



Universidad de los Andes  
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental  
Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA  
*Efecto del uso de ecuaciones empíricas vs ecuaciones físicamente  
basadas sobre los costos de diseños optimizados en acueductos.*

IAMB 201210 29



---

Universidad de los Andes  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental  
Centro de Investigaciones en Acueductos y  
Alcantarillados  
**CIACUA**



**Efecto del uso de ecuaciones empíricas vs físicamente  
basadas sobre los costos de diseños optimizados en  
acueductos.**

Proyecto de Grado  
Ingeniería Ambiental

**Juan David Uribe Rojas**



Bogotá, Junio de 2012

## Agradecimientos

Un especial agradecimiento al Ingeniero Juan Guillermo Saldarriaga Valderrama, asesor de esta tesis, por la gran ayuda, guía y asistencia proporcionada sin la cual este proyecto de grado no hubiera sido posible desarrollar. A su vez un agradecimiento especial a Diego Alejandro Páez, Paula Andrea Cuero, Claudia Stella Solano, Rafael Alejandro Flechas y Daniela Rincón Romero por su apoyo y aportes con los cuales el proyecto avanzó y se realizó de forma exitosa.

Así mismo un agradecimiento a todo el personal del Centro de investigaciones de Acueducto y Alcantarillado (CIACUA) por la ayuda suministrada en la realización de este proyecto de grado.

Gracias a Dios, a mis amados Padres Álvaro Francisco Uribe Cálad y Martha Dolly Rojas Ospina, a mi familia en Medellín y a todos los que han creído en mí y siempre me han brindado su apoyo y estímulo.



## Resumen

En los diseños optimizados de Redes de Distribución de Agua Potable (RDAP) se han utilizado comúnmente ecuaciones empíricas o físicamente basadas, para el cálculo de las pérdidas por fricción. Dentro de las más destacables se encuentra la ecuación empírica de Hazen-Williams y la ecuación físicamente basada de Darcy-Weisbach. Siendo la primera una ecuación explícita en la solución de las pérdidas por fricción, por lo que su uso en el contexto internacional y en el marco colombiano es extenso. Sin embargo al ser una ecuación empírica, se encuentra sujeta a restricciones de uso y a un número importante de limitaciones, las cuales en muchos casos no son tenidas en cuenta por los ingenieros a la hora de realizar los diseños de las RDAP. Por este motivo, en este proyecto se realizaron análisis en cuanto a costos en el momento de diseñar con la ecuación de Hazen-Williams comparándolos con los costos de diseñar con la Ecuación de Darcy-Weisbach para los materiales: hierro dúctil, PVC y polietileno de alta densidad (PEAD).

En este trabajo se simularon, se diseñaron y se analizaron redes como la red Balerna, San Vicente, R28, Bogotá-Cazucá y tres redes hipotéticas diseñadas por el autor. Con los resultados obtenidos se van a mostrar los riesgos y serias limitaciones que puede tener la ecuación de Hazen-Williams y porqué su uso debe ser restringido y seriamente vigilado por la normativa colombiana.



## CONTENIDO

<b>Tabla de Ilustraciones</b> .....	VI
<b>Tablas</b> .....	XIII
<b>Capítulo 1 Introducción</b> .....	1
<b>1.1 Objetivos</b> .....	2
<b>Capítulo 2 Marco Teórico</b> .....	3
<b>2.1 Ecuaciones y fórmulas utilizadas En los diseños de RDAP.</b> .....	3
<b>2.1.1 Ecuación de Hazen y Williams</b> .....	4
<b>2.1.2 Ecuación de Darcy-Weisbach</b> .....	5
<b>2.1.3 Antecedentes Históricos</b> .....	10
<b>2.2 Diseños Optimizados</b> .....	16
<b>2.3 Programas Utilizados durante el Proyecto</b> .....	17
<b>2.3.1 Programa REDES</b> .....	17
<b>2.3.3 Programa EPANET 2.0</b> .....	20
<b>2.4 Materiales utilizados y sus características</b> .....	21
<b>2.4.1 Rugosidades absolutas</b> .....	21
<b>2.4.2 Coeficientes de Hazen-Williams</b> .....	23
<b>2.4.3 Diámetros comerciales y Curvas de costo</b> .....	24
<b>2.4.3.1 PVC</b> .....	24
<b>2.4.3.2 PEAD</b> .....	26
<b>2.4.3.3 HIERRO DÚCTIL</b> .....	29
<b>Capítulo 3. Metodología</b> .....	33
<b>3.1 Red San Vicente</b> .....	33
<b>3.2 Red Balerna</b> .....	34
<b>3.3 Red Bogotá-Cazucá</b> .....	35
<b>3.4 Red R28</b> .....	36
<b>3.5 Red Tesis 1</b> .....	36
<b>3.6 Red Tesis 2</b> .....	37
<b>3.7 Red Tesis 3</b> .....	38
<b>3.8 Procedimiento para la obtención de los diseños</b> .....	39
<b>Capítulo 4. Resultados</b> .....	48



---

<b>4.1 Red San Vicente</b> .....	49
<b>4.2 Red Balerna</b> .....	54
<b>4.3 Red Bogotá-Cazucá</b> .....	58
<b>4.4 Red R28</b> .....	62
<b>4.5 Red Tesis 1</b> .....	66
<b>4.6 Red Tesis 2</b> .....	70
<b>4.7 Red Tesis 3</b> .....	74
<b>Capítulo 5 Análisis de resultados</b> .....	78
<b>5.1 Red San Vicente</b> .....	78
<b>5.2 Red Balerna</b> .....	79
<b>5.3 Red Bogotá-Cazucá</b> .....	83
<b>5.4 Red R28</b> .....	86
<b>5.5 Red Tesis 1</b> .....	89
<b>5.6 Red Tesis 2</b> .....	92
<b>5.7 Red Tesis 3</b> .....	95
<b>5.8 Resumen de resultados</b> .....	98
<b>Capítulo 6 Conclusiones</b> .....	99
<b>Capítulo 7 Recomendaciones</b> .....	100
<b>Bibliografía</b> .....	101
<b>Anexos</b> .....	102

## TABLA DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 1. Diagrama de Moody.</b>	9
<b>Ilustración 2. Variación del coeficiente de Hazen-Williams con respecto al número de Reynolds y el diámetro encontrado por Liou (Liou, 1998).</b>	12
<b>Ilustración 3. Diagrama de Moody realizado por Diskin 1960 donde se muestran variaciones y representaciones de los coeficientes de Hazen-Williams (B.A. Christensen, 2000).</b>	14
<b>Ilustración 4. Diagrama de flujo de la metodología sogh desarrollada por susana ochoa (Ochoa, 2009).</b>	20
<b>Ilustración 5. Tabla de rugosidades absolutas del libro de hidráulica de tuberías (Saldarriaga, 2007).</b>	22
<b>Ilustración 6. Rugosidades absolutas del RAS (Ministerio de Desarrollo Economico, 2000).</b>	23
<b>Ilustración 7. Lista de diámetros comerciales disponibles para PVC (PAVCO, 2011).</b>	24
<b>Ilustración 8. Curva de costos para PVC.</b>	26
<b>Ilustración 9. Curva de costos para PEAD.</b>	29
<b>Ilustración 10. Curva de costos para hierro dúctil.</b>	32
<b>Ilustración 11. Red San Vicente.</b>	33
<b>Ilustración 12. Red Balerma.</b>	34
<b>Ilustración 13. Red Bogotá-Cazucá.</b>	35
<b>Ilustración 14. Red R28.</b>	36
<b>Ilustración 15. Red Tesis 1.</b>	37
<b>Ilustración 16. Red Tesis 2.</b>	38
<b>Ilustración 17. Red Tesis 3.</b>	39
<b>Ilustración 18. Interfaz del Programa REDES.</b>	40
<b>Ilustración 19. Cargar la Red a Trabajar.</b>	40
<b>Ilustración 20. Verificación de los parámetros.</b>	41
<b>Ilustración 21. Prueba inicial para correr la Hidráulica en estado Estable.</b>	41
<b>Ilustración 22. Parametros de diseño: Curva de Costos, Diámetros y Ecuacion que se desea utilizar.</b>	42
<b>Ilustración 23. Ventana de Diseño con Metodología SOGH.</b>	43
<b>Ilustración 24. Cálculo de la Flecha.</b>	43
<b>Ilustración 25. Diseño exitoso de la red.</b>	44
<b>Ilustración 26. Mensaje de error.</b>	45
<b>Ilustración 27. Resultados en REDES.</b>	45
<b>Ilustración 28 Exportar los resultados.</b>	46
<b>Ilustración 29. Costos de la red.</b>	46
<b>Ilustración 30. Gráfica de costos red San Vicente caudales normales.</b>	50
<b>Ilustración 31. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para hierro dúctil.</b>	51
<b>Ilustración 32. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams despues de Correr la hidráulica con la ecuacion de Darcy-Weisbach para hierro dúctil.</b>	51
<b>Ilustración 33. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para PVC.</b>	52

<b>Ilustración 34. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PVC.</b>	52
<b>Ilustración 35. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para PEAD.</b>	53
<b>Ilustración 36. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PEAD.</b>	53
<b>Ilustración 37. Gráfica de costos Red Balerma con caudales normales.</b>	54
<b>Ilustración 38. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para hierro dúctil.</b>	55
<b>Ilustración 39. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para hierro dúctil.</b>	55
<b>Ilustración 40. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para PVC.</b>	56
<b>Ilustración 41. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PVC.</b>	56
<b>Ilustración 42. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para PEAD.</b>	57
<b>Ilustración 43. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PEAD.</b>	57
<b>Ilustración 44. Gráfica de costos de la Red Bogotá-Cazucá con caudales normales.</b>	58
<b>Ilustración 45. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para hierro dúctil.</b>	59
<b>Ilustración 46. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para hierro dúctil.</b>	59
<b>Ilustración 47. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para PVC.</b>	60
<b>Ilustración 48. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PVC.</b>	60
<b>Ilustración 49. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para PEAD.</b>	61
<b>Ilustración 50. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PEAD.</b>	61
<b>Ilustración 51. Gráfica de costos de la Red R28 con caudales normales.</b>	62
<b>Ilustración 52. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para hierro dúctil.</b>	63
<b>Ilustración 53. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para Hierro dúctil.</b>	63
<b>Ilustración 54. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para PVC.</b>	64
<b>Ilustración 55. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PVC.</b>	64
<b>Ilustración 56. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para PEAD.</b>	65
<b>Ilustración 57. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PEAD.</b>	65
<b>Ilustración 58. Gráfica de costos de la Red Tesis 1 con caudales normales.</b>	66
<b>Ilustración 59. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para hierro dúctil.</b>	67
<b>Ilustración 60. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para hierro dúctil.</b>	67
<b>Ilustración 61. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para PVC.</b>	68
<b>Ilustración 62. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PVC.</b>	68
<b>Ilustración 63. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para PEAD.</b>	69

<b>Ilustración 64. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PEAD.</b>	69
<b>Ilustración 65. Gráfica de costos para la Red Tesis 2 con caudales normales.</b>	70
<b>Ilustración 66. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para hierro dúctil.</b>	71
<b>Ilustración 67. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para hierro dúctil.</b>	71
<b>Ilustración 68. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para PVC.</b>	72
<b>Ilustración 69. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PVC.</b>	72
<b>Ilustración 70. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para PEAD.</b>	73
<b>Ilustración 71. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PEAD.</b>	73
<b>Ilustración 72. Gráfica de costos de la Red Tesis 3 con caudales normales.</b>	74
<b>Ilustración 73. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para hierro dúctil.</b>	75
<b>Ilustración 74. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para hierro dúctil.</b>	75
<b>Ilustración 75. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para PVC.</b>	76
<b>Ilustración 76. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PVC.</b>	76
<b>Ilustración 77. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para PEAD.</b>	77
<b>Ilustración 78. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PEAD.</b>	77
<b>Ilustración 79. Comparación entre el diseño y su comprobación.</b>	79
<b>Ilustración 80. Comparación entre el diseño y su comprobación.</b>	80
<b>Ilustración 81. Comparación entre el diseño y su comprobación.</b>	84
<b>Ilustración 82. Comparación entre el diseño y su comprobación.</b>	87
<b>Ilustración 83. Comparación entre el diseño y su comprobación.</b>	90
<b>Ilustración 84. Comparación entre el diseño y su comprobación.</b>	93
<b>Ilustración 85. Comparación entre el diseño y su comprobación.</b>	96
<b>Ilustración 86. Gráfica de costos red San Vicente caudales duplicados.</b>	102
<b>Ilustración 87. presiones con la ecuación de hazen-Williams para hierro dúctil.</b>	103
<b>Ilustración 88. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams despues de Correr la hidráulica con la ecuacion de Darcy-Weisbach para hierro dúctil.</b>	103
<b>Ilustración 89. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para PVC.</b>	104
<b>Ilustración 90. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PVC.</b>	104
<b>Ilustración 91. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para PEAD.</b>	105
<b>Ilustración 92. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PEAD.</b>	105
<b>Ilustración 93. Gráfica de costos Red San Vicente con caudales Cuadruplicados.</b>	106
<b>Ilustración 94. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para hierro dúctil.</b>	107
<b>Ilustración 95. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para hierro dúctil.</b>	107
<b>Ilustración 96. Presiones con la ecuación de Darcy-Weisbach para hierro dúctil.</b>	108

<b>Ilustración 97. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams con PVC.</b>	108
<b>Ilustración 98. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach.</b>	109
<b>Ilustración 99. Presiones con la ecuación de Darcy-Weisbach para PVC.</b>	109
<b>Ilustración 100. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para PEAD.</b>	110
<b>Ilustración 101. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PEAD.</b>	110
<b>Ilustración 102. Presiones con la ecuación de Darcy-Weisbach para PEAD.</b>	111
<b>Ilustración 103. Gráfica de los costos de la Red Balerma con caudales duplicados.</b>	112
<b>Ilustración 104. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams con hierro dúctil.</b>	112
<b>Ilustración 105. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para hierro dúctil.</b>	113
<b>Ilustración 106. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para PVC.</b>	113
<b>Ilustración 107. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PVC.</b>	114
<b>Ilustración 108. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para PEAD.</b>	114
<b>Ilustración 109. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PEAD.</b>	115
<b>Ilustración 110. Gráfica de costos de la Red Balerma con caudales cuadruplicados.</b>	116
<b>Ilustración 111. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para hierro dúctil.</b>	116
<b>Ilustración 112. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para hierro dúctil.</b>	117
<b>Ilustración 113. Presiones con la ecuación de Darcy-Weisbach para hierro dúctil.</b>	117
<b>Ilustración 114. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para PVC.</b>	118
<b>Ilustración 115. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PVC.</b>	118
<b>Ilustración 116. Presiones con la ecuación de Darcy-Weisbach para pvc.</b>	119
<b>Ilustración 117. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para PEAD.</b>	119
<b>Ilustración 118. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PEAD.</b>	120
<b>Ilustración 119. Presiones con la ecuación de Darcy-Weisbach para PEAD.</b>	120
<b>Ilustración 120. Gráfica de costos de la Red Bogotá-Cazucá con caudales duplicados.</b>	121
<b>Ilustración 121. Presiones con al ecuación de Hazen-Williams para hierro dúctil.</b>	122
<b>Ilustración 122. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para hierro dúctil.</b>	122
<b>Ilustración 123. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para PVC.</b>	123
<b>Ilustración 124. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PVC.</b>	123
<b>Ilustración 125. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para PEAD.</b>	124
<b>Ilustración 126. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PEAD.</b>	124
<b>Ilustración 127. Gráfica de costos de la Red Bogotá-Cazucá con caudales cuadruplicados.</b>	125
<b>Ilustración 128. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para hierro dúctil.</b>	126

<b>Ilustración 129. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para hierro dúctil.</b>	126
<b>Ilustración 130. Presiones con la ecuación de Darcy-Weisbach para hierro dúctil.</b>	127
<b>Ilustración 131. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para PVC.</b>	127
<b>Ilustración 132. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PVC.</b>	128
<b>Ilustración 133. Presiones con la ecuación de Darcy-Weisbach para PVC.</b>	128
<b>Ilustración 134. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para PEAD.</b>	129
<b>Ilustración 135. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PEAD.</b>	129
<b>Ilustración 136. Presiones con la ecuación de Darcy-Weisbach para PEAD.</b>	130
<b>Ilustración 137. Gráfica de costos para la Red R28 con caudales duplicados.</b>	131
<b>Ilustración 138. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para hierro dúctil.</b>	131
<b>Ilustración 139. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para hierro dúctil.</b>	132
<b>Ilustración 140. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para PVC.</b>	132
<b>Ilustración 141. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PVC.</b>	133
<b>Ilustración 142. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para PEAD.</b>	133
<b>Ilustración 143. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PEAD.</b>	134
<b>Ilustración 144. Gráfica de costos de la Red R28 con caudales cuadruplicados.</b>	135
<b>Ilustración 145. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para hierro dúctil.</b>	135
<b>Ilustración 146. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para hierro dúctil.</b>	136
<b>Ilustración 147. Presiones con la ecuación de Darcy-Weisbach para hierro dúctil.</b>	136
<b>Ilustración 148. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para PVC.</b>	137
<b>Ilustración 149. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PVC.</b>	137
<b>Ilustración 150. Presiones con la ecuación de Darcy-Weisbach para PVC.</b>	138
<b>Ilustración 151. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para PEAD.</b>	138
<b>Ilustración 152. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PEAD.</b>	139
<b>Ilustración 153. Presiones con la ecuación de Darcy-Weisbach para PEAD.</b>	139
<b>Ilustración 154. Gráfica de costos de la Red Tesis 1 para caudales duplicados.</b>	140
<b>Ilustración 155. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para hierro dúctil.</b>	141
<b>Ilustración 156. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para hierro dúctil.</b>	141
<b>Ilustración 157. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para PVC.</b>	142
<b>Ilustración 158. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PVC.</b>	142
<b>Ilustración 159. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para PEAD.</b>	143
<b>Ilustración 160. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PEAD.</b>	143

<b>Ilustración 161. Gráfica de costos para la Red Tesis 1 con caudales cuadruplicados.</b>	144
<b>Ilustración 162. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para hierro dúctil.</b>	145
<b>Ilustración 163. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para hierro dúctil.</b>	145
<b>Ilustración 164. Presiones con la ecuación de Darcy-Weisbach para hierro dúctil.</b>	146
<b>Ilustración 165. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para PVC.</b>	146
<b>Ilustración 166. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PVC.</b>	147
<b>Ilustración 167. Presiones con la ecuación de Darcy-Weisbach para PVC.</b>	147
<b>Ilustración 168. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para PEAD.</b>	148
<b>Ilustración 169. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PEAD.</b>	148
<b>Ilustración 170. Presiones con la ecuación de Darcy-Weisbach para PEAD.</b>	149
<b>Ilustración 171. Gráfica de costos para la Red Tesis 2 con caudales duplicados.</b>	150
<b>Ilustración 172. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para hierro dúctil.</b>	150
<b>Ilustración 173. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para hierro dúctil.</b>	151
<b>Ilustración 174. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para PVC.</b>	151
<b>Ilustración 175. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PVC.</b>	152
<b>Ilustración 176. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para PEAD.</b>	152
<b>Ilustración 177. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PEAD.</b>	153
<b>Ilustración 178. Gráfica de costos de la Red Tesis 2 con caudales cuadruplicados.</b>	154
<b>Ilustración 179. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para Hierro Dúctil.</b>	154
<b>Ilustración 180. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para hierro dúctil.</b>	155
<b>Ilustración 181. Presiones con la ecuación de Darcy-Weisbach para hierro dúctil.</b>	155
<b>Ilustración 182. Presiones con la de Hazen-Williams para pvc.</b>	156
<b>Ilustración 183. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PVC.</b>	156
<b>Ilustración 184. Presiones con la ecuación de Darcy-Weisbach para PVC.</b>	157
<b>Ilustración 185. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para PEAD.</b>	157
<b>Ilustración 186. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PEAD.</b>	158
<b>Ilustración 187. Presiones con la ecuación de Darcy-Weisbach para PEAD.</b>	158
<b>Ilustración 188. Gráfica de costos para la Red Tesis 3 con caudales Duplicados.</b>	159
<b>Ilustración 189. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para hierro dúctil.</b>	160
<b>Ilustración 190. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para hierro dúctil.</b>	160
<b>Ilustración 191. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para PVC.</b>	161
<b>Ilustración 192. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PVC.</b>	161
<b>Ilustración 193. Presiones con la ecuacion de Hazen-Williams para PEAD.</b>	162



<b>Ilustración 194. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PEAD.</b>	162
<b>Ilustración 195. Gráfica de costos de la Red Tesis 3 con caudales cuadruplicados.</b>	163
<b>Ilustración 196. Presiones de la ecuación de Hazen-Williams para hierro dúctil.</b>	164
<b>Ilustración 197. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para hierro dúctil.</b>	164
<b>Ilustración 198. Presiones para la ecuación de Darcy-Weisbach para hierro dúctil.</b>	165
<b>Ilustración 199. Presiones con la ecuación de Hazen-Williams para PVC.</b>	165
<b>Ilustración 200. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PVC.</b>	166
<b>Ilustración 201. Presiones con la ecuación de Darcy-Weisbach para PVC.</b>	166
<b>Ilustración 202. Presiones CON la ecuación de Hazen-Williams PARA PEAD.</b>	167
<b>Ilustración 203. Presiones de la red diseñada con Hazen-Williams después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach para PEAD.</b>	167
<b>Ilustración 204. Presiones con la ecuación de Darcy-Weisbach para PEAD.</b>	168
<b>Ilustración 205. Diagrama de Moody con factores de fricción de redes con caudales normales utilizando PEAD.</b>	169
<b>Ilustración 206. Diagrama de Moody con factores de fricción de redes con caudales normales utilizando PEAD.</b>	170
<b>Ilustración 207. Diagrama de Moody con factores de fricción de redes con caudales cuadruplicados utilizando PEAD.</b>	171



## TABLAS

<b>Tabla 1. Rugosidades absolutas de las normas técnicas de epm 2009</b> (Empresas Públicas de Medellín, 2006-2009) .....	22
<b>Tabla 2. Tabla de coeficientes de Hazen-Williams de la EPM</b> (Empresas Públicas de Medellín, 2006-2009).....	23
<b>Tabla 3. Costos por 6 metros de tubería de pvc</b> (PAVCO, 2012).....	25
<b>Tabla 4. Tabla de costos por metro y extensión de diámetros.</b> .....	25
<b>Tabla 5. Tabla de diámetros para PEAD de PAVCO</b> (PAVCO, 2011).....	27
<b>Tabla 6. Tabla de costos para PEAD suministrada por PAVCO</b> (PAVCO, 2012).....	27
<b>Tabla 7. Costos por metro para PEAD.</b> .....	28
<b>Tabla 8. Parte 1 de la lista de Diámetros de hierro dúctil</b> (Saint-Gobain PAM , 2012).....	30
<b>Tabla 9. Parte 2 de la lista de diámetros de hierro dúctil</b> (Saint-Gobain PAM , 2012).....	30
<b>Tabla 10. Costos con sus respectivos diámetros internos para Hierro Dúctil.</b> .....	31
<b>Tabla 11. Costos de la Red San Vicente con caudales normales.</b> .....	50
<b>Tabla 12. Costos de la Red Balerma con caudales normales.</b> .....	54
<b>Tabla 13. Costos de la Red Bogotá-Cazucá con caudales normales.</b> .....	58
<b>Tabla 14. Costos de la Red R28 con caudales normales.</b> .....	62
<b>Tabla 15. Costos de la Red Tesis 1 con caudales normales.</b> .....	66
<b>Tabla 16. Costos de la Red Tesis 2 con caudales normales.</b> .....	70
<b>Tabla 17. Costos de la Red Tesis 3 con caudales normales.</b> .....	74
<b>Tabla 18. Resumen de resultados encontrados en el proyecto.</b> .....	98
<b>Tabla 19. Costos de la Red San Vicente con caudales duplicados</b> .....	102
<b>Tabla 20. Costos de la Red San Vicente con caudales cuadruplicados.</b> .....	106
<b>Tabla 21. Costos de la Red Balerma con caudales duplicados.</b> .....	111
<b>Tabla 22. Costos de la Red Balerma con caudales cuadruplicados.</b> .....	115
<b>Tabla 23. Costos de la Red Bogotá-Cazucá con caudales duplicados.</b> .....	121
<b>Tabla 24. Costos de la red Bogotá-Cazucá con caudales cuadruplicados.</b> .....	125
<b>Tabla 25. Costos de la Red R28 con caudales duplicados.</b> .....	130
<b>Tabla 26. Costos de la Red R28 con caudales cuadruplicados.</b> .....	134
<b>Tabla 27. Costos de la red con caudales duplicados.</b> .....	140
<b>Tabla 28. Costos de la Red Tesis 1 con caudales cuadruplicados.</b> .....	144
<b>Tabla 29. Costos de la Red Tesis 2 con caudales duplicados.</b> .....	149
<b>Tabla 30. Costos de la Red Tesis 2 con caudales cuadruplicados.</b> .....	153
<b>Tabla 31. Costos de la Red Tesis 3 con caudales duplicados.</b> .....	159
<b>Tabla 32. Costos de la Red Tesis 3 con caudales cuadruplicados.</b> .....	163

---

## CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

---

En el diseño de redes de distribución de agua potable (RDAP), se han utilizado a través de la historia dos ecuaciones. La primera, la ecuación empírica conocida como la ecuación de Hazen-Williams desarrollada por Allen Hazen y Gardner Steward Williams. La segunda, la ecuación físicamente basada de Darcy-Weisbach, desarrollada por Henry Darcy y Julius Weisbach. Pese a que esta última es una ecuación físicamente basada y tiene un cumplimiento de diseño prácticamente ilimitado (Tipo de flujo, velocidad del flujo, diámetros, gravedad y longitud de la tubería), su uso no es tan extendido como el de la ecuación de Hazen-Williams debido a su complejidad de solución; esto se debe a que no es una ecuación explícita y requiere de iteraciones o de un método numérico para su solución. Por el contrario, la ecuación de Hazen-Williams es una ecuación de solución directa y no requiere de iteraciones o métodos numéricos para su solución. Sin embargo, esta ecuación tiene serias e importantes limitaciones que por lo general no son tenidas en cuenta actualmente por los ingenieros. Adicionalmente, por ser una ecuación empírica, tiene limitaciones serias en su rango de cumplimiento (Diámetros, Velocidad, Temperatura, Factores de Fricción y Números de Reynolds que deben estar en el rango de flujo de transición).

En la actualidad, y en especial en el contexto colombiano, la ecuación de Hazen-Williams se utiliza de forma generalizada e indiscriminada, con riesgos de diversa naturaleza, pese a contar con métodos computacionales que facilitan y promueven el uso de la ecuación de Darcy-Weisbach. Considerando los puntos fuertes y las desventajas de cada ecuación, se debería poder establecer cual debe de ser la ecuación ideal para el diseño de RDAP.

Por ende el enfoque de este trabajo es diseñar y evaluar 7 RDAP a partir de las dos ecuaciones existentes, con tres materiales diferentes (Hierro Dúctil, PEAD y PVC), con base a la normativa colombiana (Presión mínima, rugosidad absoluta y coeficientes de Hazen-Williams) y analizarlas desde el punto de vista hidráulico (presiones mínimas para esta tesis) y desde el punto de vista de costos para concluir cual debe ser la ecuación más indicada a ser utilizada.

Por tal motivo este trabajo de grado estará organizado de la siguiente forma. En el Capítulo 1 se realiza la introducción del proyecto y se definen los objetivos que se esperan alcanzar.

El Capítulo 2 desarrolla el marco teórico en el que se explicarán las características básicas de las ecuaciones de diseño, antecedentes e investigaciones sobre las ecuaciones de Hazen-Williams y Darcy-Weisbach. Adicionalmente, se mostrarán los materiales, valores para las rugosidades de las tuberías, coeficientes de Hazen-Williams, lista de precios (incluyendo la curva de costo para el diseño de la red), los programas que se utilizaron para el diseño (REDES y EPANET) y diámetros que se utilizaron durante el proyecto.

El Capítulo 3 explicará la metodología que fundamenta este trabajo de investigación, lo cual incluye las redes que se utilizaron, los parámetros de diseño y el procedimiento que se realizó para la obtención de los resultados.

En el Capítulo 4 se exponen los resultados obtenidos en cuanto a costos y presiones para cada una de las redes diseñadas, con sus diferentes parámetros.

En el Capítulo 5 se encuentran los análisis de los resultados obtenidos para cada una de las redes y materiales.

Finalmente los Capítulos 6 y 7 se mostrarán las conclusiones y las recomendaciones que se sacaron de todo el trabajo semestral que se realizó.

---

## 1.1 OBJETIVOS

---

- Entender el efecto hidráulico (presiones en los Nudos de la red) que causa utilizar ecuaciones empíricas en contraste con las ecuaciones físicamente basadas.
- Establecer la magnitud del efecto que tiene la hidráulica al utilizar las ecuaciones empíricas y físicamente basadas en los costos de diseños de redes de distribución de agua potable (RDAP).
- Analizar y plantear cambios en la legislación actualmente vigente para el diseño de redes de acueducto, estableciendo cuales deben ser las ecuaciones a utilizar y qué tipo de restricciones tienen a la hora de aplicarlas en diferentes modelos de diseños.
- Identificar los materiales con los cuales hay que tener especial precaución al utilizar la ecuación empírica de Hazen-Williams y nombrar los efectos que conlleva diseñar con estos materiales, utilizando esta ecuación.

## CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

### 2.1 ECUACIONES Y FÓRMULAS UTILIZADAS EN LOS DISEÑOS DE RDAP.

En las tuberías a presión existen pérdidas de energía causadas por la fricción que existe entre el fluido y la tubería, y las pérdidas menores que son por cambios de dirección del flujo e instalación de accesorios. Estas pérdidas pueden ser calculadas utilizando la ecuación de conservación de la energía de Bernoulli.

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 - HF = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

ECUACIÓN 2.1-1

siendo:

-p= presión.

-v= velocidad del flujo.

-z= altura topográfica o con respecto a una cota.

-g= gravedad  $\left(9.81 \frac{m^2}{seg}\right)$

-ρ= Densidad del fluido.

-HF= pérdidas de energía entre el tramo 1 y 2.

De acuerdo con lo anterior, puede observarse que para el cálculo de las pérdidas por fricción se tienen limitaciones ya que se requeriría de una medición de la velocidad o el caudal y de la presión en la tubería. Lo que no es aplicable ya que como es evidente, la tubería aún no está diseñada.

Las anteriores limitaciones exigieron estudiar a fondo la relación que existía entre las características de la tubería (diámetro, material, longitud), las características del fluido (densidad y viscosidad) y las pérdidas por fricción a través de los tramos de tubería. Como resultado de estas investigaciones surgieron diversas ecuaciones para la realización de este cálculo. Estas ecuaciones se dividen en dos grupos: empíricas y físicamente basadas. De las primeras, la que en la actualidad tiene mayor importancia para los sistemas de acueducto, es la ecuación de Hazen-Williams, desarrollada a principios del siglo XX por Allan Hazen y Gardner Williams. Finalmente la ecuación más representativa del segundo grupo es la ecuación de Darcy-Weisbach desarrollada por Henry Darcy (1803-1858) y Julius Weisbach

(1806 -1871). Ambas ecuaciones han sido ampliamente utilizadas en el diseño de redes de distribución de agua potable; sin embargo, la primera (Hazen-Williams) al ser una ecuación explícita para la velocidad y el caudal, presentaba una solución rápida y sencilla en contraste con la ecuación de Darcy-Weisbach que es una ecuación implícita y requiere de iteraciones o un método numérico para su solución.

---

### 2.1.1 ECUACIÓN DE HAZEN Y WILLIAMS

---

Ecuación empírica desarrollada por Allan Hazen y Gardner Williams a principios de 1900. Esta ecuación tuvo la peculiaridad de no tener en cuenta los análisis hidráulicos de la ecuación de Darcy –Weisbach. La forma original de la ecuación se muestra a continuación en el sistema internacional de unidades.

$$v = 0.849 * c * R^{0.63} * S^{0.54}$$

ECUACIÓN 2.1.1-1

donde:

v= Velocidad del flujo

R= Radio hidráulico (Área/ Perímetro mojado de la tubería)

S= Pendiente de la línea de gradiente de energía.

C= Coeficiente de Hazen-Williams (adimensional).

Es importante resaltar que el 0.849 es una constante utilizada y puede ser cambiada a 1.318 para el sistema inglés de unidades (Liou, 1998).

Esta ecuación es de rápida solución y es explícita para la velocidad del flujo, lo que la hacía extremadamente útil para diseñar, antes de la llegada de los medios de cálculo computacionales. Su desarrollo se realizó mediante el análisis estadístico de estudios de flujos en sistemas de distribución de agua potable que más se presentaban en la ingeniería.

Estos estudios fueron realizados principalmente para modificar la ecuación de Chezy que se muestra a continuación.

$$v = C * \sqrt{(R * S)}$$

ECUACIÓN 2.1.1-2

En la ecuación de Chezy, el cálculo del factor de fricción dependía del radio, rugosidad y pendiente de fricción de la tubería, lo que la hacía extremadamente compleja de utilizar. Es

importante resaltar que esta ecuación fue la más utilizada para el cálculo de la velocidad en tuberías para el año de 1903 (Gardner Williams, 1905).

En su momento, Gardner Williams y Allan-Hazen publicaron una serie de valores de C (coeficiente de Hazen-Williams) para diversos materiales (Gardner Williams, 1905). De tal forma que era posible calcular la velocidad (comprobación de diseño), las pérdidas por fricción (en caso de que se tuviera una tubería con diámetro establecido) o el diámetro con el que se quisiera diseñar la tubería (teniendo las pérdidas por fricción calculadas de la Ecuación 2.1-1).

Los coeficientes definidos por Hazen-Williams, aplicaban solo para las condiciones “comunes o normales de la práctica” por lo que desde su misma creación, esta ecuación contaba con limitaciones que debían ser tenidas en cuenta a la hora de realizar los diseños de RDAP.

Las limitaciones establecidas por los creadores son:

-Solo es aplicable para Agua

-Debe estar en condiciones normales (20 grados centígrados)

-Velocidades inferiores a  $3 \frac{m}{s}$

-Diámetros superiores a 100 mm o 4 pulgadas.

Así mismo, resulta necesario resaltar que estos coeficientes no son constantes, ya que como se explica en la literatura y por los mismos Gardner Williams y Allan Hazen, pueden variar por la edad de la tubería (aumento de la rugosidad) o cuando los diámetros de la tubería son demasiado pequeños. Estos coeficientes son representados en la actualidad con valores entre 80 y 150, donde 80 es un material rugoso y 150 para un material especialmente liso (PVC o PEAD).

---

## 2.1.2 ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH

---

La ecuación de Darcy Weisbach es la ecuación físicamente basada más utilizada para diseños de RDAP, redes pluviales y de alcantarillado. Esta ecuación fue inicialmente desarrollada por Henry Darcy (1803-1858) mediante el uso de experimentos de flujo en tuberías, realizados cerca a Paris. (Saldarriaga, 2007).

Los experimentos se llevaron a cabo utilizando un rango de diámetros que iba desde los 12 mm (0.0122 m) hasta los 500 mm (0.5 m), y los materiales utilizados para la experimentación incluían vidrio, hierro, plomo, hierro recubierto con bitumen, hierro fundido y latón. Para los experimentos se incluyeron tuberías con paredes recién construidas y tuberías con cierto tiempo de ser utilizadas, llevando a resultados con velocidades ente  $0.03$  y  $6 \frac{m}{s}$ . Los caudales fueron medidos con tanques de aforo y las longitudes de las tuberías siempre fueron

superiores a los 100 metros (excepción de vidrio y plomo que tuvieron tramos más cortos). (Saldarriaga, 2007)

A partir de los resultados obtenidos, Henry Darcy concluyó que estos podían ser expresados mediante la siguiente ecuación:

$$R * S_f = \alpha * v + b * v^2$$

ECUACIÓN 2.1.2-1

donde

R= Radio Hidráulico de la tubería.

$S_f$ = Pendiente de Fricción.

v= Velocidad media dentro de la tubería.

$\alpha$  y  $b$  = Siendo coeficientes que describen la edad y el material de la tubería.

Llegando finalmente a la ecuación:

$$S_f = \left( 0.00164 + \frac{0.000042}{d} \right) * \frac{Q^2}{d^5}$$

ECUACIÓN 2.1.2-2

Donde

Q= Caudal

d= diámetro de la tubería.

Esta ecuación fue utilizada posteriormente por Fanning( 1837-1911) para combinarla junto con la ecuación desarrollada por Julius-Weisbach ( 1806-1871), formando una ecuación físicamente basada que se ajustaba de gran forma a los diferentes datos experimentales (Saldarriaga, 2007).

Julius Weisbach, desarrolló una ecuación que ayudaría a predecir las pérdidas por fricción dentro de las tuberías. Esta ecuación requería estar en función del tipo de fluido, el diámetro, el material de la tubería y la velocidad. Llegando a la siguiente expresión:

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

ECUACIÓN 2.1.2-3

donde

$l$ = longitud de la tubería.

$f$ = factor de fricción adimensional.

Esta ecuación incluyó únicamente las pérdidas por fricción con las paredes de la tubería. Más adelante se desarrolló una forma de calcular las pérdidas menores causadas por el uso de accesorios y por cambios de dirección dentro de las tuberías. La ecuación anterior (2.1.2-2) puede ser obtenida mediante análisis dimensional.

Sin embargo, la obtención del factor de fricción seguía presentando una complicación, por lo que se desarrollaron diferentes ecuaciones para su obtención. Una de ellas fue la ecuación para el flujo laminar de Hagen-Poiseuille que Julius Weisbach utilizó:

$$f = \frac{64}{Re}$$

ECUACIÓN 2.1.2-4

donde:

$Re$ = Número de Reynolds en flujo laminar (2000 o menores en tramos de tuberías).

Sin embargo, estas condiciones raramente se presentaban en las RDAP, por lo que se requerían ecuaciones adicionales para hallar el factor de fricción en flujos turbulentos hidráulicamente rugosos y lisos.

En 1911 Blasius, alumno de Prandl von Karman (Saldarriaga, 2007), desarrolló una ecuación mediante experimentos empíricos para hallar el factor de fricción en flujos con números de Reynolds entre (5000-100000). La ecuación a la que llegó fue:

$$f = \frac{0.316}{Re^{0.25}}$$

ECUACIÓN 2.1.2-5

Por su parte, Prandl desarrolló una ecuación para hallar el factor de fricción, pero dada su complejidad de solución, el buen cumplimiento de la ecuación de Blasius y el hecho de que la ecuación de Colebrook-White aplica para todos los flujos, esta ecuación no es ampliamente utilizada.

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = 2 * \log_{10} Re * \sqrt{f} - 0.8$$

ECUACIÓN 2.1.2-6

Más adelante, se desarrollaron los trabajos de los Ingenieros Johann Nikuradse y de Lewis Moody. El primero de ellos con el ánimo de entender la naturaleza del factor de fricción, realizó diversos experimentos para diferentes diámetros, variando el caudal, de tal forma que incluyera un rango importante de números de Reynolds y abarcara los 4 tipos de flujo (Flujo Laminar, Flujo Transicional, Flujo Turbulento Hidráulicamente Liso (FTHL) y Flujo Turbulento Hidráulicamente Rugoso (FTHR)) (Saldarriaga, 2007).

