440E-06	4.9877E-06	4.6541E-06	28%										
12	4.6440E-06	4.3279E-06	2.2493E-06	4.3321E-06	4.6499E-06	4.7229E-06	4.6631E-06	5.0285E-06	4.7189E-06	5.0285E-06	4.7189E-06	34%									
13	4.7028E-06	4.6824E-06	4.6248E-06	4.3235E-06	4.6494E-06	4.7174E-06	4.6631E-06	4.6541E-06	4.3235E-06	4.6440E-06	24%										
14	3.7765E-06	4.4059E-06	4.9674E-06	5.0741E-06	4.2729E-06	5.0285E-06	5.0622E-06	5.1605E-06	4.6541E-06	5.0009E-06	4.6392E-06	4.6248E-06	7%								
15	5.1898E-06	4.6341E-06	5.2863E-06	5.0621E-06	5.0621E-06	4.3142E-06	4.5840E-06	4.3105E-06	5.0285E-06	5.1898E-06	24%										
16	4.3041E-06	4.3279E-06	4.3142E-06	4.5395E-06	4.5395E-06	5.0857E-06	4.6440E-06	4.6440E-06	4.2989E-06	4.3033E-06	4.6392E-06	32%									
17	4.3279E-06	4.3106E-06	4.5395E-06	3.2918E-06	4.7024E-06	4.9745E-06	4.4478E-06	4.6440E-06	4.2989E-06	4.3033E-06	4.6440E-06	24%									
18	4.6824E-06	4.6731E-06	4.2729E-06	4.7084E-06	4.4478E-06	4.7084E-06	4.6248E-06	4.6248E-06	4.6248E-06	4.6248E-06	4.6248E-06	4.6248E-06	4.6248E-06	4.6248E-06	4.6248E-06	4.6248E-06	4.6248E-06	4.6248E-06	4.6248E-06	4.6248E-06	28%
19	3.7077E-06	3.2122E-06	3.7411E-06	4.6631E-06	4.7128E-06	4.3189E-06	4.6317E-06	4.6677E-06	3.6783E-06	5.1557E-06	4.6440E-06	28%									
20	4.6541E-06	4.3666E-06	5.0622E-06	2.2080E-06	3.7584E-06	4.6877E-06	5.0621E-06	4.6161E-06	4.6161E-06	4.6161E-06	4.6161E-06	4.6161E-06	4.6161E-06	4.6161E-06	4.6161E-06	4.6161E-06	4.6161E-06	4.6161E-06	4.6161E-06	4.6161E-06	28%
21	3.1456E-06	4.6731E-06	2.2080E-06	3.7584E-06	4.6877E-06	5.0621E-06	4.6161E-06	4.6161E-06	4.6161E-06	4.6161E-06	4.6161E-06	4.6161E-06	4.6161E-06	4.6161E-06	4.6161E-06	4.6161E-06	4.6161E-06	4.6161E-06	4.6161E-06	4.6161E-06	3%
22	5.0138E-06	4.3321E-06	4.6440E-06	4.2940E-06	4.3189E-06	4.3189E-06	4.3189E-06	4.3189E-06	4.3189E-06	4.3189E-06	4.3189E-06	4.3189E-06	4.3189E-06	4.3189E-06	4.3189E-06	4.3189E-06	4.3189E-06	4.3189E-06	4.3189E-06	4.3189E-06	28%
23	3.7765E-06	5.0730E-06	5.0285E-06	4.7024E-06	4.4478E-06	4.6317E-06	4.6317E-06	4.6317E-06	4.6317E-06	4.6317E-06	4.6317E-06	4.6317E-06	4.6317E-06	4.6317E-06	4.6317E-06	4.6317E-06	4.6317E-06	4.6317E-06	4.6317E-06	4.6317E-06	28%
24	4.7423E-06	3.6627E-06	3.7077E-06	4.5706E-06	4.6035E-06	4.3142E-06	4.6494E-06	4.6494E-06	4.6494E-06	4.6494E-06	4.6494E-06	4.6494E-06	4.6494E-06	4.6494E-06	4.6494E-06	4.6494E-06	4.6494E-06	4.6494E-06	4.6494E-06	4.6494E-06	7%
A→	4.4009E-06	4.4465E-06	4.2294E-06	4.3748E-06	4.5583E-06	4.6323E-06	4.6229E-06	4.6548E-06	4.6100E-06	4.7510E-06	4.7430E-06	4.8897E-06	4.7292E-06	4.7308E-06	4.8263E-06	4.8945E-06	4.8925E-06	4.9076E-06	4.8239E-06	4.9772E-06	17%
B→	23000	101%	96%	99%	104%	105%	105%	105%	105%	108%	108%	107%	107%	108%	110%	111%	111%	112%	110%	113%	←←
C→	5.2864E-06	5.0390E-06	5.2863E-06	5.0741E-06	5.1557E-06	5.2864E-06	5.1557E-06	5.2863E-06	5.1898E-06	5.2864E-06	5.2863E-06										
D→	1.5-1.67-2.5	3-0-67-2	1-2-5-2.5	1.5-1-1.5	4.5-0.58-2.5	1.5-1.67-2.5	4.5-0.58-2.5	1.2-5-2.5	3.5-0.71-2.5	1.5-1.67-2.5	1.5-1.67-2.5	1.5-1.67-2.5	1.5-1.67-2.5	1.5-1.67-2.5	1.5-1.67-2.5	1.5-1.67-2.5	1.5-1.67-2.5	1.5-1.67-2.5	1.5-1.67-2.5	1.5-1.67-2.5	1.5-1.67-2.5
E→	\$46.039.00	\$36.831.20	\$46.039.00	\$27.623.40	\$46.039.00	\$46.039.00	\$46.039.00	\$46.039.00	\$46.039.00	\$46.039.00	\$46.039.00	\$46.039.00	\$46.039.00	\$46.039.00	\$46.039.00	\$46.039.00	\$46.039.00	\$46.039.00	\$46.039.00	\$46.039.00	\$46.039.00

A Promedio de los factores de aptitud, para ver como van evolucionando por generación las cámaras
 B Factor K elegido respecto a la Relación 5 - 24x*
 C Factor de aptitud máximo de cada generación

D Altura - Área - Volumen para la cámara con mejor factor de aptitud de cada generación
 E Precio de la cámara con mejor factor de aptitud de cada generación
 F Porcentaje de mejora de cada generación, con respecto a la 1ra Generación

TABLA D-5 SIMULACIÓN VERSIÓN 4.

Opción 1 - E

Promedio de las cotas de la envolvente de sobrepresiones - Promedio de las cotas de la línea piezométrica.
 Promedio de las cotas de la envolvente de depresiones - Promedio de las cotas de la línea piezométrica.

(Altura 3 bits)

# Cámara de aire	Generaciones																				Relación
	1ra	2da	3ra	4ta	5ta	6ta	7ma	8va	9na	10ma	11ma	12ma	13ra	14ta	15ta	16ta	17ma	18va	19na	20na	
1	4.6263E-06	4.2670E-06	4.2148E-06	4.6277E-06	4.6673E-06	4.6949E-06	4.6498E-06	4.2506E-06	4.6127E-06	4.1907E-06	4.6367E-06	4.2404E-06	4.2404E-06	4.6440E-06	4.2234E-06	4.1656E-06	4.2669E-06	4.6473E-06	4.6473E-06	4.6820E-06	28%
2	4.1952E-06	4.2404E-06	4.5624E-06	4.2670E-06	4.1903E-06	4.2323E-06	3.7814E-06	4.2387E-06	4.6127E-06	4.6949E-06	4.6473E-06	4.6166E-06	4.6166E-06	4.6545E-06	4.1823E-06	4.2579E-06	4.2579E-06	4.6473E-06	4.6473E-06	4.5702E-06	31%
3	4.0777E-06	4.6166E-06	3.7202E-06	4.6846E-06	4.1903E-06	4.2387E-06	4.2317E-06	4.6313E-06	4.2445E-06	4.6449E-06	4.2068E-06	4.2068E-06	4.6502E-06	4.6502E-06	4.6744E-06	4.6744E-06	4.2148E-06	4.6473E-06	4.6473E-06	4.6805E-06	15%
4	4.6949E-06	4.5331E-06	2.0690E-06	4.5624E-06	4.6988E-06	3.7315E-06	4.2148E-06	4.2725E-06	2.9139E-06	4.0848E-06	4.6682E-06	4.3320E-06	4.6805E-06	4.2317E-06	4.2234E-06	4.1992E-06	4.6692E-06	4.2068E-06	4.2068E-06	4.2068E-06	22%
5	4.1074E-06	4.1425E-06	4.2086E-06	4.6313E-06	4.6404E-06	4.1898E-06	4.6127E-06	4.2086E-06	4.6217E-06	4.6313E-06	4.1740E-06	4.1740E-06	4.6545E-06	4.6545E-06	4.6692E-06	4.2317E-06	4.6370E-06	4.6744E-06	4.6744E-06	4.6370E-06	15%
6	3.7619E-06	4.6028E-06	4.6028E-06	4.6127E-06	4.2725E-06	4.1789E-06	4.1789E-06	3.8081E-06	4.6263E-06	4.2615E-06	4.6263E-06	4.1907E-06	4.1574E-06	4.1574E-06	4.6263E-06	4.6263E-06	4.1823E-06	4.1823E-06	4.1823E-06	4.6949E-06	10%
7	4.2725E-06	4.1952E-06	4.2133E-06	3.7315E-06	4.1740E-06	4.2491E-06	4.2387E-06	4.6548E-06	4.2445E-06	4.2387E-06	4.6263E-06	4.1574E-06	4.2579E-06	4.2404E-06	4.6645E-06	4.6645E-06	4.6370E-06	4.6449E-06	4.6449E-06	4.6805E-06	28%
8	4.6028E-06	4.2387E-06	2.9139E-06	4.6404E-06	4.5624E-06	4.5782E-06	4.2670E-06	4.1907E-06	4.2670E-06	4.2317E-06	4.6028E-06	4.2148E-06	4.1656E-06	4.1656E-06	4.2907E-06	4.1656E-06	4.6404E-06	4.6404E-06	4.2068E-06	4.1656E-06	30%
9	4.5624E-06	2.0777E-06	4.6028E-06	2.9437E-06	4.5702E-06	4.1656E-06	4.2445E-06	4.6673E-06	4.2670E-06	4.2698E-06	4.3687E-06	4.1823E-06	4.1740E-06	4.1740E-06	4.6494E-06	4.6494E-06	4.6920E-06	4.2234E-06	4.2234E-06	4.6494E-06	34%
10	2.0898E-06	2.9375E-06	4.3434E-06	3.8702E-06	4.5473E-06	4.6920E-06	4.1738E-06	4.6498E-06	4.1952E-06	4.6127E-06	4.6166E-06	4.5308E-06	4.2579E-06	4.2148E-06	4.2234E-06	4.2234E-06	4.6582E-06	4.6582E-06	4.6473E-06	4.1952E-06	2%
11	4.6127E-06	2.0742E-06	4.6127E-06	4.2670E-06	4.2670E-06	4.1898E-06	4.2670E-06	4.0925E-06	4.2323E-06	4.1425E-06	3.8702E-06	4.6920E-06	4.6920E-06	4.6920E-06	4.6805E-06	4.6805E-06	4.1907E-06	4.6277E-06	4.6277E-06	4.6370E-06	30%
12	2.4111E-06	2.0690E-06	4.6585E-06	4.2670E-06	4.5331E-06	4.6217E-06	4.6498E-06	4.6283E-06	4.6585E-06	4.1842E-06	4.6498E-06	4.6545E-06	4.1425E-06	4.1425E-06	4.6645E-06	4.6645E-06	4.6473E-06	4.6473E-06	4.6744E-06	4.2491E-06	2%
13	4.1907E-06	4.6545E-06	2.9076E-06	4.6166E-06	4.2068E-06	4.2148E-06	4.393E-06	3.7315E-06	4.2669E-06	4.2669E-06	4.2491E-06	4.1842E-06	4.1842E-06	4.6692E-06	4.6692E-06	4.1656E-06	4.2669E-06	4.1574E-06	4.1823E-06	4.6846E-06	5%
14	2.9203E-06	4.1789E-06	4.6127E-06	4.2725E-06	4.2323E-06	4.3178E-06	4.2387E-06	4.1738E-06	3.8702E-06	4.2387E-06	4.2068E-06	4.2068E-06	4.2068E-06	4.2068E-06	4.6545E-06	4.6545E-06	4.6370E-06	4.6949E-06	4.6949E-06	4.1740E-06	2%
15	2.9076E-06	4.6545E-06	2.9076E-06	4.6166E-06	4.2068E-06	4.2148E-06	4.393E-06	3.7315E-06	4.2669E-06	4.2669E-06	4.2491E-06	4.1842E-06	4.1842E-06	4.6692E-06	4.6692E-06	4.1656E-06	4.2669E-06	4.1574E-06	4.1823E-06	4.6846E-06	5%
16	2.0830E-06	4.0698E-06	4.6028E-06	4.6028E-06	3.8317E-06	4.2670E-06	4.2068E-06	4.6404E-06	4.5702E-06	4.6920E-06	4.6404E-06	4.1151E-06	4.1151E-06	4.1503E-06	4.1503E-06	4.1503E-06	4.1740E-06	4.6920E-06	4.2068E-06	4.6545E-06	2%
17	2.4433E-06	4.6127E-06	2.3850E-06	4.2725E-06	4.2725E-06	4.2028E-06	4.2317E-06	4.6127E-06	2.0777E-06	4.1503E-06	4.6920E-06	4.5744E-06	4.5744E-06	4.6692E-06	4.6692E-06	4.6473E-06	4.6473E-06	4.6744E-06	4.2669E-06	4.6449E-06	19%
18	4.2234E-06	4.2387E-06	3.8081E-06	4.1074E-06	4.6028E-06	4.2670E-06	4.1656E-06	3.7814E-06	4.2234E-06	4.2969E-06	4.2969E-06	4.2969E-06	4.2969E-06	4.2969E-06	4.6920E-06	4.6920E-06	4.2148E-06	4.2669E-06	4.2669E-06	4.6545E-06	23%
19	4.2387E-06	4.6805E-06	4.2615E-06	4.1898E-06	4.2387E-06	4.2506E-06	4.6127E-06	4.6585E-06	4.1656E-06	4.1656E-06	4.1656E-06	4.2579E-06	4.2148E-06	4.2148E-06	4.1656E-06	4.1656E-06	4.2491E-06	4.2404E-06	4.1907E-06	4.6473E-06	27%
20	3.7315E-06	4.6313E-06	4.2445E-06	4.2234E-06	4.6805E-06	4.1738E-06	4.6217E-06	4.2669E-06	4.6387E-06	4.6466E-06	4.6127E-06	4.4433E-06	4.6277E-06	4.6166E-06	4.1823E-06	4.1823E-06	4.6645E-06	4.6473E-06	4.6263E-06	4.2491E-06	10%
21	4.6473E-06	3.7615E-06	4.2698E-06	4.5401E-06	4.6370E-06	2.9315E-06	4.2323E-06	4.6127E-06	4.2323E-06	2.9076E-06	2.4034E-06	4.2445E-06	4.1574E-06	4.2068E-06	4.2068E-06	4.2234E-06	4.1740E-06	4.2234E-06	4.6263E-06	4.6387E-06	26%
22	4.6673E-06	4.6217E-06	4.6387E-06	4.2561E-06	4.6805E-06	4.6692E-06	4.2506E-06	4.6028E-06	4.2387E-06	2.9468E-06	4.2404E-06	4.5702E-06	4.6277E-06	4.2148E-06	4.2148E-06	4.1656E-06	4.1656E-06	4.1656E-06	4.1656E-06	4.6545E-06	30%
23	2.9139E-06	4.6313E-06	4.1898E-06	2.9375E-06	3.8860E-06	4.6217E-06	4.6127E-06	4.6498E-06	4.5624E-06	2.9375E-06	2.4601E-06	4.2123E-06	4.2123E-06	4.1574E-06	4.1574E-06	4.2579E-06	4.2317E-06	4.1903E-06	4.2561E-06	4.3558E-06	5%
24	2.9076E-06	4.6127E-06	4.2086E-06	4.6217E-06	4.6645E-06	4.6673E-06	4.2387E-06	4.2387E-06	4.1425E-06	4.2579E-06	4.0925E-06	4.6370E-06	4.6370E-06	4.1740E-06	4.1740E-06	4.2234E-06	4.1574E-06	4.1907E-06	4.6820E-06	4.6805E-06	5%
A→	3.7452E-06	4.0190E-06	4.1211E-06	4.1886E-06	4.2036E-06	4.2947E-06	4.3134E-06	4.3471E-06	4.2133E-06	4.1027E-06	4.2882E-06	4.2319E-06	4.2927E-06	4.3359E-06	4.4036E-06	4.3988E-06	4.3372E-06	4.4532E-06	4.4609E-06	4.5144E-06	
B→	22000	107%	110%	112%	112%	115%	115%	116%	116%	112%	114%	113%	116%	116%	118%	117%	116%	119%	119%	121%	←F
C→	4.6949E-06	4.6805E-06	4.6805E-06	4.6846E-06	4.6805E-06	4.6949E-06	4.6498E-06	4.6673E-06	4.6388E-06	4.6949E-06	4.6805E-06	4.6920E-06	4.6920E-06	4.6949E-06	4.6920E-06	4.6949E-06	4.6920E-06	4.6949E-06	4.6920E-06	4.6949E-06	4.6949E-06
D→	1-2.5-2.5	1-5-2.3	1-5-2.3	1-5-1.67-2.5	1-5-2.3	1-2.5-2.5	2-1.75-3.5	1-3.5-3.5	1-5.2-3.3-3.5	1-2.5-2.5	1-5.2-3.3	1-3-3	1-2.5-2.5	1-3-3	1-2.5-2.5	1-3-3	1-2.5-2.5	1-3-3	1-2.5-2.5	1-3-3	1-2.5-2.5
E→	\$46.039.00	\$55.246.80	\$55.246.80	\$46.039.00	\$55.246.80	\$46.039.00	\$64.454.60	\$64.454.60	\$64.454.60	\$64.454.60	\$55.246.80	\$55.246.80	\$55.246.80	\$55.246.80	\$55.246.80	\$55.246.80	\$55.246.80	\$55.246.80	\$55.246.80	\$55.246.80	\$46.039.00