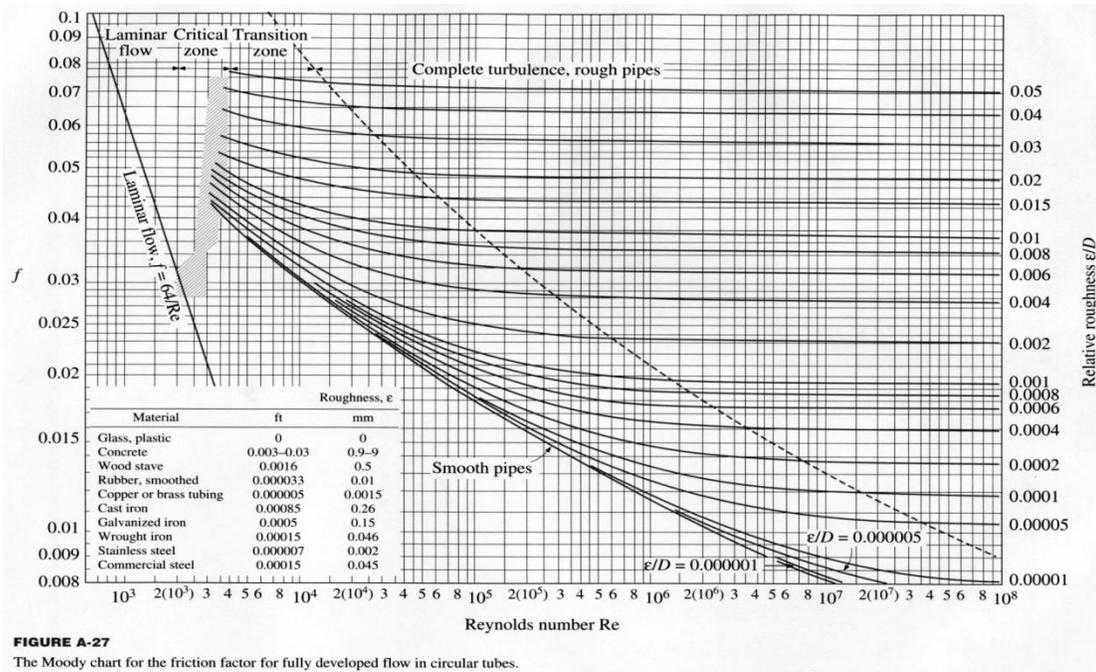
De los experimentos logró concluir:

- Cuando el número de Reynolds es inferior a 2000, el factor de fricción es independiente de la rugosidad relativa de la tubería  $\left(\frac{ks}{d}\right)$ .
- Al entrar en el flujo Liso, tanto el número de Reynolds como la rugosidad relativa de la tubería juegan un papel fundamental dentro del cálculo del factor de fricción.
- A medida que el número Reynolds se va alejando del flujo liso, y entra en la zona de transición, se vuelve una función compleja tanto de Reynolds como de la rugosidad relativa.
- Finalmente, a medida que se aumentan los números de Reynolds, Nikuradse notó que las curvas en su gráfica se volvían prácticamente horizontales, llevando a que el factor de fricción dejara de ser una función del número de Reynolds y pasara a ser únicamente una función de la rugosidad relativa de la tubería, en otras palabras el numero de Reynolds deja de ser un factor importante para la obtención del factor de fricción.

Prosiguiendo su investigación Moody en 1940, con la intención de investigar las pérdidas por fricción en tuberías con rugosidades reales y no artificiales. Desarrolló un trabajo combinando el trabajo del ingeniero alemán y de Colebrook. (Saldarriaga, 2007). De sus resultados lo más destacable es:

- Para el flujo hidráulicamente rugoso, el factor de fricción dependía exclusivamente de la rugosidad relativa de la tubería.
- Con lo anterior Moody, amplió su experimento y mediante la adquisición de tuberías de diferentes materiales y diámetros comerciales realizo experimentos, en los que hallaba las pérdidas por fricción, posteriormente calculaba el factor de fricción (sólo para FTHR). Con estos resultados hallo la rugosidad relativa y con esta y la gráfica de factor de fricción vs Rugosidad relativa, pudo determinar las diferentes rugosidades absolutas de las tuberías (Saldarriaga, 2007).

- Con esto Moody llegó a la conclusión que para cada tipo de material había una rugosidad asociada y que esta representaba el comportamiento hidráulico de cada una de las tuberías.
- Con toda la información y la ecuación de Colebrook, Moody pudo desarrollar un diagrama donde se podía ver el tipo de flujo y determinar el factor de fricción para diferentes tuberías comerciales (ver Ilustración 1).



**ILUSTRACIÓN 1. DIAGRAMA DE MOODY.**

Esta gráfica fue ampliamente utilizada hasta la aparición de los métodos computacionales ya que como se verá más adelante, encontrar el factor de fricción matemáticamente era de una complejidad importante para la época.

Para el flujo hidráulicamente rugoso, las investigaciones de Colebrook y White en 1939, utilizando las investigaciones de Prandtl, von Karman y Nikuradse, permitieron establecer una ecuación para hallar el factor de fricción para el flujo de transición. Ellos notaron sin embargo, que los resultados encontrados solo representaban los extremos, y decidieron que el comportamiento en tuberías reales debería de estar descrito por una única ecuación (Saldarriaga, 2007). Llegando a obtener:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log_{10} \left( \frac{ks}{3.7d} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right)$$

ECUACIÓN 2.1.2-7

Esta última ecuación aplica para todos los tipos de flujo turbulento (para los laminares se utiliza la Ecuación 2.1.2-3). Sin embargo y como se mencionó anteriormente, esta es una ecuación de difícil solución si no se cuenta con un método computacional o una calculadora, por 2 motivos:

- El logaritmo incluido es de difícil solución manual.
- Es una ecuación implícita para despejar el factor de fricción.

Posteriormente, Swamee y Jain desarrollarían en 1976 otra ecuación para el cálculo del factor de fricción, de tal forma que fuera más simple y fácil de resolver. La ecuación a la que llegaron fue:

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

ECUACIÓN 2.1.2-8

Como se puede observar, esta ecuación es explícita y no requiere de métodos numéricos para su solución. Sin embargo tiene rangos de cumplimiento para rugosidad relativa y números de Reynolds (Liou, 1998).

$$10^{-6} < \frac{\varepsilon}{D} < 10^{-2}$$

$$5 * 10^3 < Reynolds < 10^8$$

La gran ventaja es que sus rangos de cumplimiento solo presenta un error máximo con respecto a la ecuación de Colebrook-White del 5%.

---

### 2.1.3 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

---

Varios investigadores han realizado trabajos para estudiar ambas ecuaciones de diseño. En 1998 Chyr Pyng Liou publicó un trabajo en el cual demostró las falencias y rangos de validez de la ecuación de Hazen-Williams, así como la alta variabilidad de su Coeficiente respecto al número de Reynolds, su diámetro y su rugosidad relativa.

Liou empezó su trabajo relacionando el coeficiente de Hazen-Williams con la ecuación físicamente basada de Darcy-Weisbach. Primero, reorganizó la ecuación de tal forma que la pendiente del gradiente hidráulico quedara expresada en términos de la cabeza de velocidad  $\left(\frac{v^2}{2g}\right)$ . Al realizar esto, dejaba la velocidad expresada en el lado derecho como un denominador elevado a la 0.1841 (Liou, 1998). Luego, al introducir la viscosidad cinemática  $\nu$ ,  $\nu^{0.1841}$  es

combinada con  $\left(\frac{d}{v}\right)^{0.1841}$  para formar el número de Reynolds elevado a la 0.1841. Posteriormente, expresó el radio hidráulico como  $\left(\frac{d}{4}\right)$ , combinando esto con  $\left(\frac{d}{v}\right)^{0.1841}$ , resultaba en el diámetro elevado a la 1.0185. Luego siendo  $\varepsilon$  la rugosidad absoluta de la tubería, Liou dividió el diámetro encontrado en el paso anterior de tal forma que este quedara  $d$  y  $d^{0.0185}$ , y reescribirlo para obtener la expresión  $\left(\frac{d}{\varepsilon}\right)^{0.0185} \varepsilon^{0.0185}$  (Liou, 1998). Finalmente, expresando la pendiente como  $\left(\frac{h}{L}\right)$ , manipuló la ecuación expresándola de esta forma:

$$h = \left[ \frac{133.84}{(C^{1.8519} * R^{0.1481})} * \left(\frac{\varepsilon}{d}\right)^{0.0185} * \frac{1}{\varepsilon^{0.0185} * v^{0.1481}} \right] * \frac{l}{d} * \frac{v^2}{2g}$$

ECUACIÓN 2.1.3-1

Luego, reemplazando el lado derecho de la ecuación con la ecuación de Darcy - Weisbach se obtiene:

$$C = 14.07 f^{-0.54} * R^{0.08} * \left(\frac{\varepsilon}{d}\right)^{0.01} * \varepsilon^{-0.01} * v^{-0.08}$$

ECUACIÓN 2.1.3-2

donde:

C: Coeficiente adimensional de Hazen-Williams.

R: Número de Reynolds

$\varepsilon$ = Rugosidad Absoluta del material

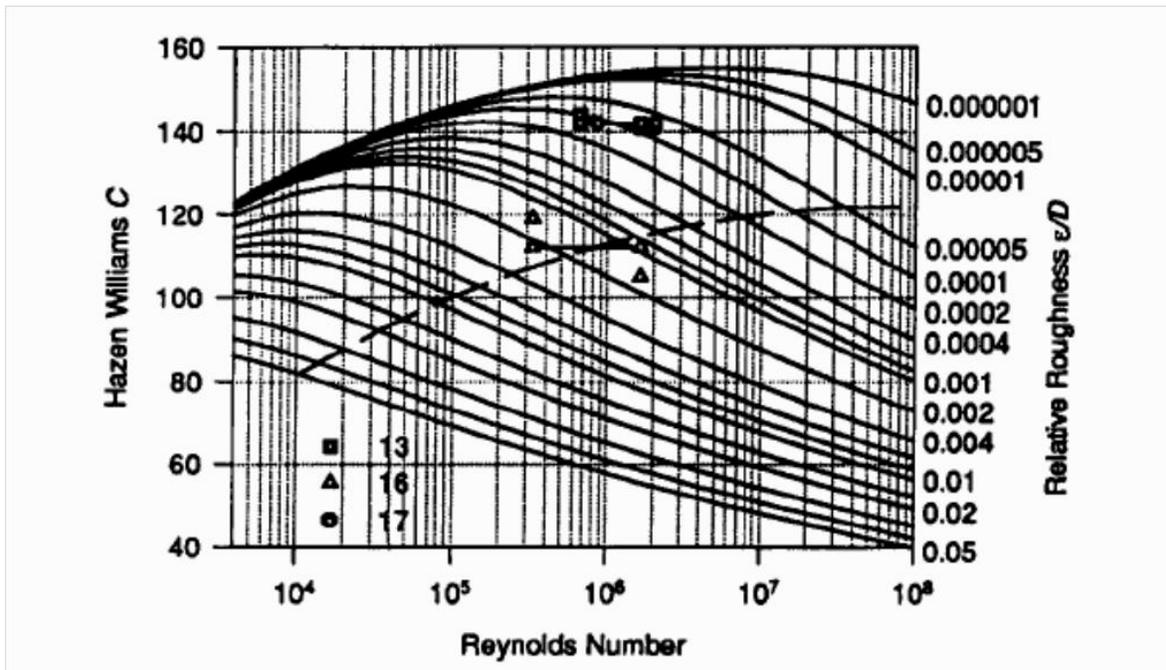
$v$ = Diámetro de la tubería

$v$ = Viscosidad Cinemática.

Al llegar a esta expresión Liou pudo concluir que en efecto, el coeficiente de Hazen-Williams es dependiente del número de Reynolds, de la rugosidad relativa de la tubería  $\left(\frac{\varepsilon}{d}\right)$ , de la rugosidad absoluta y de la viscosidad cinemática ( $v$ ).

Posteriormente Liou varió los números de Reynolds y los diámetros para ver cómo se comportaban los Coeficientes de Hazen-Williams, dejando una rugosidad absoluta de 0.0003 m y una viscosidad cinemática de  $1.133 * \frac{10^{-6} m^2}{s}$  (agua a 15.56 grados centígrados) (Liou,

1998). Generó la siguiente tabla que muestra la variación del coeficiente de Hazen -Williams con respecto al diámetro y al número de Reynolds.



**ILUSTRACIÓN 2. VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE HAZEN-WILLIAMS CON RESPECTO AL NÚMERO DE REYNOLDS Y EL DIÁMETRO ENCONTRADO POR LIOU (LIOU, 1998).**

Como se puede observar, el coeficiente de Hazen y Williams varía relativamente poco en la zona de transición, pero presenta cambios severos fuera de esta (Línea punteada). Esto permitió establecer que la ecuación de Hazen-Williams tiene unos rangos de cumplimiento limitados y fuertemente dependientes del número de Reynolds y del Diámetro.

Para finalizar Liou decidió mostrar los errores que se pueden cometer al calcular el error de la pendiente de gradiente hidráulico con la ecuación de Hazen-Williams y comparándolos con la pendiente calculada con la ecuación de Darcy-Weisbach. Los resultados que obtuvo fueron de gran importancia, no solo debido a que por fuera de la zona de cumplimiento la ecuación de Hazen-Williams presentaba un error de hasta el 40% sino porque su rango de validez se limitaba exclusivamente a la zona de transición en el diagrama de Moody.

Ese mismo año, Hosam El-Din Moghazi (M.Moghazi, 1998), realizó experimentos para determinar el coeficiente de Hazen-Williams para tuberías de Polietileno, encontrando una vez más que el coeficiente de Hazen y Williams presentaba variaciones con respecto a su diámetro y también que al realizar un cálculo entre el factor de fricción medido y el calculado (por el investigador) se encontraba un error no superior al 14%. Sin embargo, al comparar los valores calculados por el autor y los calculados por los valores recomendados estos presentaron diferencias en el cálculo de las pérdidas por fricción con un máximo del 27%.

En el año 2000, surge una discusión respecto al artículo de Liou (Liou, 1998). Los tres autores participantes concluyen que el uso de la ecuación de Hazen-Williams debe de ser limitada o abandonado. En la primera parte, Christensen concuerda con Liou en el sentido de que se debe dejar de utilizar la ecuación de Hazen-Williams con excepción de la zona dentro del rango de validez.

Christensen plantea que los rangos de validez de la ecuación de Hazen y Williams deben de ser:

$$10^5 < R < 10^8$$

donde R es el número de Reynolds.

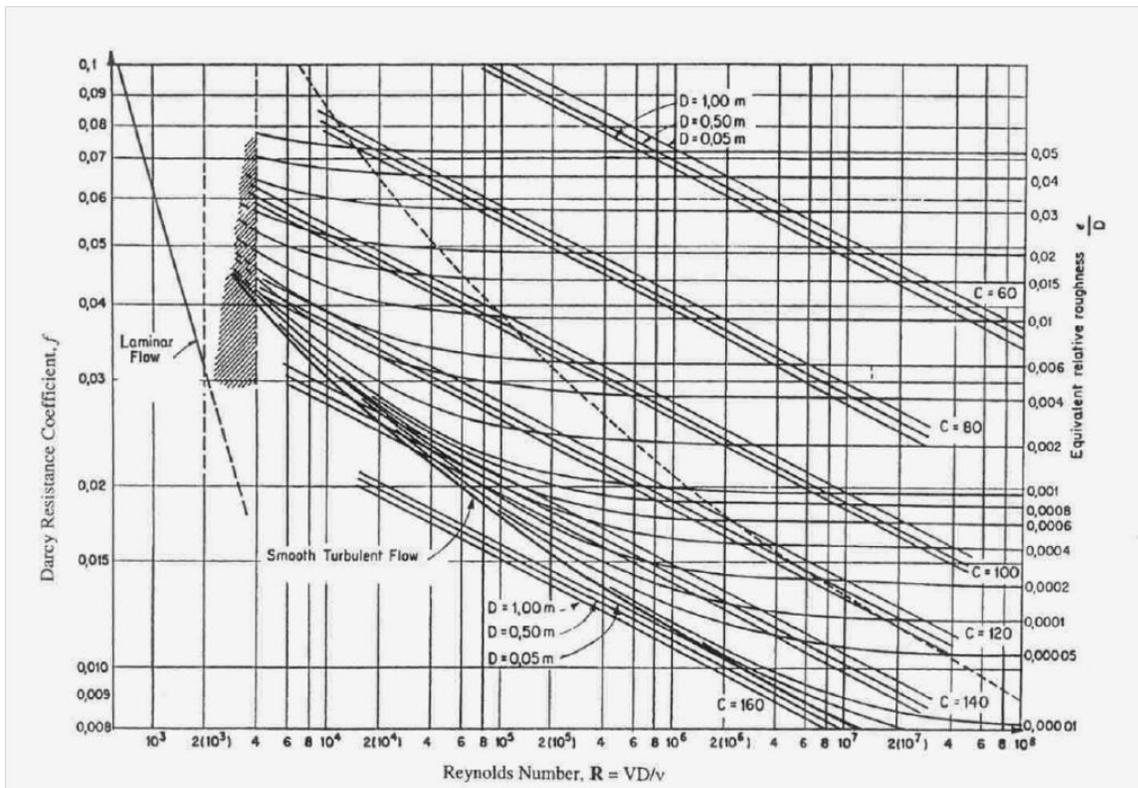
A su vez, especifica que no es la única limitación y que la ecuación debe estar regulada igualmente por el diámetro de la tubería, estableciendo que el diámetro mínimo debe estar regulado por  $d = 1.441 * \epsilon$  donde  $\epsilon$  es la rugosidad absoluta de la tubería. Resaltando que es posible que en tuberías de considerable edad, se pueden presentar valores de  $\epsilon$  cercanos a 1 mm, lo que llevaría a que el diámetro mínimo de la tubería fuera de 1.44 m (B.A. Christensen, 2000). Concluyen y resaltan que en la actualidad muchos ingenieros y diseñadores no tienen en cuenta las restricciones y están diseñando por fuera del número de Reynolds reglamentario y con diámetros muchos menores a los que se deberían utilizar.

El segundo autor Frederick Locher, concuerda con Liou en que el uso de la ecuación de Hazen-Williams debe de ser abandonado o solo aplicado en sus rangos de cumplimiento, pero plantea que Liou a la hora de realizar sus cálculos, no debe de introducir una dependencia de la rugosidad absoluta, ya que esto obscurece la verdadera naturaleza de la ecuación de Hazen-Williams. Resalta Locher que se debe analizar tal y cómo lo realizó Diskin en 1960, que se debe relacionar el factor de fricción, el C de Hazen-Williams, Reynolds y la rugosidad relativa, sin la introducción artificial de la rugosidad absoluta (B.A. Christensen, 2000). De tal forma que quede:

$$f = \frac{133.84}{(C^{1.85}) * (R^{0.148}) * (d^{0.0185}) * \nu^{0.1481}}$$

#### ECUACIÓN 2.1.3-3

Y teniendo en cuenta que para la ecuación de Hazen-Williams el único fluido válido es el agua, Locher establece que se puede usar un  $\nu = 1.133 * \frac{10^{-6} m^2}{s}$ , llegando a que para un diámetro establecido y una rugosidad absoluta de material, surge una constante que representa estos dos parámetros. De esta manera, concluye que los coeficientes de Hazen-Williams sean graficados como líneas rectas en el diagrama de Moody. (B.A. Christensen, 2000), como se muestra a continuación:



**ILUSTRACIÓN 3. DIAGRAMA DE MOODY REALIZADO POR DISKIN 1960 DONDE SE MUESTRAN VARIACIONES Y REPRESENTACIONES DE LOS COEFICIENTES DE HAZEN-WILLIAMS (B.A. CHRISTENSEN, 2000).**

De acuerdo con Locher, el trabajo de Diskin permite llevar a las siguientes conclusiones:

- 1) Los datos estadísticos utilizados para el desarrollo de la ecuación de Hazen-Williams se encontraban en la zona de transición del diagrama de Moody. Llevando a que la validez de esta ecuación se encuentre cuando la línea del Coeficiente de Hazen-Williams se encuentre aproximadamente paralela con las curvas de la constante  $\left(\frac{\epsilon}{d}\right)$  en el diagrama de Moody (B.A. Christensen, 2000).
- 2) La ecuación de Hazen-Williams es inválida para materiales demasiado rugosos ( $C$  menores a 100 nunca se debería de utilizar). Por lo que al diseñar con valores cercanos o menores a 100 no solo se están encontrando resultados equivocados en las pérdidas por fricción, sino que al suponer que es un valor constante se comete el error de hacer al material más liso de lo que realmente representa (B.A. Christensen, 2000).

Finalmente, Locher concluye que en la actualidad y con métodos computacionales es inapropiado seguir utilizando una ecuación empírica y no una ecuación físicamente basada que puede ser resuelta rápidamente por medios computacionales.

Para finalizar, el tercer autor Swamee, felicita a Liou por mostrar las falencias de la ecuación de Hazen y Williams y considerando irónico que esta sea la ecuación más utilizada, mientras que la ecuación de Darcy-Weisbach, físicamente basada, sea utilizada casi exclusivamente por los académicos.

En 2003 Fabián A. Bombardelli y Marcelo H. García realizaron un estudio sobre los diseños con diámetros de gran tamaño. El caso de estudio utilizado por los autores fue el de una zona de una metrópolis que a tan solo 5 años de haberse puesto en servicio, era inadecuada para proveer la cantidad de agua necesaria.

El análisis se realizó consultando la literatura con respecto a los límites y validez de la ecuación de Hazen-Williams. Una vez realizada la recopilación bibliográfica, procedieron a revisar la información sobre la red que presentó los problemas.

Lo primero que lograron evidenciar fue que la red fue diseñada con concreto, con un coeficiente de Hazen-Williams de 120, y con una variación de diámetros de hasta 2.29 m. Como se mencionó anteriormente, en este caso se vio que una red de tan solo 5 años de operación presentó problemas y se le realizó un análisis hidráulico por 2 firmas consultoras. Durante este análisis se realizaron mediciones en las velocidades del flujo y las presiones en los Nudos (Fabián A. Bombardelli, 2003).

Con base a los resultados obtenidos, se procedió a obtener los valores de los Coeficientes de Hazen-Williams. Los resultados que se obtuvieron de la primera firma consultora fueron sorprendentes ya que en las tuberías de 2.29 m de diámetro se encontró que el coeficiente de Hazen-Williams presentaba valores entre 85 y 95. Esto quería decir que la tubería presentaba una rugosidad mucho mayor a la que se había esperado (se diseñó con un coeficiente de Hazen-Williams de 120). Los autores concluyeron que si estos valores eran correctos, en el futuro la red no podría suplir de forma correcta las crecientes demandas de agua, debido a que las pérdidas por fricción iban a ser mucho mayores con los nuevos coeficientes (Fabián A. Bombardelli, 2003).

Esta situación causó gran sorpresa en el personal y se plantearon si el problema era de la ecuación de diseño (Hazen-Williams) o si era debido a un incremento real en la rugosidad de la tubería, por lo que la comisión se enfocó en ver si las medidas que se habían tomado presentaban algún tipo de error en la toma de los datos. Para verificar esta situación, se llamó a una segunda firma consultora para tomar una segunda muestra de datos exclusivamente en la tubería de 2.29 m de diámetro. Esta segunda muestra se realizó de forma más cuidadosa, teniendo especial cuidado de registrar mejor las pérdidas y los lugares donde se tomaron las muestras. Estos resultados mostraron resultados similares a los encontrados en la primera toma de datos.

Bombardelli y García, después de realizar sus análisis, llegaron a la conclusión de que tuberías de gran diámetro presentaban un comportamiento bastante peculiar. De una parte, el hecho de ser tuberías de gran tamaño en diámetro estaría más expuesto a flujos turbulentos que estarían más relacionadas con altos números de Reynolds. Pero, de otra parte, dado el gran

diámetro, la relación entre  $\left(\frac{\varepsilon}{d}\right)$  puede llegar a ser muy pequeña y por ende tener condiciones de trabajo en flujo de transición, lo que llevaría a pensar que se presentan las condiciones ideales para aplicar la ecuación de Hazen-Williams (Fabián A. Bombardelli, 2003). Sin embargo un análisis de los datos, permitió concluir que era precisamente el constante aumento de la demanda y por ende de los caudales, los que llevaron al flujo a la zona de Flujo Turbulento, quitándole toda validez al diseño realizado con la ecuación de Hazen-Williams. Llevando a concluir y recomendar que la mejor y más correcta opción era el uso de la ecuación de Darcy-Weisbach para diseñar las redes de distribución de agua potable.

En 2007 Quentin B. Travis y Larry W. Mays, desarrollaron una investigación en la que reproducían una relación entre el coeficiente de Hazen-Williams y las rugosidades absolutas en la ecuación de Colebrook-White, lo que permitió a los ingenieros a sacar fácilmente los valores de rugosidades absolutas y a visualizar de forma rápida y sencilla los límites de aplicabilidad de la ecuación de Hazen-Williams (Quentin B. Travis, 2007).

Posteriores investigaciones como la de John D Valiantzas (2008) permitieron reescribir la ecuación de Darcy-Weissbach de tal forma que fuera explícita en su solución y solo presentando una diferencia con respecto a la ecuación original del 5% (Valiantzas, 2008).

Finalmente, en 2011 David Bennett y Rebecca Glaser publican un artículo donde enfatizan las principales complicaciones que se presentan en los diseños de tuberías con grandes diámetros, donde incluyen varios fenómenos físicos como sedimentos, efectos biológicos dentro de las tuberías (biopelículas), no tener en cuenta el envejecimiento de las diversas tuberías, mala ubicación de válvulas, mal mantenimiento de las tuberías y finalmente el extensivo y más generalizado uso de la ecuación de Hazen-Williams al ser ampliamente utilizada por fuera de los límites de cumplimiento o con Coeficientes de Hazen-Williams que subestiman las pérdidas y llevan al incumplimiento de las presiones mínimas dentro de las tuberías.

## 2.2 DISEÑOS OPTIMIZADOS

Los diseños de redes de distribución de agua potable han estado regidos por una serie de restricciones importantes. Dentro de las principales, está el adecuado suministro de agua a poblaciones, industrias o sectores comerciales. Estas restricciones están plasmadas principalmente en la presión mínima de cada uno de los Nudos de la red. Si bien, parece un problema sencillo de solucionar, la verdad es que la complejidad aumenta ya que se aplica una segunda restricción a los diseños y es los costos de diseño. No solo es necesario cumplir con los requerimientos de presión mínima dentro de la red, sino que el costo de diseño de la misma sea el menor posible. Lo anterior llevó al desarrollo de técnicas que permitieran diseñar de forma óptima RDAP.

Las RDAP poseen varias características importantes para sus diseños. Dentro de estas características, se destacan la captación, tratamiento, conducción, almacenamiento y distribución del agua. Esto exige tener en cuenta muchos factores para el diseño (las pérdidas

en cada uno de estos procesos). Adicionalmente, las RDAP están regidas por las demandas de las poblaciones bajo un periodo de tiempo, lo que lleva a diseñar sistemas que puedan suplir a la población en estos periodos de diseño sin ningún problema. Lo anterior obliga a que los diseños tengan que ser precisos y cuidadosos. Por este motivo y por las restricciones nombradas anteriormente, se han desarrollado innumerables metodologías para el diseño óptimo.

Dentro de las metodologías más importantes se encuentra la de Algoritmos Genéticos (AG), que si bien ofrecían la opción de comparar diferentes generaciones de diseños, el excesivo uso de memoria computacional solo permitía arrojar óptimos locales. Adicionalmente, existen diseños con superficie óptima, búsqueda de armonía y superficie optima de gradiente hidráulico. Esta última fue la que se utilizó durante este trabajo de grado y será explicada adelante.

Con base en lo anterior, muchos ingenieros han aplicado estas metodologías junto con las ecuaciones de diseño nombradas anteriormente, para diseñar de forma efectiva redes de distribución. Sin embargo y en muchas ocasiones muchos de los diseños creados fueron aplicando la ecuación de Hazen-Williams sin verificar si se encontraba dentro de sus rangos de cumplimiento. Lo que en muchas ocasiones generaba redes con bajos costos de diseño pero que incumplían las presiones mínimas exigidas por las normativas.

Por este motivo, se realizó este proyecto a fin de contribuir a ilustrar sobre los efectos que conlleva utilizar una ecuación físicamente basada o una ecuación empírica en los costos y en el cumplimiento de la presión mínima.

---

## 2.3 PROGRAMAS UTILIZADOS DURANTE EL PROYECTO

---

---

### 2.3.1 PROGRAMA REDES

---

El programa REDES fue desarrollado en la Universidad de los Andes por el grupo de investigación CIACUA (Centro de investigaciones en Acueductos y Alcantarillados) en el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, es una herramienta computacional para la simulación de redes de acueducto y tuberías a presión. (Saldarriaga, 2007). Este programa ha sido modificado y actualizado desde su nacimiento en 1998 hasta el presente año, por numerosas tesis de pregrado, investigaciones y magíster, bajo la supervisión del ingeniero Juan Guillermo Saldarriaga. Así mismo, el programa ha sido utilizado en numerosas tesis de grado e investigaciones realizadas dentro del grupo de investigación CIACUA.

Las características que ofrece este programa para el usuario son:

- Permite al usuario utilizar dos (2) ecuaciones de diseño: Ecuación de Hazen-Williams y la ecuación de Darcy-Weisbach.

-Edita o crea redes desde el comienzo, permitiendo al usuario ingresar Nudos, bombas, válvulas, tuberías, tanques y embalses. Adicionalmente, le permite al usuario escoger por defecto la viscosidad con la que se desea trabajar, escoger el material de la tubería y si el usuario lo desea, asignar los coeficientes de pérdidas menores y fugas dependiendo del tipo de investigación que se desee.

-Permite el cálculo hidráulico estático: Permite obtener alturas piezométricas, velocidades, caudales, factores de fricción, pérdidas menores, pérdidas por fricción, pérdidas totales y las presiones en cada nudo de la red utilizando el método del gradiente hidráulico.

- Realiza el cálculo hidráulico en periodo extendido: A diferencia del cálculo estático, esta opción permite evaluar los resultados en una hora deseada del día, lo que permite ver el comportamiento de la red durante el día y ver si cumple con los requerimientos deseados por el usuario.

-Genera el cálculo de Calidad del Agua

- Permite la calibración de Redes de distribución de agua potable.

-Diseño Optimizado: En esta sección hay diferentes opciones para diseñar, dentro de las que se encuentran:

1) Diseño Rápido: Una solución rápida teniendo en cuenta un mínimo costo y cumplimiento de la presión mínima.

2) Algoritmo Genético: Mediante la utilización de algoritmos genéticos, encontrar soluciones óptimas locales para los diseños, cumpliendo los parámetros de costos e hidráulicos establecidos por el usuario.

3) Superficie Óptima: Utiliza una superficie óptima, ya sea cuadrática, elipsoidal, catenaria, gaussiana, lineal y recíproca. Siendo la cuadrática la más utilizada, utilizando una flecha del 15%.

4) Metodología SOGH: esta metodología fue utilizada durante la tesis y será explicada más adelante con mayor detalle. Esta metodología fue implementada en el programa REDES en 2009 por Susana Ochoa en su tesis de Maestría.

5) Finalmente, la metodología de búsqueda de armonía.

El programa de redes es compatible con los archivos .INP generados en el programa de EPANET y con archivos propios .RED. Además de contar con una interfaz gráfica que permite visualizar los resultados en 2D y 3D, y exportar los mismos a portapapeles y posteriormente a Excel.

Los archivos .RED al igual que los archivos generados por el programa de EPANET, permiten su modificación en Excel, de tal forma que el cambio de parámetros se haga de una forma amistosa para el usuario. Esta es una gran ventaja que presentan los dos programas.

En la actualidad, el programa se encuentra sujeto a actualizaciones bajo la supervisión del Ingeniero Juan Guillermo Saldarriaga, sobre todo en lo que concierne a la nueva metodología de OPUS.

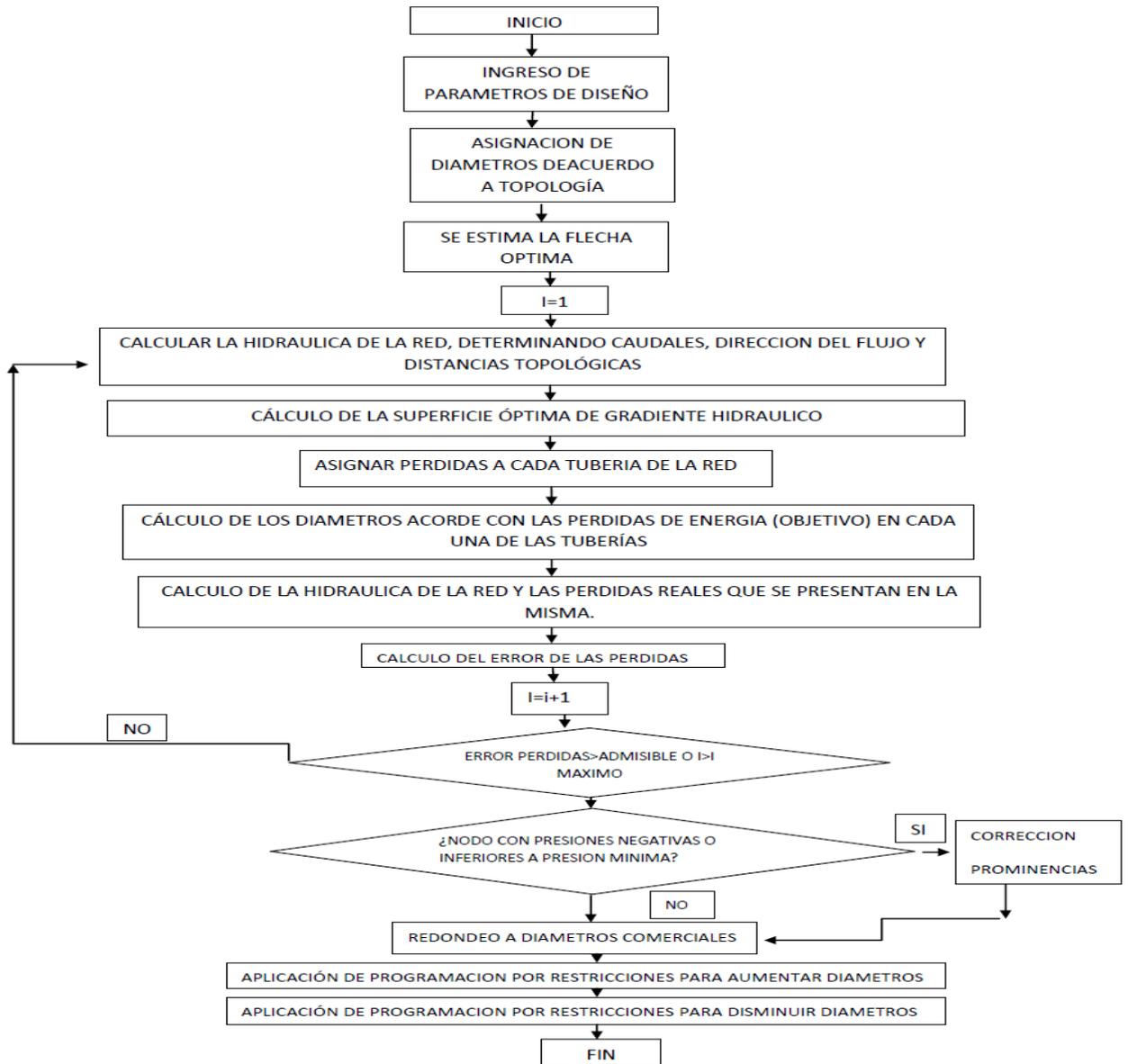
### 2.3.2 METODOLOGIA SOGH

La metodología de Superficie Óptima del Gradiente Hidráulico (SOGH) fue desarrollada por Susana Ochoa en el año 2009 y fue el resultado de su proyecto de Maestría supervisado por el Ingeniero Juan Guillermo Saldarriaga. Esta metodología, es muy similar a la de Superficie Óptima, utiliza las mismas funciones (siendo la cuadrática la más recomendable al ser la que mejores resultados arroja) para optimizar el diseño, pero a diferencia de la metodología de superficie óptima, no utiliza una flecha establecida del 15%, sino que calcula una flecha con base a la distribución de las demandas de la RDAP, la demanda total, la longitud de la red y la función de costos que se le asigne.

Para la utilización de esta metodología, el usuario debe de establecer los siguientes parámetros:

- Cargar la red que se desea trabajar.
- Presión mínima que se desea en la red.
- Conjunto de diámetros con los que se desea diseñar (Diámetros comerciales).
- Curva de Costos.
- Ecuación de diseño con que se desea trabajar.

Una vez especificados estos diámetros, la metodología SOGH se ejecuta con base al siguiente diagrama de flujo, donde se describen los pasos:



**ILUSTRACIÓN 4. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGIA SOGH DESARROLLADA POR SUSANA OCHOA (OCHOA, 2009).**

El diagrama de flujo presentado es similar al presentado por Susana Ochoa en su proyecto de Maestría., y muestra todos los pasos que realiza la metodología para encontrar el diseño óptimo de la red.

### 2.3.3 PROGRAMA EPANET 2.0

El programa de EPANET, es una herramienta computacional desarrollada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (EPA). Este programa fue desarrollado para estudiar el comportamiento hidráulico de una red de distribución de agua potable (Saldarriaga, 2007).

Este programa, dentro de sus múltiples funciones, incluye realizar el análisis hidráulico utilizando las ecuaciones de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach y Chezy-Manning. Adicionalmente y al igual que el programa REDES utiliza de la metodología del gradiente hidráulico para la solución matemática de la red (a diferencia de otros programas que utilizan el método de Hardy-Cross).

El programa cuenta adicionalmente con un módulo para seguir la calidad de las aguas en una red, permitiendo al usuario seguir el decaimiento o comportamiento de una sustancia en una red (Saldarriaga, 2007). Esto puede ser de gran importancia en el análisis de cloro residual en redes, o el comportamiento de manganeso o hierro en los sistemas de distribución al salir de las plantas de tratamiento. Esto lo realiza utilizando reacciones químicas del agua, o en las paredes de la tubería y de los tanques. Para ello utiliza reacciones de primer orden.

Además, el programa permite visualizar los resultados en tablas y gráficas y los archivos que utiliza son compatibles para su modificación con Excel. Lo que lo convierte en un programa amigable para el usuario.

Al igual que el programa de REDES, EPANET también permite correr la hidráulica en estado estable y en periodos extendidos.

## **2.4 MATERIALES UTILIZADOS Y SUS CARACTERÍSTICAS**

Los materiales utilizados en esta tesis de grado fueron PVC (Policloruro de vinilo), PEAD (Polietileno de alta densidad) y Hierro Dúctil. Estos materiales fueron escogidos por su amplia aplicabilidad en los diseños de RDAP. Por lo tanto, en esta sección se mostrarán sus correspondientes rugosidades absolutas de la normativa y literatura que se aplicaron para el desarrollo del proyecto, sus diámetros comerciales disponibles y sus correspondientes curvas de costo.

### **2.4.1 RUGOSIDADES ABSOLUTAS**

A continuación se presentan las rugosidades absolutas de los materiales utilizados en esta tesis de grado. Los valores de rugosidad fueron sacados de las normas técnicas de las Empresas Públicas de Medellín (EPM) del año 2006 y su versión final actualizada en 2009 y del libro de hidráulica de tuberías del ingeniero Juan Saldarriaga. Adicionalmente, se incluye la tabla de rugosidades absolutas que maneja el RAS, que es la normativa vigente en acueductos y alcantarillados de Colombia.

Rugosidad absoluta ( $k_s$ ) para diferentes materiales utilizados en la fabricación de tuberías

Material	$K_s$ (mm)
Vidrio	0.0003
PVC, CPVC	0.0015
Asbesto cemento	0.03
GRP	0.03
Acero	0.046
Hierro forjado	0.06
CCP	0.12
Hierro fundido asfaltado	0.12
Hierro galvanizado	0.15
Arcilla vitrificada	0.15
Hierro fundido	0.15
Hierro dúctil	0.25
Madera cepillada	0.18-0.9
Concreto	0.3-3.0
Acero bridado	0.9-9

ILUSTRACIÓN 5. TABLA DE RUGOSIDADES ABSOLUTAS DEL LIBRO DE HIDRÁULICA DE TUBERÍAS (SALDARRIAGA, 2007).

RUGOSIDAD ABSOLUTA	
MATERIAL	mm
HIERRO DÚCTIL	0.25
PVC	0.0015
PEAD*	0.007

TABLA 1. RUGOSIDADES ABSOLUTAS DE LAS NORMAS TÉCNICAS DE EPM 2009 (EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN, 2006-2009)

\*El valor del PEAD fue complementado con la información del manual técnico para PEAD de PAVCO (PAVCO, 2011).

**TABLA B.6.10**  
**Valores de rugosidad absoluta**

Material	Rugosidad absoluta $k_s$ (mm)
Acero bridado	0.9-9
Acero comercial	0.45
Acero galvanizado	0.15
Concreto	0.3-3
Concreto bituminoso	0.25
CCP	0.12
Hierro forjado	0.06
Hierro fundido	0.15
Hierro dúctil (1)	0.25
Hierro galvanizado	0.15
Hierro dulce asfaltado	0.12
GRP	0.030
Polietileno	0.007
PVC	0.0015

(1) cuando la tubería de hierro dúctil esté revestida internamente, se debe tomar el valor de rugosidad absoluta del material de revestimiento.

**ILUSTRACIÓN 6. RUGOSIDADES ABSOLUTAS DEL RAS (MINISTERIO DE DESARROLLO ECONOMICO, 2000).**

### 2.4.2 COEFICIENTES DE HAZEN-WILLIAMS

Ya que en este trabajo de grado se empleará la ecuación de Hazen-Williams, es necesario consultar los Coeficientes para cada uno de los materiales. Y dado a que uno de los objetivos de este trabajo es el de analizar la normativa colombiana, es necesario utilizar los Coeficientes de Hazen-Williams de la normativa colombiana y por ello se consultaron las normas técnicas de la EPM.

COEFICIENTES DE HAZEN-WILLIAMS	
MATERIAL	COEFICIENTE
HIERRO DÚCTIL	140-150
PVC	150
PEAD	150

**TABLA 2. TABLA DE COEFICIENTES DE HAZEN-WILLIAMS DE LA EPM (EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN, 2006-2009).**

Para propósitos de esta tesis y con base a la literatura el valor del Coeficiente de Hazen-Williams para Hierro dúctil fue de 140, teniendo en cuenta que es con revestimiento interior.

### 2.4.3 DIÁMETROS COMERCIALES Y CURVAS DE COSTO

Los diámetros comerciales son de gran importancia a la hora de diseñar las redes de distribución de agua potable. Por lo que se consultaron los diámetros comerciales y para el diseño los diámetros Internos y sus respectivas curvas de costos.

#### 2.4.3.1 PVC

Para el PVC se consultó con la empresa PAVCO. La lista de diámetros se muestra a continuación. La referencia (RED 21 PVC Tipo 1, Grado1) utilizada fue es cogida ya que es a que presenta la mejor resistencia a presión y una lista bastante amplia de diámetros.

RDE 21 PVC Tipo 1, Grado 1							
Presión de trabajo a 23°C: 200 psi - 1.38 MPa - 14.06 Kg/cm <sup>2</sup>							
Diámetro Nominal pulg.	Ref.	Peso Aprox. Kg/m	Diámetro Exterior Prom.		Espesor de Pared Mínimo		Diámetro Interior Prom. mm
			mm	pulg.	mm	pulg.	
2	2900010	0.81	60.32	2.375	2.87	0.113	54.58
2.1/2	2900018	1.18	73.03	2.875	3.48	0.137	66.07
3	2900022	1.76	88.90	3.500	4.24	0.167	80.42
4	2900033	2.90	114.30	4.500	5.44	0.214	103.42
6	2900043	6.31	168.28	6.625	8.03	0.316	152.22
8	2900054	10.67	219.03	8.623	10.41	0.409	198.21
10	2902411	16.63	273.05	10.750	12.98	0.511	247.09
12	2902421	23.45	323.85	12.750	15.39	0.605	293.07
14	2902431	28.14	355.60	14	16.92	0.666	321.76
16	2902435	36.78	406.40	16	19.35	0.762	367.70
18	2902439	46.53	457.20	18	21.77	0.857	413.66
20	2902443	53.82	508.00	20	24.18	0.952	459.64
24	NUEVO	80.62	609.6	24	29.03	1.143	551.54

ILUSTRACIÓN 7. LISTA DE DIÁMETROS COMERCIALES DISPONIBLES PARA PVC (PAVCO, 2011).

Los costos también fueron suministrados por PAVCO y fueron resumidos en las siguientes tablas.

<b>TUBERÍAS</b>			
Tuberías	Referencia	Diámetro	Precio x Tubo
Tramos de 6 metros	2900010	2	\$ 30,044
	2900018	2.1/2	44,072
Presión de trabajo a 23°C	2900022	3	65,753
	2900033	4	108,491
	2900043	6	236,890
RDE 21	2900054	8	401,264
PSI 200	2902411	10	631,671
	2902421	12	883,828
	2902431	14	1,096,055
	2902435	16	1,438,589
	2902439	18	1,846,403
	2902443	20	2,299,906
<b>NUEVO</b>	2904900	24	3,398,699

TABLA 3. COSTOS POR 6 METROS DE TUBERÍA DE PVC (PAVCO, 2012).

<b>RDE 21 PVC Tipo 1 Grado 1</b>			
DN (in)	DI (mm)	Costo( 6 metros)	Costo (metro)
2	54.58	\$ 30 044.00	\$ 5 007.33
2 1/2	66.07	\$ 44 072.00	\$ 7 345.33
3	80.42	\$ 65 753.00	\$ 10 958.83
4	103.42	\$ 108 491.00	\$ 18 081.83
6	152.22	\$ 236 890.00	\$ 39 481.67
8	198.21	\$ 401 264.00	\$ 66 877.33
10	247.09	\$ 631 671.00	\$ 105 278.50
12	293.07	\$ 883 828.00	\$ 147 304.67
14	321.76	\$ 1 096 055.00	\$ 182 675.83
16	367.7	\$ 1 438 589.00	\$ 239 764.83
18	413.66	\$ 1 846 403.00	\$ 307 733.83
20	459.54	\$ 2 299 906.00	\$ 383 317.67
24	551.54	\$ 3 398 699.00	\$ 566 449.83
*	600	\$ 3 910 086.74	\$ 651 681.12
*	700	\$ 5 352 504.03	\$ 892 084.00
*	800	\$ 7 025 651.42	\$ 1 170 941.90
*	900	\$ 8 930 675.04	\$ 1 488 445.84
*	1000	\$ 11 068 589.86	\$ 1 844 764.98
*	1400	\$ 21 966 208.61	\$ 3 661 034.77

TABLA 4. TABLA DE COSTOS POR METRO Y EXTENSIÓN DE DIÁMETROS.

En las tablas anteriores se pueden evidenciar los diámetros con los que se trabajó durante la tesis. Los que están con el \* y resaltados en amarillo fueron diámetros que se adicionaron artificialmente con fines investigativos (para los diseños que incluían el caudal inicial aumentado 4 veces), y los costos fueron ajustados con la curva de costos.

La curva de costos resultante fue:

$$C = L * 1.4287 * d^{2.037}$$

ECUACIÓN 2.4.3.1-1

en donde:

C= Costo en pesos colombianos

L= Longitud del tramo de la tubería

D= Diámetro de la tubería en mm.

A continuación se muestra la gráfica con la que se obtuvo la Curva de Costos:

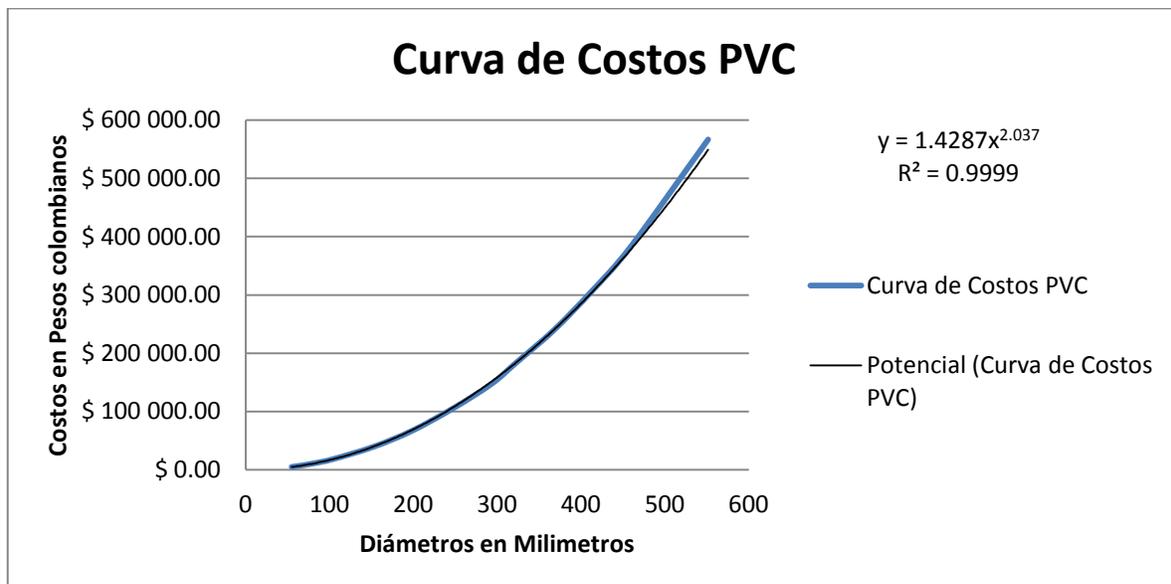


ILUSTRACIÓN 8. CURVA DE COSTOS PARA PVC.

### 2.4.3.2 PEAD

El siguiente material fue el Polietileno de alta densidad (PEAD). Para este material también se consultaron los diámetros y costos de PAVCO y la referencia seleccionada se realizó con los mismos criterios que el PVC. A continuación se muestran los diferentes diámetros.

PE 100 / PN 16 PRESION NOMINAL (PN)  
 DE TRABAJO A23°C : 16BAR - 230 PSI (RDE 11)

Diámetro Nominal mm.	Referencia	Diámetro Exterior Prom.	Espesor de Pared Mínimo	Diam. Interior mm	Presentación	Peso kg/m
* 50		50	4.6	40.80	Rollo 100 m	0.68
63	2900297	63	5.8	51.40	Rollo 100 m	1.09
* 75	NUEVO	75	6.8	61.36	Rollo 100 m	1.51
90	2900299	90	8,2	73.60	Rollo 100 m	2.17
110	2900288	110	10,0	90.00	Rollo 50 m	3.21
160	2900292	160	14,6	130.80	Tramo 6 m	6.81
200	2903708	200	18,2	163.60	Tramo 6 m	10.38
250	2905056	250	22,7	204.60	Tramo 6 m	16.65
315	NUEVO	315	28,6	257.80	Tramo 6 m	26.57
355	NUEVO	355	32,2	290.60	Tramo 6 m	33.72
400	NUEVO	400	36,3	327.40	Tramo 6 m	42.83

TABLA 5. TABLA DE DIÁMETROS PARA PEAD DE PAVCO (PAVCO, 2011).

Al igual que con el PVC los costos también fueron suministrados por PAVCO como se muestra a continuación:

ACUAFLEX PN 16 PE 100 RDE 11	Ref.	Diámetro	Precio x Mt.	Long. Mts.
		32	2,869	
		40	4,509	
		50	6,968	
	2900297	63	10,975	Rollo 100
		75	15,473	
	2900299	90	21,519	Rollo 100
	2900288	110	33,190	Rollo 50
			<b>Precio x Tramo</b>	
	2900292	160	421,152	Tramo-6
	2903708	200	659,702	Tramo-6
	2905056	250	1,054,319	Tramo-6
	2903916	315	1,673,432	Tramo-6
	2904619	355	2,123,753	Tramo-6
	2904623	400	2,697,519	Tramo-6

TABLA 6. TABLA DE COSTOS PARA PEAD SUMINISTRADA POR PAVCO (PAVCO, 2012).

Con lo anterior, se sacaron los costos por metro y por diámetro como se ilustra en la siguiente tabla.

RDE11 PEAD				
DN(mm)	DI(mm)	Costo	Presentación	Costo(Metro)
50	40.8	\$ 6 968.00	Rollo 100 m	\$ 6 968.00
63	51.4	\$ 10 975.00	Rollo 100 m	\$ 10 975.00
75	61.36	\$ 15 473.00	Rollo 100 m	\$ 15 473.00
90	73.6	\$ 21 519.00	Rollo 100 m	\$ 21 519.00
110	90	\$ 33 190.00	Rollo 50 m	\$ 33 190.00
160	130.8	\$ 421 152.00	Tramo 6 m	\$ 70 192.00
200	163.6	\$ 659 702.00	Tramo 6 m	\$ 109 950.33
250	204.6	\$ 1 054 319.00	Tramo 6 m	\$ 175 719.83
315	257.8	\$ 1 673 432.00	Tramo 6 m	\$ 278 905.33
355	290.6	\$ 2 123 753.00	Tramo 6 m	\$ 353 958.83
400	327.4	\$ 2 697 519.00	Tramo 6 m	\$ 449 586.50
*	400	\$ 4 016 503.08	Tramo 6 m	\$ 669 417.18
*	450	\$ 5 089 137.84	Tramo 6 m	\$ 848 189.64
*	500	\$ 6 289 244.33	Tramo 6 m	\$ 1 048 207.39
*	600	\$ 9 072 377.21	Tramo 6 m	\$ 1 512 062.87
*	700	\$ 12 366 800.85	Tramo 6 m	\$ 2 061 133.48
*	1000	\$ 25 324 935.39	Tramo 6 m	\$ 4 220 822.56
*	1400	\$ 49 797 466.32	Tramo 6 m	\$ 8 299 577.72

**TABLA 7. COSTOS POR METRO PARA PEAD.**

Como se puede ver, se encuentran los costos normalizados por metro de tubería. Al igual que con el PVC los diámetros que están marcados con \* y delineados en amarillo son diámetros que fueron agregados de manera artificial con fines investigativos (para los diseños que incluían el caudal inicial aumentado 4 veces). Y estos diámetros nuevos fueron ajustados en la curva de costos.

La curva de costos resultante fue:

$$C = L * 3.95 * d^{2.0096}$$

ECUACION 2.4.3.2-1

Con los mismos parámetros del PVC.

En la siguiente grafica se muestra la curva de costos:

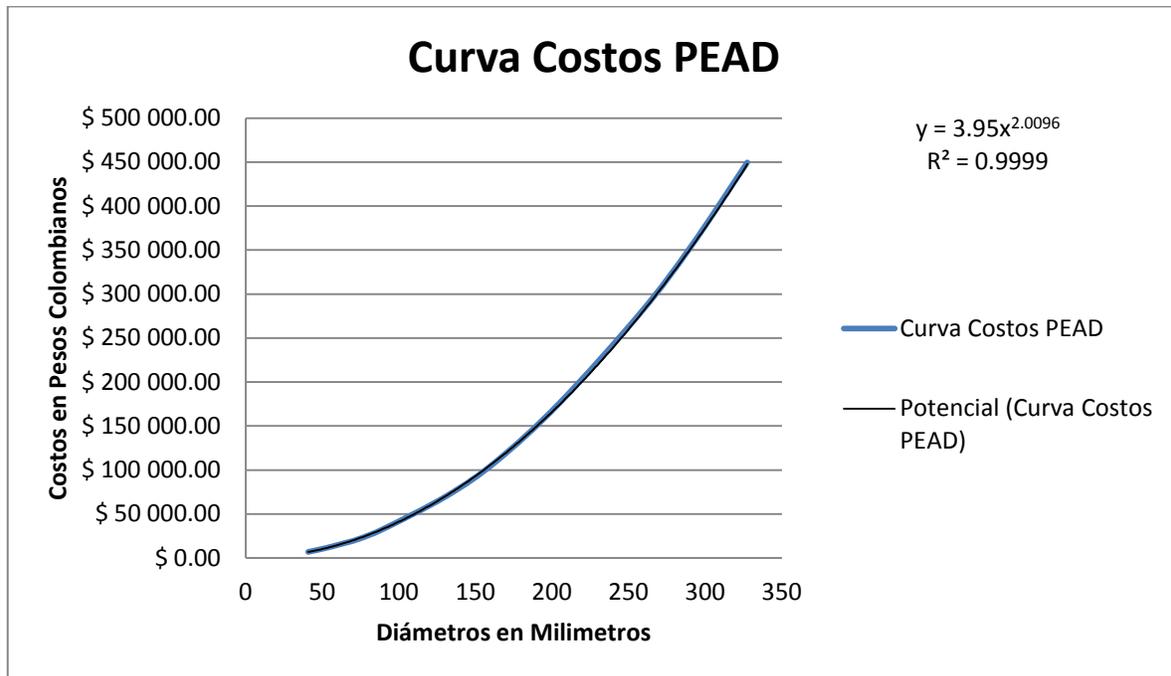


ILUSTRACIÓN 9. CURVA DE COSTOS PARA PEAD.

### 2.4.3.3 HIERRO DÚCTIL

Para la información de Hierro Dúctil se consultó con la empresa Saint-Gobain PAM Colombia, la cual tiene una lista de diámetros comerciales e internos. Sin embargo solo especificaban que el precio de tramo de tubería era de 750 Dólares por Kg-Metro de tubería. A continuación se muestra la tabla de diámetros que se utilizaron.

DN	Lu	Clase	e	ØDE	ØDI	P	ØB	Masa
mm	m		mm	mm	mm	mm	mm	kg/m
60	6,00	C40	4,4	77	80	89,5	144	9,4
80	6,00	C40	4,4	98	101	92,5	167	12,2
100	6,00	C40	4,4	118	121	94,5	188	14,9
125	6,00	C40	4,4	144	147	97,5	215	18,3
150	6,00	C40	4,5	170	173	100,5	242	22,2
200	6,00	C40	4,7	222	225	106,5	295	30,2
250	6,00	C40	5,5	274	277	105,5	352	42,2
300	6,00	C40	6,2	326	329	107,5	409	55,5
350	6,00	C30	6,4	378	381	110,5	464	68,8
400	6,00	C30	6,5	429	432	112,5	516	79,4
450	6,00	C30	6,9	480	483	115,5	574	93,8
500	6,00	C30	7,5	532	535	117,5	629	111,1
600	6,00	C30	8,7	635	638	132,5	738,5	150,6
700	6,96	C25	8,8	738	741	192	863	186,2
800	6,95	C25	9,6	842	845	197	974	229,0
900	6,95	C25	10,6	945	948	200	1082	276,2
1000	6,96	C25	11,6	1048	1051	203	1191	330,6
1100	8,19	C25	12,6	1152	1155	225	1300	395,4
1200	8,19	C25	13,6	1255	1258	235	1412,5	461,3

**TABLA 8. PARTE 1 DE LA LISTA DE DIÁMETROS DE HIERRO DÚCTIL (SAINT-GOBAIN PAM , 2012).**

DN	Lu	Clase	e	ØDE	ØDI	P	ØB	Masa
mm	m		mm	mm	mm	mm	mm	kg/m
1400	8,17	C25	15,7	1462	1465	245	1592	634,3
1500	8,16	C25	16,7	1565	1568	265	1710	720,3
1600	8,16	C25	17,7	1668	1671	265	1816	807,5
1800	8,15	C25	19,7	1875	1878	275	2032	995,1
2000	8,13	C25	21,8	2082	2085	290	2259	1210,0

**TABLA 9. PARTE 2 DE LA LISTA DE DIÁMETROS DE HIERRO DÚCTIL (SAINT-GOBAIN PAM , 2012).**

Con estos diámetros y la información suministrada para los costos se procedió a calcular el costo de la tubería. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

DN	LONGITUD	DI	MASA	Costo Tonelada/Metro	Costo kg/m	Costo /m	Costo/m
mm	m	mm	kg/m	Dólares\$	Dólares\$	\$ Dólares	Pesos\$
60	6	80	9.4	\$ 750.00	\$ 0.75	\$ 7.05	\$ 12 478.50
80	6	101	12.2	\$ 750.00	\$ 0.75	\$ 9.15	\$ 16 195.50
100	6	121	14.9	\$ 750.00	\$ 0.75	\$ 11.18	\$ 19 779.75
125	6	147	18.3	\$ 750.00	\$ 0.75	\$ 13.73	\$ 24 293.25
150	6	173	22.2	\$ 750.00	\$ 0.75	\$ 16.65	\$ 29 470.50
200	6	225	30.2	\$ 750.00	\$ 0.75	\$ 22.65	\$ 40 090.50
250	6	277	42.2	\$ 750.00	\$ 0.75	\$ 31.65	\$ 56 020.50
300	6	329	55.5	\$ 750.00	\$ 0.75	\$ 41.63	\$ 73 676.25
350	6	381	68.8	\$ 750.00	\$ 0.75	\$ 51.60	\$ 91 332.00
400	6	432	79.4	\$ 750.00	\$ 0.75	\$ 59.55	\$ 105 403.50
450	6	483	93.8	\$ 750.00	\$ 0.75	\$ 70.35	\$ 124 519.50
500	6	535	111.1	\$ 750.00	\$ 0.75	\$ 83.33	\$ 147 485.25
600	6	638	150.6	\$ 750.00	\$ 0.75	\$ 112.95	\$ 199 921.50
700	6.96	741	186.2	\$ 750.00	\$ 0.75	\$ 139.65	\$ 247 180.50
800	6.95	845	229	\$ 750.00	\$ 0.75	\$ 171.75	\$ 303 997.50
900	6.95	948	276.2	\$ 750.00	\$ 0.75	\$ 207.15	\$ 366 655.50
1000	6.96	1051	330.6	\$ 750.00	\$ 0.75	\$ 247.95	\$ 438 871.50
1100	8.19	1155	395.4	\$ 750.00	\$ 0.75	\$ 296.55	\$ 524 893.50
1200	8.19	1258	461.3	\$ 750.00	\$ 0.75	\$ 345.98	\$ 612 375.75
1400	8.17	1465	634.3	\$ 750.00	\$ 0.75	\$ 475.73	\$ 842 033.25
1500	8.16	1568	720.3	\$ 750.00	\$ 0.75	\$ 540.23	\$ 956 198.25
1600	8.16	1671	807.5	\$ 750.00	\$ 0.75	\$ 605.63	\$ 1 071 956.25
1800	8.15	1878	995.1	\$ 750.00	\$ 0.75	\$ 746.33	\$ 1 320 995.25
2000	8.13	2085	1210	\$ 750.00	\$ 0.75	\$ 907.50	\$ 1 606 275.00

**TABLA 10. COSTOS CON SUS RESPECTIVOS DIÁMETROS INTERNOS PARA HIERRO DÚCTIL.**

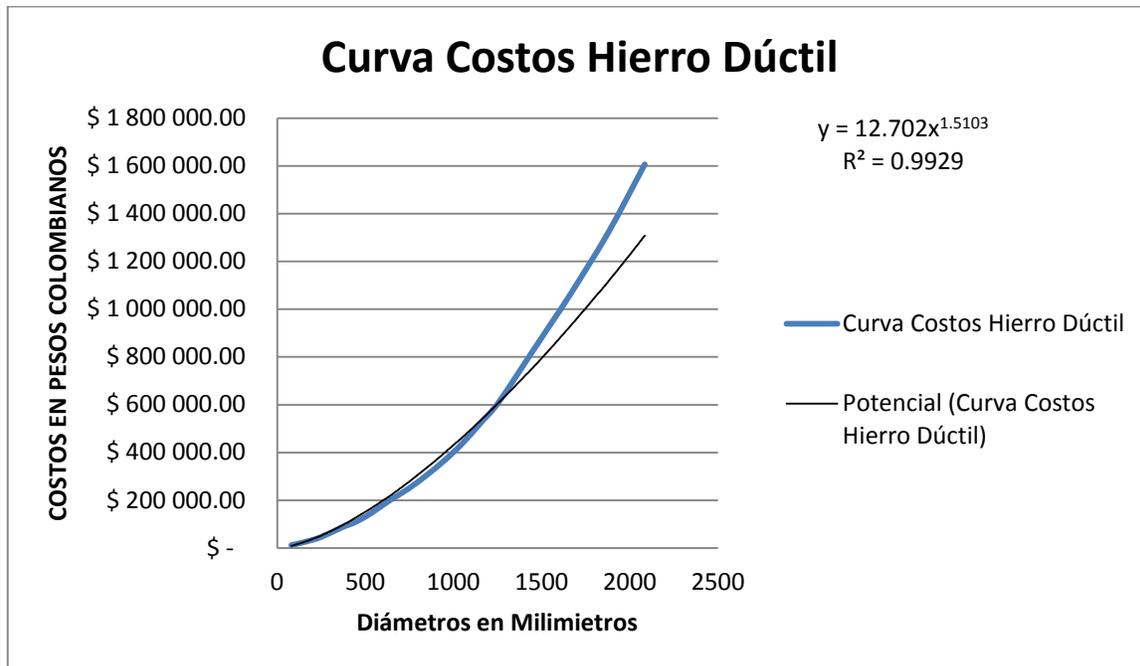
Con lo anterior se obtuvo la siguiente curva de Costos:

$$C = L * 12.702 * d^{1.5103}$$

ECUACIÓN 2.4.3.3-1

Los parámetros e la ecuación son los mismos que los aplicados a PVC y PEAD.

La gráfica con la que se obtuvo la curva de costos se muestra a continuación.



**ILUSTRACIÓN 10. CURVA DE COSTOS PARA HIERRO DÚCTIL.**

## CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

En esta sección se muestran las redes que se utilizaron con sus respectivas características. Adicionalmente, se presentan los parámetros de diseño utilizados y los procedimientos que se llevaron a cabo en el programa REDES y EPANET para obtener los resultados.

Todas las redes estuvieron sujetas a la normativa colombiana; esto se refiere a las rugosidades absolutas mostradas en la Sección 2.4.1 y a los coeficientes de Hazen-Williams de la Sección 2.4.2. La presión mínima fue la exigida por el RAS 2000 Título B (Ministerio de Desarrollo Economico, 2000) de 15 metros de cabeza de agua. Adicionalmente, para este trabajo se utilizó una temperatura de agua de 15 grados centígrados y una viscosidad cinemática de  $1.141 * \frac{10^{-6} m^2}{s}$ . La gravedad se trabajó con el valor estándar de  $9.81 \frac{m^2}{s}$ . Se tuvo especial cuidado en seleccionar redes que no presentaran ningún tipo de fugas, con rugosidad única para toda la tubería (al igual que mismo coeficiente de Hazen-Williams). En cuanto a fuentes de abastecimiento, se trabajó con un máximo de 4 fuentes de abastecimiento. Las demandas base de cada una de las redes serán mostradas más adelante cuando se presenten las características de la red, sin embargo la metodología se trabajó de tal forma que las redes fueran diseñadas con el caudal original que tenían establecido, dos veces el caudal y cuatro veces el caudal. Esto se realizó para analizar si el aumento del caudal en cada uno de los Nudos tenía algún efecto sobre los diseños con la ecuación de Hazen-Williams.

### 3.1 RED SAN VICENTE

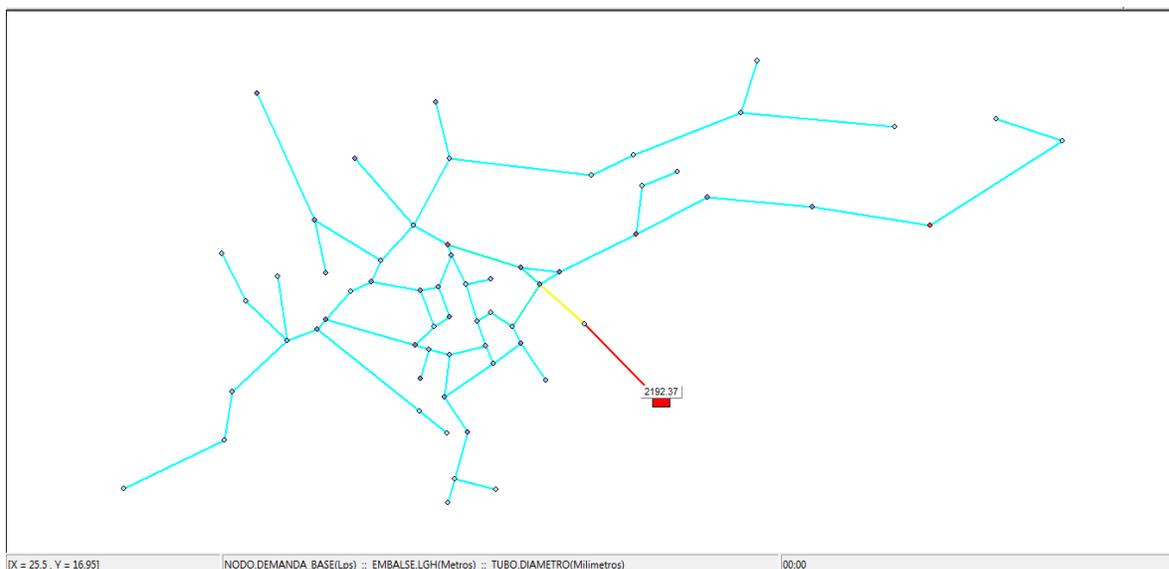


ILUSTRACIÓN 11. RED SAN VICENTE.

La red San Vicente es una red que cuenta con las siguientes características:

- 62 Nudos
- Alturas de la red varían entre un mínimo de 2192 msnm y 2176 msnm
- Una fuente de abastecimiento con una LGH de 2192.37 msnm
- 71 tramos de tubería
- Demandas en los Nudos que van desde demanda nula (solo 2 Nudos en la red) hasta los 0.61 L/s.

Esta red no tuvo ningún tipo de variación en las simulaciones de 2 veces y 4 veces el caudal. Cabe resaltar que esta es una red ubicada en el departamento de Antioquia, Colombia, con una temperatura promedio de 18 grados centígrados.

### 3.2 RED BALERMA

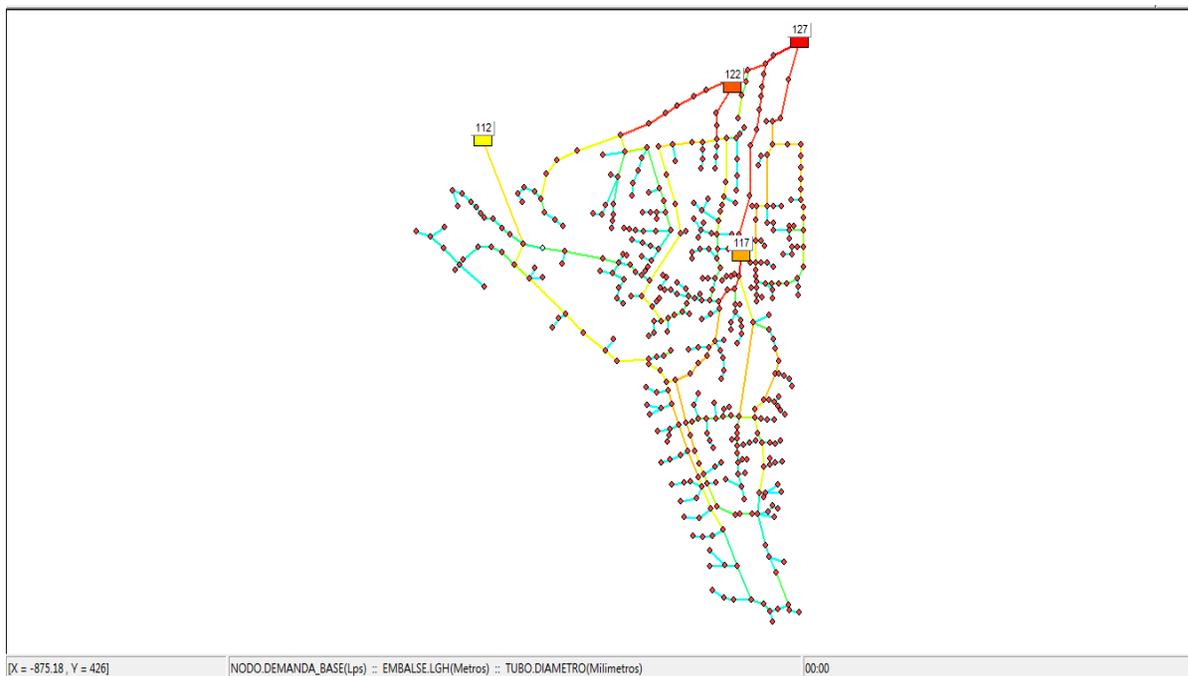


ILUSTRACIÓN 12. RED BALERMA.

Esta fue la red más grande que se trabajó en este proyecto de grado. Las características de la misma se presentan a continuación:

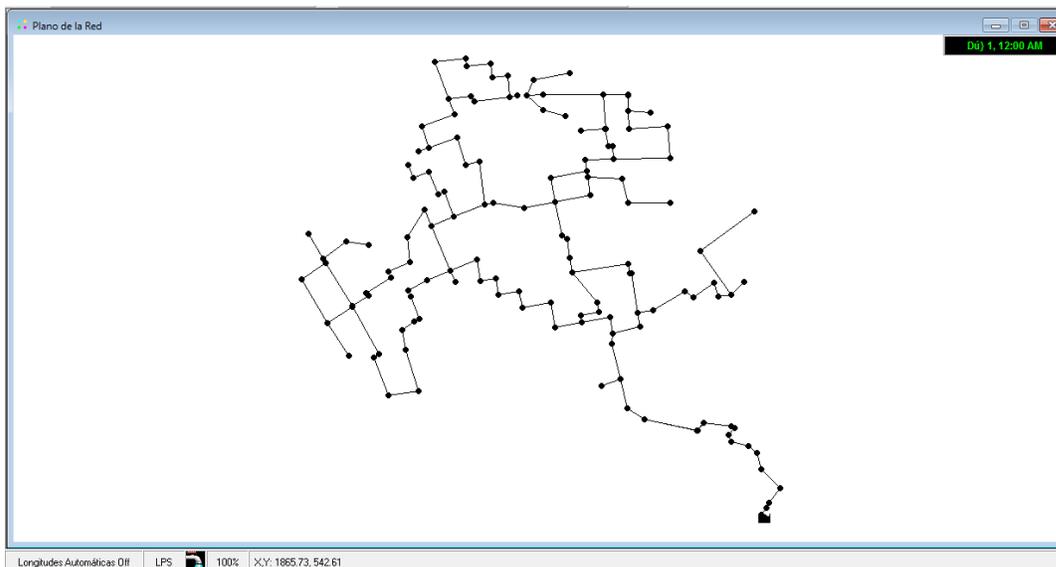
- 443 Nudos
- Las alturas en la red varían entre los 1.3 y 104 msnm.
- Cuenta con 4 Fuentes de abastecimiento. Y las LGH que se trabajaron fueron las siguientes: Grupo 1: (117, 127, 122 y 112) M.C.A estos LGH se utilizaron en la mayoría

de los diseños. Grupo 2: (200, 200,220 y 240) Estas LGH se utilizaron únicamente para el diseño de Balerma con PEAD con caudal base, sin caudal x2 y sin caudal x4.

- 454 tramos de tubería.
- La demanda fue igual en todos los Nudos de 5.5 L/s

Las LGH Grupo 2 fue un caso especial, ya que la introducción de diámetros artificiales se realizó en la etapa final del proyecto cuando los cálculos y los diseños de esta red ya se encontraban realizados. Sin embargo, la mayoría de las simulaciones se realizó con el Grupo 1 y no presentó ningún tipo de inconvenientes.

### 3.3 RED BOGOTÁ-CAZUCÁ



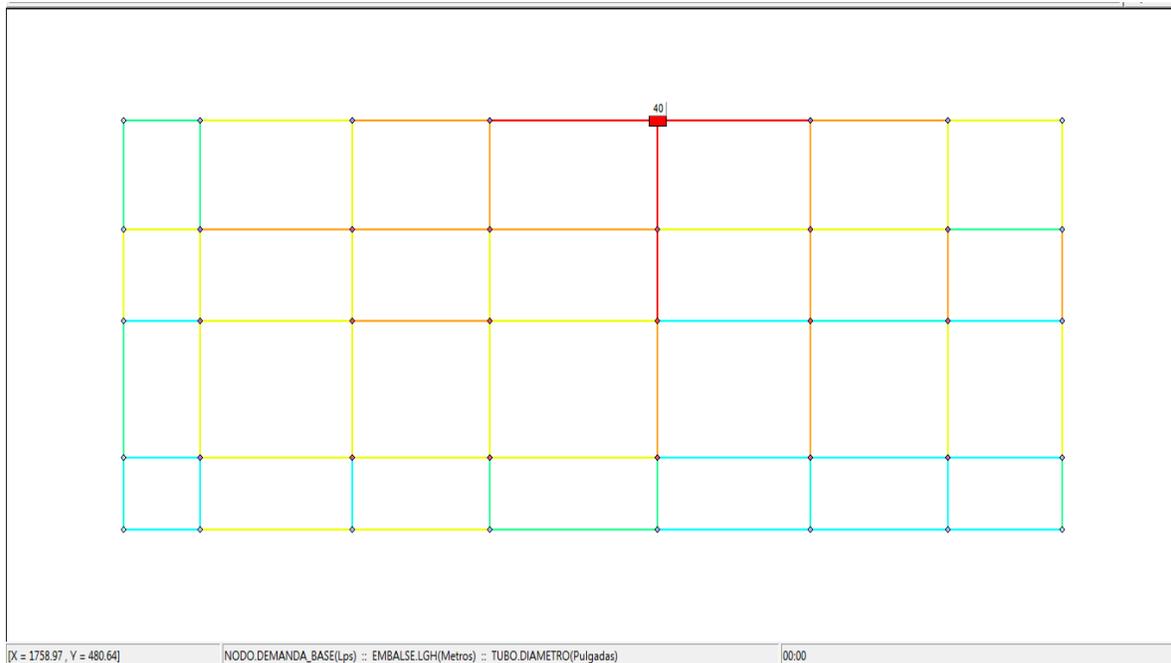
#### ILUSTRACIÓN 13. RED BOGOTÁ-CAZUCÁ.

Esta es la tercera red que se trabajó en este proyecto. Como lo dice su nombre es una red ubicada en Cazucá. Las Características de la red se muestran acá:

- 145 Nudos
- Alturas de la red varían entre 2605 y 2825 msnm.
- Cuenta con una única fuente de abastecimiento con la LGH de 2850 M.C.A para todas las simulaciones.
- 150 tramos de tubería.
- Demandas base varían entre los Nudos, con un mínimo de 1 L/s y un máximo de 58,1 L/s.

Esta red no presentó ningún tipo de inconveniente en sus diseños y al igual que con las demás redes la metodología fue trabajar con caudal base normal, duplicado y cuadruplicado.

### 3.4 RED R28



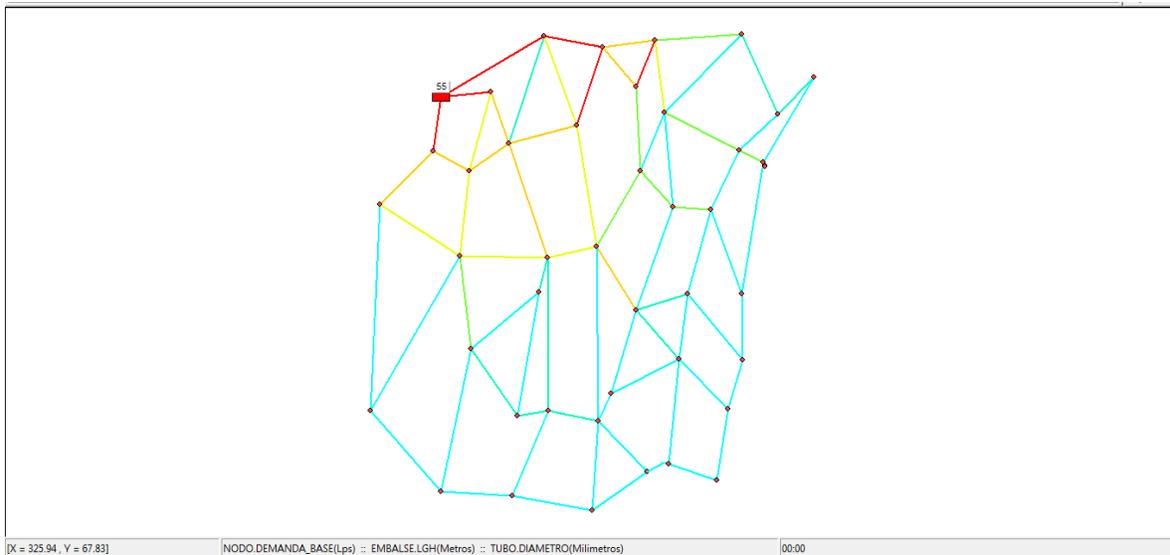
#### ILUSTRACIÓN 14. RED R28.

Esta red a diferencia de las redes anteriores, no es una red real. Esta red fue trabajada y es trabajada en el CIACUA de la Universidad de los Andes en diferentes proyectos y Tesis. Las características de esta red se muestran a continuación:

- 40 Nudos.
- Topografía plana (todos los Nudos a 0 metros).
- Cuenta con una única fuente de abastecimiento con una LGH de 40 m.
- Cuenta con 67 tramos de Tubería.
- Demandas Base varían entre los Nudos. Con un mínimo de 3 L/s y un máximo de 34 L/s.