A Promedio de los factores de aptitud, para ver como van evolucionando por generación las cámaras
 B Factor K elegido respecto a la Relación \$ - 2aPK
 C Factor de aptitud máximo de cada generación
 D Altura - Area - Volumen para la cámara con mejor factor de aptitud de cada generación
 E Precio de la cámara con mejor factor de aptitud de cada generación
 F Porcentaje de mejora de cada generación, con respecto a la 1ra Generación

TABLA D-6 SIMULACIÓN VERSIÓN 5.

Opción 1 - F
 Promedio de las cotas de la envolvente de sobrepresiones - Promedio de las cotas de la línea piezométrica.
 (Altura 3 bits)

	Generaciones																				Relación $\frac{\Delta p}{\Delta p_k}$
	1ra	2da	3ra	4ta	5ta	6ta	7ma	8va	9na	10na	11na	12na	13ta	14ta	15ta	16ta	17ma	18va	19na	20na	
1	5.2992E-06	5.3640E-06	5.2242E-06	4.0201E-06	7.1850E-06	5.3481E-06	4.7983E-06	7.5203E-06	5.3316E-06	7.1892E-06	7.5039E-06	6.0229E-06	4.7504E-06	5.2806E-06	4.4743E-06	9.3643E-06	9.7966E-06	9.5742E-06	9.7927E-06	5.3155E-06	29%
2	4.6726E-06	4.7123E-06	5.2378E-06	4.4265E-06	5.2378E-06	8.8297E-06	4.4743E-06	6.5937E-06	4.6899E-06	4.4453E-06	5.8299E-06	9.1985E-06	5.3318E-06	5.2806E-06	1.0032E-05	4.3984E-06	9.7089E-06	9.9071E-06	9.6930E-06	4.6859E-06	26%
3	7.1533E-06	6.1173E-06	5.1389E-06	5.1829E-06	4.4897E-06	4.4743E-06	5.1684E-06	5.1684E-06	5.3318E-06	9.9071E-06	9.7927E-06	9.7927E-06	9.6930E-06	4.7382E-06	4.7382E-06	4.7382E-06	9.3643E-06	9.4663E-06	9.7800E-06	9.7800E-06	7%
4	5.2242E-06	5.2378E-06	4.6726E-06	6.2003E-06	5.1389E-06	6.0960E-06	6.0524E-06	6.0890E-06	8.8897E-06	8.8897E-06	7.5307E-06	4.3195E-06	9.7800E-06	7.1533E-06	6.8356E-06	4.6726E-06	4.5064E-06	4.7123E-06	6.0524E-06	7.2975E-06	24%
5	7.5203E-06	9.7927E-06	7.3038E-06	6.0960E-06	7.4799E-06	4.3387E-06	4.3387E-06	5.2118E-06	4.3984E-06	4.3984E-06	8.8897E-06	21%									
6	5.1538E-06	4.7504E-06	8.8897E-06	7.5203E-06	5.1975E-06	4.4588E-06	4.4897E-06	7.5039E-06	9.4916E-06	4.7290E-06	8.5477E-06	5.3640E-06	4.7898E-06	7.3235E-06	4.4453E-06	4.4588E-06	4.4588E-06	4.4588E-06	4.4588E-06	4.4588E-06	24%
7	8.5477E-06	6.1173E-06	7.2975E-06	7.2975E-06	4.3006E-06	5.1829E-06	7.3482E-06	5.1829E-06	5.1829E-06	7.5203E-06	4.6859E-06	4.4743E-06	7.1850E-06	6.5937E-06	4.4743E-06	4.6929E-06	9.3643E-06	9.3643E-06	9.3643E-06	9.3643E-06	24%
8	4.3387E-06	8.5477E-06	5.2118E-06	7.3925E-06	5.2378E-06	28%															
9	7.1850E-06	4.2915E-06	5.2378E-06	6.1173E-06	4.4588E-06	5.2829E-06	5.1389E-06	8.7650E-06	8.7650E-06	7.3925E-06	6.8356E-06	7.1850E-06	1.0032E-05	9.4916E-06	26%						
10	5.318E-06	7.3038E-06	7.2137E-06	6.2210E-06	8.9306E-06	5.2242E-06	6.2210E-06	4.7818E-06	5.1829E-06	5.1829E-06	9.2555E-06	1.0032E-05	4.4285E-06	9.4916E-06	6.9307E-06	4.5064E-06	4.8859E-06	4.4185E-06	4.6590E-06	5.742E-06	29%
11	6.1173E-06	4.4588E-06	4.6726E-06	6.0748E-06	5.2118E-06	5.1538E-06	28%														
12	5.3640E-06	5.3806E-06	5.1829E-06	5.1538E-06	5.1829E-06	8.9720E-06	8.8297E-06	4.5064E-06	4.5064E-06	7.5203E-06	9.2555E-06	4.3006E-06	6.1173E-06	7.5039E-06	30%						
13	5.1829E-06	8.6945E-06	8.9720E-06	8.8897E-06	7.4387E-06	6.8356E-06	24%														
14	4.7818E-06	7.3482E-06	7.4799E-06	6.1815E-06	6.0748E-06	5.2118E-06	8.9720E-06	5.1389E-06	5.1389E-06	7.2975E-06	26%										
15	4.6992E-06	6.1815E-06	5.2378E-06	6.1173E-06	4.4588E-06	6.1173E-06	4.4588E-06	7.5727E-06	7.5727E-06	8.8297E-06	28%										
16	4.4588E-06	6.0524E-06	5.1389E-06	7.2137E-06	30%																
17	4.0567E-06	7.5727E-06	5.1829E-06	6.0748E-06	6.0229E-06	28%															
18	4.4588E-06	4.7818E-06	5.1389E-06	7.5727E-06	5.1538E-06	28%															
19	4.4916E-06	5.2118E-06	6.2210E-06	4.4285E-06	7.4799E-06	6.2003E-06	6.1815E-06	9.5742E-06	9.5742E-06	8.9720E-06	9.5742E-06	17%									
20	4.4185E-06	8.9306E-06	5.1894E-06	4.7818E-06	7.2975E-06	4%															
21	6.1389E-06	4.7382E-06	5.8723E-06	4.8899E-06	7.2893E-06	9.7800E-06	5.3481E-06	5.3481E-06	5.3481E-06	7.3482E-06	5.9026E-06	9.4916E-06	7.1850E-06	6.9900E-06	9.2555E-06	9.2555E-06	9.2555E-06	9.2555E-06	9.2555E-06	9.2555E-06	4%
22	6.9306E-06	4.2827E-06	4.7898E-06	5.1684E-06	6.1801E-06	8.8297E-06	6.7630E-06	8.8297E-06	25%												
23	5.9026E-06	4.0274E-06	6.2210E-06	7.3267E-06	5.3481E-06	8.9720E-06	7.2893E-06	5.1829E-06	5.1829E-06	4.7382E-06	7.1533E-06	7.138E-06	22%								
24	4.8075E-06	6.1173E-06	8.9720E-06	5.1975E-06	7.2893E-06	9.7800E-06	1.0032E-05	7.5039E-06	4.3289E-06	4.3289E-06	9.7800E-06	31%									
A →	5.8723E-06	6.0681E-06	6.1172E-06	5.9590E-06	6.0564E-06	6.3671E-06	6.6307E-06	6.6995E-06	6.8206E-06	7.5480E-06	7.9899E-06	7.3267E-06	6.9599E-06	7.3213E-06	7.8143E-06	8.3063E-06	8.0807E-06	8.6611E-06	8.6116E-06		
B →	26000	103%	105%	101%	103%	123%	108%	113%	114%	116%	129%	128%	125%	119%	125%	133%	141%	138%	147%	147%	F
C →	9.4916E-06	9.7927E-06	8.9720E-06	8.8897E-06	8.9306E-06	9.7965E-06	1.0032E-05	9.5742E-06	9.9071E-06	9.9071E-06	1.0032E-05										
D →	1.5067E-1	4.5022E-1	4.5033E-15	3.5043E-15	4.038E-15	3.5029E-1	4.5022E-1	2.5024E-1	4.025E-1	4.025E-1	4.5022E-1										
E →	\$18.415.60	\$18.415.60	\$27.623.40	\$27.623.40	\$27.623.40	\$18.415.60	\$18.415.60	\$18.415.60	\$18.415.60	\$18.415.60	\$18.415.60	\$18.415.60	\$18.415.60	\$18.415.60	\$18.415.60	\$18.415.60	\$18.415.60	\$18.415.60	\$18.415.60	\$18.415.60	

A Promedio de los factores de aptitud, para ver como van evolucionando por generación las cámaras
 B Factor K elegido respecto a la Relación $\frac{\Delta p}{\Delta p_k}$
 C Factor de aptitud máximo de cada generación
 D Altura - Área - Volumen para la cámara con mejor factor de aptitud de cada generación
 E Precio de la cámara con mejor factor de aptitud de cada generación
 F Porcentaje de mejora de cada generación, con respecto a la 1ra Generación

TABLA D-7 SIMULACIÓN VERSIÓN 6.

Opción 2 - A

Cota máxima en la envolvente de sobrepresiones - Cota en línea piezométrica perpendicular a ese punto

Cota mínima en la envolvente de depresiones - Cota en línea piezométrica perpendicular a ese punto

(Altura 2 bits)

#	Generaciones																				Relación $\frac{Zap * K}{Primer\ generacion}$
	1a	2da	3ra	4a	5a	6a	7ma	8va	9na	10ma	11ma	12ma	13ra	14a	15a	16a	17ma	18va	19na	20na	
1	5.5172E-06	5.8268E-06	5.2574E-06	5.5167E-06	6.7195E-06	4.5734E-06	4.7808E-06	5.2380E-06	4.7804E-06	6.1940E-06	6.7212E-06	6.7230E-06	6.4465E-06	6.4465E-06	6.3565E-06	6.4465E-06	6.4845E-06	5.8595E-06	5.8273E-06	5.8273E-06	
2	4.7808E-06	5.5167E-06	5.0078E-06	5.8587E-06	4.5734E-06	6.7195E-06	5.2574E-06	4.3608E-06	6.2594E-06	6.4073E-06	6.4465E-06	6.7230E-06	6.7195E-06	5.8288E-06	6.4845E-06	6.7195E-06	5.8587E-06	6.1930E-06	6.4073E-06	6.7195E-06	
3	5.5370E-06	5.8595E-06	6.7195E-06	5.8278E-06	5.8585E-06	5.2385E-06	4.4845E-06	4.5604E-06	5.8595E-06	5.2380E-06	5.5172E-06	5.8591E-06	5.8273E-06	6.3565E-06	5.8273E-06	6.3565E-06	5.8273E-06	6.4465E-06	6.7230E-06	6.4845E-06	
4	5.8274E-06	5.5368E-06	4.7802E-06	4.7645E-06	4.7645E-06	4.7645E-06	4.7645E-06	5.1676E-06	5.1676E-06	4.7846E-06	5.2383E-06	6.7195E-06	6.1940E-06	6.7195E-06	6.3565E-06	6.4465E-06	6.7212E-06	6.7230E-06	6.7195E-06	5.8591E-06	
5	4.7801E-06	5.8274E-06	4.7645E-06	5.5371E-06	5.5170E-06	6.7195E-06	4.5607E-06	5.2385E-06	5.8585E-06	6.4073E-06	5.8595E-06	6.7230E-06	6.4073E-06	5.8274E-06	6.7195E-06	6.4845E-06	6.4073E-06	5.8595E-06	6.4845E-06	5.8591E-06	
6	5.2385E-06	4.7643E-06	5.5371E-06	5.8587E-06	4.7646E-06	5.8274E-06	5.8591E-06	6.7195E-06	6.3565E-06	6.4073E-06	6.7230E-06	6.7230E-06	6.7212E-06	5.8274E-06	6.4845E-06	5.8274E-06	5.8274E-06	5.8595E-06	6.7195E-06	6.4845E-06	
7	5.2577E-06	4.7643E-06	6.2550E-06	6.2550E-06	5.8278E-06	5.5170E-06	4.7802E-06	5.8587E-06	6.7195E-06	6.4465E-06	6.7230E-06	6.7230E-06	6.7195E-06	6.7195E-06	5.8273E-06	6.4845E-06	6.7212E-06	6.7230E-06	6.7230E-06	6.2571E-06	
8	5.2388E-06	4.7643E-06	5.5365E-06	6.7195E-06	4.7647E-06	6.7195E-06	5.8595E-06	4.7802E-06	4.7804E-06	5.8591E-06	6.1937E-06	6.1937E-06	6.1937E-06	5.5368E-06	6.7195E-06	6.4845E-06	6.4845E-06	6.7195E-06	5.8274E-06	6.3565E-06	
9	5.8587E-06	5.8278E-06	5.8591E-06	4.7647E-06	5.8274E-06	4.5604E-06	4.7647E-06	4.7802E-06	5.8273E-06	6.4073E-06	5.8587E-06	5.8274E-06	6.4073E-06	5.8591E-06	6.4845E-06	6.4845E-06	6.4845E-06	6.7195E-06	5.8274E-06	6.4845E-06	
10	6.1930E-06	5.8278E-06	5.8595E-06	5.5172E-06	6.3565E-06	4.5607E-06	5.5368E-06	5.8273E-06	5.2577E-06	5.8288E-06	4.7801E-06	4.7801E-06	4.7801E-06	5.8587E-06	6.7195E-06	6.4845E-06	6.4845E-06	6.4845E-06	6.7195E-06	6.4845E-06	
11	4.4073E-06	6.1940E-06	5.5170E-06	5.8587E-06	5.5167E-06	4.7643E-06	4.7802E-06	5.8274E-06	5.8585E-06	6.7212E-06	5.8591E-06	5.5370E-06	6.3565E-06	6.7195E-06	6.7195E-06	6.4845E-06	6.4845E-06	6.3565E-06	5.8273E-06	6.4845E-06	
12	5.8278E-06	6.7230E-06	5.8274E-06	5.5166E-06	5.2577E-06	6.7195E-06	4.5607E-06	6.7230E-06	6.4465E-06	6.7230E-06	6.7195E-06	5.8274E-06	6.4073E-06	5.8274E-06	6.7195E-06	6.7212E-06	6.7230E-06	6.4465E-06	6.4845E-06	6.4845E-06	
13	6.4465E-06	4.9801E-06	5.8274E-06	5.1666E-06	5.2574E-06	5.8587E-06	4.5734E-06	6.3565E-06	5.1666E-06	5.8288E-06	6.7195E-06	6.7195E-06	6.7195E-06	5.5370E-06	6.4845E-06	6.4845E-06	6.4845E-06	6.4845E-06	6.4845E-06	6.4845E-06	
14	5.5167E-06	4.7646E-06	5.0078E-06	5.1666E-06	5.2577E-06	5.5371E-06	6.4073E-06	5.2383E-06	6.4073E-06	6.4073E-06	6.7195E-06	6.7195E-06	6.7195E-06	6.7195E-06	6.4845E-06	6.4845E-06	6.4845E-06	6.4845E-06	6.4845E-06	6.4845E-06	
15	4.7647E-06	4.7802E-06	4.7802E-06	5.0079E-06	5.8288E-06	5.5371E-06	5.8585E-06	5.8288E-06	5.5371E-06	6.3565E-06	6.2577E-06	6.7230E-06	6.7230E-06	6.7230E-06	5.8591E-06	6.4845E-06	6.4845E-06	6.4845E-06	6.4845E-06	6.4845E-06	
16	5.0078E-06	6.7212E-06	5.8591E-06	5.1666E-06	5.8585E-06	5.8585E-06	6.7195E-06	5.8278E-06	5.1666E-06	5.8585E-06	5.8585E-06	5.8585E-06	5.8278E-06	6.4845E-06	5.8274E-06	6.4845E-06	6.4845E-06	6.4845E-06	6.4845E-06	6.4845E-06	
17	4.5732E-06	5.2380E-06	5.8585E-06	6.4465E-06	6.7195E-06	4.5733E-06	6.7195E-06	4.9888E-06	4.7806E-06	5.2380E-06	5.5172E-06	6.7230E-06	6.7230E-06	6.4845E-06	5.8274E-06	6.4845E-06	6.4845E-06	6.4845E-06	6.4845E-06	6.4845E-06	
18	4.9889E-06	4.7643E-06	4.9889E-06	6.4465E-06	4.5604E-06	5.2383E-06	4.7643E-06	4.7643E-06	6.4465E-06	5.8288E-06	5.8585E-06	5.8585E-06	5.8288E-06	6.4845E-06							
19	4.7645E-06	6.2558E-06	4.7806E-06	5.8273E-06	5.8585E-06	4.7804E-06	4.5604E-06	4.5604E-06	6.7230E-06	5.8591E-06	5.8591E-06	5.8591E-06	5.8591E-06	6.4845E-06							
20	4.7647E-06	4.7645E-06	5.8278E-06	5.5166E-06	5.8591E-06	4.7806E-06	5.8587E-06	4.5607E-06	5.2380E-06	5.5371E-06	6.3565E-06	6.4845E-06									
21	5.2577E-06	5.8268E-06	5.8591E-06	6.2550E-06	5.2572E-06	5.5370E-06	5.5167E-06	5.5368E-06	5.8273E-06	5.8273E-06	6.3565E-06	6.4845E-06									
22	4.7647E-06	5.0078E-06	6.4845E-06	4.7645E-06	4.7645E-06	5.8587E-06	6.7212E-06	6.4465E-06	6.7195E-06	6.7230E-06	5.8587E-06	6.7230E-06	6.4845E-06	5.5168E-06	6.7195E-06	5.8595E-06	5.5368E-06	6.4465E-06	5.5167E-06	6.4845E-06	
23	6.7230E-06	5.5172E-06	4.7647E-06	6.2571E-06	5.5167E-06	4.5734E-06	4.7801E-06	5.5172E-06	6.3565E-06	6.7230E-06	5.8587E-06	6.7230E-06	6.1937E-06	6.1940E-06	5.8288E-06	5.5170E-06	6.2550E-06	6.3565E-06	6.7230E-06	6.4845E-06	
24	5.8274E-06	5.2577E-06	5.5167E-06	5.2380E-06	6.4073E-06	6.7212E-06	4.9891E-06	4.9891E-06	6.4845E-06	6.7195E-06	5.2574E-06	6.7195E-06	6.4073E-06	6.4845E-06	5.8595E-06	6.4845E-06	6.4073E-06	6.7195E-06	6.1937E-06	5.8278E-06	
A	5.4110E-06	5.5173E-06	5.5199E-06	5.6923E-06	5.5371E-06	5.5121E-06	5.4254E-06	5.5938E-06	5.8839E-06	6.0659E-06	6.1481E-06	6.2746E-06	6.2271E-06	6.3601E-06	6.2749E-06	6.2749E-06	6.3309E-06	6.3201E-06	6.2918E-06	6.3649E-06	
B	4000	102%	102%	105%	102%	102%	100%	103%	109%	112%	114%	116%	115%	118%	116%	116%	117%	117%	116%	118%	
C	6.7230E-06	6.7230E-06	6.7195E-06	6.7195E-06	6.7195E-06	6.7212E-06	6.7212E-06	6.7230E-06	6.7230E-06	6.7230E-06	6.7230E-06	6.7230E-06	6.7195E-06	6.7212E-06	6.7212E-06	6.7230E-06	6.7230E-06	6.7230E-06	6.7230E-06	6.7230E-06	
D	3.0.17.0.5	3.0.17.0.5	2.0.25.0.5	2.0.25.0.5	2.5.0.2.0.5	2.5.0.2.0.5	3.0.17.0.5	3.0.17.0.5	3.0.17.0.5	3.0.17.0.5	3.0.17.0.5	3.0.17.0.5	2.0.25.0.5	2.5.0.2.0.2	2.5.0.2.0.5	3.0.17.0.5	3.0.17.0.5	3.0.17.0.5	3.0.17.0.5	3.0.17.0.5	
E	\$ 9,207.80	\$ 9,207.80	\$ 9,207.80	\$ 9,207.80	\$ 9,207.80	\$ 9,207.80	\$ 9,207.80	\$ 9,207.80	\$ 9,207.80	\$ 9,207.80	\$ 9,207.80	\$ 9,207.80	\$ 9,207.80	\$ 9,207.80	\$ 9,207.80	\$ 9,207.80	\$ 9,207.80	\$ 9,207.80	\$ 9,207.80	\$ 9,207.80	

A Promedio de los factores de aptitud, para ver como van evolucionando por generación las cámaras
 B Factor K elegido respecto a la Relación $Z - \sum p * K$
 C Factor de aptitud máximo de cada generación

TABLA D-8 SIMULACIÓN VERSIÓN 7.

D Altura - Volumen para la cámara con mejor factor de aptitud de cada generación
 E Precio de la cámara con mejor factor de aptitud de cada generación
 F Porcentaje de mejora de cada generación, con respecto a la 1ra Generación

Opción 2 - B
 Cota máxima en la envolvente de sobrepresiones - Cota en la piezométrica perpendicular a ese punto
 Cota mínima en la envolvente de depresiones - Promedio de cotas del perfil de la línea de 0+038 a 0+600
 (Altura 2 bits)