Esta fue una red extremadamente útil para el desarrollo de este proyecto, no solo por su facilidad de manejo sino por los resultados arrojados. Se trabajó con la misma metodología de demanda base normal, duplicada y cuadruplicada. Y no presentó ningún inconveniente con los diseños en ninguno de los 3 materiales trabajados.

### 3.5 RED TESIS 1



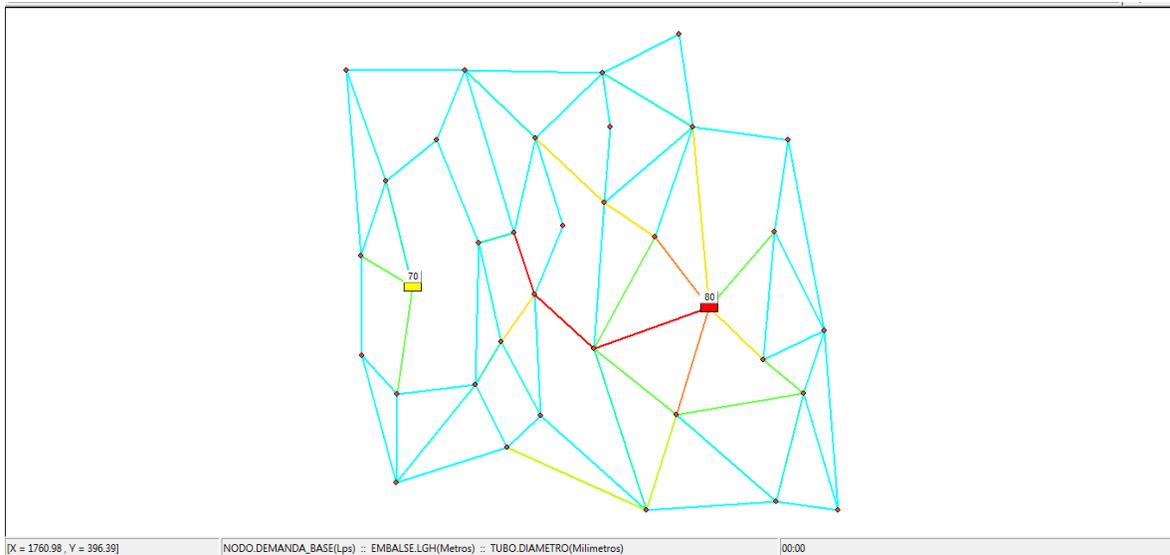
### ILUSTRACIÓN 15. RED TESIS 1.

Esta red fue diseñada por el autor de la tesis y aprobada por el asesor ingeniero Juan Saldarriaga. Las características que se utilizaron durante esta tesis de grado se presentan a continuación:

- 43 Nudos.
- Alturas en la red que varían entre 5 y 32 metros.
- Cuenta con una única fuente de abastecimiento y una LGH de 55 metros.
- Presente 78 tramos de tubería.
- Y una demanda base fija de 3 L/s.

La metodología utilizada para esta red fue igual a las anteriores trabajando la demanda base, de tal forma que se realizaran los diseños con la demanda base estándar, duplicada y cuadruplicada para cada uno de los 3 materiales utilizados en este proyecto de grado.

### 3.6 RED TESIS 2



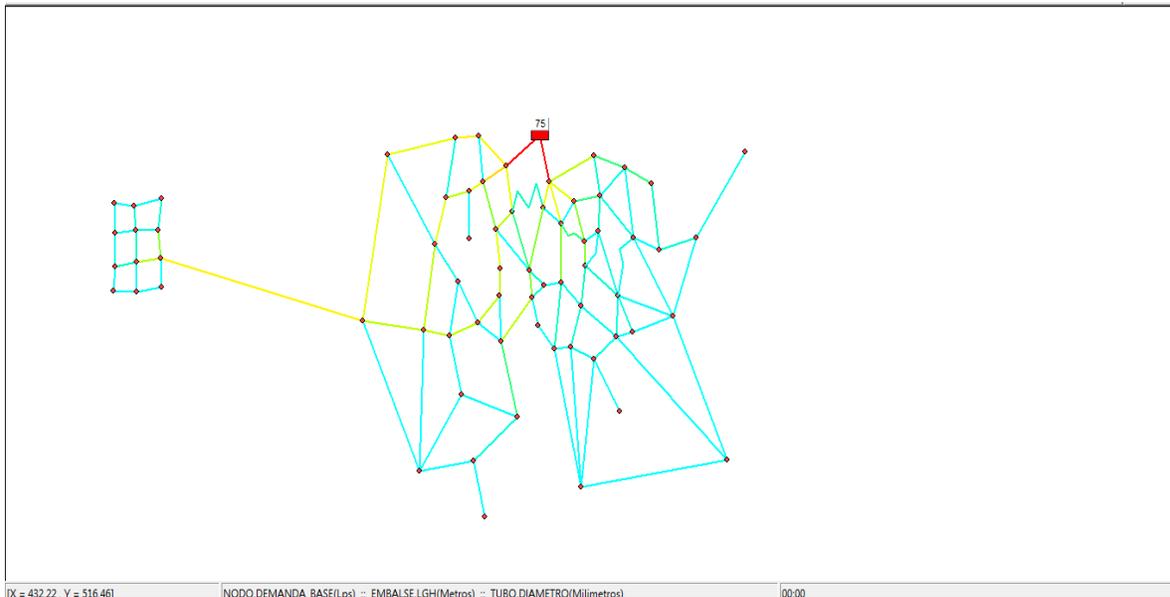
### ILUSTRACIÓN 16. RED TESIS 2.

Al igual que en la red anterior, esta red fue diseñada por el autor y autorizada por el asesor de este trabajo. Las características con las que se trabajó esta red se van a mostrar a continuación:

- 33 Nudos
- Alturas en la red que varían entre los 7 y los 56 m.
- La red cuenta con 2 fuentes de abastecimiento con las LGH de 70 y 80 m respectivamente.
- La red cuenta con 72 tramos de tubería.
- Y una demanda base de 15 L/s para todos los Nudos de la tubería.

Al igual que las redes anteriores, se trabajó con la demanda base estándar, duplicada y cuadruplicada, y no presentó ningún problema al diseñarla con los materiales seleccionados para este trabajo.

### 3.7 RED TESIS 3



**ILUSTRACIÓN 17. RED TESIS 3.**

Última red que se trabajó en este proyecto de grado, al igual que las 2 redes anteriores también fue creada para la realización de este proyecto de grado. Las características de esta red se mostrarán a continuación:

- 67 Nudos
- Alturas en la red se encuentran entre los 4 y 56 m.
- Cuenta con una única fuente de abastecimiento. La LGH se modificó por los mismos motivos que los nombrados en Balerma. LGH: 75 m se utilizó en la mayoría de las simulaciones, LGH: 90 m se utilizó en el diseño con PVC con demanda duplicada y PEAD con demanda estándar y finalmente LGH: 130 m se utilizó únicamente en el diseño de PEAD para demanda duplicada.
- La demanda base que se trabajó para esta red fue de 7 L/s para todos los Nudos de la red.

Como se nombró en la red Balerma, el único inconveniente que esta red presentó fue en 3 diseños, en los cuales aún no se había implementado los diámetros artificiales.

### **3.8 PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DE LOS DISEÑOS**

El procedimiento a seguir consistió en los siguientes pasos:

- Abrir el Programa REDES

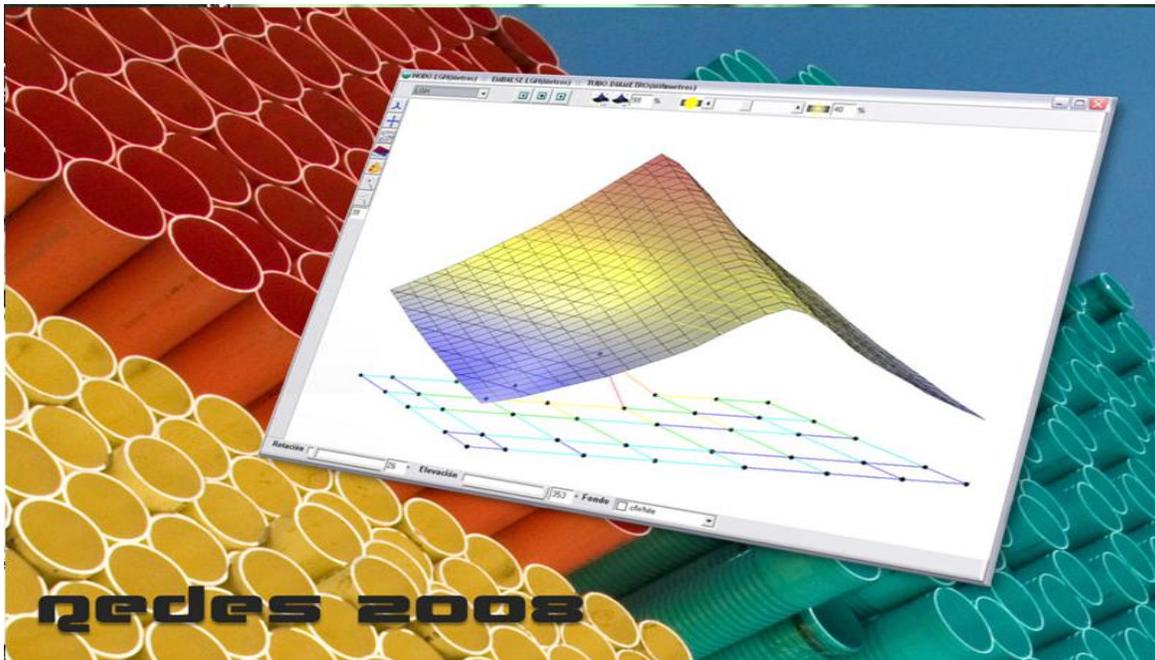


ILUSTRACIÓN 18. INTERFAZ DEL PROGRAMA REDES.

- Cargar la red que se desea trabajar.

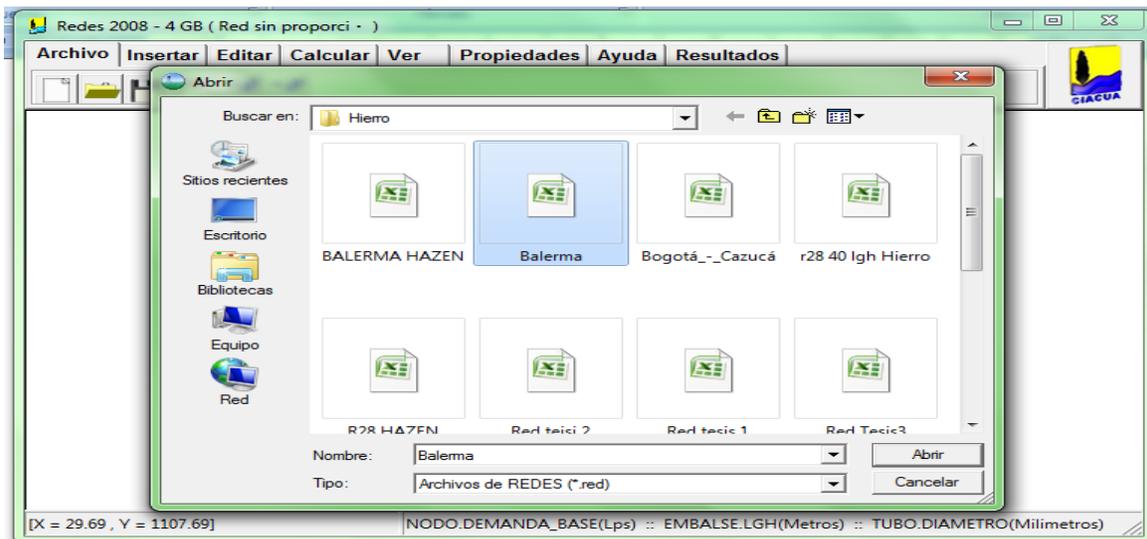


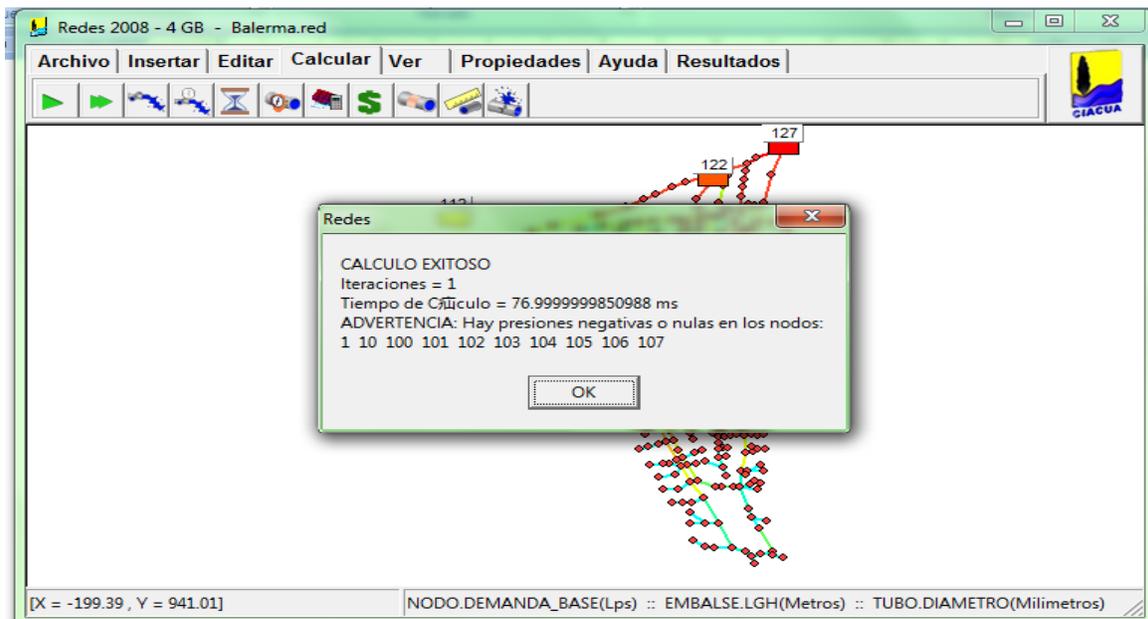
ILUSTRACIÓN 19. CARGAR LA RED A TRABAJAR.

- Revisar que los parámetros establecidos en la metodología sean correctos.



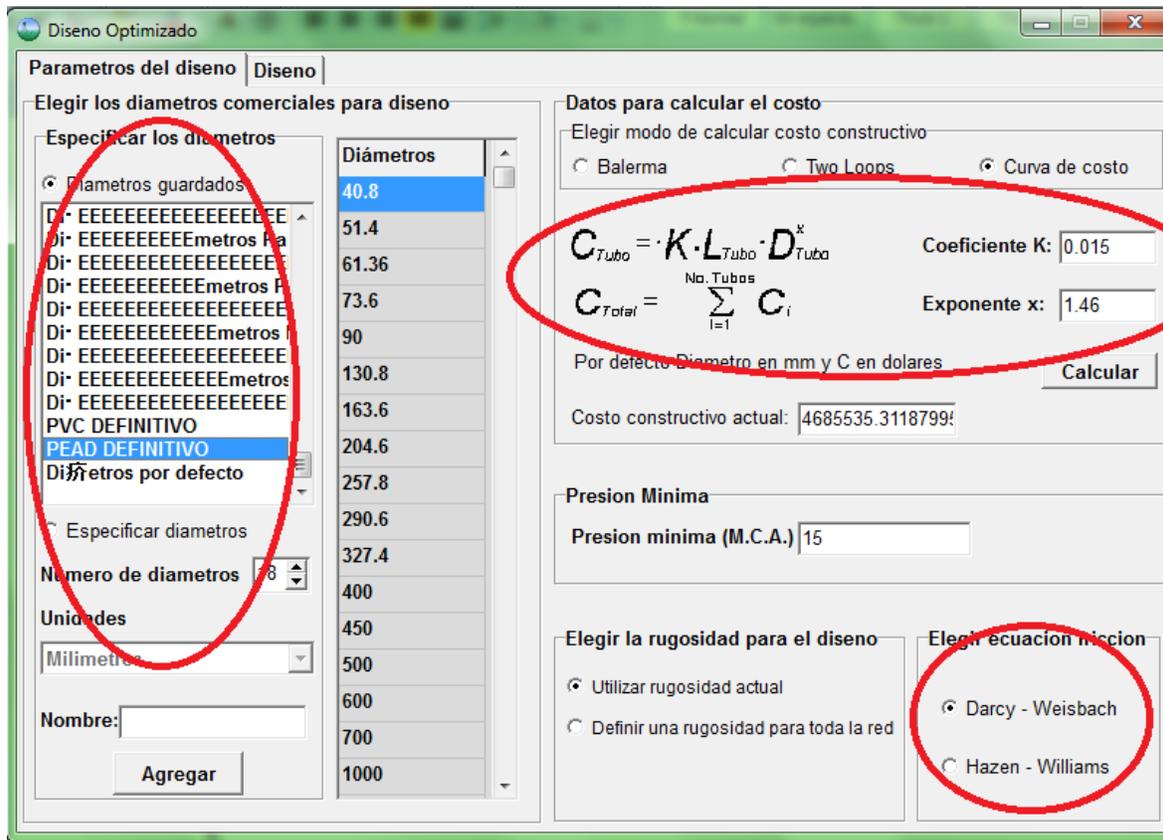
**ILUSTRACIÓN 20. VERIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS.**

- Se realiza una comprobación hidráulica inicial para ver el estado de la red.



**ILUSTRACIÓN 21. PRUEBA INICIAL PARA CORRER LA HIDRÁULICA EN ESTADO ESTABLE.**

- Se establece la curva de costos, los diámetros comerciales que se desean utilizar y la ecuación de diseño.



**ILUSTRACIÓN 22. PARAMETROS DE DISEÑO: CURVA DE COSTOS, DIÁMETROS Y ECUACION QUE SE DESEA UTILIZAR.**

- Entrar a la ventana de Diseño y seleccionar SOGH, verificando que los parámetros sean los correctos.

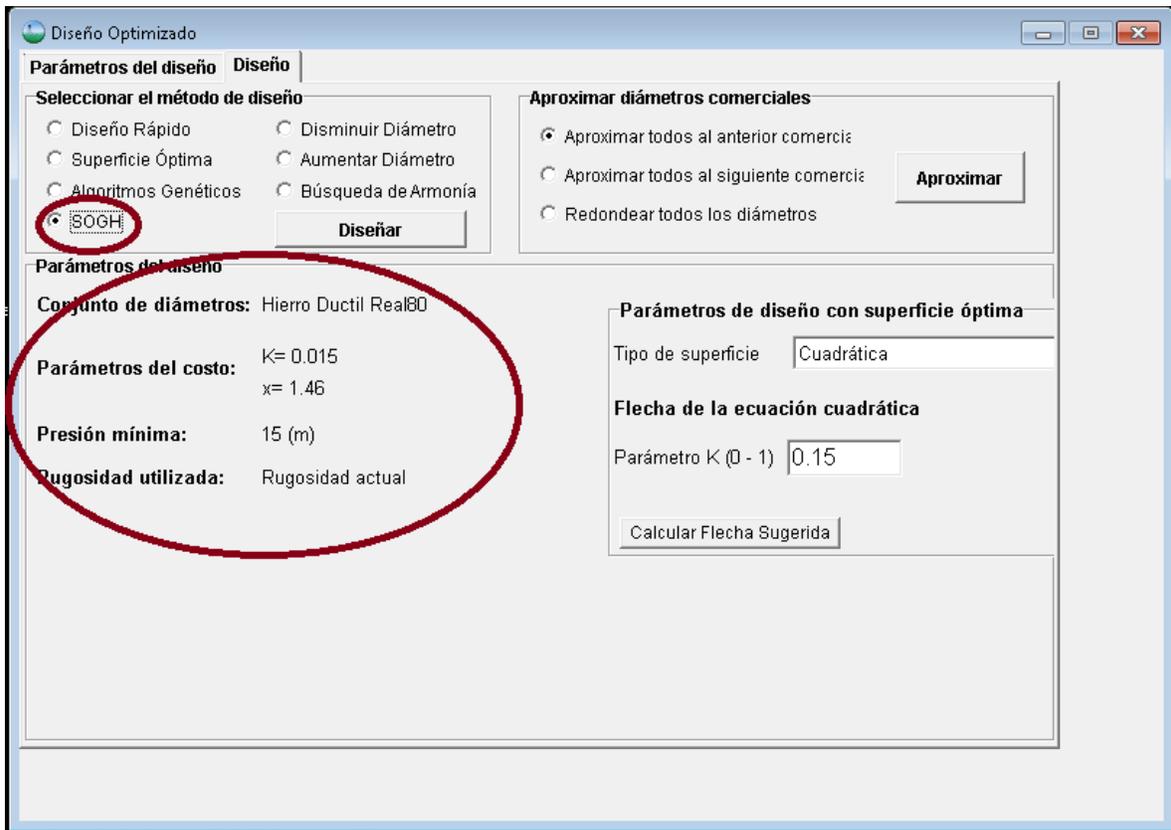


ILUSTRACIÓN 23. VENTANA DE DISEÑO CON METODOLOGÍA SOGH.

- Como se muestra en el marco teórico específicamente en la sección 2.3.1.1, se calcula la flecha óptima que será utilizada para el diseño de la red. Seleccionando la flecha 3 para que cumpla tanto con requerimientos hidráulicos como de costos mínimos.

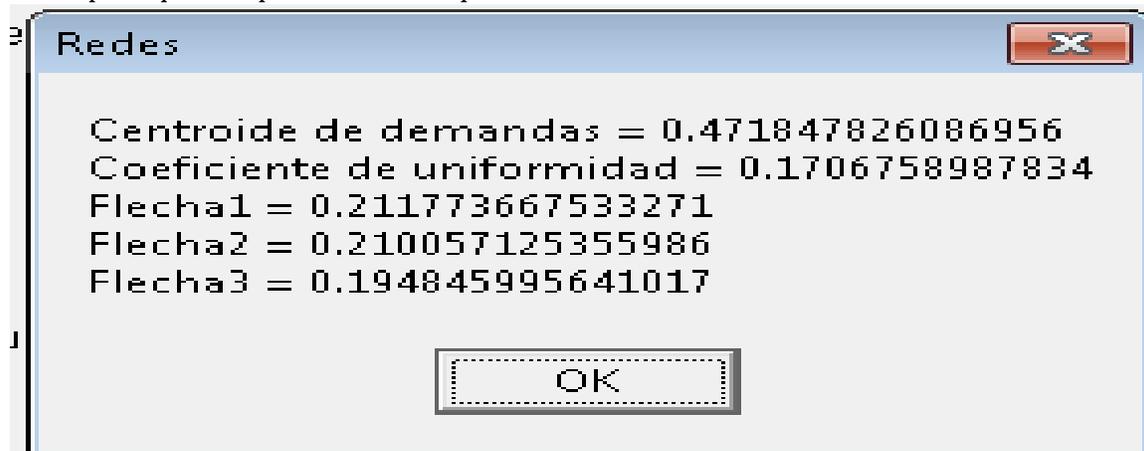


ILUSTRACIÓN 24. CÁLCULO DE LA FLECHA.

- Una vez asignada la flecha, se procede a diseñar la red. El programa finalizará cuando haya concluido el diseño o presente algún mensaje de error que puede ser causado por que los diámetros escogidos son muy pequeños, o la presión mínima es demasiado grande o la LGH de los embalses no tiene un valor lo suficientemente alto para suplir las demandas.

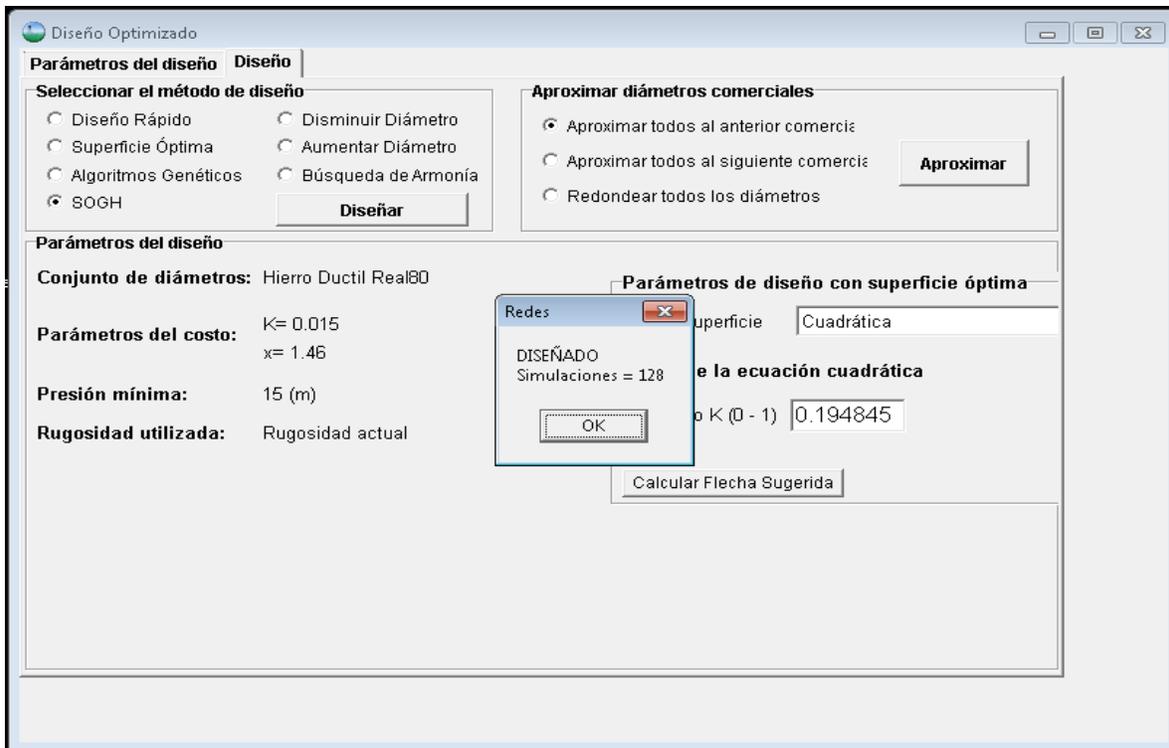


ILUSTRACIÓN 25. DISEÑO EXITOSO DE LA RED.

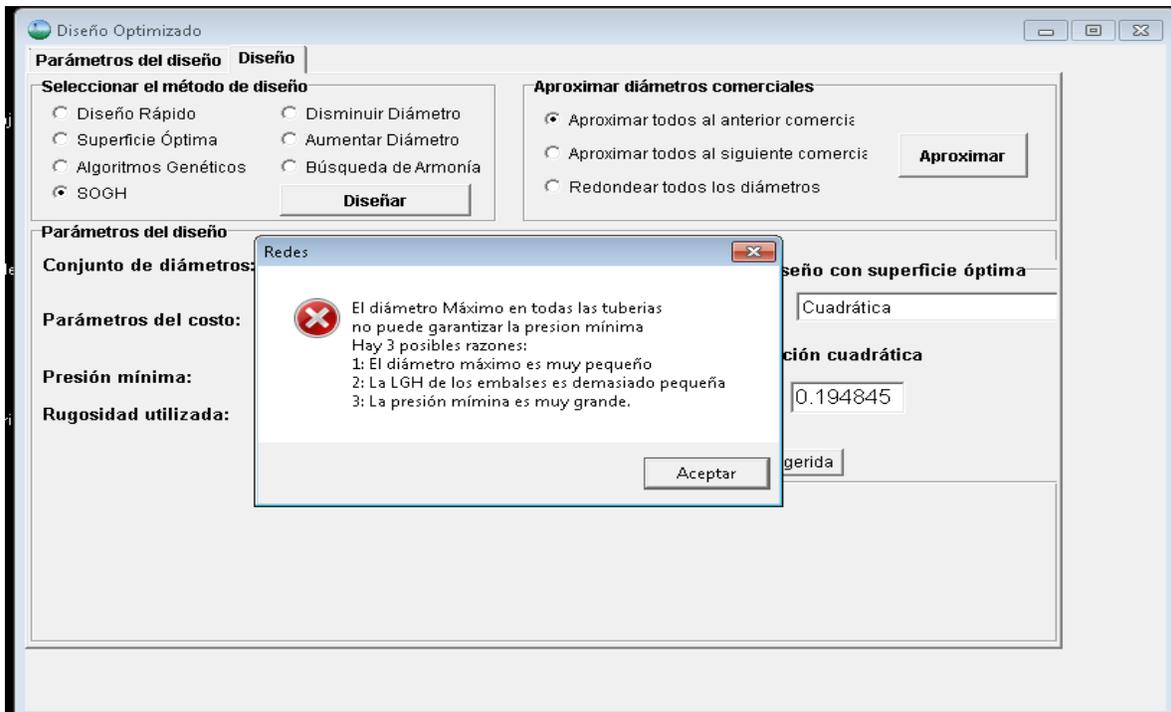


ILUSTRACIÓN 26. MENSAJE DE ERROR.

- Obtención de los resultados:

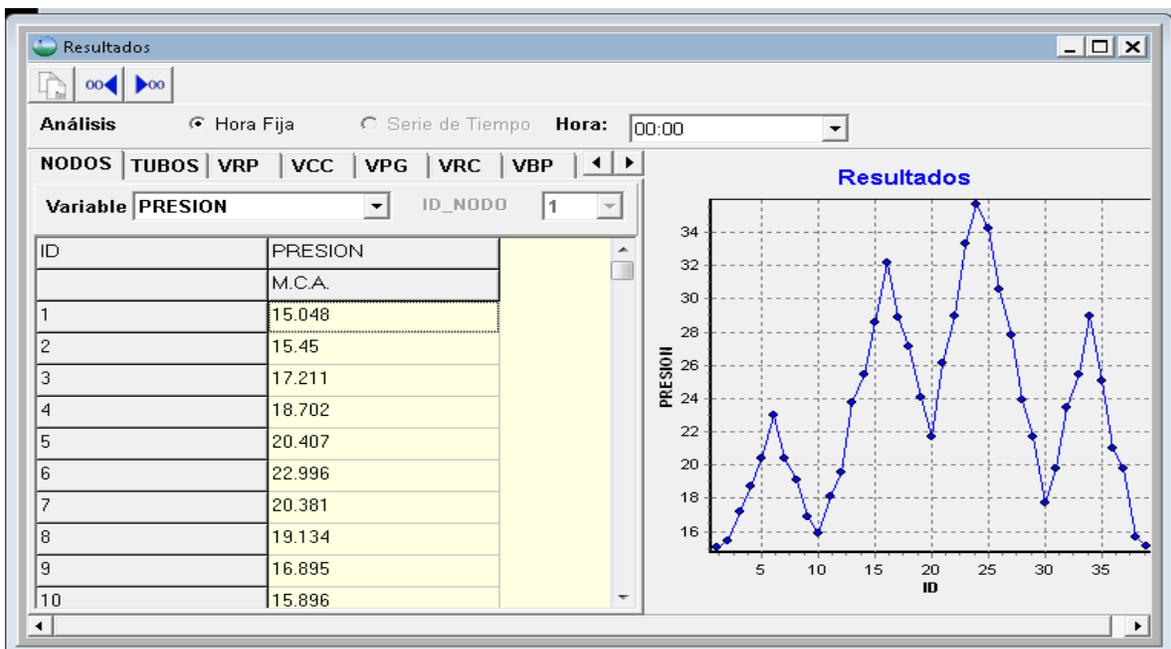


ILUSTRACIÓN 27. RESULTADOS EN REDES.

- Exportar los resultados para su análisis.



ILUSTRACIÓN 28 EXPORTAR LOS RESULTADOS.

- Para el caso de este proyecto de Tesis, se realizó una segunda comprobación de los datos con el programa de EPANET.
- Se observaron los costos, utilizando la herramienta de REDES.

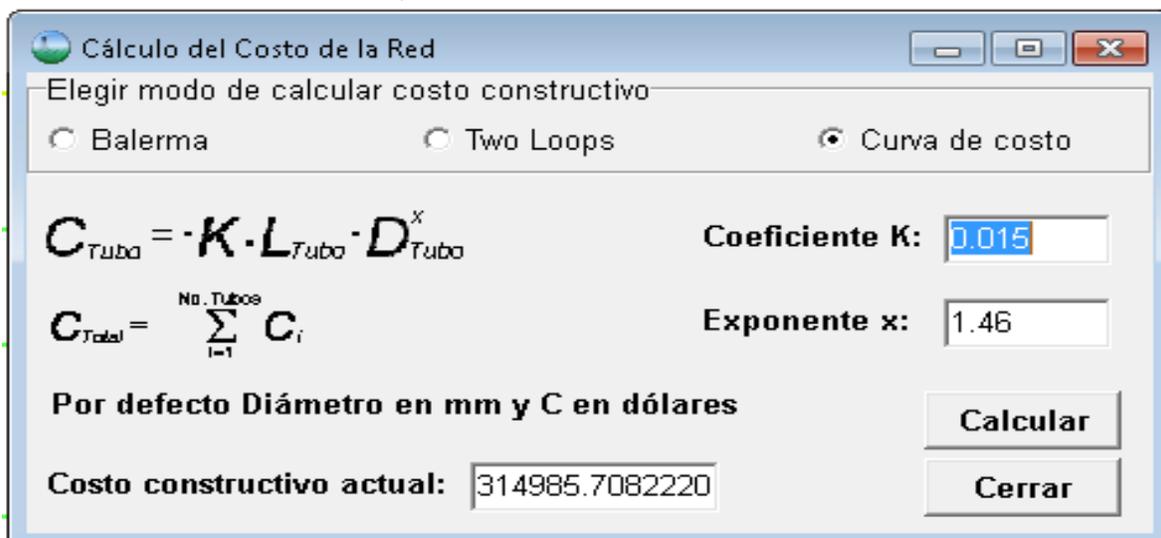


ILUSTRACIÓN 29. COSTOS DE LA RED.

- Y ya que el proyecto desea analizar los efectos de la ecuación empírica de Hazen-Williams frente a la ecuación físicamente basada de Darcy-Weisbach, la comparación



---

se realizó diseñando con la ecuación de Hazen-Williams. Posteriormente, se abrió una nueva ventana de redes y se corrió la hidráulica en estado estable, ya que por defecto el Programa REDES corre la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach. Y con estos resultados se exportan para su posterior análisis.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Los resultados de este proyecto se realizaron analizando los efectos hidráulicos de la ecuación de Hazen-Williams. Para este propósito, se utilizó la herramienta computacional de REDES. Como se nombró en la metodología, se diseñó la red con la ecuación y el coeficiente de Hazen-Williams y posteriormente se corrió la hidráulica de esta red con rugosidad absoluta en la ecuación de Darcy-Weisbach, de tal forma que el C de Hazen-Williams y  $k_s$  coincidieran para el mismo material. Con este procedimiento, se lograban obtener las presiones al correr la hidráulica con la ecuación físicamente basada de Darcy-Weisbach y observar el efecto hidráulico que causaba el uso de la ecuación de Hazen-Williams en los diseños optimizados.

Por lo cual se diseña con la ecuación de Hazen-Williams:

$$v = 0.849 * c * R^{0.63} * S^{0.54}$$

ECUACIÓN 2.1.1-1

De esta ecuación se obtiene el diámetro de diseño. Posteriormente realizamos una especie de comprobación de diseño con la ecuación de Darcy-Weisbach:

- Se halla el factor de fricción con la ecuación de Colebrook-White :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log_{10} \left( \frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right)$$

ECUACIÓN 2.1.2-5

- Ya que se cuenta con todos los parámetros, se puede hallar el factor de fricción con algún método numérico o de forma iterativa.
- Posteriormente, encontramos las verdaderas pérdidas por fricción, con la ecuación de Darcy-Weisbach:

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

ECUACIÓN 2.1.2-2

- Finalmente, con las pérdidas reales (ya que es una ecuación físicamente basada), se procede a aplicar la ecuación de Bernoulli y encontrar la presión en cada uno de los Nudos después de realizada la comprobación:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 - HF = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

ECUACIÓN 2.1-1

- Como se puede observar, los parámetros del lado izquierdo de la ecuación se conocen, por lo que solo la presión del lado derecho de la ecuación termina como incógnita.

Sin embargo como no es una tubería única, sino una red cerrada, para hallar la presión en Nudos, se utilizó el método del gradiente hidráulico desarrollado por E.Todini y E.P.O'Connell entre 1982 y 1983 (Saldarriaga, 2007) para el cálculo de las alturas piezométricas finales en cada uno de los Nudos.

- Como paso final, se graficaron las presiones diseñadas con la ecuación de Hazen-Williams y las comprobaciones con la ecuación de Darcy-Weisbach. Y para el caso del caudal cuadruplicado, también se graficaron las presiones con la ecuación de Darcy-Weisbach. Eso permitió ilustrar el efecto hidráulico que causan los diseños con la ecuación de Hazen-Williams.

---

#### 4.1 RED SAN VICENTE

---

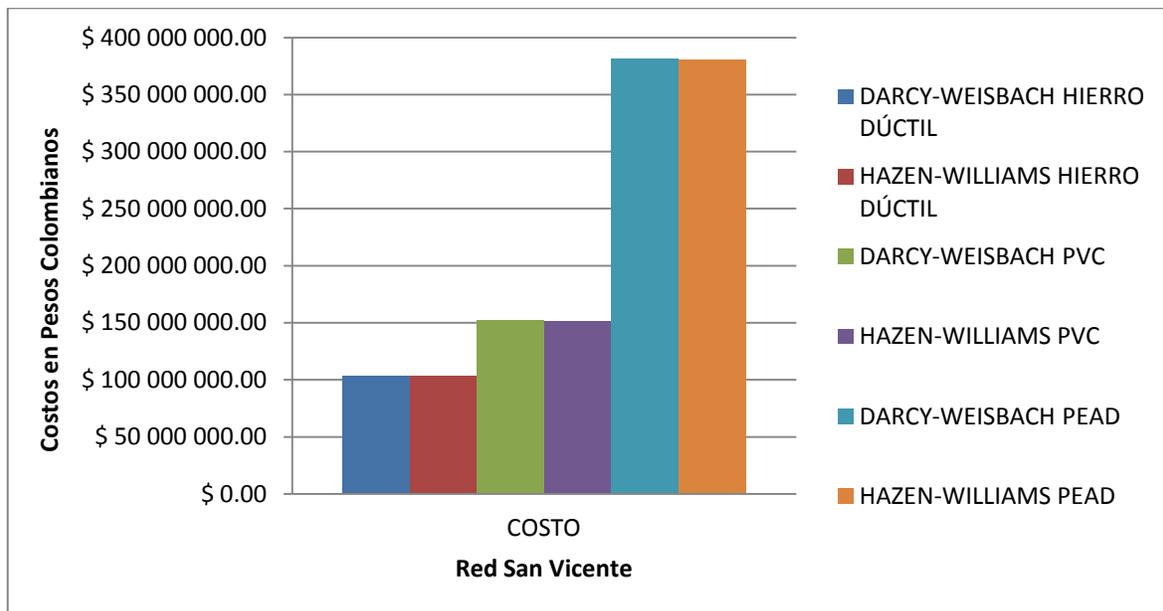
A continuación se mostraran los resultados de la Red San Vicente.

- Costos

RED SAN VICENTE CAUDALES NORMALES			
COSTOS \$	HIERRO DÚCTIL	PVC	PEAD
HAZEN-WILLIAMS	\$ 102 988 343.00	\$ 151 328 039.00	\$ 380 323 515.62
DARCY-WEISBACH	\$ 102 988 343.00	\$ 151 617 538.59	\$ 380 820 316.06
DIFERENCIA	\$ -	\$ (289 499.59)	\$ (496 800.44)

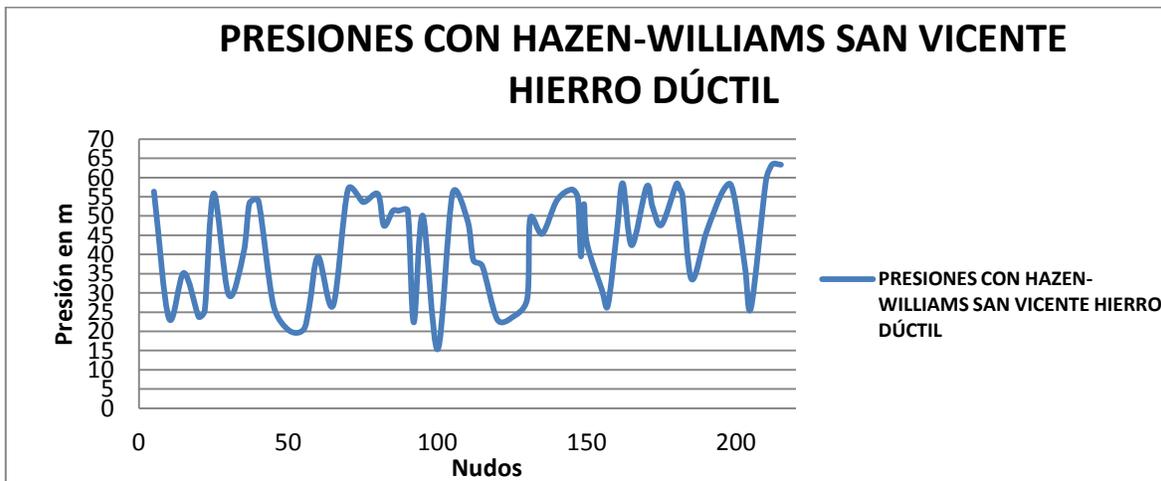
**TABLA 11. COSTOS DE LA RED SAN VICENTE CON CAUDALES NORMALES**

La tabla anterior se obtuvo después de diseñar la red con los diferentes materiales utilizando caudales normales y al aplicar la curva de costos correspondiente. Una vez se obtuvieron los costos, estos se graficaron para intentar evidenciar alguna diferencia entre los diseños con la ecuación empírica y la ecuación físicamente basada. Los resultados de caudales duplicados y cuadruplicados se encuentran en los anexos de este trabajo.



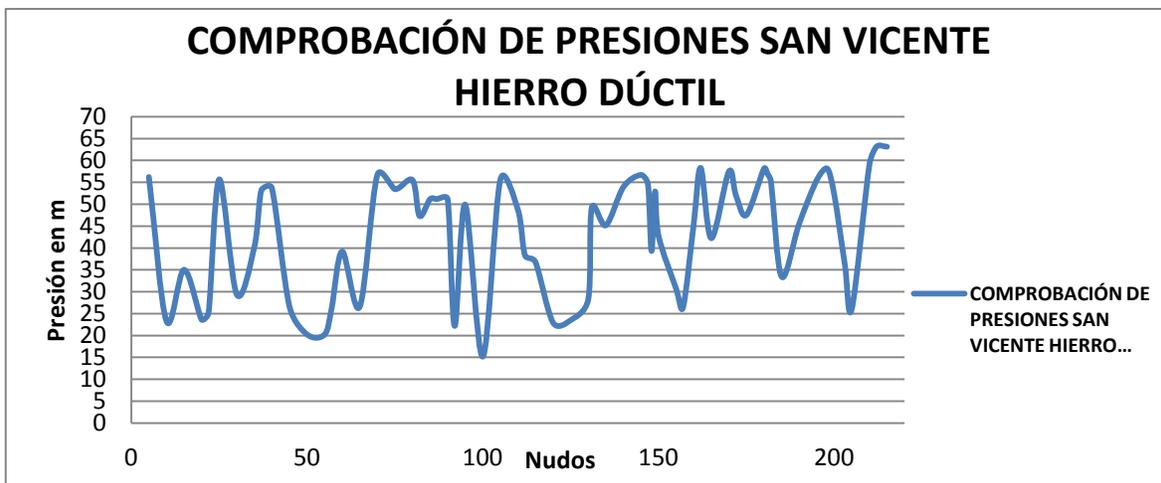
**ILUSTRACIÓN 30. GRÁFICA DE COSTOS RED SAN VICENTE CAUDALES NORMALES.**

- Resultados de presiones con Hierro Dúctil:



**ILUSTRACIÓN 31. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA HIERRO DÚCTIL.**

Estos fueron los resultados de diseñar la red utilizando la ecuación de Hazen-Williams con un coeficiente de 140 para hierro dúctil.



**ILUSTRACIÓN 32. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUES DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACION DE DARCY-WEISBACH PARA HIERRO DÚCTIL.**

Esta ilustración muestra las presiones después de correr la hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach del diseño realizado utilizando la ecuación de Hazen-Williams. La rugosidad absoluta que se trabajo es la que se mostro en metodología, es decir, una rugosidad absoluta de 0.25 mm.

- Resultados de presiones con PVC:

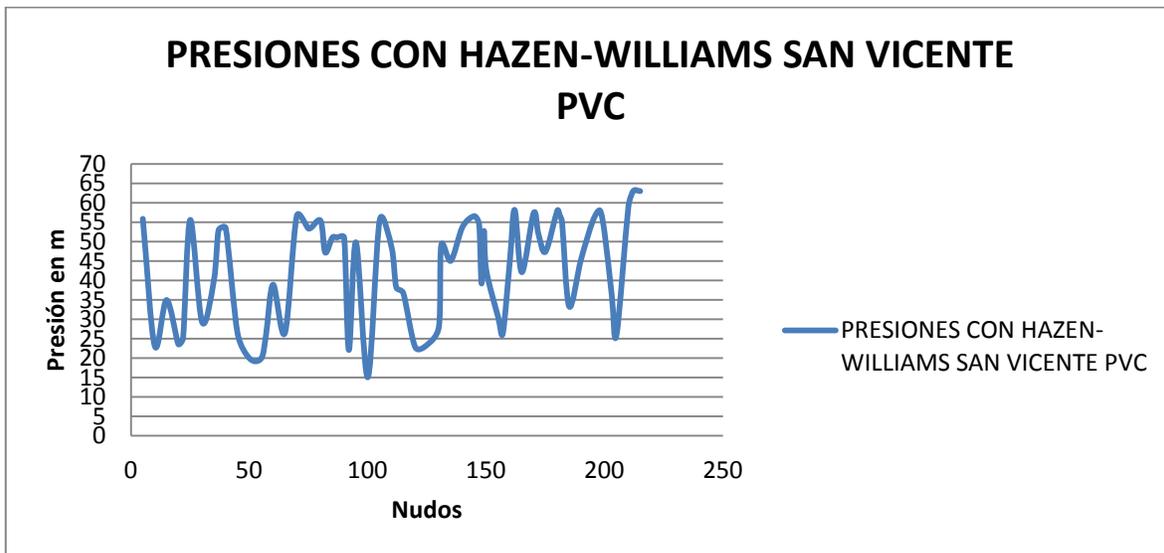


ILUSTRACIÓN 33. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA PVC.

El procedimiento es similar al realizado con el hierro dúctil, solo que en esta ocupación se utilizó un coeficiente de Hazen-Williams de 150.

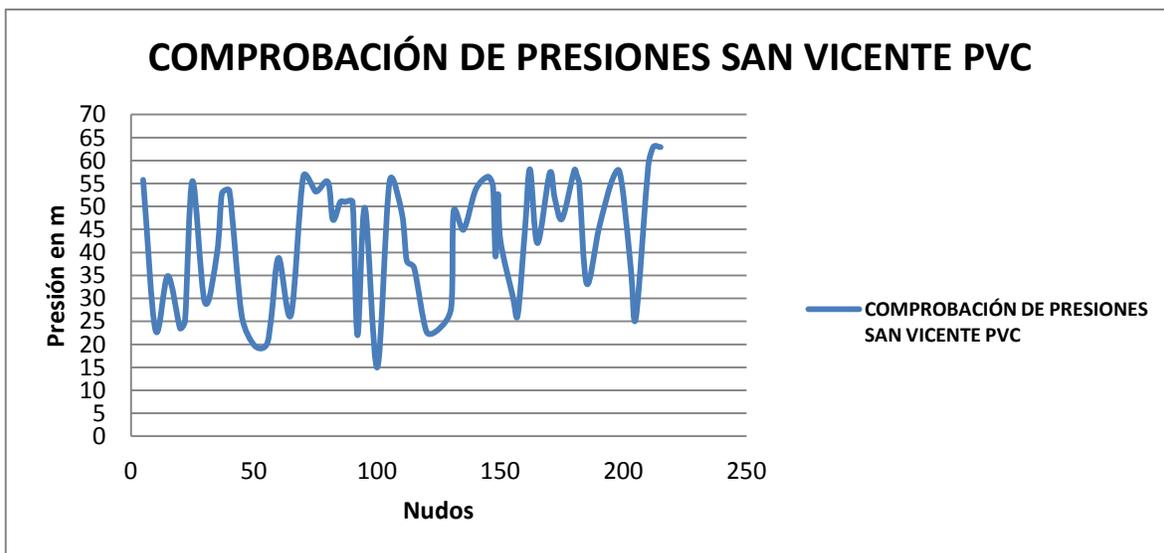


ILUSTRACIÓN 34. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PVC.

Al igual que en el hierro dúctil, también se corrió la hidráulica para comprobar las presiones reales de la red que fue diseñada con la ecuación de Hazen-Williams. La rugosidad absoluta trabajada fue de 0.0015 mm.

- Resultados de presiones PEAD:

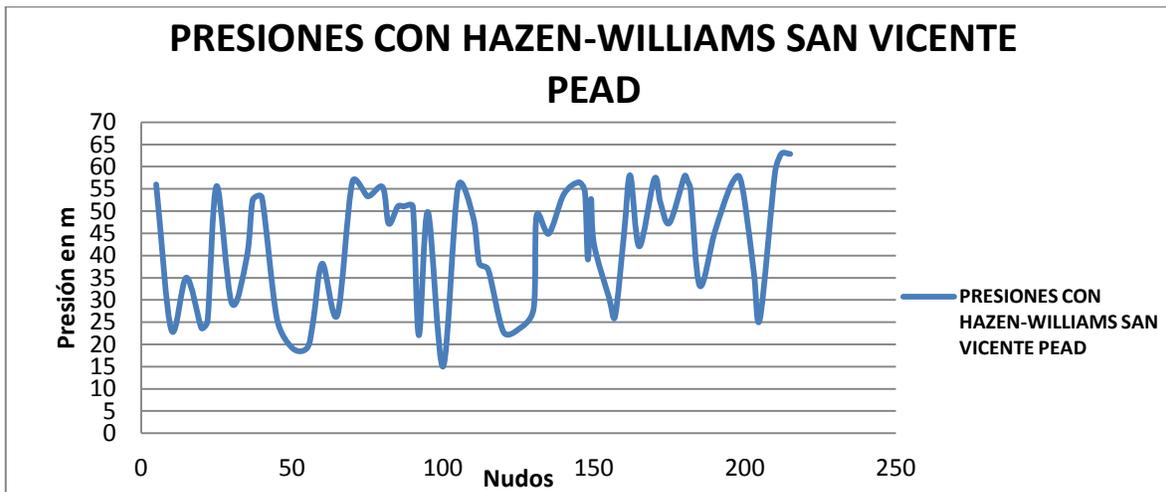


ILUSTRACIÓN 35. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA PEAD.

Al igual que en el caso del PVC esta red fue diseñada utilizando la ecuación de Hazen-Williams y un coeficiente de 150.

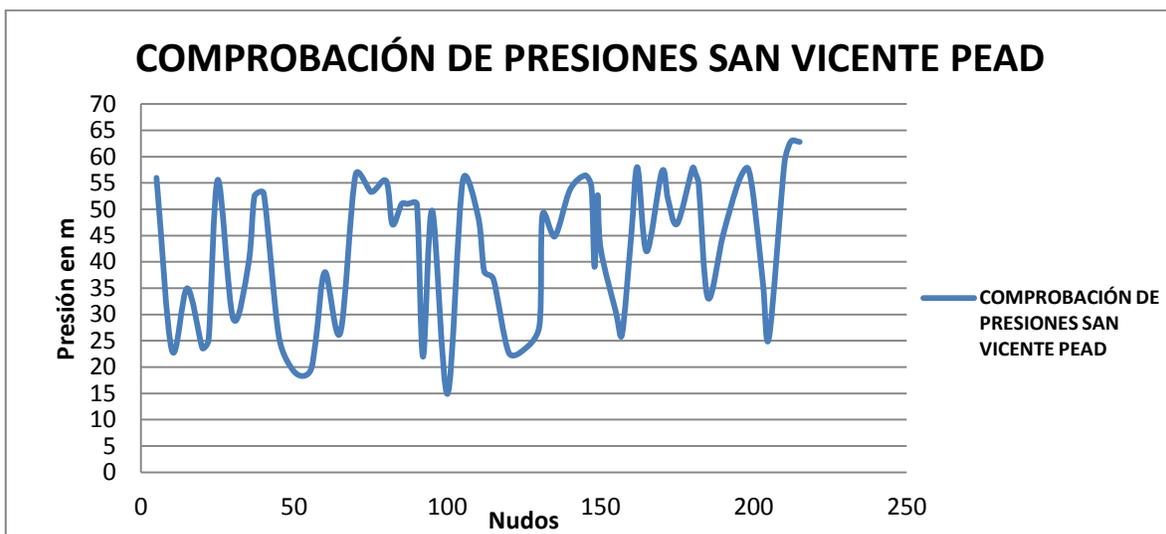


ILUSTRACIÓN 36. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PEAD.

Utilizando el mismo procedimiento de los materiales anteriores fue posible realizar esta grafica. Para este caso la rugosidad absoluta de la red fue de 0.007 mm como corresponde al PEAD.

## 4.2 RED BALERMA

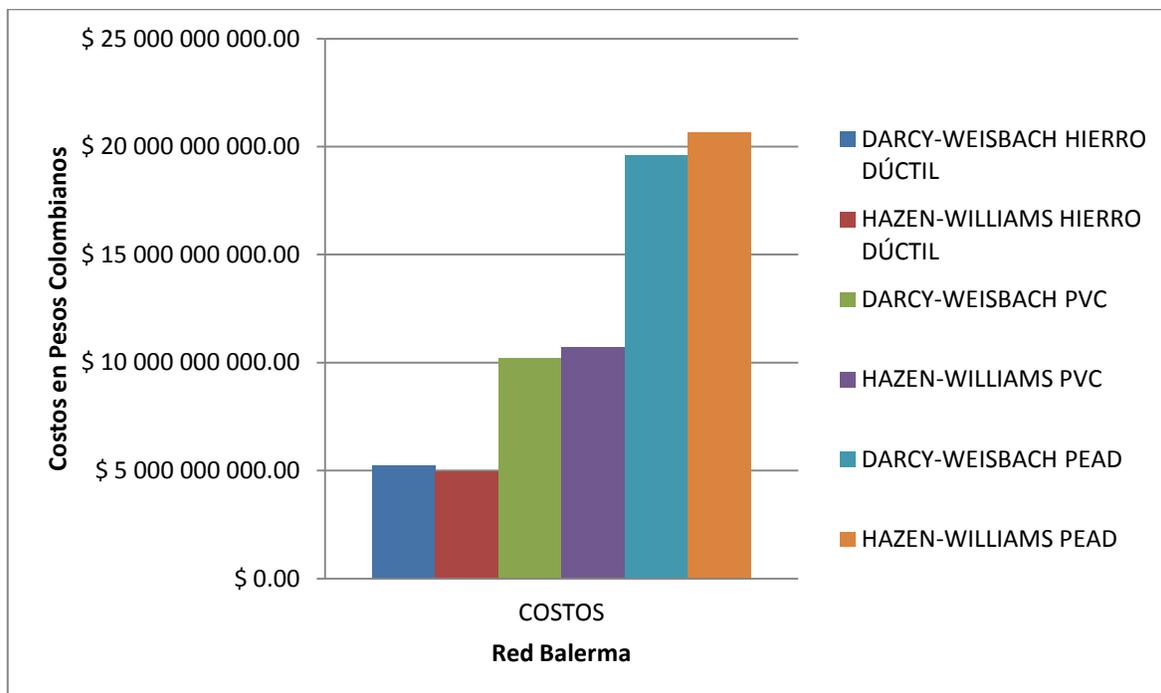
Los resultados de la Red Balerma:

Los procedimientos de esta red fueron exactamente iguales a los que se utilizaron durante la red San Vicente para todos los materiales. Los resultados para caudales duplicados y cuadruplicados se encuentran en los anexos de este trabajo.

- Costos,

COSTOS \$	RED BALERMA CAUDALES NORMALES		
	HIERRO DÚCTIL	PVC	PEAD
HAZEN-WILLIAMS	\$ 4 956 143 781.00	\$ 10 712 044 076.81	\$ 20 662 508 943.83
DARCY-WEISBACH	\$ 5 202 060 993.00	\$ 10 211 800 738.58	\$ 19 606 929 125.29
DIFERENCIA	\$ (245 917 212.00)	\$ 500 243 338.23	\$ 1 055 579 818.54

**TABLA 12. COSTOS DE LA RED BALERMA CON CAUDALES NORMALES.**



**ILUSTRACIÓN 37. GRÁFICA DE COSTOS RED BALERMA CON CAUDALES NORMALES.**

- Resultados de presiones con Hierro Dúctil

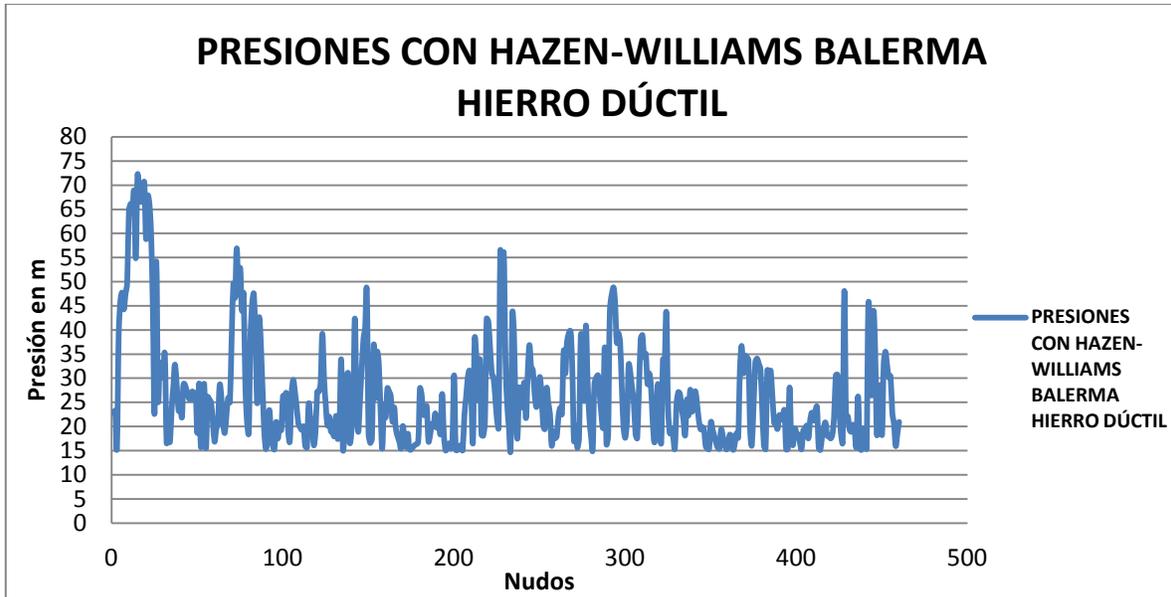


ILUSTRACIÓN 38. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA HIERRO DÚCTIL.

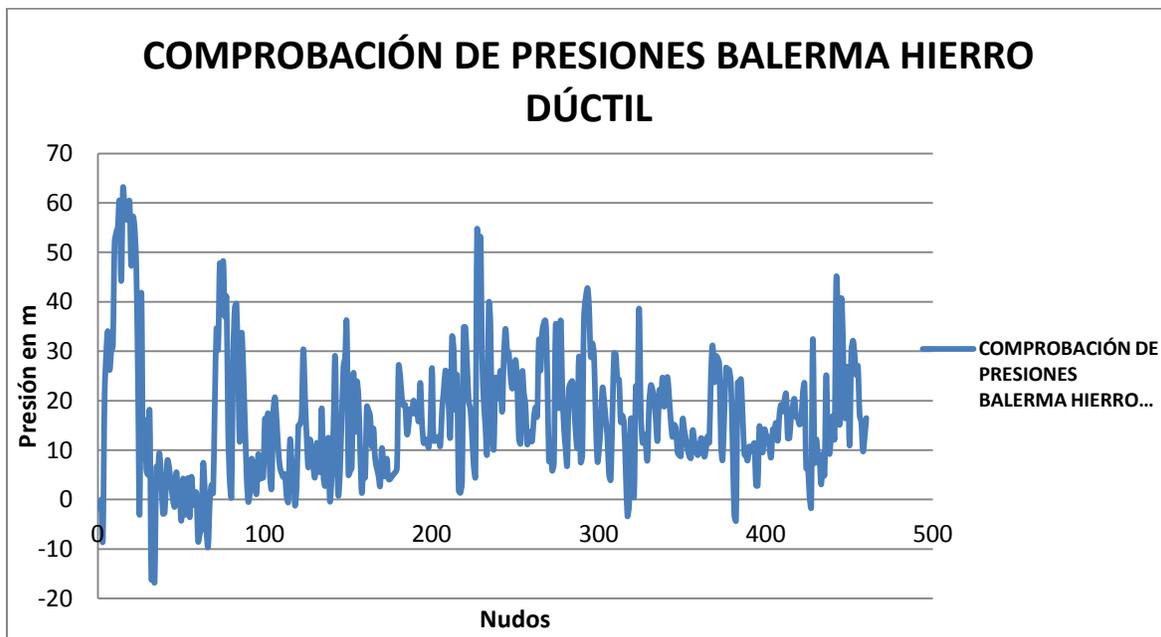


ILUSTRACIÓN 39. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA HIERRO DÚCTIL.

- Resultados de presiones con PVC.

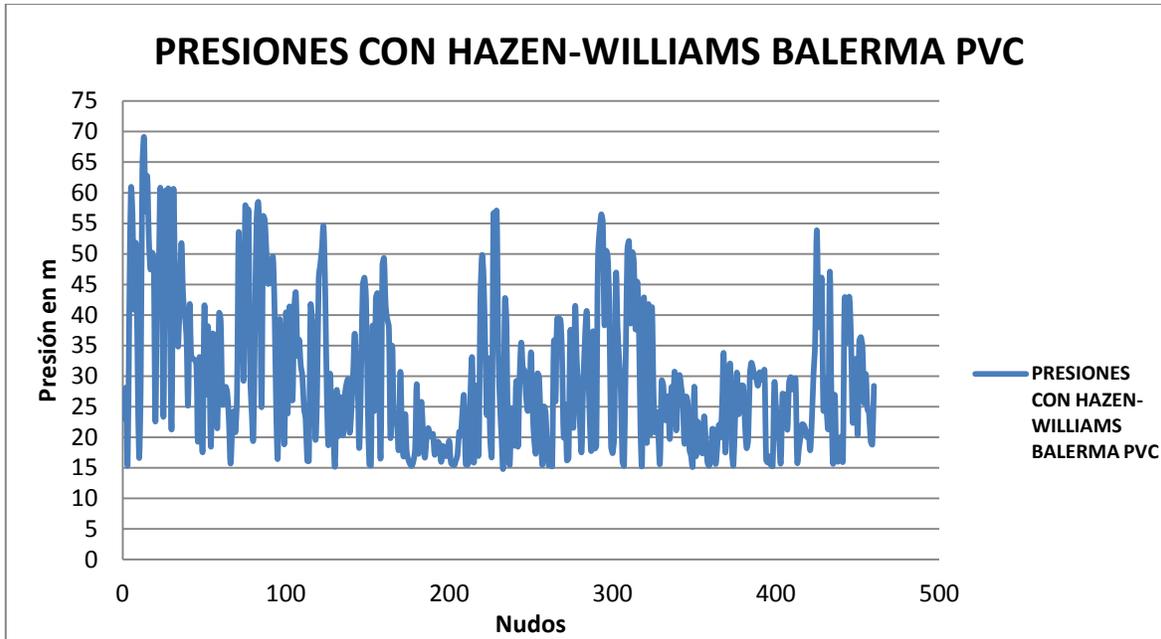


ILUSTRACIÓN 40. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA PVC.

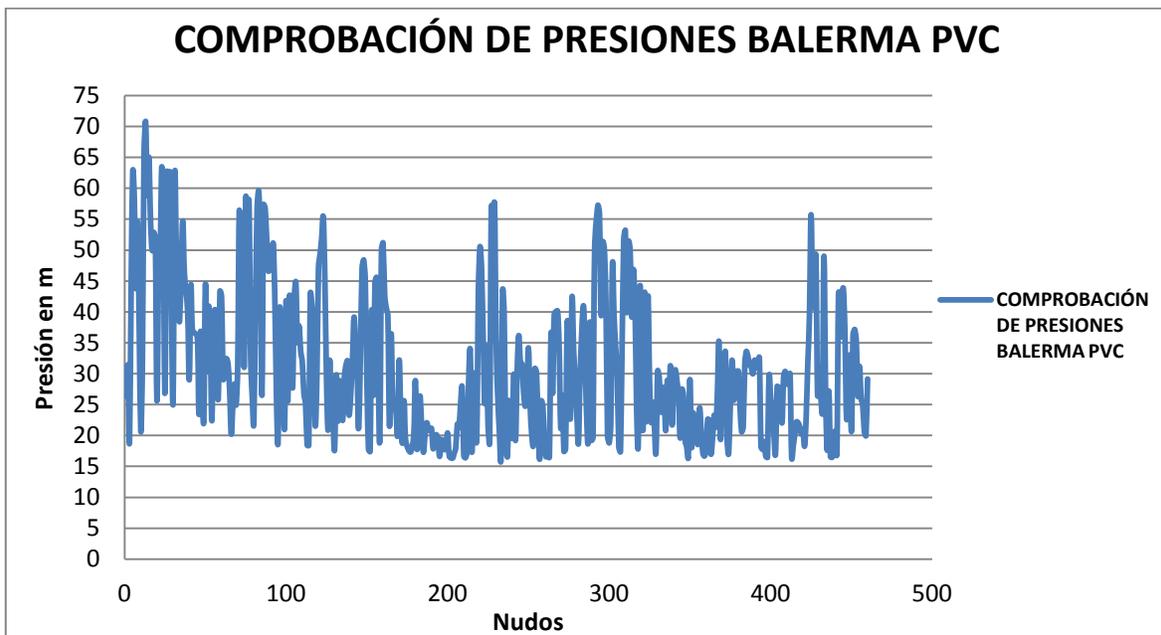


ILUSTRACIÓN 41. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PVC.

- Resultados de presiones con PEAD.

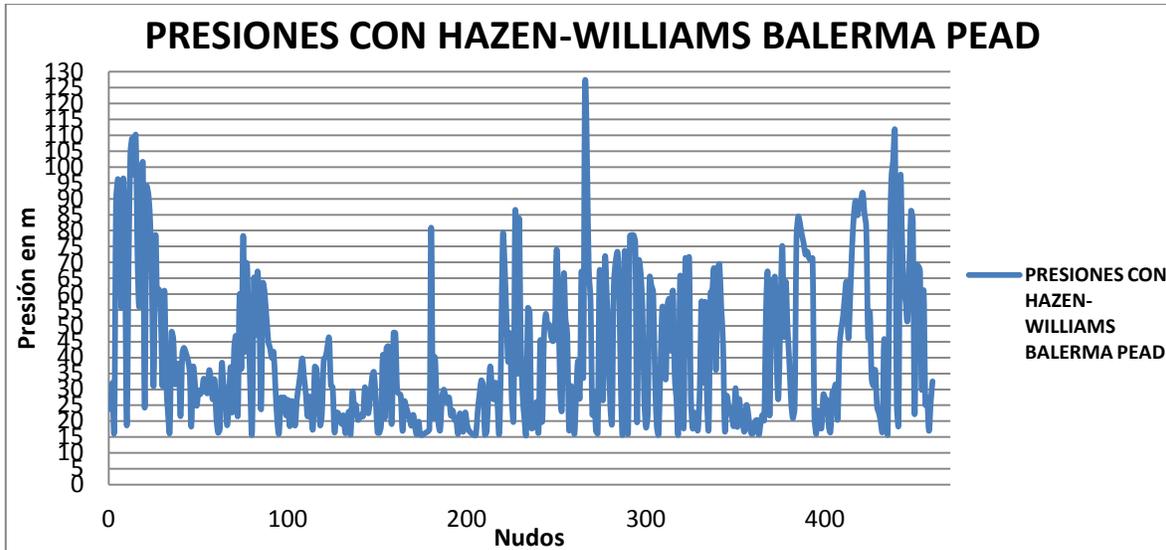


ILUSTRACIÓN 42. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA PEAD.

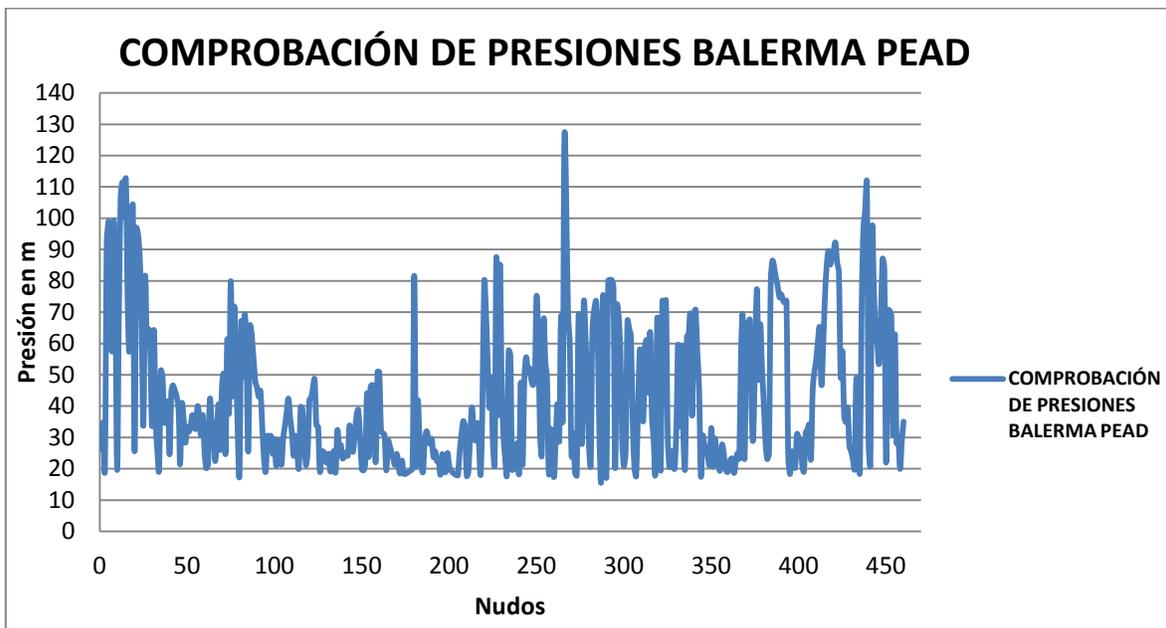


ILUSTRACIÓN 43. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PEAD.

### 4.3 RED BOGOTÁ-CAZUCÁ

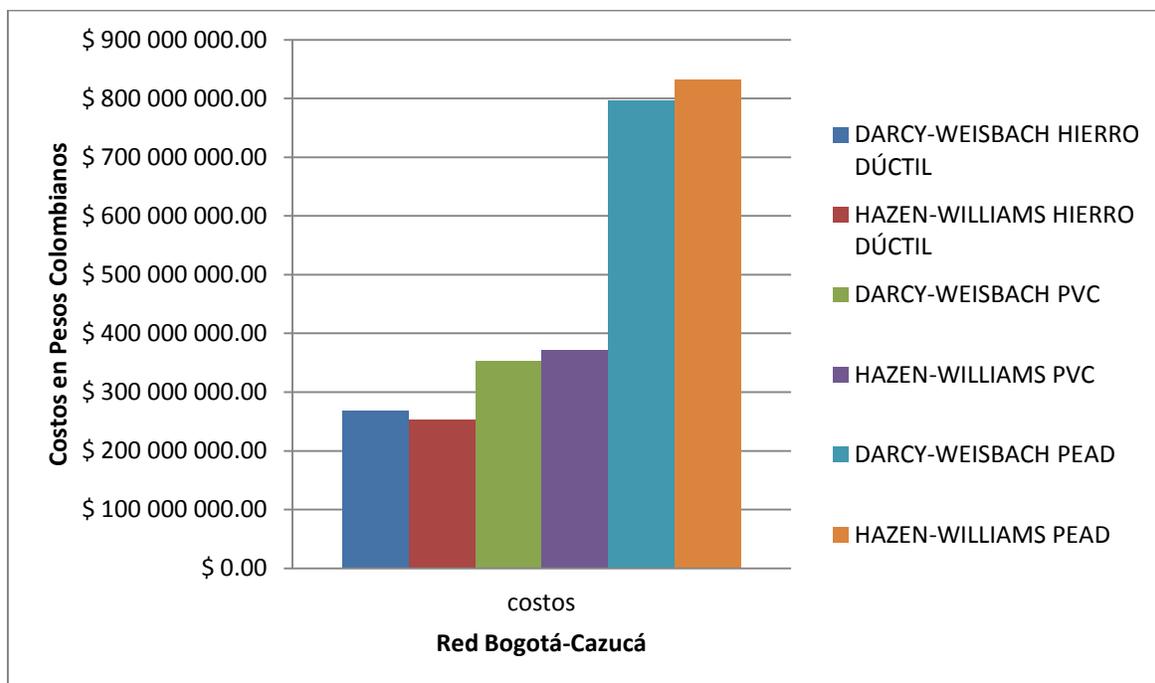
A continuación se mostraran los resultados obtenidos para los costos y para las presiones de esta red:

Los procedimientos de esta red fueron exactamente iguales a los que se utilizaron durante las redes anteriores para todos los materiales. Los resultados para caudales duplicados y cuadruplicados se encuentran en los anexos de este trabajo.

- Costos.

RED BOGOTÁ-CAZUCÁ CAUDALES NORMALES			
COSTOS \$	HIERRO DÚCTIL	PVC	PEAD
HAZEN-WILLIAMS	\$ 252 069 725.00	\$ 371 437 472.44	\$ 831 932 111.78
DARCY-WEISBACH	\$ 267 646 529.00	\$ 353 809 035.52	\$ 795 614 525.31
DIFERENCIA	\$ (15 576 804.00)	\$ 17 628 436.92	\$ 36 317 586.47

**TABLA 13. COSTOS DE LA RED BOGOTÁ-CAZUCÁ CON CAUDALES NORMALES.**



**ILUSTRACIÓN 44. GRÁFICA DE COSTOS DE LA RED BOGOTÁ-CAZUCÁ CON CAUDALES NORMALES.**

- Resultados de presiones con Hierro Dúctil.

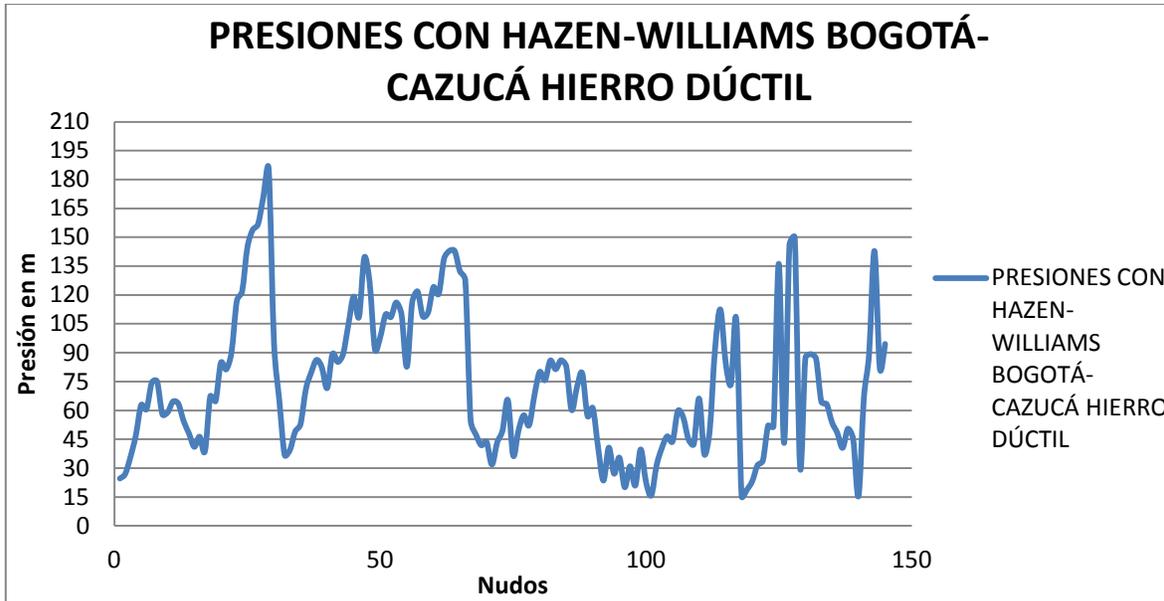


ILUSTRACIÓN 45. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA HIERRO DÚCTIL.

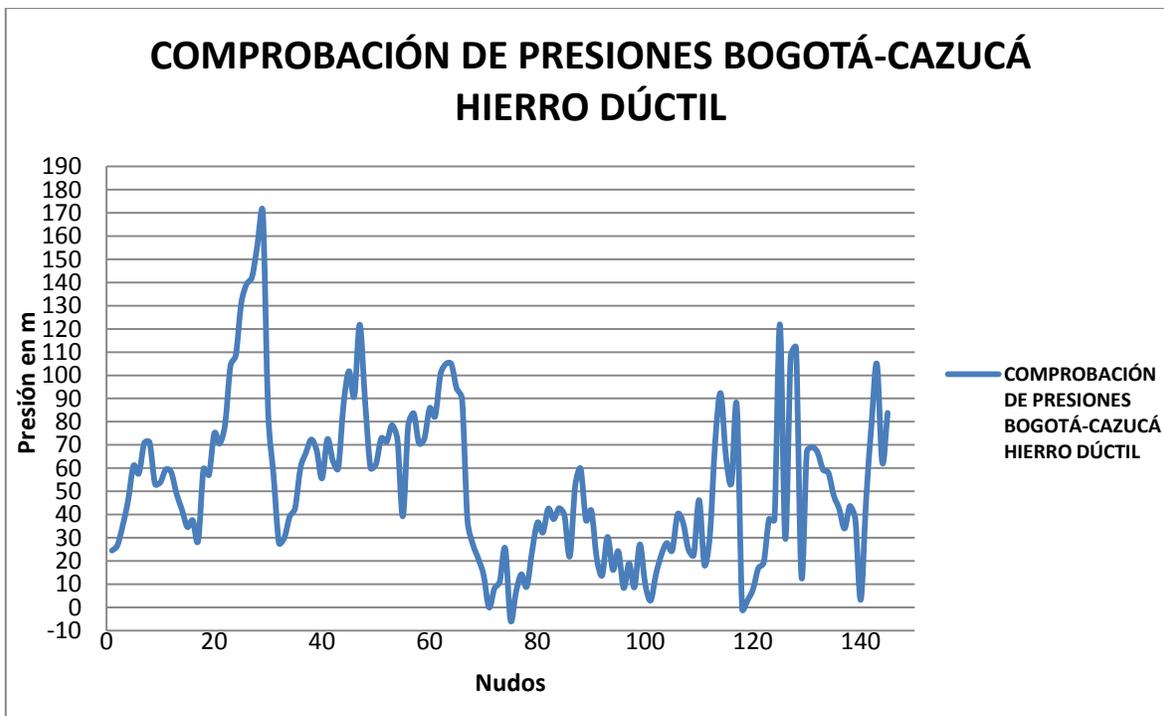


ILUSTRACIÓN 46. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA HIERRO DÚCTIL.

- Resultados de presiones con PVC.