	Generaciones																					
	1ra	2da	3ra	4ta	5ta	6ta	7ma	8va	9na	10na	11ma	12ma	13ra	14a	15a	16a	17ma	18va	19na	20ma		
1	4.6697E-06	6.7947E-06	6.1222E-06	6.2473E-06	6.1235E-06	6.1222E-06	5.4194E-06	5.7968E-06	6.2461E-06	5.1403E-06	6.2569E-06	5.7349E-06	5.7947E-06	6.2569E-06	6.0885E-06	6.7881E-06	6.3278E-06	5.4205E-06	5.1403E-06	6.7881E-06	6.3278E-06	30%
2	6.1222E-06	4.7004E-06	6.1222E-06	6.1234E-06	6.7947E-06	4.4950E-06	5.1763E-06	4.4705E-06	6.2569E-06	5.7949E-06	6.7881E-06	6.1824E-06	6.7914E-06	6.7914E-06	6.2569E-06	5.7968E-06	6.3278E-06	6.3278E-06	6.0885E-06	6.1824E-06	6.1824E-06	11%
3	6.1824E-06	6.7947E-06	6.2445E-06	6.2468E-06	6.3278E-06	6.2569E-06	4.4705E-06	6.1824E-06	4.4952E-06	5.7968E-06	4.6702E-06	5.7947E-06	6.0885E-06	5.7947E-06	6.7947E-06	6.7947E-06	6.3278E-06	6.7947E-06	6.7947E-06	6.7947E-06	6.7947E-06	6%
4	6.1240E-06	6.1234E-06	4.6697E-06	6.1222E-06	6.2445E-06	6.1256E-06	4.4705E-06	6.1234E-06	6.7947E-06	6.2461E-06	6.2461E-06	6.1824E-06	6.2473E-06	6.2569E-06	6.7947E-06	6.3278E-06	5.7968E-06	6.7947E-06	6.7947E-06	6.7947E-06	6.7947E-06	11%
5	4.9274E-06	6.2461E-06	6.0885E-06	4.4705E-06	4.4705E-06	6.0885E-06	6.7947E-06	27%														
6	6.7947E-06	6.1222E-06	6.2461E-06	6.0885E-06	6.1824E-06	6.1234E-06	6%															
7	6.1234E-06	6.3278E-06	6.7881E-06	6.2445E-06	6.3278E-06	6.1240E-06	6.1234E-06	6.1240E-06	6.2569E-06	11%												
8	4.7004E-06	6.1234E-06	6.7881E-06	6.1234E-06	6.2461E-06	6.2569E-06	6.7947E-06	30%														
9	4.8909E-06	6.7881E-06	6.2569E-06	6.7947E-06	5.4201E-06	6.2445E-06	6.7947E-06	27%														
10	4.6702E-06	6.1240E-06	6.7881E-06	6.2445E-06	4.4952E-06	6.2461E-06	6.2473E-06	6.1824E-06	6.2461E-06	6.2569E-06	6.3278E-06	5.7338E-06	6.7947E-06	6.7947E-06	6.0885E-06	6.7881E-06	6.7881E-06	6.7881E-06	6.7881E-06	6.7881E-06	6.7881E-06	20%
11	5.7349E-06	6.1222E-06	5.1763E-06	4.6697E-06	6.2473E-06	6.2461E-06	4.4952E-06	6.1824E-06	6.2569E-06	6.7947E-06	16%											
12	5.7968E-06	6.7947E-06	6.7881E-06	6.7914E-06	6.1824E-06	5.7968E-06	4.4952E-06	6.1824E-06	6.2569E-06	6.7947E-06	16%											
13	4.6697E-06	5.1763E-06	6.2488E-06	6.2488E-06	6.0885E-06	4.4952E-06	6.1824E-06	30%														
14	5.4194E-06	6.7947E-06	6.2488E-06	6.2473E-06	6.1824E-06	6.0885E-06	6.7947E-06	20%														
15	6.7947E-06	6.1256E-06	6.7881E-06	6.2488E-06	6.2445E-06	6.0885E-06	6.7947E-06	24%														
16	5.1763E-06	5.1397E-06	4.4705E-06	6.2488E-06	6.2445E-06	6.0885E-06	6.7947E-06	24%														
17	4.6702E-06	6.2569E-06	6.1824E-06	6.2488E-06	6.2445E-06	6.0885E-06	6.7947E-06	11%														
18	6.7947E-06	4.7002E-06	6.2473E-06	6.1824E-06	5.1767E-06	6.2569E-06	4.6702E-06	6.0885E-06	6.1234E-06	4.6702E-06	6.7947E-06	6%										
19	6.1222E-06	6.1224E-06	6.1824E-06	5.1403E-06	6.0885E-06	6.0885E-06	6.7947E-06	30%														
20	4.7004E-06	6.1224E-06	6.1824E-06	6.2445E-06	6.2445E-06	6.7947E-06	4.9274E-06	6.2569E-06	6.1222E-06	6.2569E-06	6.7947E-06	24%										
21	5.1393E-06	6.1222E-06	6.2445E-06	6.2445E-06	6.0885E-06	6.3278E-06	6.2461E-06	6.2569E-06	6.1222E-06	6.2569E-06	6.7947E-06	30%										
22	4.6702E-06	6.7914E-06	6.1235E-06	6.7914E-06	6.7914E-06	4.9274E-06	6.2569E-06	6.1222E-06	6.0885E-06	5.7338E-06	6.7947E-06	24%										
23	5.4205E-06	4.8913E-06	6.3278E-06	6.1824E-06	6.0885E-06	6.2461E-06	6.3278E-06	6.1234E-06	20%													
24	6.2473E-06	4.6697E-06	5.1763E-06	6.0885E-06	6.1234E-06	6.7947E-06	6.1234E-06	6.1824E-06	6.4569E-06	6.7881E-06	5.7949E-06	6.7947E-06	12%									
A→	5.5237E-06	5.8389E-06	6.1018E-06	6.0887E-06	6.0855E-06	5.9832E-06	5.7348E-06	6.1903E-06	6.0316E-06	6.1973E-06	6.1082E-06	6.3203E-06	6.3490E-06	6.2555E-06	6.2308E-06	6.3773E-06	6.1832E-06	6.4232E-06	6.4720E-06	6.4598E-06	6.4598E-06	12%
B→	8000	108%	110%	110%	110%	108%	104%	112%	109%	112%	111%	114%	115%	113%	114%	115%	112%	116%	117%	117%	←F	
C→	6.7984E-06	6.7984E-06	6.7881E-06	6.7914E-06	6.7884E-06	6.7947E-06	6.7984E-06	30%														
D→	3.0174.5	3.0174.5	1.50.33.0.5	2.0.25.0.5	3.0.17.0.5	2.50.2.0.5	3.0.17.0.5	3.0.17.0.5	3.0.17.0.5	3.0.17.0.5	3.0.17.0.5	3.0.17.0.5	3.0.17.0.5	3.0.17.0.5	3.0.17.0.5	3.0.17.0.5	3.0.17.0.5	3.0.17.0.5	3.0.17.0.5	3.0.17.0.5	3.0.17.0.5	30%
E→	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	\$ 9.207.80	30%

A Promedio de los factores de aptitud, para ver como van evolucionando por generación las cámaras
 B Factor K elegido respecto a la Relación \$ - Zap*K
 C Factor de aptitud máximo de cada generación

D Altura - Area - Volumen para la cámara con mejor factor de aptitud de cada generación
 E Precio de la cámara con mejor factor de aptitud de cada generación
 F Porcentaje de mejora de cada generación, con respecto a la 1ra Generación

TABLA D-9 SIMULACIÓN VERSIÓN 8.

Opción 2 - C

Promedio de las cotas en la envolvente de depresiones del cadenamamiento 0+000 al 0+030 - Promedio de las cotas en la línea piezométrica de operación normal del cadenamamiento 0+000 al 0+030.
 Promedio de las cotas en la envolvente de sobrepresiones del cadenamamiento 0+000 al 0+030 - Promedio de las cotas en la línea piezométrica de operación normal del cadenamamiento 0+000 al 0+030.
 (Altura 2 bits)

	Generaciones																				Relación $\frac{S}{\Sigma Ap * K}$ Primera generación
	1ra	2da	3ra	4ta	5ta	6ta	7ma	8va	9na	10ma	11ma	12ma	13ra	14ta	15ta	16ta	17ma	18va	19na	20ma	
1	5.4349E-06	5.4271E-06	5.2400E-06	4.9838E-06	4.9927E-06	5.1900E-06	4.9867E-06	4.9897E-06	5.6701E-06	4.9897E-06	5.3624E-06	5.3261E-06	5.3261E-06	5.6701E-06	5.3440E-06	5.6955E-06	5.6830E-06	5.3171E-06	5.3171E-06	5.2227E-06	15%
2	4.9327E-06	5.1662E-06	4.9927E-06	4.9838E-06	5.1190E-06	4.9838E-06	4.9838E-06	5.3349E-06	5.6701E-06	5.3349E-06	5.6830E-06	5.6701E-06	5.6830E-06	5.6830E-06	5.7084E-06	5.6830E-06	5.6830E-06	5.3261E-06	5.3261E-06	5.3349E-06	28%
3	4.9301E-06	5.3261E-06	5.2400E-06	5.1098E-06	5.1190E-06	4.9867E-06	4.9867E-06	4.9867E-06	4.9867E-06	4.9867E-06	4.9267E-06	4.9267E-06	5.6701E-06	5.3349E-06	5.6830E-06	5.6830E-06	5.6830E-06	5.3541E-06	5.3541E-06	5.6830E-06	20%
4	4.9897E-06	4.9897E-06	4.9897E-06	5.1128E-06	5.1128E-06	4.9927E-06	4.9927E-06	5.3349E-06	5.3349E-06	5.3349E-06	5.1158E-06	5.1158E-06	5.1158E-06	5.6830E-06	5.3440E-06	5.1190E-06	4.9300E-06	5.3501E-06	5.6701E-06	5.4822E-06	28%
5	4.9300E-06	4.6572E-06	5.2051E-06	5.0804E-06	5.6955E-06	5.1158E-06	5.6955E-06	5.1098E-06	5.1098E-06	5.1098E-06	5.3234E-06	5.3234E-06	4.9897E-06	5.6955E-06	5.3171E-06	5.3171E-06	5.3261E-06	5.3440E-06	5.6955E-06	5.6701E-06	4%
6	4.8218E-06	4.9867E-06	5.6955E-06	5.1128E-06	4.9867E-06	5.1098E-06	4.9867E-06	4.9867E-06	4.9867E-06	4.9867E-06	5.3349E-06	5.3349E-06	5.3349E-06	5.6830E-06	5.3440E-06	5.6830E-06	5.6830E-06	5.3261E-06	5.3261E-06	5.6955E-06	35%
7	4.7324E-06	4.6533E-06	5.1128E-06	4.9867E-06	5.1098E-06	4.9838E-06	4.9838E-06	5.1098E-06	5.1098E-06	5.1098E-06	5.1677E-06	5.1677E-06	5.1677E-06	5.6830E-06	5.6701E-06	5.6830E-06	5.6830E-06	5.3261E-06	5.3261E-06	5.6955E-06	31%
8	5.6830E-06	5.6955E-06	5.2051E-06	5.1158E-06	5.1098E-06	5.1098E-06	4.9867E-06	5.6830E-06	5.3349E-06	5.6830E-06	5.6701E-06	5.3541E-06	5.3541E-06	5.6955E-06	31%						
9	5.2227E-06	4.4822E-06	5.6830E-06	5.1190E-06	4.9867E-06	4.9867E-06	4.9867E-06	4.9867E-06	5.1158E-06	5.1098E-06	5.6830E-06	5.6830E-06	4.9867E-06	5.6830E-06	5.6830E-06	5.6830E-06	5.6830E-06	5.3261E-06	5.3261E-06	5.6955E-06	5%
10	5.1628E-06	4.9838E-06	5.3130E-06	4.9867E-06	5.6701E-06	4.9838E-06	5.6701E-06	5.1158E-06	5.1158E-06	5.1158E-06	4.9867E-06	4.9867E-06	4.9867E-06	4.9867E-06	5.3349E-06	5.6830E-06	5.6830E-06	5.3541E-06	5.3541E-06	5.6955E-06	10%
11	5.6701E-06	5.4773E-06	5.3261E-06	5.3261E-06	5.3440E-06	5.6955E-06	5.4927E-06	5.4927E-06	5.4927E-06	5.4927E-06	5.1128E-06	5.1128E-06	5.1128E-06	5.6830E-06	5.3440E-06	5.6830E-06	5.6830E-06	5.3261E-06	5.3261E-06	5.6955E-06	10%
12	4.9927E-06	5.3349E-06	5.3440E-06	5.3234E-06	4.9927E-06	5.1098E-06	4.9927E-06	4.9927E-06	4.9927E-06	4.9927E-06	4.9838E-06	4.9838E-06	4.9838E-06	4.9838E-06	5.3440E-06	5.6830E-06	5.6830E-06	5.3541E-06	5.3541E-06	5.6955E-06	28%
13	4.9217E-06	5.3171E-06	5.3171E-06	5.3349E-06	5.1098E-06	4.9927E-06	5.4927E-06	5.4927E-06	5.4927E-06	5.4927E-06	5.1158E-06	5.1158E-06	5.1158E-06	5.6830E-06	5.3440E-06	5.6830E-06	5.6830E-06	5.3261E-06	5.3261E-06	5.6955E-06	28%
14	4.9300E-06	5.1677E-06	5.3261E-06	5.1098E-06	4.9867E-06	5.1098E-06	4.9867E-06	5.6830E-06	5.3349E-06	5.6830E-06	5.6830E-06	5.3541E-06	5.3541E-06	5.6955E-06	24%						
15	5.3261E-06	4.6546E-06	5.7084E-06	5.1098E-06	5.1098E-06	5.1098E-06	4.9867E-06	5.6830E-06	5.3349E-06	5.6830E-06	5.6830E-06	5.3541E-06	5.3541E-06	5.6955E-06	4%						
16	4.7338E-06	5.1098E-06	5.3171E-06	5.6955E-06	5.3171E-06	5.1158E-06	4.9867E-06	4.9867E-06	4.9867E-06	4.9867E-06	5.3349E-06	5.3349E-06	5.3349E-06	5.6830E-06	5.3440E-06	5.6830E-06	5.6830E-06	5.3261E-06	5.3261E-06	5.6955E-06	25%
17	4.4462E-06	4.7362E-06	5.1190E-06	5.1098E-06	5.1652E-06	4.9838E-06	5.1128E-06	5.6830E-06	5.3349E-06	5.6830E-06	5.6830E-06	5.3541E-06	5.3541E-06	5.6955E-06	28%						
18	4.9897E-06	4.4462E-06	5.2400E-06	4.9838E-06	5.1098E-06	4.9867E-06	4.9867E-06	4.9867E-06	4.9867E-06	4.9867E-06	5.1098E-06	5.1098E-06	5.1098E-06	5.6830E-06	5.3440E-06	5.6830E-06	5.6830E-06	5.3261E-06	5.3261E-06	5.6955E-06	28%
19	4.9327E-06	5.1190E-06	5.3440E-06	5.3440E-06	5.7084E-06	5.3440E-06	5.1098E-06	5.1098E-06	5.1098E-06	5.1098E-06	5.1128E-06	5.1128E-06	5.1128E-06	5.6830E-06	5.3349E-06	5.6830E-06	5.6830E-06	5.3541E-06	5.3541E-06	5.6955E-06	28%
20	5.6677E-06	4.9867E-06	4.9927E-06	4.9897E-06	5.1128E-06	5.6830E-06	5.1098E-06	5.6830E-06	5.3349E-06	5.6830E-06	5.6830E-06	5.3261E-06	5.3261E-06	5.6955E-06	16%						
21	5.3261E-06	5.3533E-06	5.3440E-06	4.9867E-06	4.9867E-06	5.6955E-06	5.1190E-06	4.9927E-06	5.1128E-06	5.1128E-06	5.3440E-06	5.3440E-06	5.3440E-06	5.6830E-06	5.3349E-06	5.6830E-06	5.6830E-06	5.3541E-06	5.3541E-06	5.6955E-06	10%
22	4.9248E-06	5.6701E-06	4.9897E-06	4.4075E-06	5.1158E-06	5.1158E-06	5.1158E-06	5.1158E-06	5.1158E-06	5.1158E-06	4.9867E-06	4.9867E-06	4.9867E-06	5.6830E-06	5.3261E-06	5.6830E-06	5.6830E-06	5.3541E-06	5.3541E-06	5.6955E-06	31%
23	5.3261E-06	5.6701E-06	5.3624E-06	5.6701E-06	4.4276E-06	5.2227E-06	5.1158E-06	4.9927E-06	5.1128E-06	5.1128E-06	4.9867E-06	4.9867E-06	4.9867E-06	5.6830E-06	5.3261E-06	5.6830E-06	5.6830E-06	5.3541E-06	5.3541E-06	5.6955E-06	25%
24	5.1900E-06	5.1900E-06	5.6830E-06	4.9867E-06	4.9867E-06	4.9227E-06	4.4276E-06	4.4276E-06	4.4276E-06	4.4276E-06	5.1190E-06	5.1190E-06	5.1190E-06	5.6830E-06	5.3440E-06	5.6830E-06	5.6830E-06	5.3261E-06	5.3261E-06	5.6955E-06	5%
A →	5.0658E-06	5.0800E-06	5.2923E-06	5.1821E-06	5.1554E-06	5.1223E-06	5.1223E-06	5.1689E-06	5.1215E-06	5.1864E-06	5.2312E-06	5.2638E-06	5.2290E-06	5.3673E-06	5.4388E-06	5.4113E-06	5.4862E-06	5.4120E-06	5.4589E-06	5.4716E-06	
B →	6000	100%	104%	102%	102%	102%	101%	102%	101%	102%	103%	104%	103%	103%	106%	107%	107%	108%	107%	108%	108% ← F
C →	5.6830E-06	5.6955E-06	5.7084E-06	5.7084E-06	5.7084E-06	5.6955E-06	5.6830E-06	5.6830E-06	5.7084E-06												
D →	2.0.5.1	1.5.0.67.1	1.5.0.67.1	1.5.0.67.1	2.0.5.1	2.0.5.1	2.5.0.4.1	2.5.0.4.1	2.5.0.4.1	2.5.0.4.1	1.5.0.67.1	1.5.0.67.1	1.5.0.67.1	1.5.0.67.1	1.5.0.67.1	1.5.0.67.1	1.5.0.67.1	1.5.0.67.1	2.0.5.1	1.5.0.67.1	1.5.0.67.1
E →	\$18,415.60	\$18,415.60	\$18,415.60	\$18,415.60	\$18,415.60	\$18,415.60	\$18,415.60	\$18,415.60	\$18,415.60	\$18,415.60	\$18,415.60	\$18,415.60	\$18,415.60	\$18,415.60	\$18,415.60	\$18,415.60	\$18,415.60	\$18,415.60	\$18,415.60	\$18,415.60	\$18,415.60