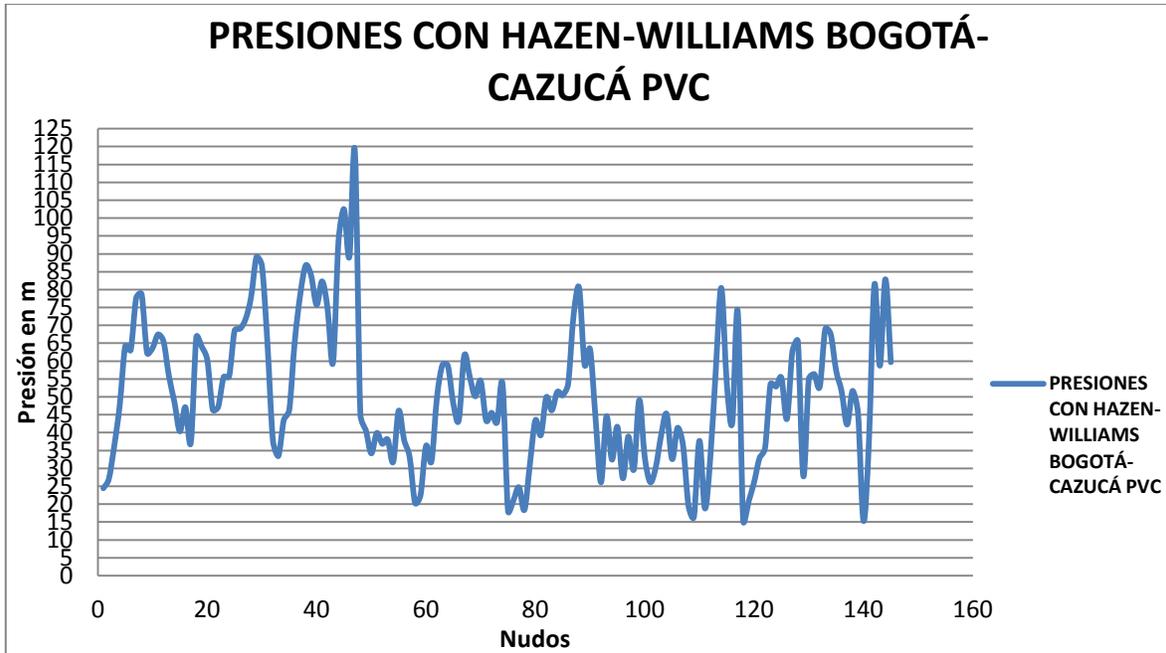


ILUSTRACIÓN 47. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA PVC.

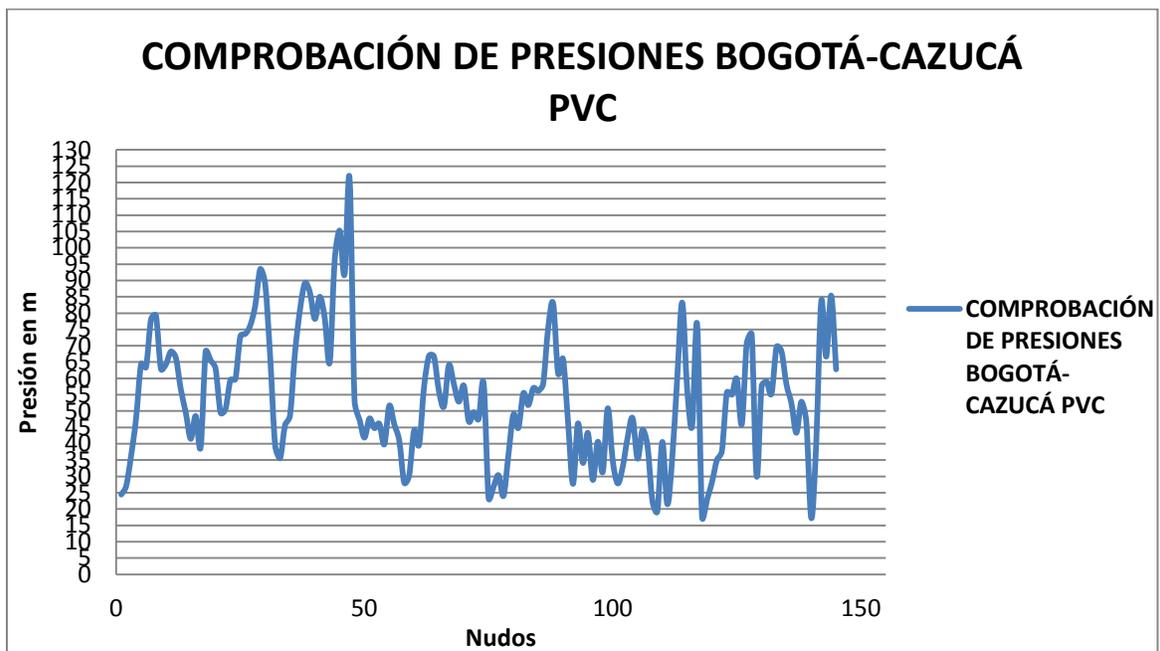


ILUSTRACIÓN 48. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PVC.

- Resultados para PEAD.

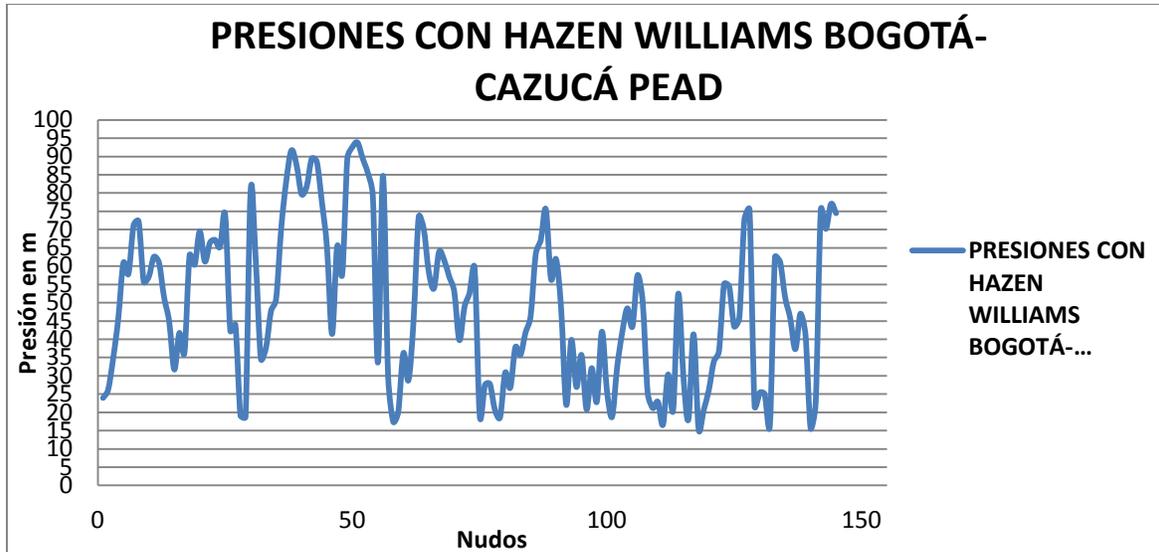


ILUSTRACIÓN 49. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA PEAD.

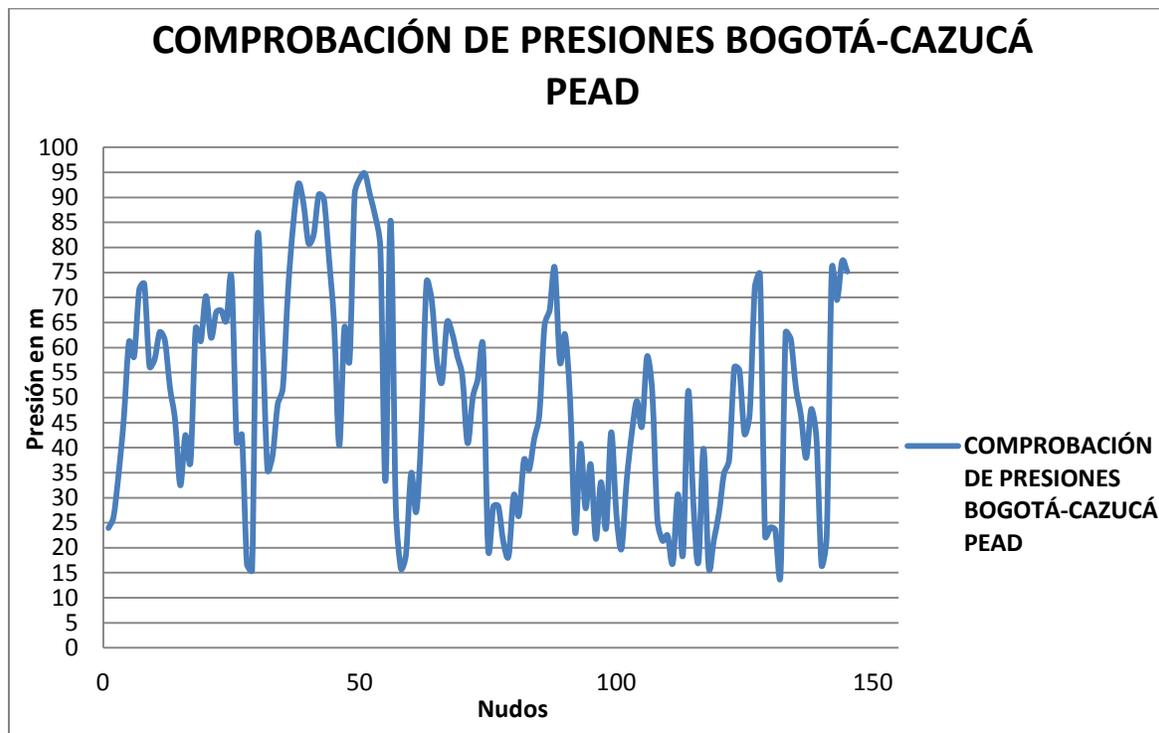


ILUSTRACIÓN 50. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PEAD.

#### 4.4 RED R28

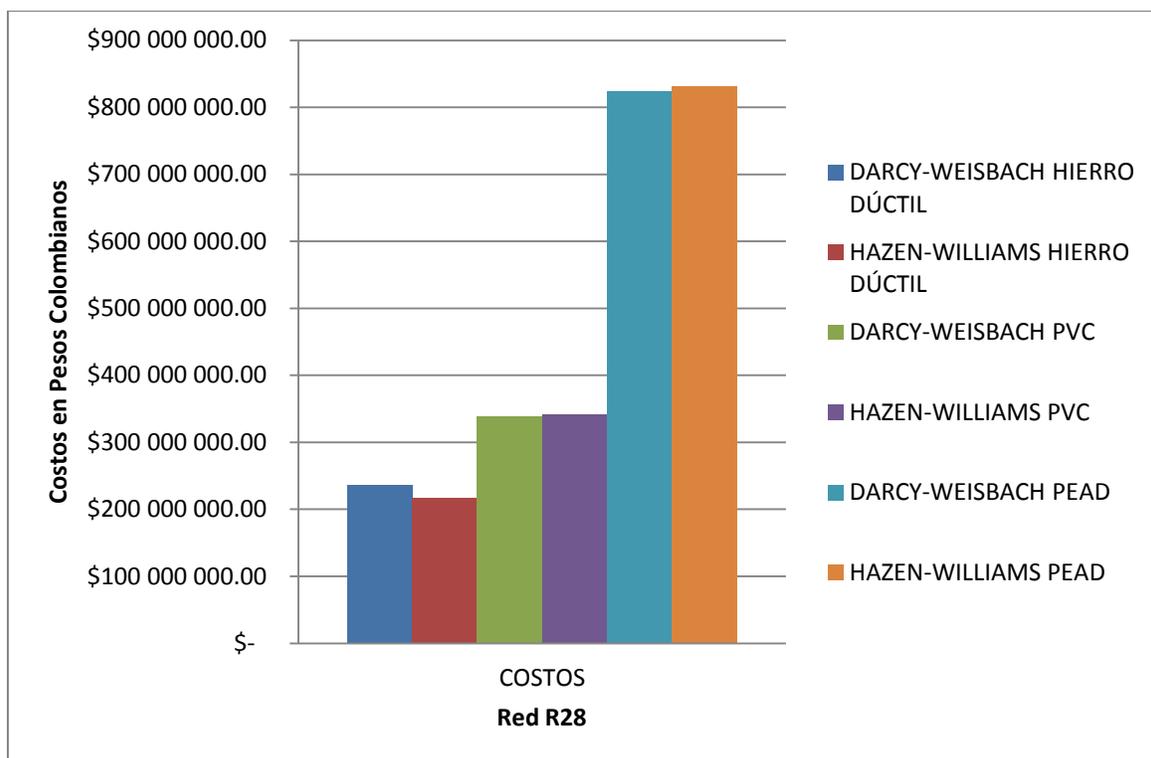
Los resultados de esta red se mostraran a continuación:

Los procedimientos de esta red fueron exactamente iguales a los que se utilizaron durante las redes anteriores para todos los materiales. Los resultados para caudales duplicados y cuadruplicados se encuentran en los anexos de este trabajo.

- Costos.

COSTOS \$	RED R28 CAUDALES NORMALES		
	HIERRO DÚCTIL	PVC	PEAD
HAZEN-WILLIAMS	\$ 216 741 724.00	\$ 341 717 974.00	\$ 831 216 362.00
DARCY-WEISBACH	\$ 236 109 239.00	\$ 339 167 117.00	\$ 824 017 103.00
DIFERENCIA	\$ (19 367 515.00)	\$ 2 550 857.00	\$ 7 199 259.00

**TABLA 14. COSTOS DE LA RED R28 CON CAUDALES NORMALES.**



**ILUSTRACIÓN 51. GRÁFICA DE COSTOS DE LA RED R28 CON CAUDALES NORMALES.**

- Resultados de presiones con Hierro Dúctil

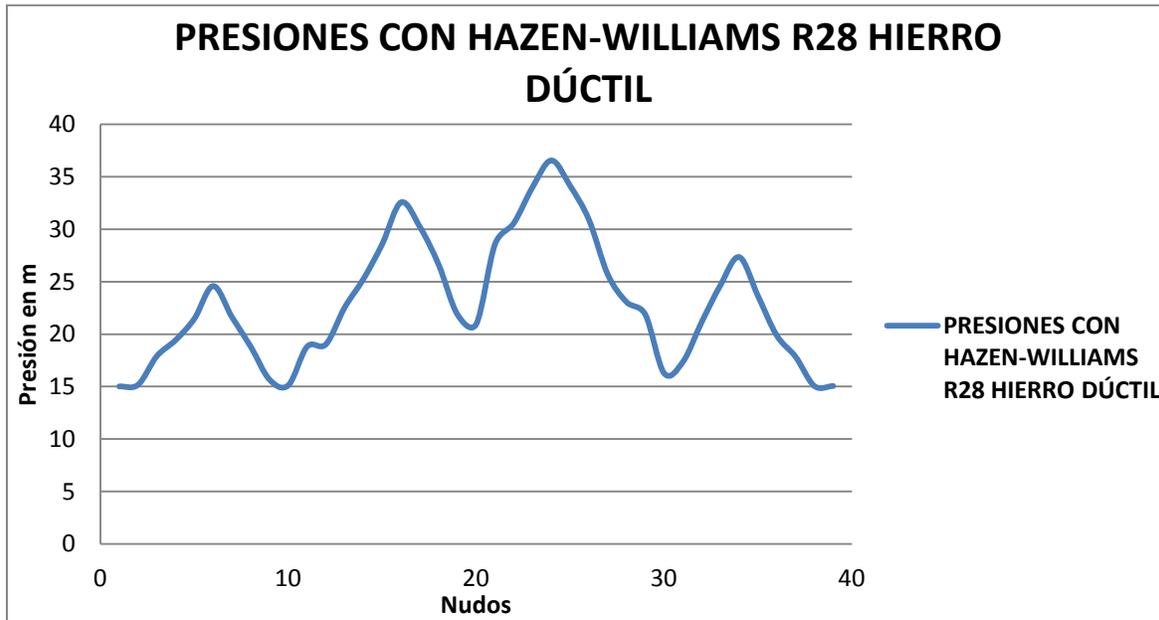


ILUSTRACIÓN 52. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA HIERRO DÚCTIL.

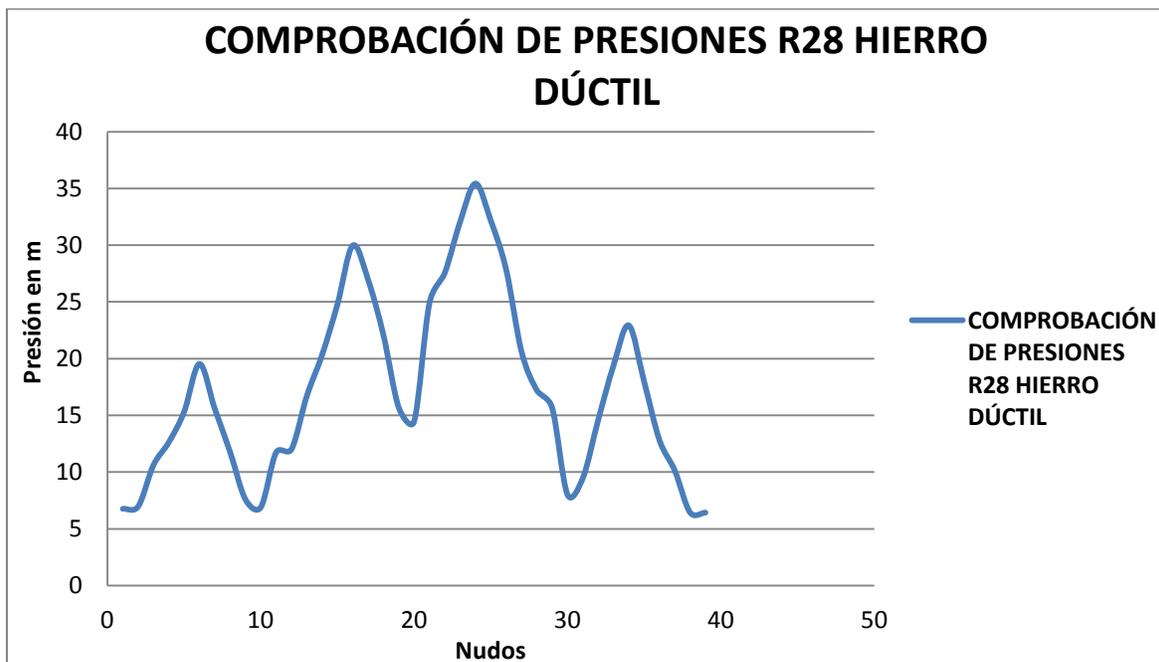


ILUSTRACIÓN 53. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA HIERRO DÚCTIL.

- Resultados de presiones para PVC.

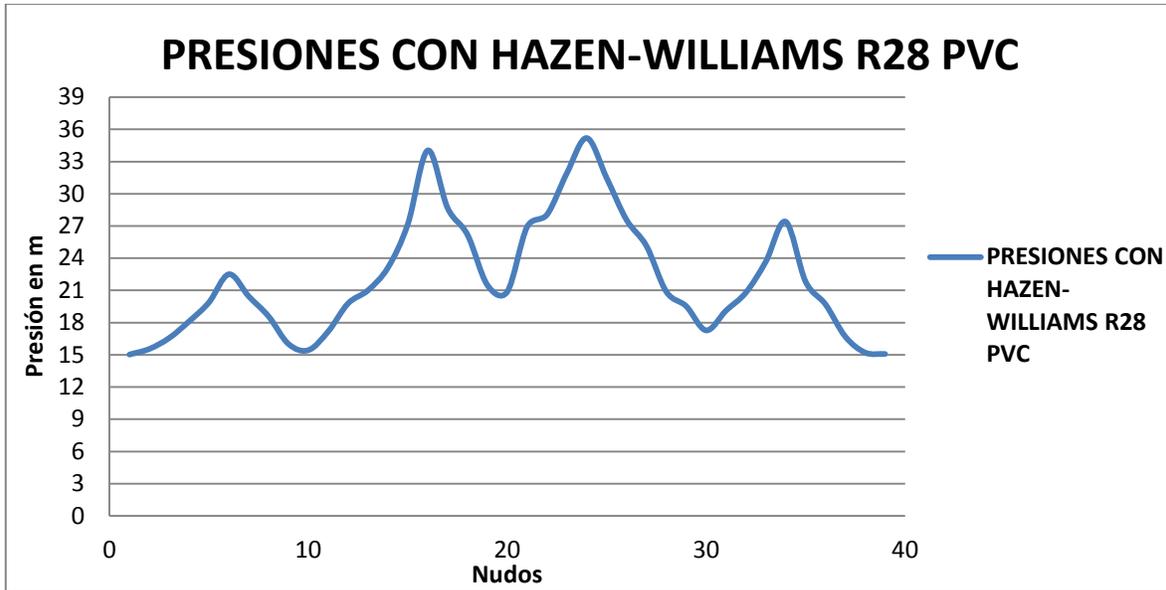


ILUSTRACIÓN 54. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA PVC.

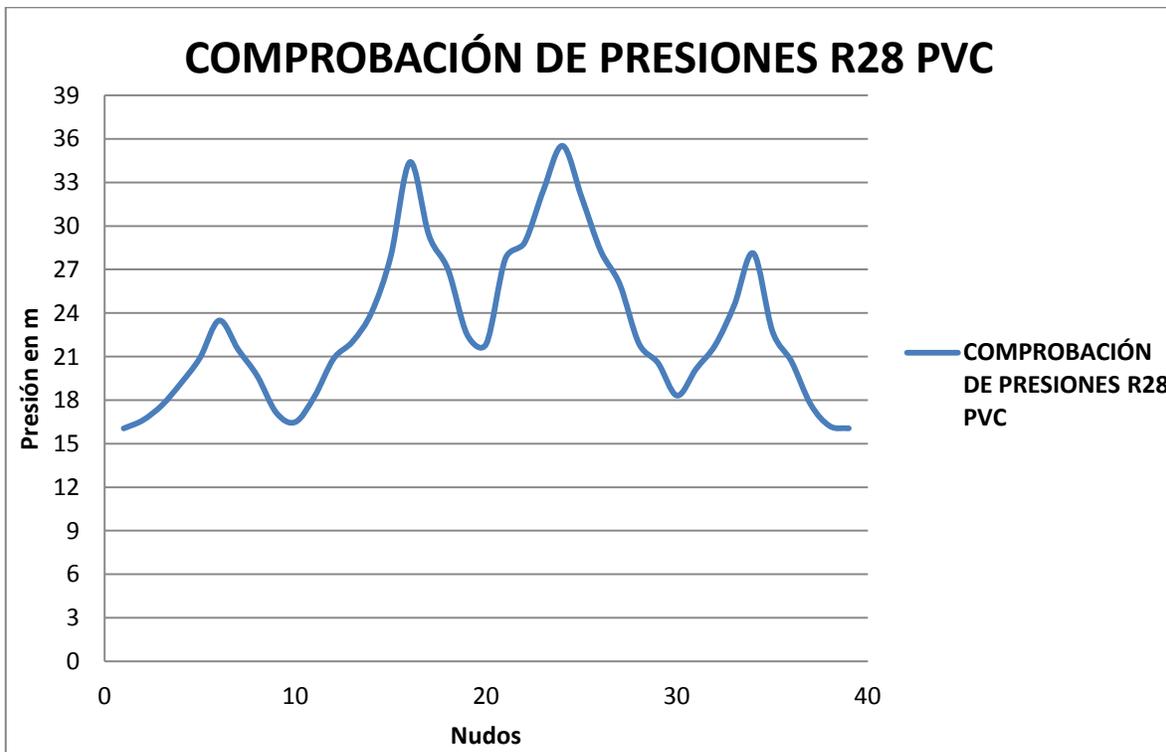


ILUSTRACIÓN 55. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PVC.

- Resultados de presiones para PEAD.

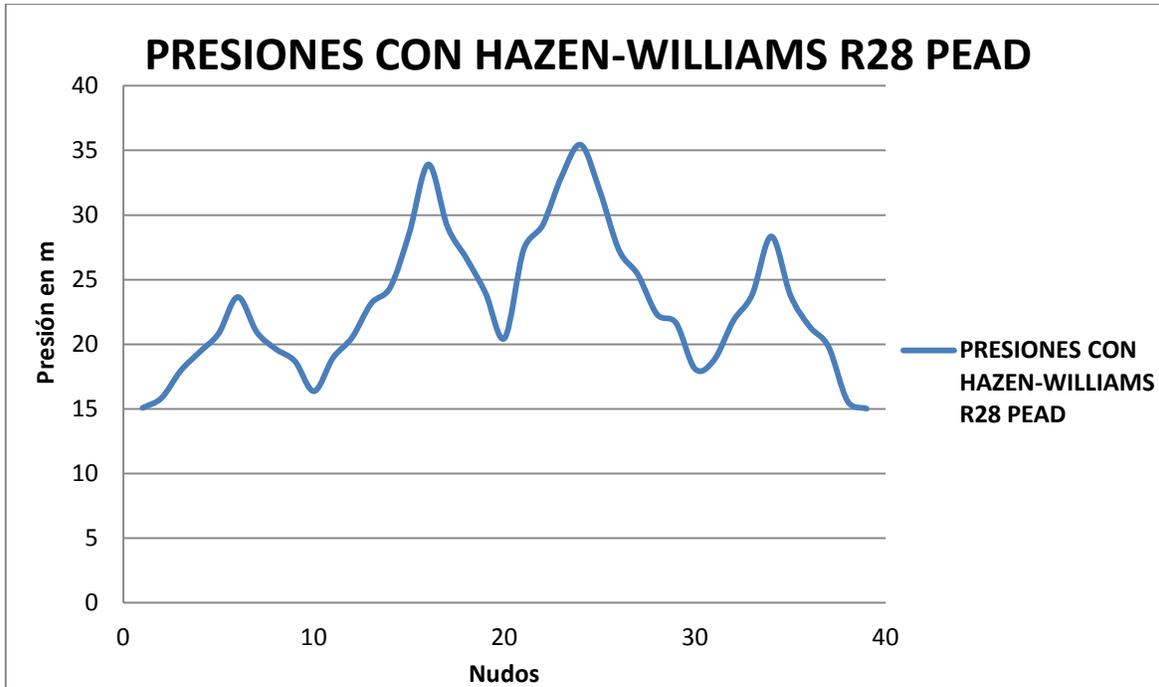


ILUSTRACIÓN 56. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA PEAD.

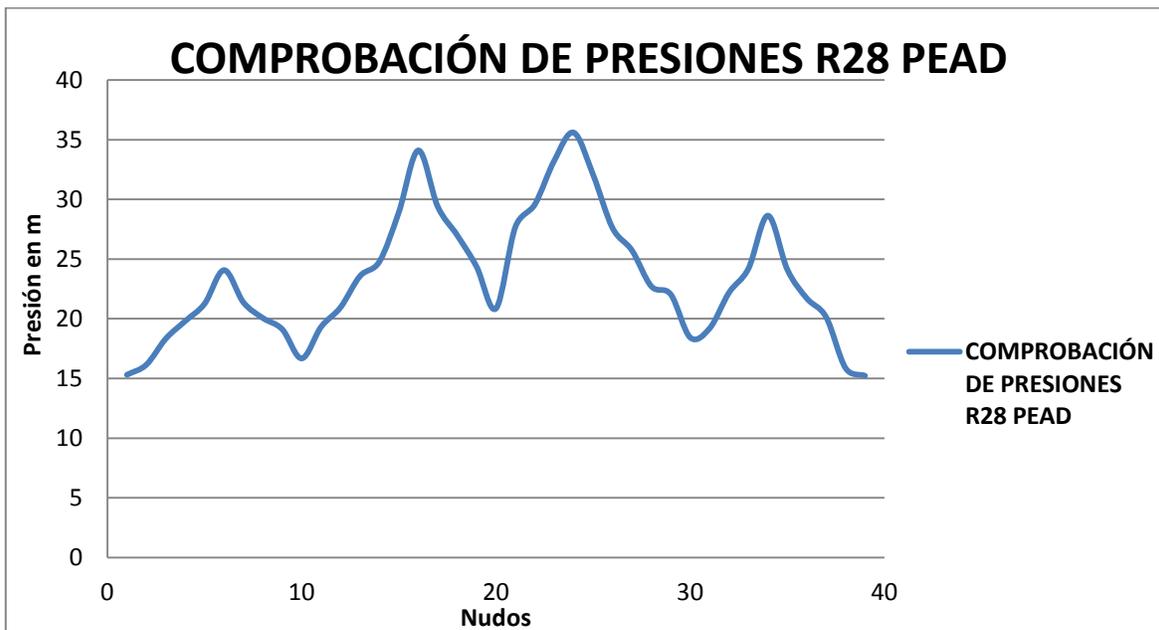


ILUSTRACIÓN 57. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PEAD.

### 4.5 RED TESIS 1

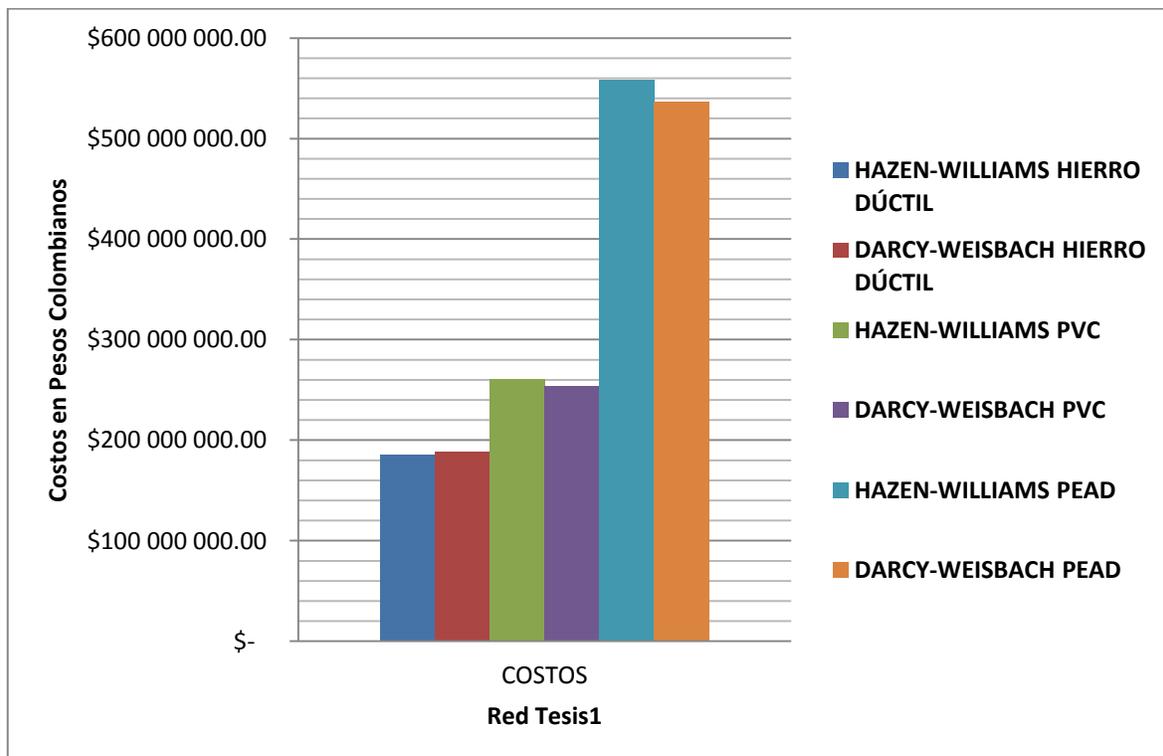
Los resultados de esta red se muestran a continuación:

Los procedimientos de esta red fueron exactamente iguales a los que se utilizaron durante las redes anteriores para todos los materiales. Los resultados para caudales duplicados y cuadruplicados se encuentran en los anexos de este trabajo.

- Costos.

	RED TESIS1 CAUDALES NORMALES		
COSTOS \$	HIERRO DÚCTIL	PVC	PEAD
HAZEN-WILLIAMS	\$ 185 978 041.00	\$ 260 763 825.00	\$ 558 250 289.00
DARCY-WEISBACH	\$ 188 756 051.00	\$ 253 774 465.00	\$ 536 720 184.00
DIFERENCIA	\$ (2 778 010.00)	\$ 6 989 360.00	\$ 21 530 105.00

**TABLA 15. COSTOS DE LA RED TESIS 1 CON CAUDALES NORMALES.**



**ILUSTRACIÓN 58. GRÁFICA DE COSTOS DE LA RED TESIS 1 CON CAUDALES NORMALES.**

-Resultados de presiones para Hierro Dúctil.

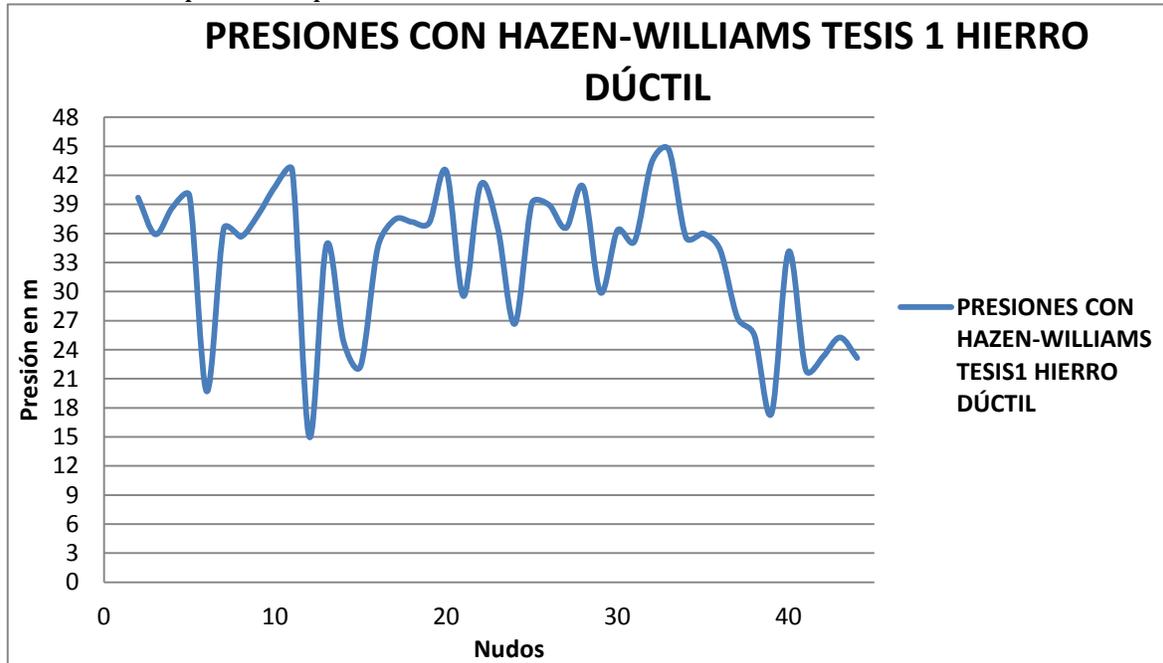


ILUSTRACIÓN 59. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA HIERRO DÚCTIL.

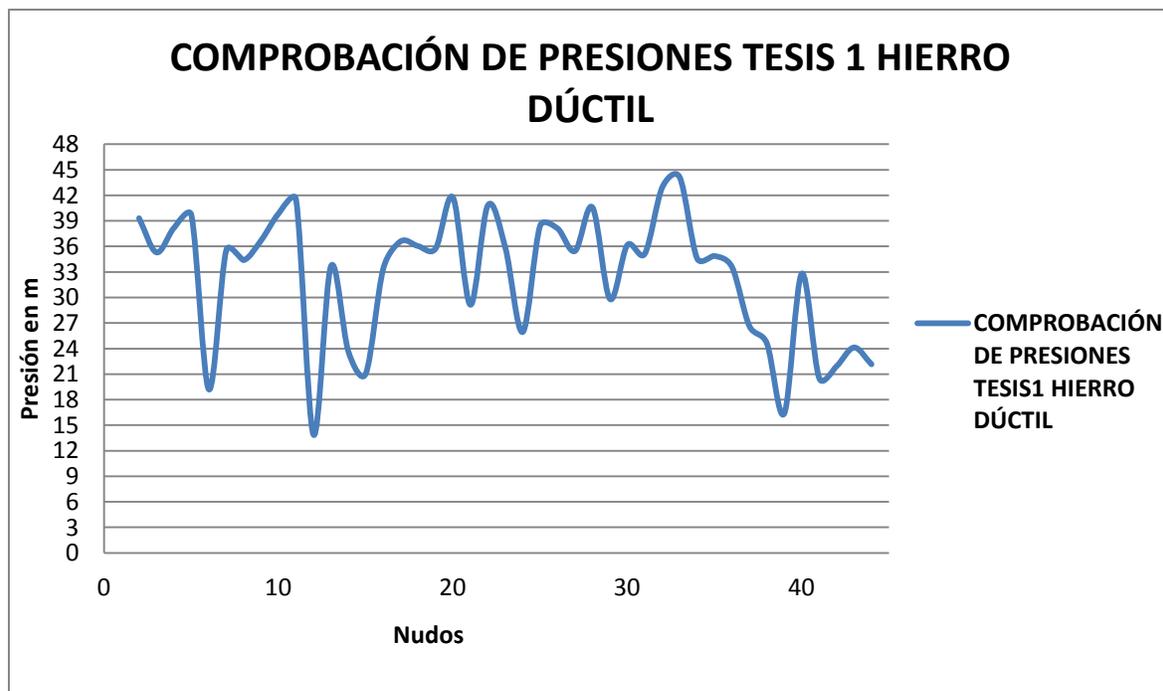


ILUSTRACIÓN 60. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA HIERRO DÚCTIL.

- Resultados de presiones para PVC.

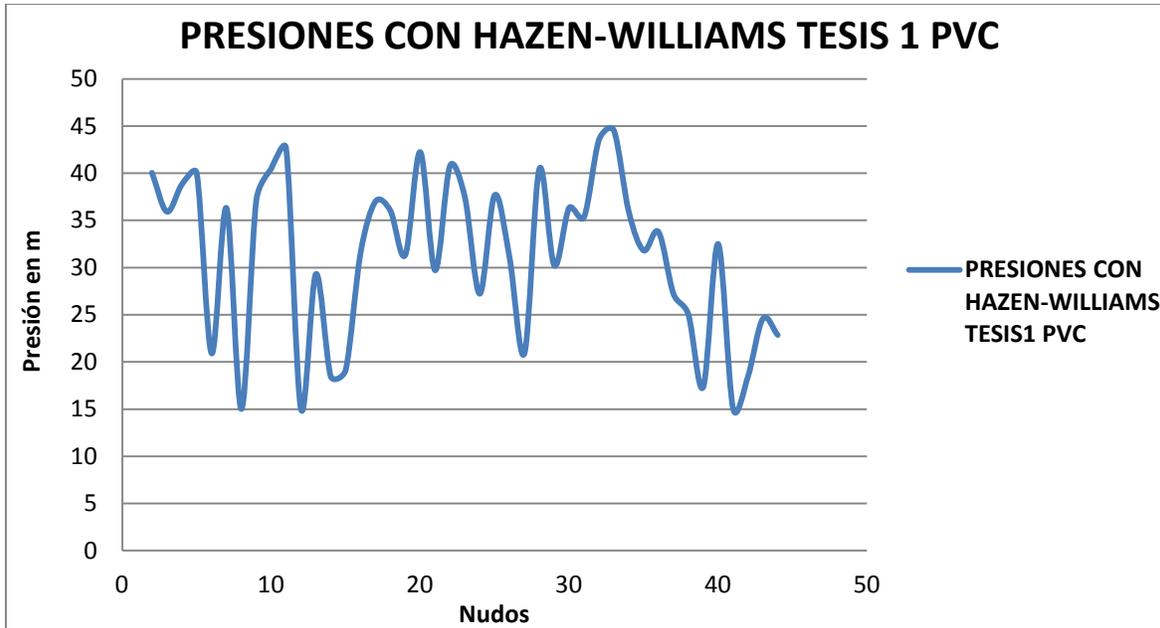


ILUSTRACIÓN 61. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA PVC.

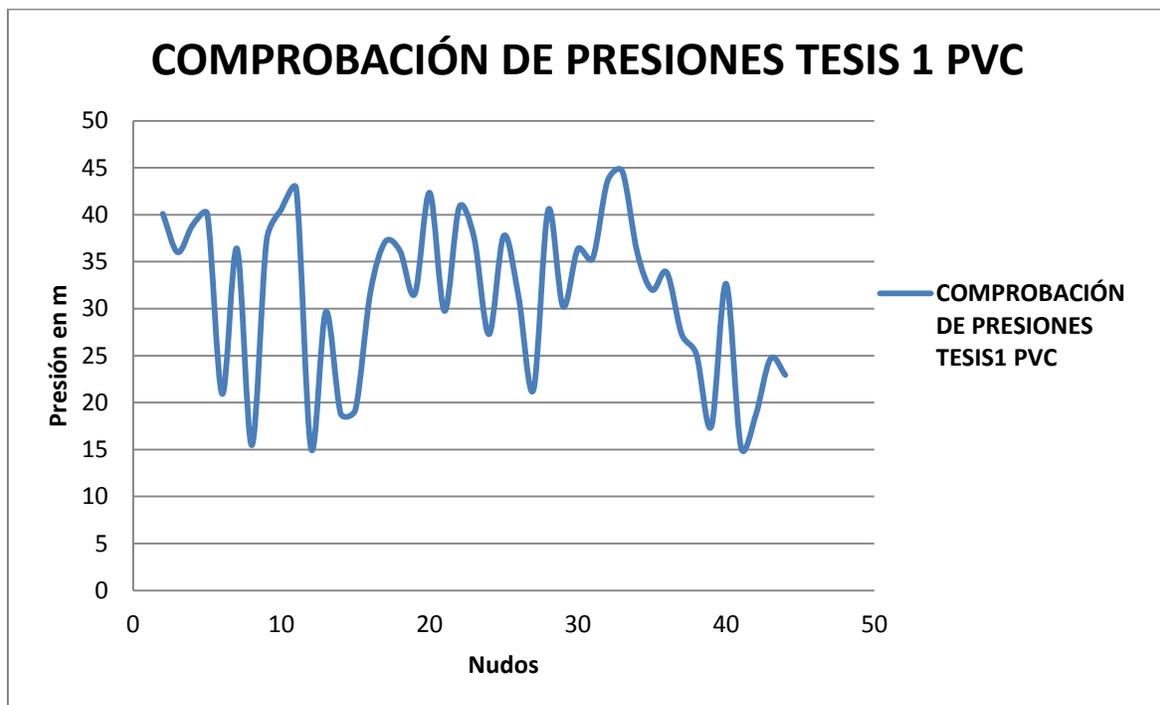


ILUSTRACIÓN 62. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PVC.

- Resultados de presiones para PEAD

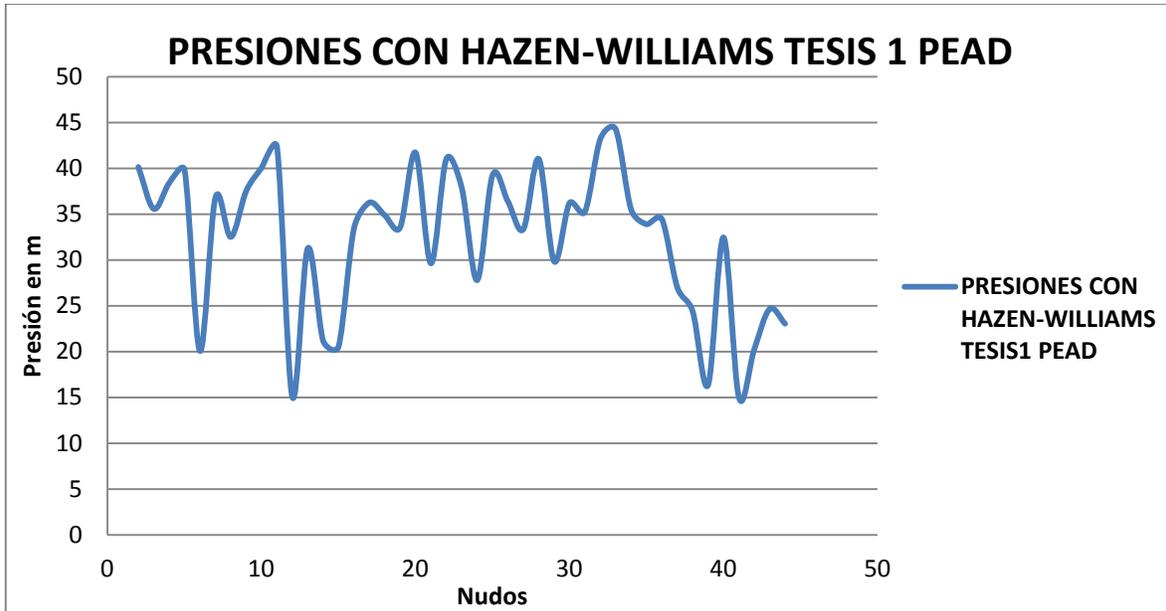


ILUSTRACIÓN 63. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA PEAD.

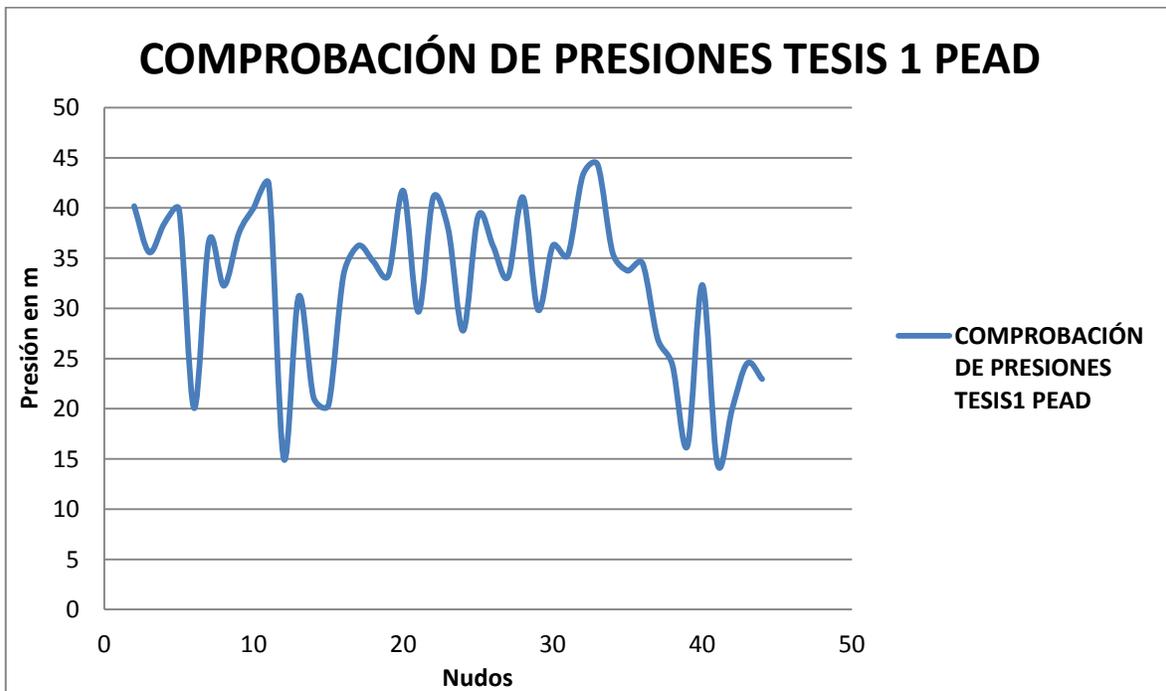


ILUSTRACIÓN 64. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PEAD.

## 4.6 RED TESIS 2

Los resultados de esta red se muestran a continuación:

Los procedimientos de esta red fueron exactamente iguales a los que se utilizaron durante las redes anteriores para todos los materiales. Los resultados para caudales duplicados y cuadruplicados se encuentran en los anexos de este trabajo.

- Costos.

	RED TESIS2 CAUDALES NORMALES		
COSTOS \$	HIERRO DÚCTIL	PVC	PEAD
HAZEN-WILLIAMS	\$ 296 340 611.00	\$ 418 048 066.34	\$ 1 006 033 833.00
DARCY-WEISBACH	\$ 320 355 041.00	\$ 424 988 082.54	\$ 978 951 895.00
DIFERENCIA	\$ (24 014 430.00)	\$ (6 940 016.20)	\$ 27 081 938.00

TABLA 16. COSTOS DE LA RED TESIS 2 CON CAUDALES NORMALES.

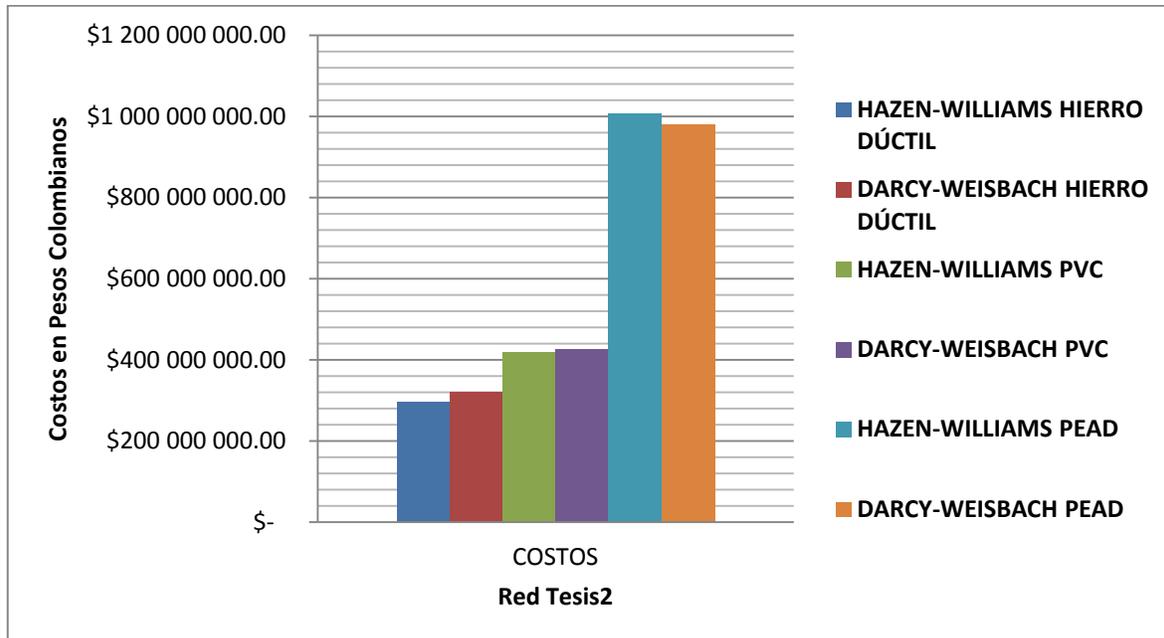


ILUSTRACIÓN 65. GRÁFICA DE COSTOS PARA LA RED TESIS 2 CON CAUDALES NORMALES.

- Resultados de presiones para Hierro Dúctil.

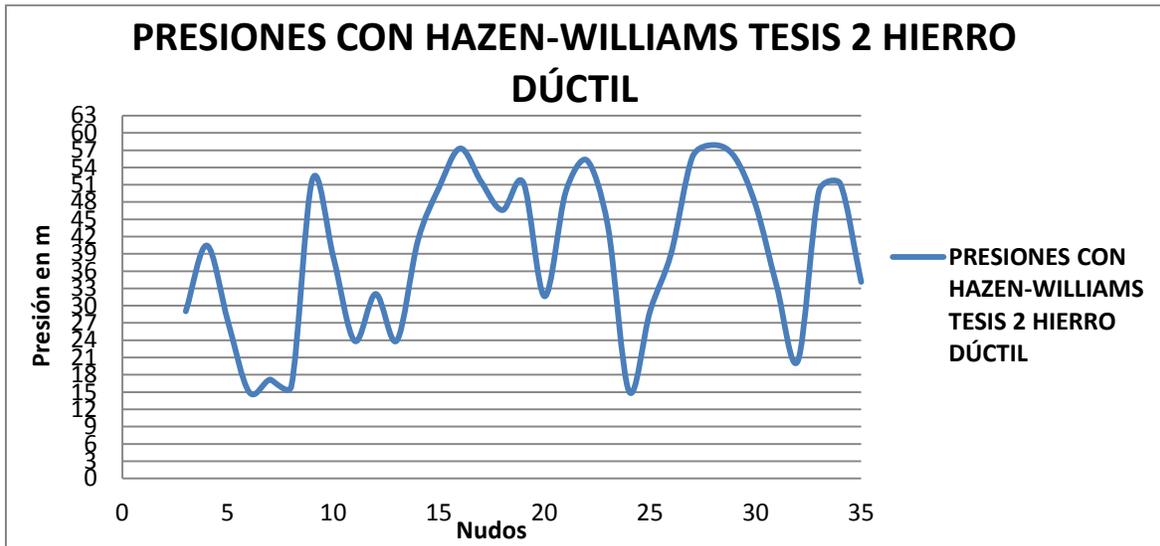


ILUSTRACIÓN 66. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA HIERRO DÚCTIL.

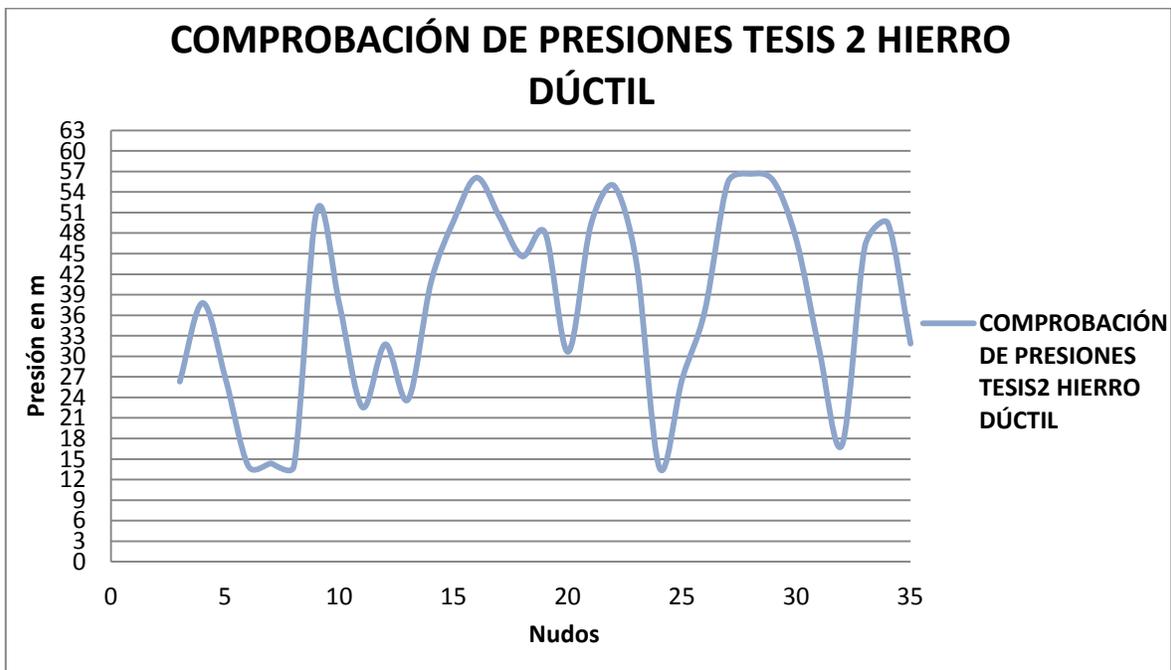


ILUSTRACIÓN 67. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA HIERRO DÚCTIL.

- Resultados de presiones para PVC.

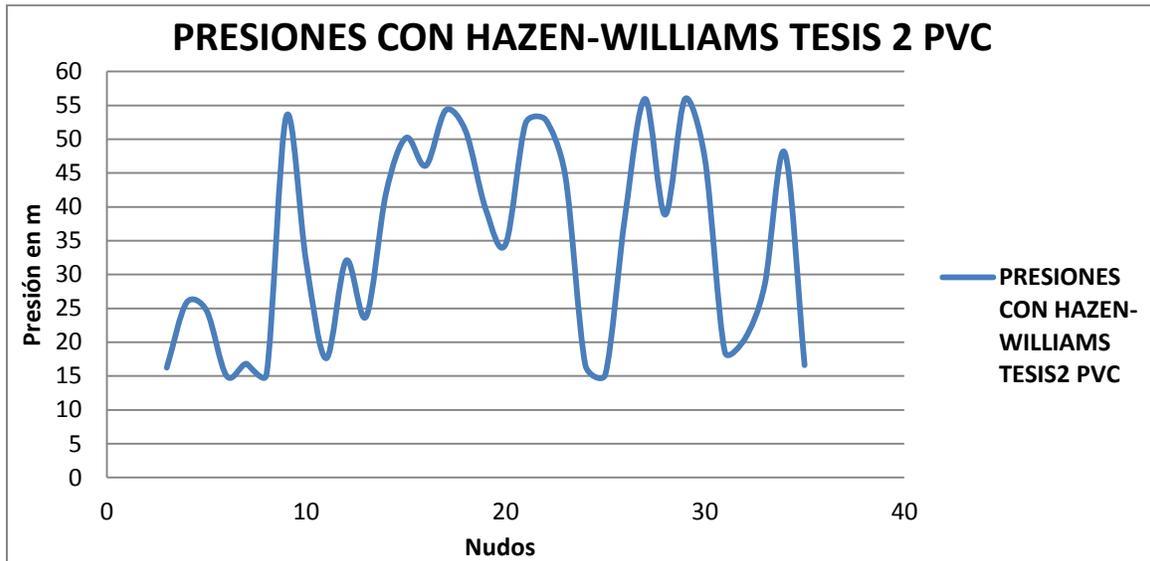


ILUSTRACIÓN 68. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA PVC.

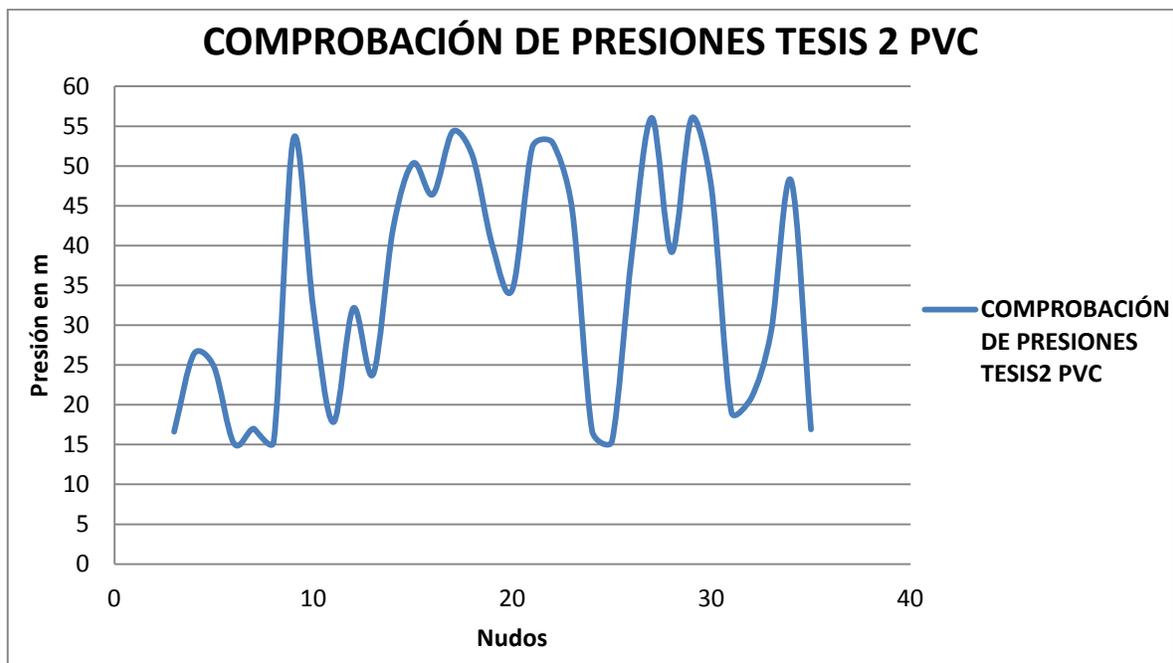


ILUSTRACIÓN 69. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PVC.

- Resultados de presiones para PEAD

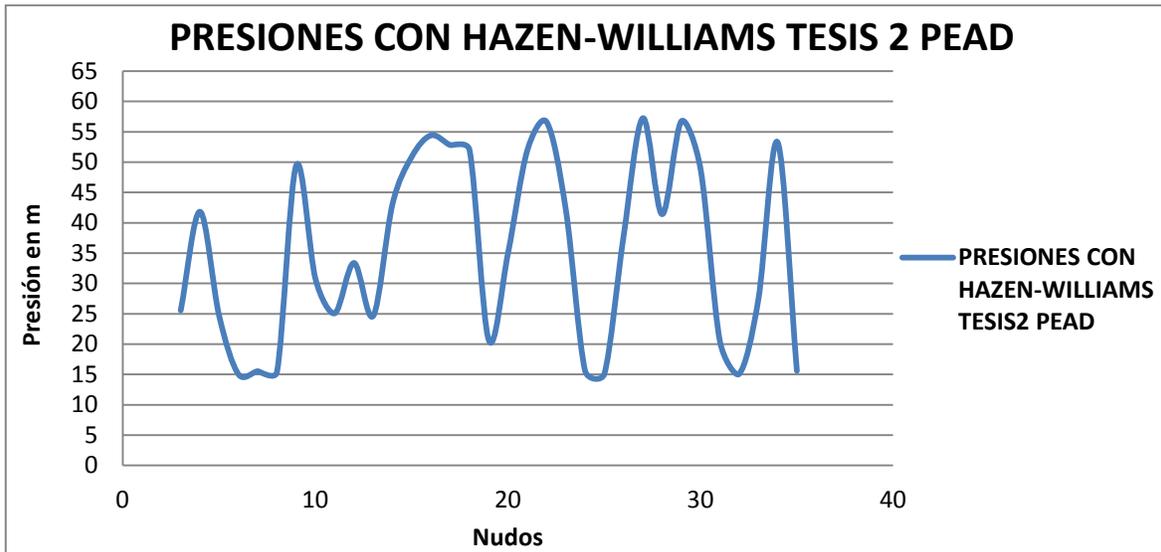


ILUSTRACIÓN 70. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA PEAD.

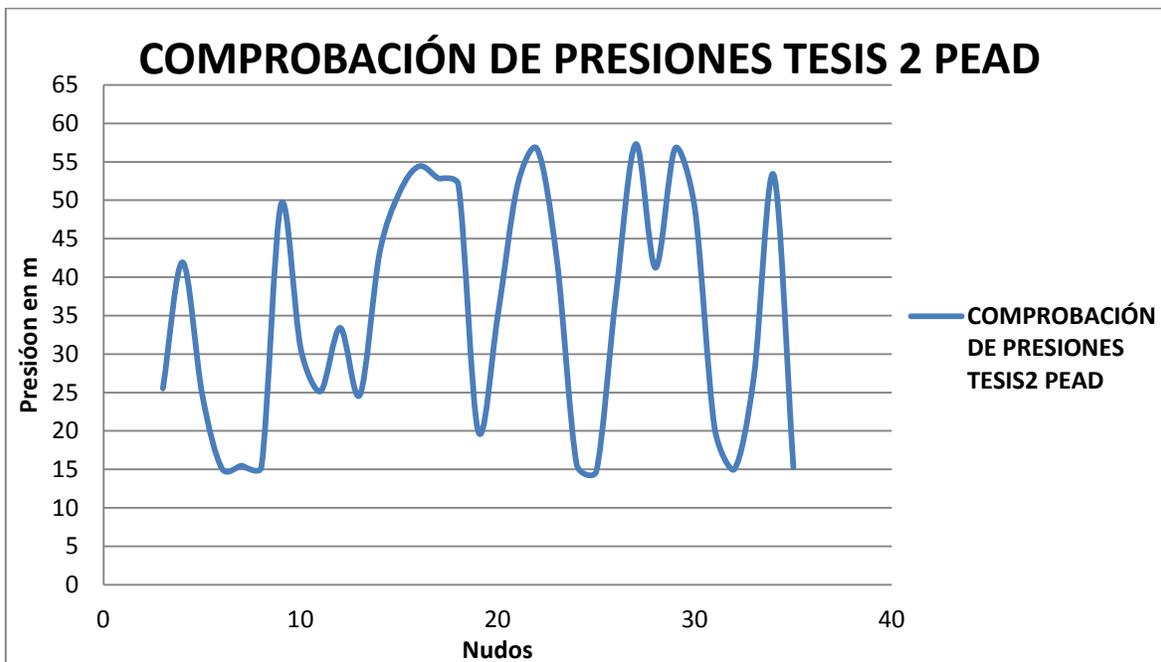


ILUSTRACIÓN 71. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PEAD.

### 4.7 RED TESIS 3

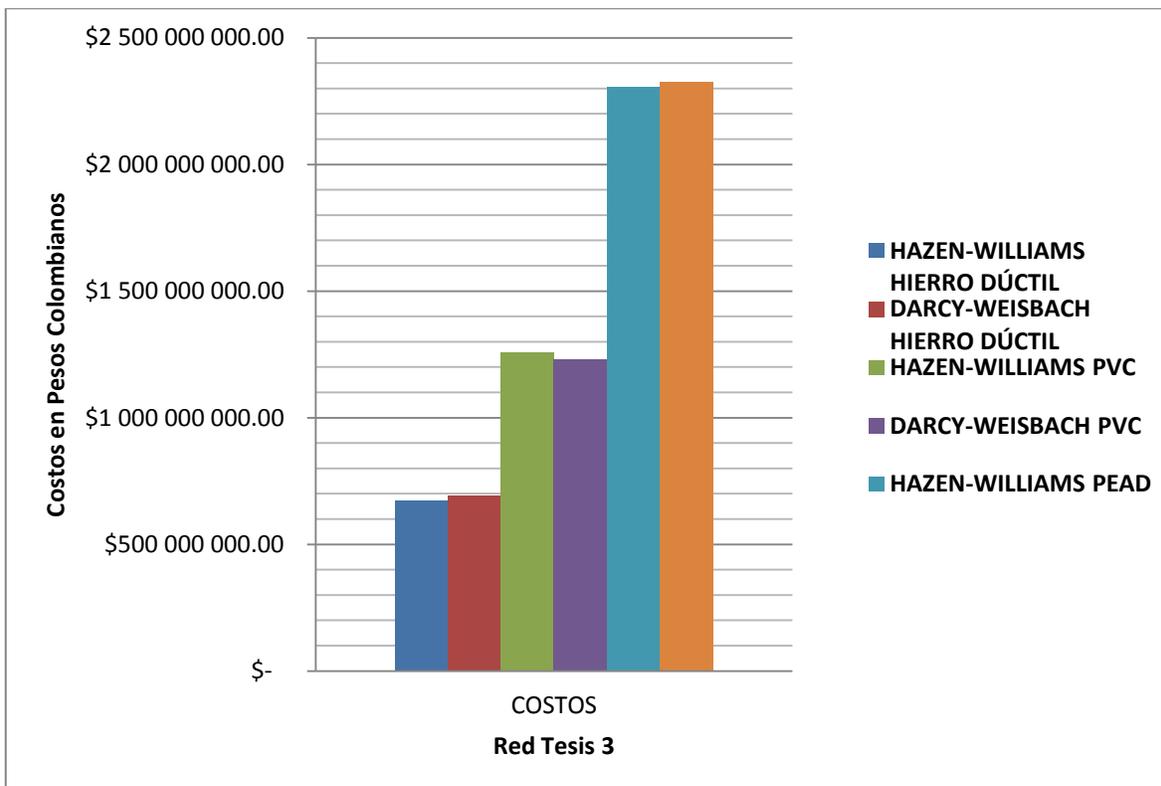
Los resultados de esta red se muestran a continuación:

Los procedimientos de esta red fueron exactamente iguales a los que se utilizaron durante las redes anteriores para todos los materiales. Los resultados para caudales duplicados y cuadruplicados se encuentran en los anexos de este trabajo.

- Costos.

COSTOS \$	RED TESIS 3 CAUDALES NORMALES		
	HIERRO DÚCTIL	PVC	PEAD
HAZEN-WILLIAMS	\$ 671 672 311.00	\$ 1 258 134 919.00	\$ 2 306 476 242.00
DARCY-WEISBACH	\$ 694 617 056.00	\$ 1 229 680 866.00	\$ 2 324 966 973.00
DIFERENCIA	\$ (22 944 745.00)	\$ 28 454 053.00	\$ (18 490 731.00)

**TABLA 17. COSTOS DE LA RED TESIS 3 CON CAUDALES NORMALES.**



**ILUSTRACIÓN 72. GRÁFICA DE COSTOS DE LA RED TESIS 3 CON CAUDALES NORMALES.**

- Resultados de presiones para Hierro Dúctil.

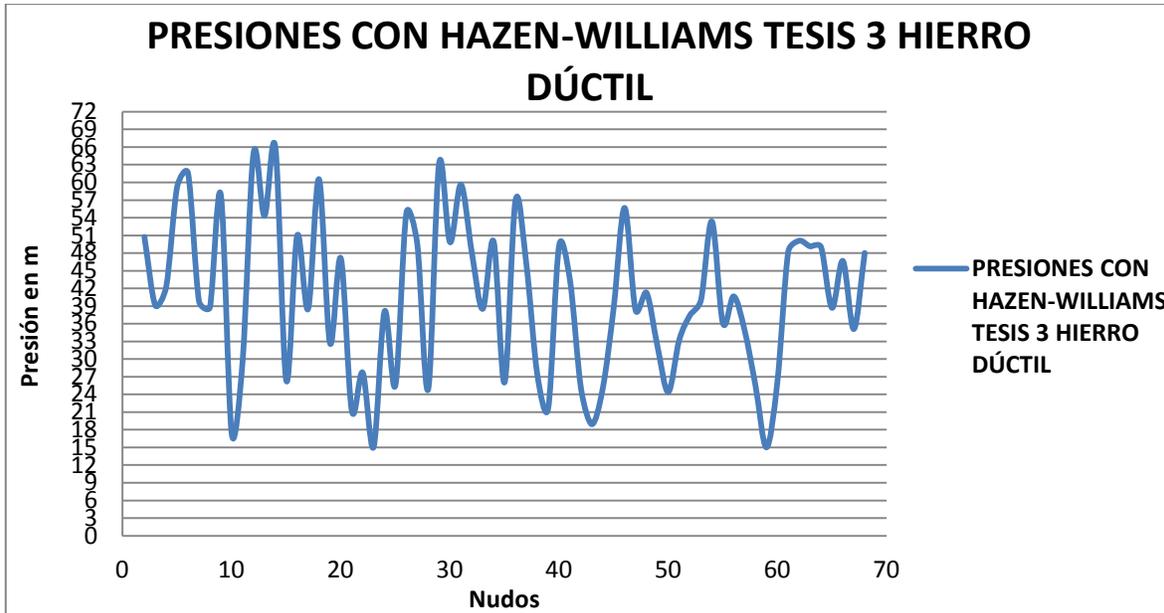


ILUSTRACIÓN 73. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA HIERRO DÚCTIL.

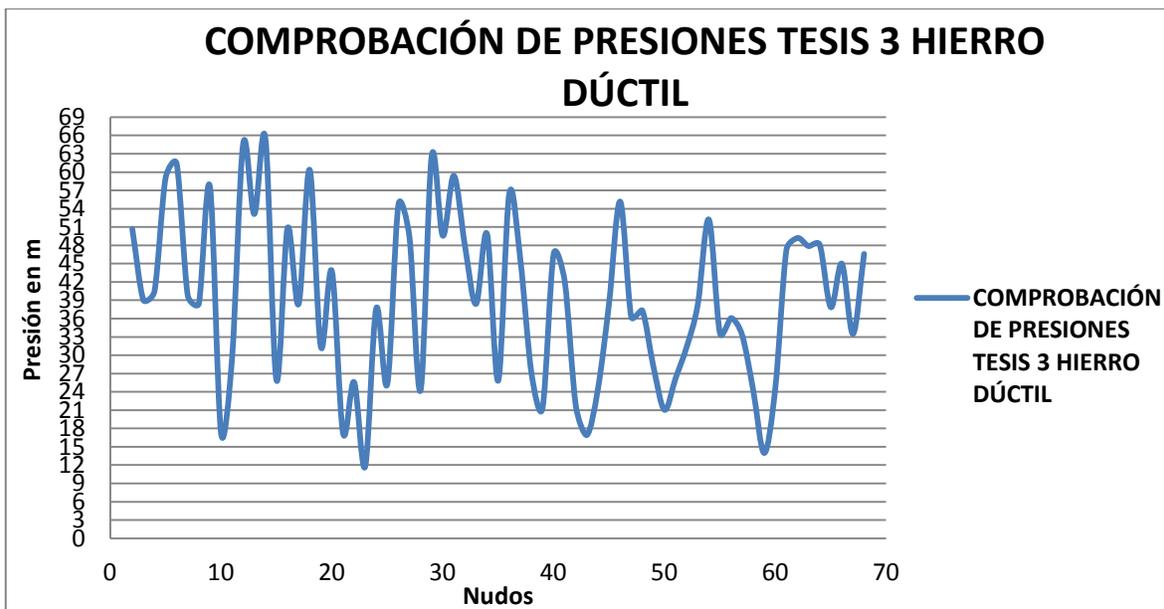


ILUSTRACIÓN 74. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA HIERRO DÚCTIL.

- Resultados de presión para PVC.

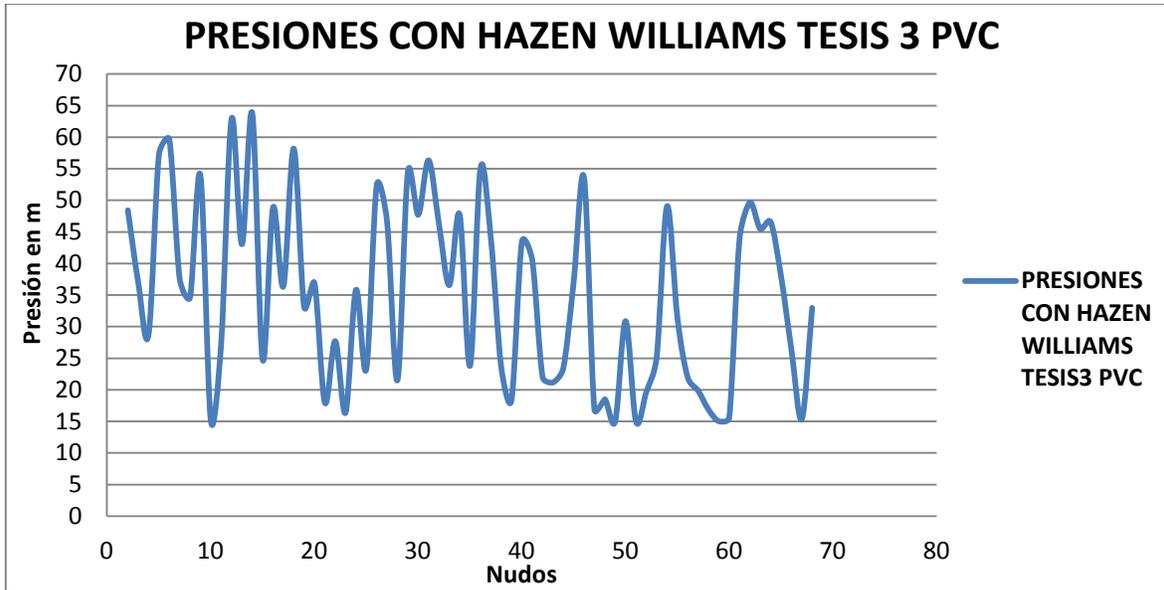


ILUSTRACIÓN 75. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA PVC.

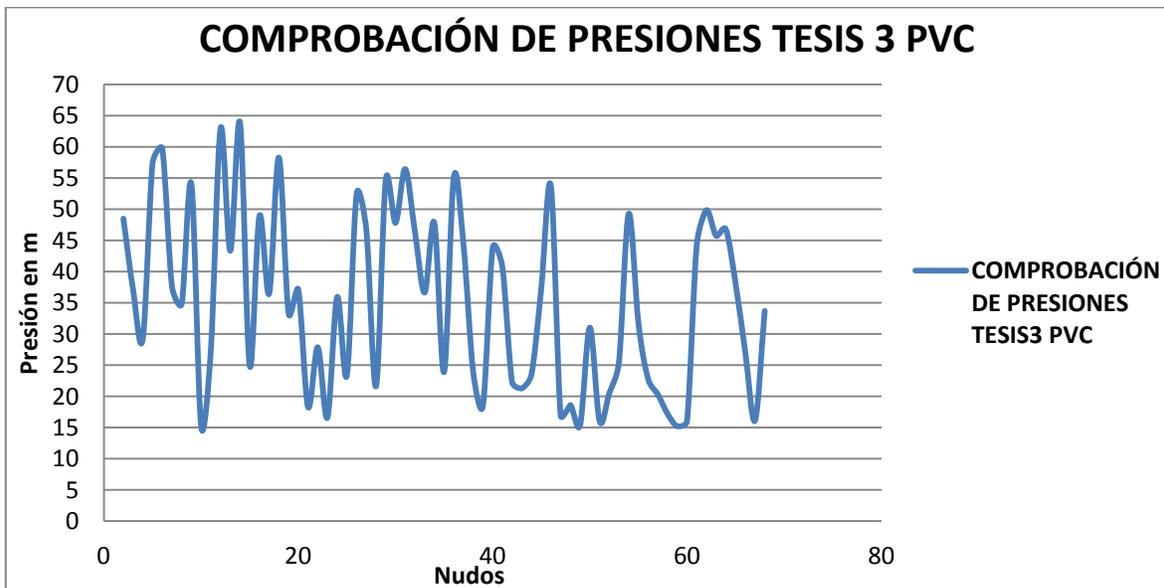


ILUSTRACIÓN 76. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PVC.

- Resultados de presiones para PEAD

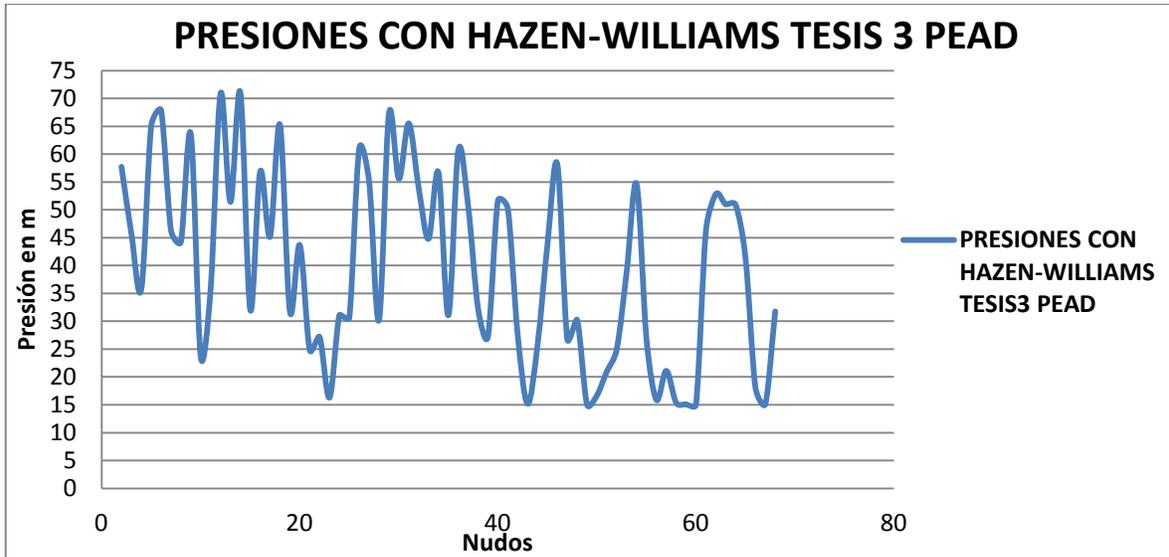


ILUSTRACIÓN 77. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA PEAD.