A Promedio de los factores de aptitud, para ver como van evolucionando por generación las cámaras
 B Factor K elegido respecto a la Relación $\frac{S}{\Sigma Ap * K}$
 C Factor de aptitud máximo de cada generación
 D Altura - Área - Volumen para la cámara con mejor factor de aptitud de cada generación
 E Precio de la cámara con mejor factor de aptitud de cada generación
 F Porcentaje de mejora de cada generación, con respecto a la 1ra Generación

TABLA D-10 SIMULACIÓN VERSIÓN 9.

Promedio de las cotas en la envolvente de sobrepresiones del cadenamamiento 0+000 al 0+030 - Promedio de las cotas en la línea piezométrica del cadenamamiento 0+000 al 0+030.
 Promedio de las cotas en la línea envolvente de depresiones del cadenamamiento 0+000 al 0+030 - Promedio de las cotas de la línea de conducción del cadenamamiento 0+030 al 0+600
 (Altura 2 bits)

Opción 2 - D

	Generaciones																				Relación $\frac{Z_{ap}}{K}$ Primera generación
	1ra	2da	3ra	4ta	5ta	6ta	7ma	8va	9na	10ma	11ma	12ma	13ra	14a	15a	16a	17ma	18va	19na	20na	
1	5.1243E-06	5.0139E-06	4.6978E-06	4.6341E-06	5.2278E-06	4.3478E-06	4.5938E-06	4.7024E-06	4.6392E-06	5.1089E-06	5.0741E-06	4.3860E-06	5.2083E-06	4.7169E-06	4.7189E-06	4.7189E-06	4.6127E-06	4.7108E-06	4.6946E-06	4.7189E-06	19%
2	4.6035E-06	4.6946E-06	5.0435E-06	4.3041E-06	4.3666E-06	4.3478E-06	4.3860E-06	4.7024E-06	4.6294E-06	4.6035E-06	5.0139E-06	2.2882E-06	4.3860E-06	5.0821E-06	4.7189E-06	5.2468E-06	4.7026E-06	4.6127E-06	4.7189E-06	4.6946E-06	30%
3	5.2083E-06	3.2122E-06	5.2278E-06	5.0435E-06	4.3041E-06	2.2882E-06	4.3666E-06	4.3478E-06	4.3041E-06	5.2278E-06	5.2684E-06	4.7189E-06	5.2278E-06	4.7189E-06	4.7189E-06	5.2278E-06	4.3478E-06	3.2836E-06	5.2278E-06	4.6946E-06	24%
4	2.2319E-06	4.6035E-06	5.0741E-06	4.7084E-06	4.6931E-06	4.6221E-06	4.3287E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	2%
5	4.6924E-06	5.2083E-06	4.7084E-06	5.0821E-06	2.2319E-06	5.2684E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	26%
6	3.1920E-06	4.3041E-06	4.6946E-06	4.3192E-06	4.6946E-06	4.3192E-06	4.3192E-06	4.3192E-06	4.3192E-06	4.3192E-06	4.3192E-06	4.3192E-06	4.3192E-06	4.3192E-06	4.3192E-06	4.3192E-06	4.3192E-06	4.3192E-06	4.3192E-06	4.3192E-06	3%
7	4.5395E-06	4.3860E-06	4.7024E-06	4.6127E-06	4.6946E-06	5.0904E-06	4.3478E-06	4.3478E-06	4.3478E-06	4.3478E-06	4.3478E-06	4.3478E-06	4.3478E-06	4.3478E-06	4.3478E-06	4.3478E-06	4.3478E-06	4.3478E-06	4.3478E-06	4.3478E-06	8%
8	4.4478E-06	3.7584E-06	4.3142E-06	4.3142E-06	4.3287E-06	4.3287E-06	4.3287E-06	4.3287E-06	4.3287E-06	4.3287E-06	4.3287E-06	4.3287E-06	4.3287E-06	4.3287E-06	4.3287E-06	4.3287E-06	4.3287E-06	4.3287E-06	4.3287E-06	4.3287E-06	8%
9	5.2684E-06	4.714E-06	5.0245E-06	5.2033E-06	2.2882E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	24%
10	5.1419E-06	4.714E-06	5.2033E-06	4.6935E-06	5.0741E-06	4.6341E-06	5.1243E-06	4.3093E-06	4.3424E-06	5.0099E-06	4.7106E-06	5.2684E-06	5.2033E-06	3.1920E-06	5.2278E-06	4.2468E-06	4.7189E-06	5.2684E-06	4.7108E-06	4.6035E-06	19%
11	4.3142E-06	5.0099E-06	4.7026E-06	4.3142E-06	4.7026E-06	4.3860E-06	4.5938E-06	4.7190E-06	4.3860E-06	4.7190E-06	5.0904E-06	4.7189E-06	2.2882E-06	4.3860E-06	4.7189E-06	4.7189E-06	4.6946E-06	4.6946E-06	4.6946E-06	4.6946E-06	32%
12	4.6978E-06	5.0741E-06	5.2684E-06	4.7026E-06	4.3189E-06	4.7084E-06	4.7084E-06	4.7084E-06	4.7084E-06	4.7084E-06	4.7084E-06	4.7084E-06	4.7084E-06	4.7084E-06	4.7084E-06	4.7084E-06	4.7084E-06	4.7084E-06	4.7084E-06	4.7084E-06	28%
13	2.2882E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	2.2882E-06	5.0621E-06	4.5938E-06	4.6440E-06	5.0265E-06	5.0435E-06	5.0435E-06	4.7174E-06	2.2319E-06	4.5395E-06	5.2684E-06	3.2122E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	2%
14	4.714E-06	5.2278E-06	3.7246E-06	4.6234E-06	4.6127E-06	4.7298E-06	4.6294E-06	5.2278E-06	5.2083E-06	5.2684E-06	4.7026E-06	5.2684E-06	5.2083E-06	4.7106E-06	4.7026E-06	4.6946E-06	4.6946E-06	4.6946E-06	4.6946E-06	4.6946E-06	17%
15	4.7084E-06	5.0139E-06	4.3666E-06	4.3666E-06	4.3666E-06	4.3666E-06	4.3666E-06	4.3666E-06	4.3666E-06	4.3666E-06	4.3666E-06	4.3666E-06	4.3666E-06	4.3666E-06	4.3666E-06	4.3666E-06	4.3666E-06	4.3666E-06	4.3666E-06	4.3666E-06	30%
16	4.7084E-06	3.2636E-06	2.2493E-06	4.6978E-06	5.0435E-06	4.6392E-06	4.7106E-06	4.7106E-06	4.7106E-06	4.7106E-06	4.7106E-06	4.7106E-06	4.7106E-06	4.7106E-06	4.7106E-06	4.7106E-06	4.7106E-06	4.7106E-06	4.7106E-06	4.7106E-06	3%
17	4.7050E-06	3.1920E-06	4.3860E-06	4.3860E-06	2.2493E-06	5.0741E-06	4.7050E-06	4.7050E-06	4.7050E-06	4.7050E-06	4.7050E-06	4.7050E-06	4.7050E-06	4.7050E-06	4.7050E-06	4.7050E-06	4.7050E-06	4.7050E-06	4.7050E-06	4.7050E-06	7%
18	3.7077E-06	5.2468E-06	5.0435E-06	3.2122E-06	4.7106E-06	4.3142E-06	5.0435E-06	4.3189E-06	3.7584E-06	3.7584E-06	5.2468E-06	5.2468E-06	5.2468E-06	4.7189E-06	4.7189E-06	4.7189E-06	4.7189E-06	4.7189E-06	4.7189E-06	4.7189E-06	7%
19	5.2009E-06	4.3041E-06	4.7026E-06	4.3860E-06	4.3189E-06	5.2278E-06	4.7106E-06	4.7106E-06	2.2493E-06	5.2083E-06	4.6946E-06	4.7189E-06	4.7189E-06	4.7189E-06	4.7189E-06	4.7189E-06	4.7189E-06	4.7189E-06	4.7189E-06	4.7189E-06	28%
20	4.6924E-06	4.6127E-06	4.6221E-06	4.6221E-06	4.6221E-06	4.6221E-06	4.6221E-06	4.6221E-06	4.6221E-06	4.6221E-06	4.6221E-06	4.6221E-06	4.6221E-06	4.6221E-06	4.6221E-06	4.6221E-06	4.6221E-06	4.6221E-06	4.6221E-06	4.6221E-06	28%
21	5.0009E-06	4.6127E-06	4.6221E-06	5.0435E-06	4.3093E-06	4.7190E-06	3.2122E-06	4.4478E-06	4.6978E-06	4.6127E-06	4.6221E-06	3.2636E-06	4.5938E-06	4.7026E-06	5.0741E-06	4.6978E-06	5.2033E-06	5.2684E-06	5.2684E-06	5.2684E-06	28%
22	4.6924E-06	3.7246E-06	4.7190E-06	4.6035E-06	4.6035E-06	5.0741E-06	4.6127E-06	4.3041E-06	4.3041E-06	4.6946E-06	4.6946E-06	5.2033E-06	5.2033E-06	4.7190E-06	5.2033E-06	4.6946E-06	4.6127E-06	4.6946E-06	4.6946E-06	4.6946E-06	26%
23	4.6341E-06	4.6924E-06	4.6924E-06	5.1419E-06	4.7106E-06	4.7106E-06	3.7584E-06	4.5395E-06	5.1089E-06	5.1089E-06	5.1089E-06	4.7026E-06	5.2468E-06	4.7189E-06	4.7189E-06	4.7189E-06	4.7189E-06	4.7189E-06	4.7189E-06	4.7189E-06	34%
24	5.0435E-06	4.6978E-06	5.0245E-06	4.6035E-06	4.3666E-06	4.7026E-06	4.6978E-06	5.0904E-06	5.0904E-06	2.2882E-06	4.7174E-06	4.7189E-06	4.7189E-06	4.7189E-06	4.7189E-06	4.7189E-06	4.7189E-06	4.7189E-06	4.7189E-06	4.7189E-06	14%
A→	4.4298E-06	4.4641E-06	4.6071E-06	4.4047E-06	4.4643E-06	4.6722E-06	4.5077E-06	4.3859E-06	4.4046E-06	4.6300E-06	4.7221E-06	4.5890E-06	4.5670E-06	4.4464E-06	4.5648E-06	4.8593E-06	4.8831E-06	4.8873E-06	4.9081E-06	5.0090E-06	
B→	23000	101%	104%	100%	101%	108%	102%	99%	100%	105%	107%	104%	103%	100%	103%	110%	110%	110%	111%	113%	←
C→	5.2684E-06	5.2468E-06	5.2684E-06	5.2684E-06	5.2684E-06	5.2684E-06	5.2684E-06	5.2684E-06	5.2083E-06	5.2684E-06	5.2684E-06	5.2684E-06	5.2684E-06	5.2684E-06	5.2684E-06	5.2684E-06	5.2684E-06	5.2684E-06	5.2684E-06	5.2684E-06	
D→	1.51-1.67-2.5	2.1-2.5-2.5	1.51-1.67-2.5	1.51-1.67-2.5	2.5-1.2-5	1.51-1.67-2.5	2.5-1.2-5	2.1-2.5-2.5	3.0-8.3-2.5	1.51-1.67-2.5	1.51-1.67-2.5	1.51-1.67-2.5	1.51-1.67-2.5	1.51-1.67-2.5	2.1-2.5-2.5	1.51-1.67-2.5	1.51-1.67-2.5	1.51-1.67-2.5	1.51-1.67-2.5	1.51-1.67-2.5	
E→	\$46.039.000	\$46.039.000	\$46.039.000	\$46.039.000	\$46.039.000	\$46.039.000	\$46.039.000	\$46.039.000	\$46.039.000	\$46.039.000	\$46.039.000	\$46.039.000	\$46.039.000	\$46.039.000	\$46.039.000	\$46.039.000	\$46.039.000	\$46.039.000	\$46.039.000	\$46.039.000	

A Promedio de los factores de aptitud, para ver como van evolucionando por generación las cámaras
 B Factor K elegido respecto a la Relación $\frac{Z_{ap}}{K}$
 C Factor de aptitud máximo de cada generación

D Altura - Área - Volumen para la cámara con mejor factor de aptitud de cada generación
 E Precio de la cámara con mejor factor de aptitud de cada generación
 F Porcentaje de mejora de cada generación, con respecto a la 1ra Generación

TABLA D-11 SIMULACIÓN VERSIÓN 10.

Opción 2 - E

Promedio de las cotas de la envolvente de sobrepresiones - Promedio de las cotas de la línea piezométrica.
 Promedio de las cotas de la envolvente de depresiones - Promedio de las cotas de la línea piezométrica.

(Altura 2 bits)

	Generaciones																				Relación $\frac{E}{F}$ * K Primera generación	
	1ra	2da	3ra	4ta	5ta	6ta	7ma	8va	9na	10ma	11ma	12ma	13ra	14ta	15ta	16ta	17ma	18va	19na	20ma		
1	4.2008E-06	4.5233E-06	3.9623E-06	4.0786E-06	4.5091E-06	1.9941E-06	4.4139E-06	3.6518E-06	4.4371E-06	4.4365E-06	4.4213E-06	4.4365E-06	4.4139E-06	4.4139E-06	4.4224E-06	4.4078E-06	4.4288E-06	4.4365E-06	4.4213E-06	4.3939E-06	2%	
2	1.9914E-06	4.2265E-06	4.4139E-06	2.8048E-06	2.8224E-06	4.0786E-06	3.5744E-06	4.0675E-06	4.5279E-06	4.0786E-06	4.4213E-06	4.4213E-06	4.4213E-06	4.4213E-06	4.4213E-06	4.4148E-06	4.4148E-06	3.6518E-06	4.0730E-06	4.4139E-06	12%	
3	4.3939E-06	2.8048E-06	3.5853E-06	3.5853E-06	4.0978E-06	3.7134E-06	2.8106E-06	4.4371E-06	4.0786E-06	3.9548E-06	3.7134E-06	4.0424E-06	3.6784E-06	4.0786E-06	4.0786E-06	4.4224E-06	4.0786E-06	3.9548E-06	3.9548E-06	4.4139E-06	16%	
4	2.3263E-06	1.9890E-06	4.4224E-06	3.6784E-06	4.3939E-06	4.0978E-06	4.1149E-06	3.9548E-06	2.8048E-06	4.0180E-06	4.4139E-06	4.4971E-06	4.0786E-06	4.0424E-06	4.4224E-06	4.5233E-06	3.5853E-06	2.8106E-06	4.4371E-06	4.4213E-06	2%	
5	4.4139E-06	4.0620E-06	3.9623E-06	2.8164E-06	4.1149E-06	3.9474E-06	2.8106E-06	4.4288E-06	3.9474E-06	4.5169E-06	3.9623E-06	4.0675E-06	4.1148E-06	4.0620E-06	4.4371E-06	3.9474E-06	3.5853E-06	3.9548E-06	4.4078E-06	3.9623E-06	33%	
6	2.8048E-06	3.9548E-06	3.7134E-06	4.0939E-06	4.4365E-06	4.4078E-06	4.1149E-06	4.5169E-06	4.4288E-06	4.4078E-06	4.2008E-06	4.0675E-06	3.9594E-06	3.9594E-06	3.9594E-06	4.1148E-06	4.4213E-06	4.3939E-06	4.0786E-06	4.4288E-06	5%	
7	3.9474E-06	4.4224E-06	4.0730E-06	3.5744E-06	2.3584E-06	4.0424E-06	4.5169E-06	4.0730E-06	3.5744E-06	4.4078E-06	4.2008E-06	4.4371E-06	4.0786E-06	4.4971E-06	4.0281E-06	3.6048E-06	1.9941E-06	3.5744E-06	4.4139E-06	4.3939E-06	15%	
8	2.8164E-06	4.0424E-06	4.4971E-06	4.5279E-06	3.9404E-06	3.9404E-06	4.4139E-06	4.4139E-06	4.4139E-06	3.9548E-06	4.0786E-06	4.4288E-06	4.4288E-06	4.4288E-06	4.4288E-06	4.4365E-06	4.4365E-06	4.1148E-06	4.0675E-06	3.7134E-06	5%	
9	4.0786E-06	3.7134E-06	4.5279E-06	4.3939E-06	3.6048E-06	4.4224E-06	2.8106E-06	4.4224E-06	4.4224E-06	4.0675E-06	4.4371E-06	4.4371E-06	4.4371E-06	4.4371E-06	4.2265E-06	4.5061E-06	4.0730E-06	4.4078E-06	4.4365E-06	4.0730E-06	30%	
10	3.6784E-06	2.3718E-06	2.8048E-06	4.5061E-06	4.5061E-06	4.4365E-06	4.5279E-06	4.4786E-06	4.4786E-06	4.4958E-06	4.0261E-06	4.5037E-06	4.0730E-06	4.0424E-06	4.4288E-06	3.9548E-06	4.4224E-06	3.9404E-06	4.4371E-06	4.4213E-06	7%	
11	4.1202E-06	3.6048E-06	1.9941E-06	2.8106E-06	4.4224E-06	4.0675E-06	4.0675E-06	4.1308E-06	4.4224E-06	4.1148E-06	4.2139E-06	4.0424E-06	4.0730E-06	4.1883E-06	3.9474E-06	4.4224E-06	3.9404E-06	4.0675E-06	4.0620E-06	4.4288E-06	27%	
12	4.5037E-06	4.4365E-06	4.4365E-06	4.4940E-06	4.4139E-06	4.4365E-06	4.3939E-06	4.3939E-06	4.2265E-06	4.2265E-06	4.4365E-06	4.0620E-06	4.1883E-06	4.1308E-06	3.9474E-06	4.5061E-06	2.8164E-06	3.9623E-06	4.0786E-06	4.4288E-06	21%	
13	4.1148E-06	4.4365E-06	4.4365E-06	4.4365E-06	4.4365E-06	4.5061E-06	4.0620E-06	4.0620E-06	4.4224E-06	4.4224E-06	4.4365E-06	4.0620E-06	3.9474E-06	4.4882E-06	4.4882E-06	4.4882E-06	3.9474E-06	4.1202E-06	4.0786E-06	4.4288E-06	7%	
14	4.4882E-06	2.8106E-06	4.5061E-06	4.0620E-06	4.0342E-06	4.1308E-06	4.4371E-06	4.0620E-06	4.4224E-06	4.5279E-06	3.6518E-06	2.3263E-06	3.9474E-06	4.4882E-06	4.4224E-06	4.0620E-06	3.9404E-06	2.8106E-06	4.0620E-06	3.9474E-06	23%	
15	3.5853E-06	4.0424E-06	4.1883E-06	4.0620E-06	4.0978E-06	3.9404E-06	2.8164E-06	4.5061E-06	4.4224E-06	4.2139E-06	2.3584E-06	4.0620E-06	4.4224E-06	4.4224E-06	4.4224E-06	4.4139E-06	4.0730E-06	3.9474E-06	4.0675E-06	4.0675E-06	10%	
16	1.9868E-06	2.8224E-06	4.0620E-06	4.3939E-06	4.5279E-06	3.6518E-06	4.0675E-06	3.9474E-06	4.3939E-06	4.1063E-06	3.9744E-06	4.0675E-06	4.0786E-06	4.0786E-06	4.4882E-06	4.4224E-06	2.8224E-06	4.3939E-06	4.1308E-06	3.6961E-06	2%	
17	4.5233E-06	1.9914E-06	2.8164E-06	4.4288E-06	4.4288E-06	4.3939E-06	4.5279E-06	4.4078E-06	3.9623E-06	4.4224E-06	4.4224E-06	4.4288E-06	4.2008E-06	4.2008E-06	4.3939E-06	3.9474E-06	3.6518E-06	3.6518E-06	3.7134E-06	4.4213E-06	4.4213E-06	21%
18	2.8164E-06	4.1202E-06	3.9404E-06	4.0786E-06	4.4958E-06	3.7134E-06	4.4882E-06	4.4371E-06	4.5169E-06	4.4371E-06	4.4288E-06	4.2008E-06	4.2008E-06	3.6518E-06	4.0620E-06	4.0620E-06	4.2139E-06	3.9404E-06	4.0786E-06	4.4078E-06	5%	
19	4.0786E-06	4.4371E-06	4.2265E-06	4.0675E-06	4.0342E-06	4.0978E-06	3.9474E-06	4.4139E-06	3.5853E-06	4.1148E-06	4.1148E-06	4.4365E-06	4.5061E-06	4.4078E-06	3.9474E-06	4.0620E-06	4.0620E-06	4.0620E-06	4.4224E-06	4.4224E-06	30%	
20	4.1149E-06	4.5169E-06	4.4078E-06	4.5279E-06	4.4365E-06	4.5279E-06	2.8224E-06	4.5169E-06	4.0675E-06	3.6764E-06	4.0620E-06	3.9474E-06	4.0730E-06	4.1148E-06	4.1148E-06	4.1308E-06	4.1308E-06	3.9404E-06	4.0786E-06	4.0675E-06	23%	
21	2.8164E-06	4.0675E-06	4.4958E-06	4.4882E-06	1.9914E-06	4.4213E-06	4.4224E-06	4.0893E-06	3.9404E-06	4.4224E-06	4.1148E-06	4.4139E-06	4.0730E-06	4.0786E-06	4.0620E-06	3.6961E-06	4.1148E-06	4.2008E-06	4.4288E-06	4.4224E-06	5%	
22	4.4940E-06	2.8164E-06	4.2265E-06	3.9441E-06	4.5169E-06	2.8164E-06	4.1148E-06	4.1308E-06	4.1202E-06	4.5279E-06	4.5279E-06	4.4139E-06	4.1255E-06	4.1883E-06	4.1883E-06	4.4139E-06	3.9404E-06	4.4224E-06	3.9404E-06	4.4365E-06	21%	
23	4.2265E-06	2.8164E-06	4.5279E-06	4.2008E-06	3.7134E-06	4.5169E-06	4.0675E-06	3.9548E-06	4.0675E-06	3.9548E-06	4.4213E-06	3.6518E-06	3.6518E-06	4.1148E-06	4.3665E-06	3.9474E-06	3.9548E-06	4.4371E-06	4.4139E-06	3.6518E-06	12%	
24	4.4139E-06	3.5853E-06	4.1308E-06	4.1308E-06	2.8224E-06	4.0424E-06	4.5233E-06	3.9548E-06	4.4139E-06	4.4139E-06	4.4078E-06	4.2665E-06	4.4078E-06	4.4078E-06	4.4078E-06	4.4371E-06	4.4371E-06	3.9474E-06	4.0730E-06	4.4365E-06	33%	
A→	3.7059E-06	3.6127E-06	3.8604E-06	3.8792E-06	3.9448E-06	4.0169E-06	4.0031E-06	4.1213E-06	4.1411E-06	4.1881E-06	4.1270E-06	4.1644E-06	4.1644E-06	4.1688E-06	4.2325E-06	4.1704E-06	4.0548E-06	3.8569E-06	3.9729E-06	4.2111E-06	4.2625E-06	
B→	23000	97%	104%	105%	106%	108%	108%	111%	111%	112%	113%	111%	112%	112%	114%	113%	109%	104%	107%	114%	115%	F-F
C→	4.5233E-06	4.5279E-06	4.5279E-06																			
D→	1.54.67.2.5	1.54.3	1.54.3	1.54.3	1.54.3	1.54.3	1.54.3	1.54.3	1.54.3	1.54.3	1.54.3	1.54.3	1.54.3	1.54.3	1.54.3	1.54.3	1.54.3	1.54.3	1.54.3	1.54.3	1.54.3	1.54.3
E→	\$46.039.00	\$55.246.80	\$55.246.80	\$55.246.80	\$55.246.80	\$55.246.80	\$55.246.80	\$55.246.80	\$55.246.80	\$55.246.80	\$55.246.80	\$55.246.80	\$55.246.80	\$55.246.80	\$55.246.80	\$55.246.80	\$55.246.80	\$55.246.80	\$55.246.80	\$55.246.80	\$55.246.80	\$55.246.80

A Promedio de los factores de aptitud, para ver como van evolucionando por generación las cámaras
 B Factor K elegido respecto a la Relación $\frac{E}{F}$ * K
 C Factor de aptitud máximo de cada generación

Tabla D-12 SIMULACIÓN VERSIÓN 11.

Opción 2 - F
 Promedio de las cotas de la envolvente de sobrepresiones - Promedio de las cotas de la línea piezométrica.
 Promedio de las cotas en la envolvente de presiones negativas - Promedio del perfil de la línea de conducción del cadenamamiento 0+030 al 0+600.
 (Altura 2 bits)

	Generaciones																			
	1ra	2da	3ra	4ta	5ta	6ta	7ma	8va	9na	10na	11ma	12ma	13ra	14a	15a	16a	17na	18va	19na	20na
1	5.377E-06	4.609E-06	4.298E-06	8.282E-06	8.282E-06	4.947E-06	7.0120E-06	6.9736E-06	8.0133E-06	8.0133E-06	8.9398E-06	8.8849E-06	4.2834E-06	8.6788E-06	8.7620E-06	8.7462E-06	8.5892E-06	8.6892E-06	8.6992E-06	8.293E-06
2	6.9736E-06	6.0963E-06	8.2775E-06	6.9736E-06	6.0504E-06	6.0504E-06	7.4519E-06	6.0732E-06	8.2775E-06	8.0133E-06	8.9398E-06	8.8849E-06	8.2834E-06	8.6788E-06	8.7620E-06	8.7462E-06	8.5892E-06	8.6892E-06	8.6992E-06	8.293E-06
3	8.2775E-06	6.027E-06	4.5644E-06	4.609E-06	6.0963E-06	6.9736E-06	8.9398E-06	8.2775E-06	8.7620E-06	8.0133E-06	8.9398E-06	8.8849E-06	6.9928E-06	8.6788E-06	8.8362E-06	8.7462E-06	8.5892E-06	8.6892E-06	8.6992E-06	8.293E-06
4	4.301E-06	7.0120E-06	4.6218E-06	4.5493E-06	6.0963E-06	6.0504E-06	8.9398E-06	5.4439E-06	8.282E-06	4.301E-06	8.9398E-06	8.8849E-06	8.8362E-06	8.6788E-06	8.8362E-06	8.7620E-06	8.0133E-06	8.9398E-06	8.8849E-06	8.293E-06
5	5.406E-06	4.6218E-06	6.0732E-06	6.9736E-06	4.2894E-06	8.8849E-06	6.0852E-06	8.8362E-06	8.282E-06	8.7620E-06	8.6788E-06	8.6788E-06	8.8362E-06	8.6788E-06	8.8362E-06	8.7620E-06	8.0133E-06	8.9398E-06	8.8849E-06	8.293E-06
6	4.9418E-06	8.7462E-06	6.1118E-06	7.4837E-06	4.5212E-06	8.2902E-06	8.7620E-06	8.2902E-06	8.282E-06	8.9398E-06	8.8849E-06	8.8849E-06	8.8362E-06	8.6788E-06	8.8362E-06	4.9151E-06	8.9398E-06	8.8849E-06	8.8849E-06	8.293E-06
7	4.939E-06	8.2775E-06	6.0808E-06	4.9418E-06	7.0120E-06	6.027E-06	7.0306E-06	6.9736E-06	8.9398E-06	8.9398E-06	8.9398E-06	8.8849E-06	8.8362E-06	8.6788E-06	8.8362E-06	8.7462E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.293E-06
8	7.169E-06	4.939E-06	4.556E-06	8.2902E-06	7.4519E-06	8.133E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.2902E-06	8.9398E-06	8.8849E-06	8.8849E-06	8.8362E-06	8.6788E-06	8.8362E-06	8.7462E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.293E-06
9	5.4439E-06	6.1273E-06	5.4439E-06	5.419E-06	6.0732E-06	6.0732E-06	8.9398E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.6788E-06	8.8362E-06	8.7462E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.293E-06
10	6.1273E-06	4.301E-06	6.9736E-06	4.6218E-06	7.0120E-06	7.0120E-06	8.9398E-06	8.9398E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.6788E-06	8.8362E-06	8.7462E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.293E-06
11	4.301E-06	4.6218E-06	4.556E-06	7.5162E-06	8.9398E-06	8.2775E-06	8.8362E-06	8.2775E-06	8.2775E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.6788E-06	8.8362E-06	8.7462E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.293E-06
12	8.6788E-06	8.8133E-06	6.0732E-06	8.2902E-06	7.0306E-06	7.4837E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.2775E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.6788E-06	8.8362E-06	8.7462E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.293E-06
13	8.8849E-06	4.556E-06	4.9418E-06	4.6218E-06	4.6218E-06	8.9398E-06	8.8849E-06	8.6788E-06	8.8849E-06	8.7462E-06	8.8849E-06	8.8849E-06	8.8849E-06	8.293E-06						
14	4.556E-06	5.4439E-06	5.4439E-06	6.0504E-06	6.0504E-06	8.2775E-06	8.8362E-06	8.6788E-06	8.8362E-06	8.7462E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.293E-06						
15	4.615E-06	8.2902E-06	8.2775E-06	6.9736E-06	8.133E-06	7.2828E-06	6.9828E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.6788E-06	8.8362E-06	8.7462E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.293E-06
16	4.5493E-06	8.1713E-06	5.4439E-06	7.0306E-06	8.8849E-06	8.282E-06	8.8362E-06	8.6788E-06	8.8362E-06	8.7462E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.293E-06						
17	6.0808E-06	6.9928E-06	6.027E-06	4.301E-06	8.2902E-06	8.2902E-06	6.0504E-06	8.0504E-06	7.4519E-06	8.133E-06	8.9398E-06	8.8849E-06	8.8362E-06	8.6788E-06	8.8362E-06	8.7462E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.293E-06
18	6.0963E-06	6.0952E-06	6.0808E-06	8.9892E-06	7.0306E-06	8.8849E-06	8.2775E-06	8.7462E-06	8.7462E-06	8.7462E-06	8.7462E-06	8.7462E-06	8.7462E-06	8.6788E-06	8.7462E-06	8.7462E-06	8.7462E-06	8.7462E-06	8.7462E-06	8.293E-06
19	7.424E-06	4.941E-06	8.2775E-06	8.282E-06	8.282E-06	8.282E-06	8.133E-06	8.6788E-06	8.133E-06	8.133E-06	8.133E-06	8.133E-06	8.133E-06	8.293E-06						
20	4.2962E-06	4.609E-06	4.572E-06	4.941E-06	8.282E-06	7.4244E-06	8.7620E-06	7.5152E-06	8.7620E-06	8.7620E-06	8.7620E-06	8.7620E-06	8.7620E-06	8.6788E-06	8.7620E-06	8.7620E-06	8.7620E-06	8.7620E-06	8.7620E-06	8.293E-06
21	8.8932E-06	5.3773E-06	5.3888E-06	4.9367E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	7.0306E-06	8.6788E-06	7.0306E-06	7.0306E-06	7.0306E-06	7.0306E-06	7.0306E-06	8.293E-06						
22	4.9473E-06	4.5493E-06	5.419E-06	5.373E-06	5.373E-06	7.4244E-06	8.7620E-06	8.6788E-06	8.7620E-06	8.7620E-06	8.7620E-06	8.7620E-06	8.7620E-06	8.293E-06						
23	4.6218E-06	8.7462E-06	6.0963E-06	6.9928E-06	6.9736E-06	7.2828E-06	6.1118E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.6788E-06	8.8362E-06	8.7462E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.293E-06
24	8.7620E-06	4.609E-06	6.0732E-06	8.2775E-06	8.2775E-06	8.2775E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.282E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.6788E-06	8.8362E-06	8.7462E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.8362E-06	8.293E-06
A→	6.0892E-06	6.1085E-06	5.8199E-06	6.4750E-06	7.0558E-06	7.5597E-06	7.7790E-06	7.9795E-06	8.0540E-06	7.5332E-06	7.7506E-06	7.737E-06	8.1199E-06	8.0008E-06	8.5092E-06	8.3156E-06	8.3989E-06	8.3258E-06	8.6075E-06	8.834E-06
B→	19000	101%	96%	107%	116%	125%	128%	131%	133%	131%	128%	127%	134%	132%	140%	137%	138%	137%	143%	146%
C→	8.8962E-06	8.8133E-06	8.2775E-06	8.8962E-06	8.9398E-06	8.9398E-06	8.9398E-06	8.9398E-06	8.8962E-06	8.9398E-06	8.9398E-06	8.9398E-06	8.9398E-06	8.8962E-06	8.9398E-06	8.9398E-06	8.9398E-06	8.9398E-06	8.9398E-06	8.9398E-06
D→	2.5044	2.5044	2.50205	2.5044	3.0331	3.0331	3.0331	3.0331	3.0331	3.0331	3.0331	3.0331	3.0331	3.0331	3.0331	3.0331	3.0331	3.0331	3.0331	3.0331
E→	\$18,415.60	\$18,415.60	\$9,207.80	\$18,415.60	\$18,415.60	\$18,415.60	\$18,415.60	\$18,415.60	\$18,415.60	\$18,415.60	\$18,415.60	\$18,415.60	\$18,415.60	\$18,415.60	\$18,415.60	\$18,415.60	\$18,415.60	\$18,415.60	\$18,415.60	\$18,415.60

A Promedio de los factores de aptitud, para ver como van evolucionando por generación las cámaras
 B Factor K elegido respecto a la Relación \$ - Zap *K
 C Factor de aptitud máximo de cada generación

D Altura - Área - Volumen para la cámara con mejor factor de aptitud de cada generación
 E Precio de la cámara con mejor factor de aptitud de cada generación
 F Porcentaje de mejora de cada generación, con respecto a la 1ra Generación

TABLA D-13 SIMULACIÓN VERSIÓN 12.

Opción 1 - A (Bis)

Cota máxima en la envolvente de sobrepresiones - Cota en línea piezométrica perpendicular a ese punto
 Cota mínima en la envolvente de depresiones - Cota en línea piezométrica perpendicular a ese punto
 (Altura 3 bits)

#	Generaciones																				Porcentaje de relación \$ - Zap* K
	1ra	2da	3ra	4ta	5ta	6ta	7ma	8va	9na	10ma	11ma	12ma	13ra	14ta	15ta	16ta	17ma	18va	19na	20ma	
1	1.2795E-06	1.3118E-06	1.6322E-06	1.5620E-06	1.6608E-06	1.2167E-06	1.2167E-06	1.2167E-06	1.6630E-06	1.6127E-06	1.2167E-06	1.6127E-06	1.4148E-06	1.3029E-06	1.6194E-06	1.7535E-06	1.7535E-06	1.4641E-06	1.7535E-06	1.5342E-06	26%
2	1.3064E-06	1.5422E-06	1.6990E-06	1.6342E-06	1.6630E-06	1.6802E-06	1.2167E-06	1.6321E-06	1.5904E-06	1.4792E-06	1.7535E-06	1.4641E-06	1.4962E-06	1.5765E-06	1.6194E-06	1.4992E-06	1.4992E-06	1.4641E-06	1.7535E-06	1.4065E-06	24%
3	1.3164E-06	1.5214E-06	1.2938E-06	1.5342E-06	1.5765E-06	1.3743E-06	1.6802E-06	1.3611E-06	1.6321E-06	1.4962E-06	1.6802E-06	1.5707E-06	1.6802E-06	1.5422E-06	1.4641E-06	1.8883E-06	1.6194E-06	1.4641E-06	1.5765E-06	1.7244E-06	24%
4	1.5891E-06	1.6643E-06	1.4675E-06	1.2784E-06	1.2167E-06	1.2167E-06	1.2784E-06	1.6406E-06	1.4712E-06	1.4641E-06	1.7244E-06	1.4641E-06	1.5214E-06	1.6802E-06	1.4011E-06	1.6630E-06	1.6918E-06	1.6558E-06	1.6127E-06	1.7244E-06	7%
5	1.5868E-06	1.1890E-06	1.6697E-06	1.5677E-06	1.3743E-06	1.6321E-06	1.4194E-06	1.6194E-06	1.2118E-06	1.7535E-06	1.6173E-06	1.3611E-06	1.6802E-06	1.6630E-06	1.4962E-06	1.4962E-06	1.5765E-06	1.6127E-06	1.3092E-06	1.5765E-06	10%
6	1.4792E-06	1.1767E-06	1.1498E-06	1.3115E-06	1.5745E-06	1.5904E-06	1.4792E-06	1.5765E-06	1.6918E-06	1.5030E-06	1.5811E-06	1.6127E-06	1.6883E-06	1.6024E-06	1.6194E-06	1.6194E-06	1.6127E-06	1.7535E-06	1.6558E-06	1.5765E-06	15%
7	1.4712E-06	1.6417E-06	1.3115E-06	1.5134E-06	1.4229E-06	1.6558E-06	1.3691E-06	1.4229E-06	1.4229E-06	1.6630E-06	1.5030E-06	1.6331E-06	1.6127E-06	1.6630E-06	1.5765E-06	1.6802E-06	1.6918E-06	1.6802E-06	1.6558E-06	1.6918E-06	15%
8	1.5567E-06	1.3064E-06	1.1767E-06	1.5269E-06	1.6558E-06	1.6802E-06	1.6024E-06	1.7244E-06	1.5327E-06	1.6194E-06	1.6194E-06	1.4154E-06	1.6883E-06	1.6802E-06	1.6194E-06	1.4992E-06	1.4992E-06	1.6127E-06	1.5422E-06	1.5422E-06	9%
9	1.3851E-06	1.6406E-06	1.4058E-06	1.4675E-06	1.3512E-06	1.5342E-06	1.2098E-06	1.5393E-06	1.5327E-06	1.5356E-06	1.6194E-06	1.7244E-06	1.6830E-06	1.5811E-06	1.7535E-06	1.5765E-06	1.5422E-06	1.7535E-06	1.6630E-06	1.4641E-06	22%
10	1.5868E-06	1.4105E-06	1.5134E-06	1.5804E-06	1.5904E-06	1.6520E-06	1.3029E-06	1.3563E-06	1.4889E-06	1.2127E-06	1.7938E-06	1.5422E-06	1.5422E-06	1.3611E-06	1.6630E-06	1.6802E-06	1.6802E-06	1.6127E-06	1.6630E-06	1.6630E-06	10%
11	1.3029E-06	1.6417E-06	1.4675E-06	1.3354E-06	1.6597E-06	1.5030E-06	1.4148E-06	1.2127E-06	1.3563E-06	1.2840E-06	1.5953E-06	1.5422E-06	1.6630E-06	1.4641E-06	1.5422E-06	1.5422E-06	1.6918E-06	1.4148E-06	1.7535E-06	1.7244E-06	25%
12	1.4105E-06	1.2784E-06	1.3611E-06	1.4992E-06	1.6421E-06	1.3289E-06	1.5422E-06	1.5422E-06	1.5422E-06	1.7244E-06	1.5677E-06	1.5422E-06	1.4962E-06	1.5422E-06	1.3891E-06	1.6630E-06	1.7244E-06	1.4962E-06	1.6918E-06	1.6630E-06	5%
13	1.6322E-06	1.4011E-06	1.3403E-06	1.6558E-06	1.6342E-06	1.4962E-06	1.4148E-06	1.6778E-06	1.4154E-06	1.2160E-06	1.2118E-06	1.2118E-06	1.6127E-06	1.4962E-06	1.6558E-06	1.5342E-06	1.7244E-06	1.7244E-06	1.6918E-06	1.6630E-06	10%
14	1.5868E-06	1.5214E-06	1.6321E-06	1.3800E-06	1.2840E-06	1.1767E-06	1.4792E-06	1.4968E-06	1.3092E-06	1.6194E-06	1.2744E-06	1.5422E-06	1.6883E-06	1.7244E-06	1.5765E-06	1.4148E-06	1.7535E-06	1.4641E-06	1.6194E-06	1.4962E-06	30%
15	1.2118E-06	1.6257E-06	1.6697E-06	1.2167E-06	1.6500E-06	1.5393E-06	1.2840E-06	1.6918E-06	1.5422E-06	1.4735E-06	1.4962E-06	1.2784E-06	1.5342E-06	1.4962E-06	1.5342E-06	1.4994E-06	1.6630E-06	1.5422E-06	1.5422E-06	1.5342E-06	32%
16	1.6500E-06	1.4675E-06	1.6192E-06	1.6127E-06	1.6990E-06	1.6342E-06	1.6300E-06	1.5891E-06	1.5765E-06	1.5677E-06	1.5356E-06	1.5765E-06	1.4792E-06	1.4792E-06	1.5342E-06	1.6558E-06	1.6558E-06	1.4148E-06	1.7244E-06	1.6630E-06	5%
17	1.1767E-06	1.3064E-06	1.6257E-06	1.6883E-06	1.1767E-06	1.6194E-06	1.4641E-06	1.1767E-06	1.3563E-06	1.5134E-06	1.3611E-06	1.2118E-06	1.4792E-06	1.6558E-06	1.6421E-06	1.4148E-06	1.6778E-06	1.6778E-06	1.4641E-06	1.4641E-06	10%
18	1.4235E-06	1.2515E-06	1.3851E-06	1.5214E-06	1.4675E-06	1.4011E-06	1.3403E-06	1.3563E-06	1.5030E-06	1.6630E-06	1.4148E-06	1.6778E-06	1.6918E-06	1.6918E-06	1.4962E-06	1.6194E-06	1.4962E-06	1.6194E-06	1.6918E-06	1.6558E-06	19%
19	1.5356E-06	1.6257E-06	1.6417E-06	1.4641E-06	1.4712E-06	1.4237E-06	1.5342E-06	1.4237E-06	1.6778E-06	1.4148E-06	1.3611E-06	1.5891E-06	1.6630E-06	1.6802E-06	1.6558E-06	1.4641E-06	1.6127E-06	1.6127E-06	1.4962E-06	1.5891E-06	12%
20	1.6697E-06	1.5214E-06	1.4503E-06	1.3681E-06	1.5422E-06	1.5707E-06	1.5677E-06	1.4065E-06	1.6127E-06	1.4675E-06	1.4148E-06	1.2167E-06	1.6421E-06	1.5342E-06	1.4148E-06	1.6558E-06	1.5891E-06	1.4962E-06	1.5765E-06	1.7535E-06	4%
21	1.6520E-06	1.2394E-06	1.3115E-06	1.3403E-06	1.6127E-06	1.4962E-06	1.6331E-06	1.4237E-06	1.5422E-06	1.7176E-06	1.6321E-06	1.6802E-06	1.5891E-06	1.7244E-06	1.6558E-06	1.6918E-06	1.6127E-06	1.4154E-06	1.4962E-06	1.4641E-06	4%
22	1.6321E-06	1.5620E-06	1.3029E-06	1.1890E-06	1.3512E-06	1.4148E-06	1.5707E-06	1.6883E-06	1.6406E-06	1.4792E-06	1.6331E-06	1.3563E-06	1.6918E-06	1.6630E-06	1.4962E-06	1.6127E-06	1.4641E-06	1.4962E-06	1.4962E-06	1.5765E-06	6%
23	1.5707E-06	1.5356E-06	1.6786E-06	1.5904E-06	1.5204E-06	1.3933E-06	1.4011E-06	1.6127E-06	1.2127E-06	1.5811E-06	1.6802E-06	1.6194E-06	1.5422E-06	1.6558E-06	1.6194E-06	1.3611E-06	1.6127E-06	1.4148E-06	1.7244E-06	1.7535E-06	10%
24	1.5868E-06	1.5904E-06	1.4148E-06	1.5214E-06	1.4735E-06	1.6406E-06	1.2106E-06	1.5811E-06	1.4154E-06	1.6321E-06	1.6778E-06	1.4154E-06	1.2740E-06	1.5342E-06	1.4962E-06	1.6194E-06	1.6194E-06	1.4962E-06	1.6194E-06	1.6194E-06	10%
A→	1.4928E-06	1.4572E-06	1.4652E-06	1.4732E-06	1.5113E-06	1.5113E-06	1.4954E-06	1.4954E-06	1.4963E-06	1.5299E-06	1.5386E-06	1.5063E-06	1.5842E-06	1.5888E-06	1.5702E-06	1.5816E-06	1.6251E-06	1.5887E-06	1.5887E-06	1.6238E-06	
B→	5000	98%	99%	99%	102%	102%	98%	101%	101%	103%	104%	102%	107%	106%	106%	107%	110%	106%	108%	110%	←F
C→	1.6597E-06	1.6643E-06	1.6990E-06	1.6883E-06	1.6990E-06	1.6802E-06	1.6802E-06	1.7535E-06	1.7244E-06	1.7535E-06	1.7535E-06	1.7535E-06	1.6918E-06	1.7244E-06	1.7535E-06	1.7535E-06	1.7535E-06	1.7535E-06	1.7535E-06	1.7535E-06	
D→	1.2-5.2.5	1-2-2	1-1-1	1-1-5-1.5	1-1-1	1-0-5-0.5	1-0-5-0.5	1-0-5-0.5	1-0-5-0.5	1-0-5-0.5	1-0-5-0.5	1-0-5-0.5	2-0-25-0.5	1-5-0-33-0.5	1-0-5-0.5	1-0-5-0.5	1-0-5-0.5	1-0-5-0.5	1-0-5-0.5	1-0-5-0.5	
E→	\$46,039.00	\$36,831.20	\$18,415.60	\$27,623.40	\$18,415.60	\$9,207.80	\$9,207.80	\$9,207.80	\$9,207.80	\$9,207.80	\$9,207.80	\$9,207.80	\$9,207.80	\$9,207.80	\$9,207.80	\$9,207.80	\$9,207.80	\$9,207.80	\$9,207.80	\$9,207.80	

A Promedio de los factores de aptitud, para ver como van evolucionando por generación las cámaras
 B Factor K elegido respecto a la Relación \$ - ΣΔP*K
 C Factor de aptitud máximo de cada generación
 D Altura - Área - Volumen para la cámara con mejor factor de aptitud de cada generación
 E Precio de la cámara con mejor factor de aptitud de cada generación
 F Porcentaje de mejora de cada generación, con respecto a la 1ra Generación

TABLA D-14 SIMULACIÓN VERSIÓN 13.

BIBLIOGRAFÍA

- Barnes de México, S.A. de C.V. (s.f.). Bombas centrífugas multietapas verticales BMV. *Folleto de Equipos de bombeo*. México. Recuperado el 05 de Noviembre de 2018, de http://barmesa.com.mx/productos/pdfs/folleto_serie-bmv_mx.pdf
- Biscontini, T. (2017). Genetic algorithm (GA). *Salem Press Encyclopedia of Health*.
- Bozorg Haddad, O. (Ed.). (2018). *Advanced Optimization by Nature-Inspired Algorithms* (Vol. 720). Singapore, Singapore: Springer. doi:10.1007/978-981-10-5221-7
- Cafaggi Félix, A. A., Rodal Canales, E. A., & Sánchez Huerta, A. (2011). Clasificación de los flujos. En A. A. Cafaggi Félix, E. A. Rodal Canales, & A. Sánchez Huerta, *Sistemas de bombeo* (págs. 17-18). D.F., Coyoacán, México: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, Facultad de Ingeniería.
- Carmona Paredes, L. G., & Carmona Paredes, R. (Septiembre de 2013). SERIE MANUALES, Instituto de Ingeniería, UNAM. *Manual versión 2010.1.0 del sistema de simulación de transitorios hidráulicos en tuberías a presión Trans*. Ciudad de México, México: Instituto de Ingeniería, UNAM. Obtenido de <http://aplicaciones.iingen.unam.mx/ConsultasSP11/Buscarnpublicacion.aspx>
- Carmona Paredes, R., & Aguilar Moreno, L. (Enero-Abril de 1987). Transitorios hidráulicos en conductos a presión. *Ingeniería Hidráulica en México*, 90.
- Chaudhry, M. H. (2014). *Applied Hydraulic Transients* (3rd. ed.). Columbia, South Carolina, USA: Springer.
- Comisión Nacional del Agua. (2015). *Fenómenos transitorios en líneas de conducción*. (2015 ed., Vol. 11). (S. d. Naturales, Ed.) Coyoacán, México D.F., México: Comisión Nacional del Agua.
- Corrosionpedia Inc. (2018). *Corrosionpedia*. Recuperado el 1 de Octubre de 2018, de <https://www.corrosionpedia.com/definicion/965/red-water>
- Dréo, J., Pétrowski, A., Siarry, P., & Taillard, E. (2006). *Metaheuristics for Hard Optimization. Methods and Case Studies*. (A. Chatterjee, Trans.) Berlin, Germany: Springer.

-
- F Boulos, P., Karney, B., Wood, D., & Lingireddy, S. (May de 2005). Hydraulic Transient Guidelines for Protecting Water Distribution Systems. *Journal - American Water Works Association*, 111-124. doi:10.1002/j.1551-8833.2005.tb10892.x
- Felices, A. R. (2007). *Hidráulica de Tuberías y Canales*. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Guaycochea Guglielmi, D. E. (2009). *Máquinas hidráulicas: turbobombas* (Segunda ed.). México D.F., México: Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco.
- Instituto de Ingeniería. (1985). Fascículo IV. Control de Transitorios Hidráulicos. En R. Guarga Ferro, J. L. Sánchez Bibriesca, R. Carmona Paredes, & L. Aguilar Moreno, *Diseño y operación hidráulicos de conducciones de agua a presión*. (Vol. IV). D.F., D.F., México: Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.
- Jimenez Magaña, M. R., Espinosa Peralta, S. P., Rodríguez Vazquez, K., & Sosa Rodríguez, M. (2013). DISEÑO ÓPTIMO DE CÁMARAS DE AIRE PARA MITIGAR LOS EFECTOS DE LOS TRANSITORIOS GENERADOS POR PARO DE EQUIPO DE BOMBEO EN ACUEDUCTOS. *XII Simposio Iberoamericano sobre planeación de sistemas de abastecimiento y drenaje*, 5.
- Kramer, O. (2017). *Genetic algorithm essentials*. Cham , Switzerland: Springer.
- Lechevallier, M., W Gullick, R., R Karim, M., Friedman, M., & E Funk, J. (April de 2003). The potential for health risks from intrusion of contaminants into the distribution system from pressure transients. *Journal of water and health*, 3-14. doi:10.2166/wh.2003.0002
- M. Abreu, J., Guarga, R., & Izquierdo, J. (s.f.). Introducción al estudio de los transitorios hidráulicos. En *Transitorios y oscilaciones en Sistemas Hidráulicos a Presión*.
- Márquez Gómez, M. (2014). Las metaheurísticas: tendencias actuales y su aplicabilidad en la ergonomía. *Ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias*, IV(12), 108-120. Recuperado el 26 de Octubre de 2018, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=215037911009>
- Massey, B. (2006). *Mechanics of fluids* (8th ed.). Abingdon, Oxon: Taylor & Francis.
- Mataix, C. (1986). *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas* (2da. ed.). Madrid, España: Ediciones de Castillo, S. A.
- Melián, B., Moreno Pérez, J., & Moreno Vega, J. (2003). Metahe. *Inteligencia Artificial, Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*.(19), 7-22.
- Mott, R. L. (2006). 8 Número de Reynolds, flujo laminar, flujo turbulento y pérdidas de energía debido a la fricción. En R. L. Mott, *Mecánica de fluidos* (Sexta ed., págs. 226-229). México, D.F.: PEARSON EDUCACION.

-
- Obaihnahatti, B. G. (2018, August). A Literature Survey on Artificial Swarm Intelligence based Optimization. (Dr. Kavita, & D. Verma , Eds.) *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*, 7(4.12).
- Parmakian, J. (1963). *Waterhammer Analysis*. Dover, New York, United States of America: Dover Publications, Inc.
- Patnaik, S., Yang, X.-S., & Nakamatsu, K. (Eds.). (2017). *Nature-Inspired Computing and Optimization. Theory and Applications*. (Vol. 10). Cham, Switzerland: Springer.
- Ramalingam, D. (2007). DESIGN AIDS FOR AIR VESSELS FOR. *A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in College of Engineering at the University of Kentucky*. Lexington, Kentucky, U.S.A.: University of Kentucky.
- Robert W. Fox, A. t. (2004). *Introduction to Fluid Mechanics* (Sixth Edition ed.). USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Shanmuganathan, S., & Samarasinghe , S. (Edits.). (2016). *Artificial Neural Network Modeling* (Vol. 628). Switzerland: Springer.
- Sotelo Ávila, G. (1997). Clasificación de los flujos. En G. S. Ávila, *Hidráulica General* (págs. 96-98). México, D.F.: Limusa.
- Spillman, R. (1993, February). GENETIC ALGORITHMS. NATURE'S WAY TO SEARCH FOR THE BEST. (J. Erickson , Ed.) *Dr. Dobb's Journal*, 18, 26-30.
- Thorley, A. R. (2004). *Fluid Transients in Pipeline Systems*. London, UK: Professional Engineering Publishing.
- Vélez, M. C., & Montoya, J. A. (Diciembre de 2007). METAHEURÍSTICOS: UNA ALTERNATIVA PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS COMBINATORIOS EN ADMINISTRACIÓN DE OPERACIONES. *EIA*(8), 99-115. Recuperado el 26 de Octubre de 2018, de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372007000200009&lng=en&tIng=es.
- Zarco Hernández, J. Á. (Enero de 2000). Método simplificado para el predimensionamiento de cámaras de aire. *Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil*. D.F., México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Zarco Hernández, J. Á. (Enero de 2002). Predimensionamiento de dispositivos de control de transitorios en plantas de bombeo. *Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Hidráulica*. D.F., México: Universidad Nacional Autónoma de México.