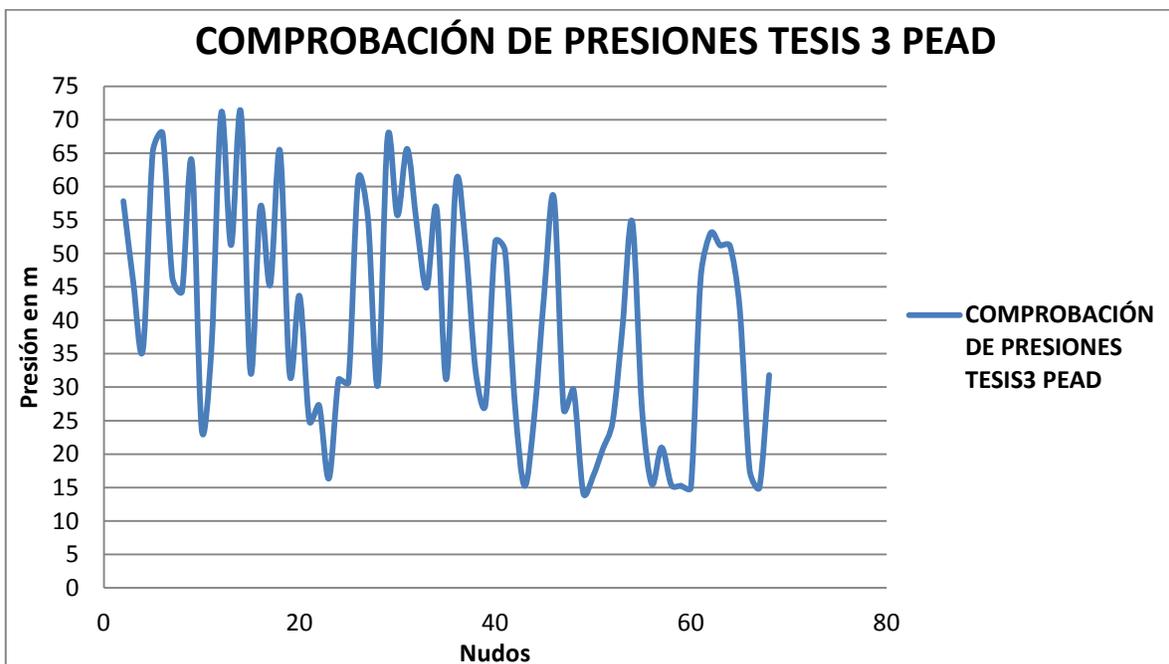


ILUSTRACIÓN 78. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PEAD.

---

## CAPÍTULO 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

---

En esta sección, se analizarán los resultados obtenidos en este proyecto. Esto se refiere al análisis hidráulico de la red y al análisis de costos que presentaron las ecuaciones de Darcy-Weisbach y Hazen-Williams. El análisis se realizará red por red, mostrando cuales fueron los efectos de las ecuaciones en la hidráulica y en los costos de diseños con diferentes caudales y diferentes materiales. Adicionalmente en anexos se pueden encontrar diagramas de Moody con los factores de fricción de las redes diseñadas para mostrar los resultados del PEAD que no presento una tendencia clara al diseñar con la ecuación de Darcy-Weisbach frente a la ecuación de Hazen-Williams. Estos diagramas muestran que la mayoría de los factores de fricción se encuentran dentro del rango sugerido por Christensen (B.A. Christensen, 2000), es decir, se encuentran entre  $10^5 < Re < 10^8$ .

---

### 5.1 RED SAN VICENTE

---

Los resultados para caudales normales que presentó esta red fueron bastante inusuales. En cuanto a los costos de diseño no se vio ninguna tendencia claramente diferencial. Las dos ecuaciones presentaban costos similares para los 3 materiales de diseño. Esto se debió principalmente a que en ambos diseños, la mayoría de los diámetros coincidían por lo que el costo resultaba muy similar al diseñar. Por este mismo motivo, no se pudo observar ningún efecto hidráulico para la ecuación de Hazen-Williams para ninguno de los materiales, como se puede observar en la Sección **3.1 Red San Vicente**. La causa principal es que si bien en algunos tramos de tuberías se presentaba una variación de diámetros entre los diseños con la ecuación de Hazen-Williams y la de Darcy-Weisbach, los tramos más largos y más cercanos a la fuente de abastecimiento presentaron el mismo diámetro, y dado a que este era el diámetro más grande y más relevante de la red, es normal que se presente una hidráulica similar entre ambas ecuaciones.

Para los caudales duplicados ocurrió algo muy similar, el efecto en los costos fue mínimo. Al igual que con los caudales normales, el efecto de los costos fue insignificante y las características hidráulicas dentro de la red no presentaron variación significativa entre las ecuaciones de Hazen-Williams y la ecuación de Darcy-Weisbach. Los resultados obtenidos no permiten decidir cuál debe ser la ecuación ideal para el diseño de RDAP.

Por el contrario, para los caudales cuadruplicados se notó una variación importante en los costos, lo cual fue especialmente visible en los costos con el PEAD, que presentaron una variación extrema. Un análisis detenido de los resultados que arrojaron las dos ecuaciones muestran que en tramos muy largos de tubería se presentaron diámetros mayores con la ecuación de Darcy-Weisbach que con la ecuación de Hazen-Williams lo cual repercutió de manera determinante en los costos.

En consideración a que los costos por diámetro-metros de PEAD son los más altos de los tres materiales, el aumento de los diámetros en un tramo largo de tubería con la ecuación de Darcy-Weisbach, generó una elevación en los costos de una forma desproporcionada. No

obstante lo anterior, no se pudo observar una variación dramática en las presiones con este material para las ecuaciones de Hazen-Williams y Darcy-Weisbach, con excepción de un par de Nudos que presentaban presiones mayores con la ecuación de Darcy-Weisbach. Sin embargo, estas presiones no superaban el 7% de diferencia con respecto a la ecuación de Hazen-Williams.

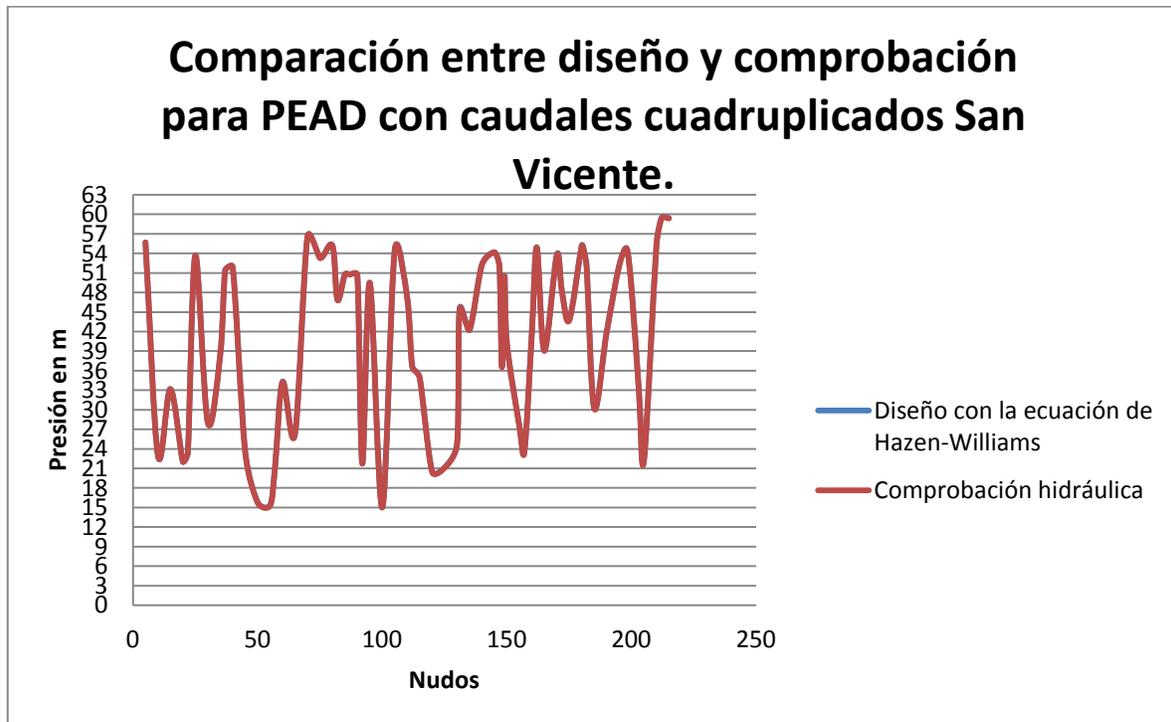


ILUSTRACIÓN 79. COMPARACIÓN ENTRE EL DISEÑO Y SU COMPROBACIÓN.

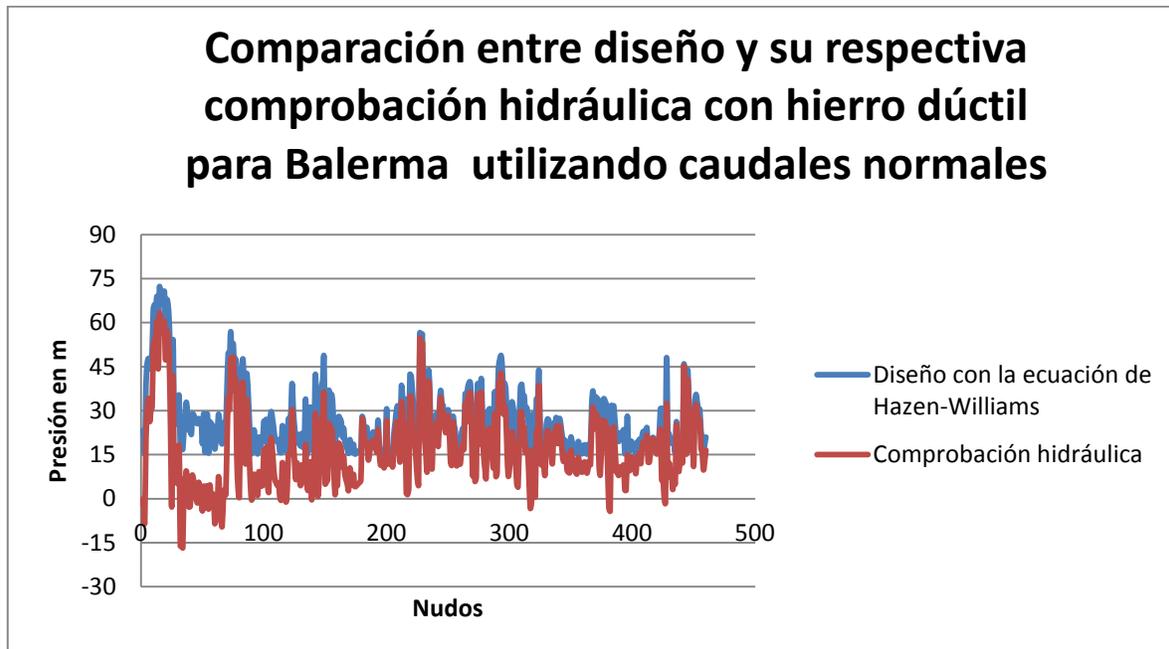
Pese a que en PEAD con caudales cuadruplicados se presentó una diferencia de costos importante y favorable al diseño de Hazen-Williams, sin embargo esto no tuvo ningún efecto en las presiones de la red a pesar de esto no es recomendable tomar como base este único resultado, ya que con caudales normales y duplicados para esta red y al observar la tendencia con las otras redes, es más probable pensar que este fue un caso particular y aislado.

## 5.2 RED BALERMA

La Red Balerma, fue una de las redes que presentó resultados más relevantes para este trabajo de tesis. En primera instancia, para caudales normales se vio que los costos presentaron variación significativa para los tres materiales (**Ver Tabla 12**) Para el hierro dúctil, se pudo observar que los costos de diseño resultaban ser mucho más económicos con la ecuación de Hazen-Williams que con la ecuación de Darcy-Weisbach. Para PVC y PEAD esta tendencia cambió y se presentaron sobrecostos al diseñar la red con este tipo de materiales al emplear la ecuación de Hazen-Williams. Estos resultados muestran que aun cuando la

ecuación de Hazen-Williams presenta una facilidad para obtener las pérdidas por fricción frente a la ecuación de Darcy-Weisbach, no siempre se obtienen costos más bajos.

El análisis hidráulico de los caudales normales arrojó resultados importantes para hierro dúctil y para PVC. Para el primero de estos materiales, al realizar la comprobación hidráulica de la red diseñada con la se ecuación de Hazen-Williams se pudo observar que en muchos de los Nudos (más del 50%) presentaba incumplimiento en la presión mínima de los Nudos (presión mínima de la red era de 15 m), llegando a presentar en varios nudos presiones negativas (**Ilustración 39**). Reflejando que el diseño con la ecuación con Hazen-Williams pese a que se obtiene un diseño más económico, no cumple con los requerimientos legales de presión.



**ILUSTRACIÓN 80. COMPARACIÓN ENTRE EL DISEÑO Y SU COMPROBACIÓN.**

Para el PVC se presentó resultado opuesto al encontrado en el hierro dúctil. Al realizar la comprobación del diseño de Hazen-Williams se presentó una sobrestimación de las presiones en muchos de los nudos llegando a alcanzar una sobrestimación cercana al 25% trabajando con el mismo programa y utilizando la misma flecha de diseño (**Ver Ilustración 41**). Este comportamiento no fue único, y se presentó en esta red con los diferentes caudales y en otras redes como se va a observar más adelante. Para este caso, esta sobrestimación de las presiones en los Nudos se vio reflejada en los sobrecostos con respecto a la ecuación de Darcy-Weisbach. Si bien, este problema de la sobrestimación de las presiones no presenta un riesgo para la población abastecida, si constituye un problema serio para el diseñador del proyecto, ya que se incurre en un sobrecosto para el diseño de la red y por lo tanto deja de ser un diseño optimizado que es quizás el segundo objetivo más importante al diseñar una red de distribución de agua potable.

El comportamiento del PEAD presentó una leve sobreestimación de presiones cuando se realizó la comprobación hidráulica de la red diseñada con la ecuación de Hazen-Williams (**Ver Ilustración 43**). Si bien, no fue un efecto tan notorio como el que se pudo observar en PVC, si se vio reflejado en un sobrecosto en el diseño realizado con la ecuación empírica.

Para el comportamiento con los caudales duplicados, la tendencia que se presentaron costos más altos con la ecuación de Hazen-Williams se mantuvo para los materiales de PVC y PEAD (**Ver Tabla 21**). En el caso del hierro dúctil se registra un comportamiento anómalo ya que también sus costos se vieron incrementados con lo cual todos los costos fueron más altos para la ecuación de Hazen-Williams. A pesar de esto y al igual que en el caso particular de la Red San Vicente, los sobrecostos de la ecuación de Hazen-Williams con hierro dúctil fueron un caso particular y como se podrá observar más adelante con otras redes, es un sobrecosto que no se repite.

Para el análisis hidráulico se presentaron resultados similares a los que se presentaron con caudales normales. El diseño de la red con la ecuación de Hazen-Williams con hierro dúctil, volvió a presentar presiones inferiores a la presión mínima trabajada durante el proyecto. Este efecto puede deberse a que la ecuación de Hazen-Williams esté subestimando las pérdidas por fricción, confirmando lo estipulado por Liou en 1998 o que el coeficiente de Hazen-Williams que se está trabajando sea equivocado y esté representando las características del material mucho más lisas de lo que realmente son. Por lo anterior, podría afirmarse que es un error trabajar únicamente con un coeficiente de Hazen-Williams, ya que como mostró Liou (Liou, 1998) en sus investigaciones, este coeficiente presenta una variación dependiendo del número de Reynolds y la rugosidad relativa de la tubería.

En el caso del hierro dúctil, la relación de costos que genera el modelo se debió a que en algunos tramos de las tuberías se presentaron diámetros mayores que los que se presentaban con la ecuación de Darcy-Weisbach. A pesar de que se presentaban diámetros mayores, estos no se encontraban localizados en los tramos vitales de la tubería, por lo que se seguían presentando presiones inferiores a la mínima establecida en el proyecto.

Por su parte, para el PVC se presentó la misma tendencia que con los caudales normales. Es decir, se presentó una sobrestimación de las presiones en muchos de los Nudos de las tuberías con la ecuación de Hazen-Williams (**Ver Ilustración 107**). Esta sobrestimación se hizo más evidente con los caudales duplicados, llegando a alcanzar una sobrestimación de las presiones cercana al 30%. Al igual que con los caudales normales esta sobrestimación de las presiones se vio reflejada en un sobrecosto, llevando a que los diseños realizados con la ecuación de Darcy-Weisbach resultaran más económicos y por lo tanto más eficientes.

Finalmente en el caso del material PEAD se presentaron prácticamente las mismas tendencias que las encontradas con los caudales normales. Es decir, se encontró que existía una pequeña sobrestimación de presiones, pero no tan evidente ni con la misma magnitud que la que es posible observar en el PVC (**Ver Ilustración 109**) y se volvió a observar que los costos con caudales duplicados mostraban diseños más costosos con la ecuación de Hazen-William.

Para los caudales cuadruplicados se volvió a evidenciar un diseño mucho más económico en hierro dúctil al utilizar la ecuación de Hazen-Williams (**Ver Tabla 22**) y se mantuvo la tendencia de obtener diseños más costosos con la ecuación de Hazen-Williams para PVC y PEAD.

En cuanto a la hidráulica de la red, se pudo observar que para hierro dúctil la tendencia de presiones inferiores a la presión mínima se seguía presentando cuando se realizaba la comprobación hidráulica de la red diseñada con la ecuación de Hazen-Williams. Al observar la gráfica de presiones con Hazen-Williams contra la gráfica de su comprobación (**Ver Ilustración 111 e Ilustración 112**), es muy evidente observar que los diseños con la ecuación de Hazen-Williams están subestimando las pérdidas por fricción ya sea por utilizar un coeficiente de Hazen-Williams incorrecto o por la naturaleza empírica de la ecuación (trabajada por fuera de sus rangos de cumplimiento). En cualquiera de los casos, queda evidenciado que en la red Balerma no es justificable utilizar la ecuación de Hazen-Williams para diseños con hierro dúctil solo por su facilidad de manejo y sus bajos costos constructivos, ya que como quedó evidenciado con los resultados, los diseños no son apropiados e incumplen con las presiones mínimas que la normatividad exige.

Para PVC se mantuvo el comportamiento visto con los caudales normales y los caudales duplicados. Los registros muestran que en algunos Nudos de la red se están presentando sobrepresiones, en contraste con las que arrojaba originalmente el diseño utilizando la ecuación de Hazen-Williams. Esto significa que en este caso, la ecuación de Hazen-Williams está sobrestimando las pérdidas por fricción en la tubería, lo que lleva a que se obtengan diámetros más grandes a los que se obtendrían con la ecuación de Darcy-Weisbach y con ello, se genere un sobrecosto al utilizar la ecuación de Hazen-Williams, como se puede observar en las tablas de costos de Balerma.

Lo anterior permite concluir que por lo menos para la red Balerma, utilizar la ecuación de Hazen-Williams es un error ya que genera un sobre costo con respecto a los diseños de la ecuación de Darcy-Weisbach.

En el caso del PEAD, se repitió la tendencia que se presentaba en los caudales normales y duplicados. Se presenta una pequeña sobrestimación de las presiones por parte de la ecuación de Hazen-Williams; sin embargo esta no representa una diferencia hidráulica demasiado relevante. En los costos, si bien el diseño con la ecuación con Darcy-Weisbach resulta más económico, el efecto no tiene la misma magnitud que el observado en hierro dúctil y en PVC. Con base a los análisis de este material, es difícil afirmar o rechazar la ventaja de una ecuación frente a la otra en cuanto a los diseños de esta red.

Para finalizar, los resultados en los diseños de la red Balerma muestran que el diseño con ambas ecuaciones resulta en una variación importante de la hidráulica y de los costos. Los efectos más importantes se vieron con el hierro dúctil y el PVC, siendo el primer material más económico en sus diseños pero incumpliendo los requerimientos de presión y el segundo entregando redes sobre diseñadas. Mientras que con el PEAD se vieron efectos de

sobrestimación de pérdidas muy leves y las desventajas o ventajas de una ecuación frente a la otra no fueron evidentes para este material.

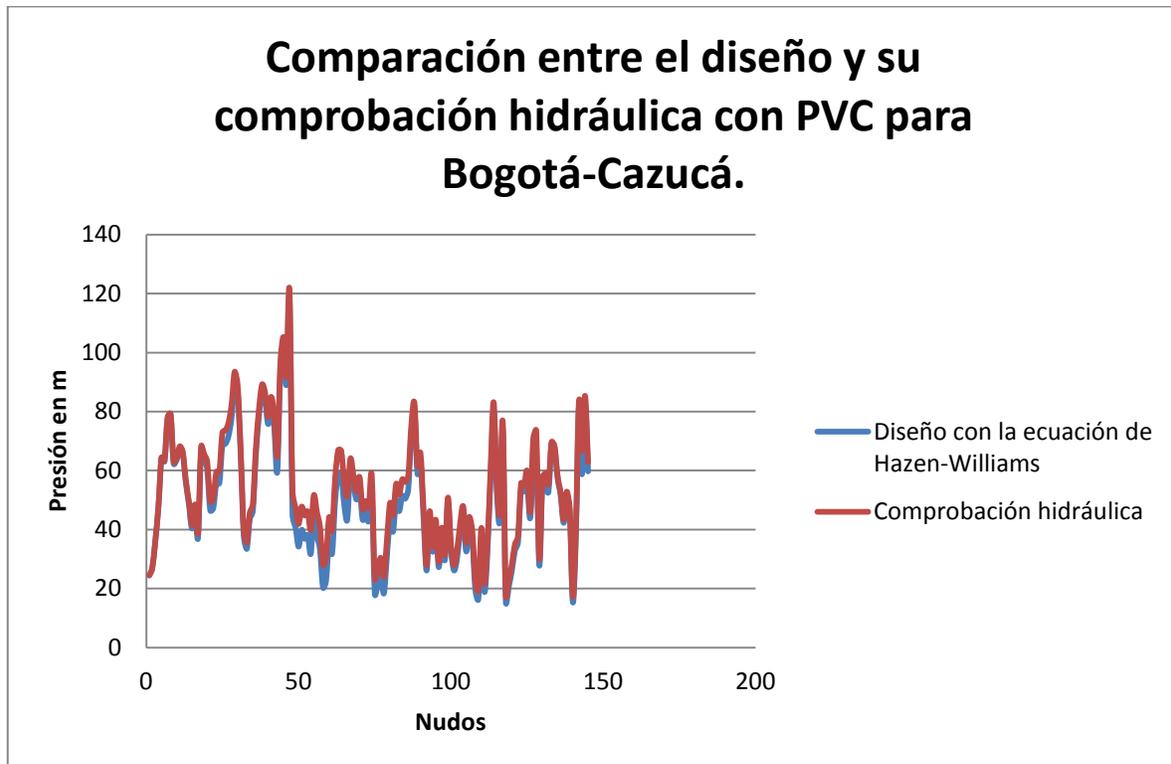
### 5.3 RED BOGOTÁ-CAZUCÁ

Los resultados obtenidos para esta red fueron similares a los que se obtuvieron con la red Balerma, con lo cual se empieza a evidenciar que el uso de la ecuación de Hazen-Williams si tiene un efecto indeseado en los costos y en la hidráulica de las redes de acueducto.

Para caudales normales, esta red presentó un costo menor cuando se diseñó con hierro dúctil, utilizando la ecuación de Hazen-Williams, respecto de los costos que arrojó la ecuación Darcy-Weisbach. Por su parte los costos más económicos para los diseños con PVC y PEAD se encontraron al utilizar la ecuación de Darcy-Weisbach (**ver Tabla 13**). En cuanto a la hidráulica de la red, los resultados presentaron comportamientos similares para los tres materiales respecto de los encontrados en la Red Balerma.

Para la red diseñada con hierro dúctil y caudales normales, se presentaron diferencias importantes de costos con la ecuación de Darcy-Weisbach y con la ecuación de Hazen-Williams, siendo esta última mucho más económica. Hidráulicamente la red presentó el mismo comportamiento que la red Balerma. Al realizar la comprobación de presiones de la red diseñada con la ecuación de Hazen-Williams, quedó evidenciada una vez más que pese a que el diseño resulta más económico con esta ecuación, los resultados revelan un incumplimiento con el requerimiento de presión mínima (**Ver Ilustración 46**). Esto confirma la tendencia de que los diseños con la ecuación de Hazen-Williams al utilizar hierro dúctil, presentan un incumplimiento en las presiones mínimas, y que a pesar de que presenta menores costos no es una razón válida para ignorar la normatividad hidráulica vigente.

Para el diseño con PVC, los costos muestran que el diseño con la ecuación de Darcy-Weisbach es más económico que el diseño con la ecuación de Hazen-Williams (para caudales normales). Hidráulicamente las tendencias que se presentaron en la red Balerma se repitieron en el diseño de la Red Bogotá-Cazucá. Los resultados para esta red mostraron que los diseños con la ecuación de Hazen-Williams al ser comprobados hidráulicamente con la ecuación de Darcy-Weisbach están sobre diseñando la red, es decir, las presiones de la red eran mayores en la comprobación que en el diseño original (**Ver Ilustración 50**). Si bien, no se incumple con las presiones mínimas, se está sobre diseñando la red lo cual tiene un impacto en los costos con un sobredimensionamiento de los mismos, al ser el diseño con la ecuación de Hazen-William más costoso que el diseño realizado con la ecuación de Darcy-Weisbach.



**ILUSTRACIÓN 81. COMPARACIÓN ENTRE EL DISEÑO Y SU COMPROBACIÓN.**

Para PEAD, no se vio un efecto evidente en los diseños con los caudales normales. Al realizar la comprobación hidráulica del diseño realizado con la ecuación de Hazen-Williams las presiones no variaron demasiado, con un máximo del 5 % frente a los diseños originales. En cuanto a costos, se evidenció que el diseño con la ecuación de Hazen-Williams presentaba un mayor costo que el diseño realizado con la ecuación de Darcy-Weisbach. Lo que lleva a pensar que la ventaja de solución rápida de la ecuación de Hazen-Williams se ve más que compensada por el diseño económico que presentó la ecuación de Darcy-Weisbach, sin embargo es importante mencionar que esta diferencia de costos no es tan grande.

Para los caudales duplicados y pese a que los costos aumentaron, se presentó el mismo comportamiento que en caudales normales. En otras palabras, al comparar los diseños con hierro dúctil se puede ver que el diseño realizado con la ecuación de Hazen-Williams es mucho más económico que el diseño que se realizó con la ecuación de Darcy-Weisbach. A su vez se puede ver que para PVC la diferencia de costos favorece al diseño con Darcy-Weisbach mientras que para PEAD la diferencia es tan pequeña entre los 2 diseños que no muestra un predominio real cuando se enfrentan los costos.

La hidráulica conservó las características vistas en los caudales normales, en otras palabras, el diseño con hierro dúctil utilizando la ecuación de Hazen-Williams presentó presiones inferiores a las exigidas por este trabajo (**ver Ilustración 122**) (Al realizar la comprobación

hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach). Estos resultados permiten confirmar lo visto en la red Balerma con hierro dúctil, es decir, los diseños con la ecuación de Hazen-Williams para hierro dúctil presentan costos muy inferiores a los diseños con la ecuación de Darcy-Weisbach; sin embargo estos diseños no cumplen con los requerimientos hidráulicos mínimos establecidos por el autor por lo que el diseño debe de ser descartado.

Para PVC se repitió la tendencia que se había visto anteriormente con los caudales normales de esta red y con la red Balerma. Se presentaron sobrepresiones al realizar la comprobación hidráulica del diseño realizado con la ecuación de Hazen-Williams (**ver Ilustración 123 e Ilustración 124**). Lo que se puede analizar es que la ecuación de Hazen-Williams está sobrestimando las pérdidas por fricción, es decir el opuesto del caso del hierro dúctil. Esto a su vez está repercutiendo en los costos de diseño de esta red, causando que los diseños con la ecuación de Hazen-Williams presente costos más elevados que los generados al diseñar con la ecuación de Darcy-Weisbach.

En el caso del PEAD no se logró evidenciar una sobrestimación o subestimación de presiones por parte de la ecuación de Hazen-Williams. Así mismo no se logró ver que la diferencia de precios fuera demasiado grande entre el diseño realizado con la ecuación de Darcy-Weisbach y la ecuación de Hazen-Williams. En otras palabras no se pudo evidenciar un efecto negativo o positivo por parte de la ecuación de Hazen-Williams al diseñar esta red con PEAD, concordando con los resultados obtenidos en la red Balerma, que presentó solo una leve sobrestimación de las presiones y una leve diferencia en los costos de diseño.

Para finalizar se va a analizar el último caso de esta red que fue el de los caudales cuadruplicados. En lo que a costos se refiere, se mantuvo la tendencia observada para hierro dúctil, es decir, la red diseñada con la ecuación de Hazen-Williams presento un diseño más económico que la red diseñada con la ecuación de Darcy-Weisbach. Para el caso del PVC y el PEAD se presentaron unas pequeñas variaciones con respecto a los resultados obtenidos hasta el momento. Para ambos materiales los diseños con la ecuación de Hazen-Williams resultaron más baratos que los diseños realizados con la ecuación de Darcy-Weisbach.

En la parte hidráulica los resultados de hierro dúctil continuaron con el comportamiento presentado hasta el momento. En otras palabras, pese a que el diseño resultante con la ecuación de Hazen-Williams resulto bastante más barato que el realizado con la ecuación de Darcy-Weisbach, al realizar la comprobación hidráulica del mismo se evidenció que este no cumplía con las presiones mínimas de la red, llegando incluso a presentar Nudos con presiones negativas (**ver Ilustración 129**). Sin embargo y a diferencia de los casos con caudales normales y duplicados, en este caso se vio mucho más agravado el problema, presentando presiones debajo de la reglamentaria en muchos más Nudos y presiones negativas en por lo menos 10 Nudos más con respecto a los caudales duplicados y normales. Esto lleva en principio a pensar que la demanda en cada uno de los Nudos juega un rol importante a la hora de mostrar los efectos hidráulicos causados por el uso de la ecuación de Hazen-Williams para el caso de hierro dúctil.

En el caso del PVC cuando se ven los resultados con caudales cuadruplicados, es posible evidenciar una vez más que los diseños con la ecuación de Hazen-Williams al ser evaluados con la ecuación de Darcy-Weisbach, presentan presiones más elevadas a las que normalmente arrojaba el modelo original (**ver Ilustración 132**). Extrañamente esta sobrestimación de las pérdidas no se vio reflejada en los costos de la red, siendo un poco más económica la red diseñada con la ecuación de Hazen-Williams, resaltando que esta diferencia de costos es tan baja que es prácticamente insignificante. No obstante, si bien desde los costos no representa una ventaja o una desventaja, desde el punto de vista hidráulico se logra evidenciar una vez más que la ecuación de Hazen-Williams está sobrestimando las presiones en muchos de los Nudos y el uso de la misma para diseñar debe realizarse con sumo cuidado.

Para el último material PEAD, la hidráulica se comportó de forma muy similar a lo que se podía evidenciar con caudales normales y duplicados, es decir, no se logra observar un efecto hidráulico claro por parte de la ecuación de Hazen-Williams cuando se evalúa su hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach. Si bien se presentó una diferencia de precios entre los diseños con la ecuación de Darcy-Weisbach y la ecuación de Hazen-Williams, esta diferencia de precios era insignificante cuando se observan los costos totales para este material, en otros términos la magnitud de la diferencia no es relevante a la hora de escoger una ecuación frente a la otra. Esta evidencia junto con la observada en las redes anteriores parece indicar que no hay un efecto positivo o negativo al diseñar con la ecuación de Hazen-Williams para el PEAD, independiente del caudal demandado en cada uno de los Nudos.

## 5.4 RED R28

Los resultados de esta red al poseer menos Nudos fue más fácil de analizar y de evidenciar los cambios. Los comportamientos observados continuaron con las tendencias vistas en las redes anteriores (con excepción de la red San Vicente, que como se nombró anteriormente presente resultados anómalos).

Cuando se observaban los resultados con caudales normales es posible evidenciar que los costos con hierro dúctil siguen presentando el mismo comportamiento que con las redes Balerna y Bogotá-Cazucá, presentando un costo menor en el diseño con la ecuación de Hazen-Williams que con la ecuación de Darcy-Weisbach. Para PVC y PEAD si bien los diseños con la ecuación de Darcy-Weisbach presentaron costos menores que los diseñados con la ecuación de Hazen-Williams, esta diferencia fue bastante pequeña, en especial para el caso del PEAD donde la magnitud de la diferencia fue prácticamente despreciable.

Para hierro dúctil, cuando se realiza su comprobación hidráulica se evidencia claramente que la ecuación de Hazen-Williams no entrega diseños que cumplan con los requerimientos mínimos de presión (**ver Ilustración 53**). En otros términos, se están subestimando las pérdidas por fricción con la tubería. Este comportamiento no es único y como se ha observado anteriormente se ha presentado en la red Balerna y en la red Bogotá-Cazucá. Demostrando una vez más que pese a que esta ecuación empírica arroja diseños considerablemente más

económicos que la ecuación físicamente basada, sus diseños incumplen con los requerimientos hidráulicos y por lo tanto sus diseños no deben tomarse en consideración.

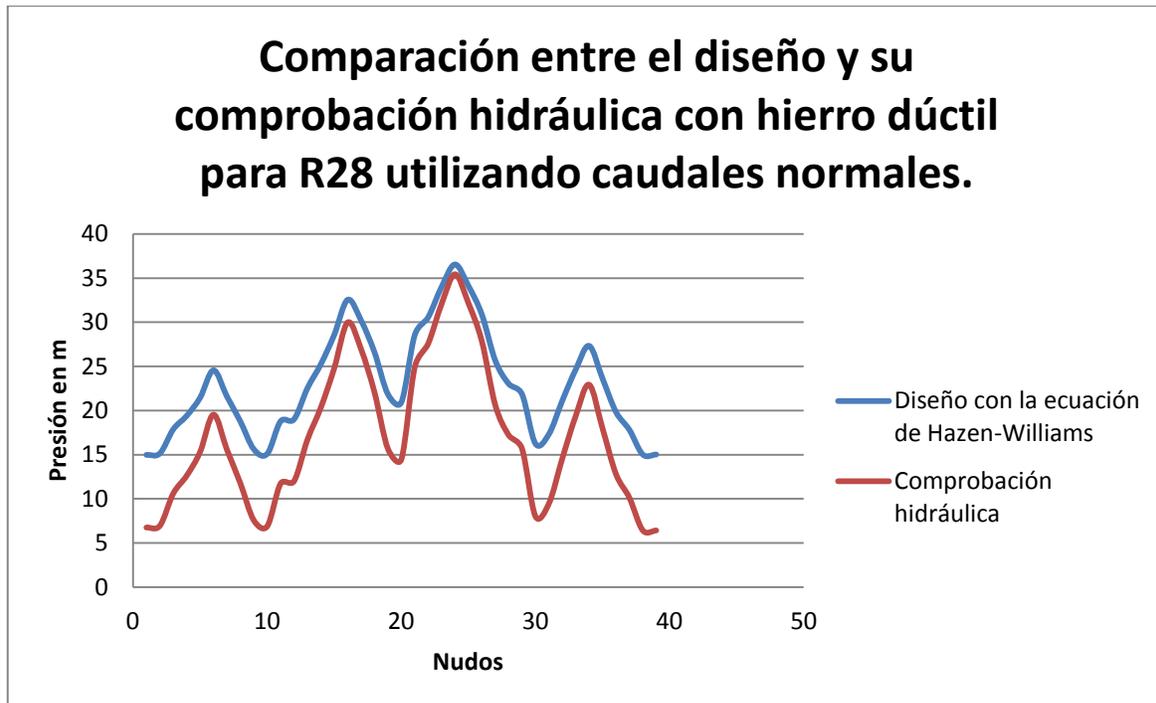


ILUSTRACIÓN 82. COMPARACIÓN ENTRE EL DISEÑO Y SU COMPROBACIÓN.

El caso del PVC continuó con la tendencia observada en las redes anteriores, presentando sobrestimación de presiones con el diseño de la ecuación de Hazen-Williams para caudales normales (**ver Ilustración 55**); aunque esta sobrestimación no fue de la misma magnitud que la que se presentó en las redes Balerma y Bogotá-Cazucá, sirve para evidenciar un efecto de sobrestimación de presiones por parte de la ecuación de Hazen-Williams. Si bien los costos de esta red fueron bastante similares cuando se compararon la ecuación empírica y la físicamente basada, este sobrecosto por parte de la primera, puede explicar la sobrestimación presentada en las presiones.

En el PEAD, al analizar los resultados con caudales normales es posible ver que hidráulicamente no se evidencia un comportamiento negativo cuando se comprueba la ecuación de Hazen-Williams (**ver Ilustración 57**). Esto quiere decir que no se presentan presiones por debajo de la mínima establecida en este trabajo, ni tampoco se presenta una sobrestimación importante de las presiones. A su vez, cuando se observan los costos entre la ecuación empírica y la ecuación físicamente basada, tampoco se ve una diferencia importante en los costos. Este comportamiento parece mostrar que no hay una diferencia importante en los diseños con la ecuación empírica frente a la ecuación físicamente basada.

Los resultados con caudales duplicados muestran una vez más que los costos con hierro dúctil presentan una diferencia importante, siendo otra vez el diseño con la ecuación de Hazen-Williams mucho más económico. Para PVC se presentó un diseño más económico cuando se utilizó la ecuación de Darcy-Weisbach; sin embargo es una diferencia de costos relativamente pequeña, que va a ser relevante cuando se analice la hidráulica. Finalmente en el PEAD no se evidencia una diferencia importante de costos (**ver Tabla 25**), lo que indica junto con los resultados de Balerna, Bogotá-Cazucá y esta red con caudales normales, que los diseños para PEAD con las ecuaciones de Hazen-Williams y Darcy-Weisbach no presentan diferencias significativas.

Hidráulicamente, el resultado con hierro dúctil presentó el mismo comportamiento que se ha ido evidenciando en la mayoría de las redes, es decir, la comprobación hidráulica del diseño con la ecuación de Hazen-Williams arroja presiones inferiores a la mínima que se ha establecido (**ver Ilustración 139**). Aunque para este caso duplicar el caudal no causó que se amplificara este efecto, es importante mostrar que el efecto de diseñar con hierro dúctil utilizando la ecuación de Hazen-Williams, produce efectos negativos en la hidráulica e incumple con los requerimientos mínimos para diseñar una red.

El PVC mostró sobrestimación de las presiones en diferentes Nudos al utilizar el diseño con la ecuación de Hazen-Williams (**ver Ilustración 141**); estas presiones fueron un poco más elevadas que cuando se utilizaron caudales normales, y como se nombró anteriormente, esta sobrestimación de las presiones fue producto de que se seleccionaran diámetros mayores a los que realmente se necesitaban, causando que se elevaran los costos de la red. Esta tendencia no es única y como se puede observar en retrospectiva, esta no es la única red que presenta este tipo de comportamiento; esto lleva a que los diseños con Hazen-Williams utilizando PVC, no incumplen con la presión mínima de la red pero la sobre diseñan y pueden ser descartados como diseños óptimos de RDAP.

Con el PEAD pese a que se duplicaron los caudales de los Nudos, la tendencia no cambio. Esto implica que no se vio ningún efecto hidráulico al realizar la comprobación hidráulica del diseño con la ecuación de Hazen-Williams. A su vez, no se pudo evidenciar una diferencia notoria de los costos al comparar los diseños con ambas ecuaciones. Si bien en este caso resultó ser más económico diseñar con la ecuación de Hazen-Williams la diferencia fue tan pequeña que es prácticamente igual al costo con la ecuación de Darcy-Weisbach (**ver Tabla 25**).

Para caudales cuadruplicados los costos presentaron un comportamiento similar que el observado en todo este trabajo, hierro más barato con el diseño de Hazen-Williams, PVC más económico para la ecuación de Darcy-Weisbach y PEAD no presentó una variación importante. Como es evidente al aumentar tanto los caudales de los Nudos esto hace que los costos con respecto a caudales normales y duplicados sean mayores; sin embargo como se acaba de nombrar la tendencia de los mismos se mantuvo.

Hidráulicamente el hierro dúctil no cambio demasiado con respecto a los resultados con caudales normales y duplicados. Si bien se siguió presentando la subestimación de presiones

al realizar la comprobación hidráulica del diseño con la ecuación de Hazen-Williams, este efecto no se vio incrementado al cuadruplicar los caudales como se había visto en las otras redes de este trabajo (**ver Ilustración 146**). Aun cuando no hubo una diferencia hidráulica entre el análisis de los diferentes caudales para este material, los costos si se vieron modificados, y resultó ser mucho más económico diseñar con la ecuación de Hazen-Williams, y a diferencia de la hidráulica, la variación de costos en los diseños fue bastante importante.

Al igual que con el hierro dúctil, para el caso del PVC no se presentaron diferencias significativas en cuando a las presiones con respecto a los caudales normales y duplicados (**ver Ilustración 149**). A pesar de esto se pudo seguir evidenciando la sobrestimación de presiones en algunos Nudos al realizar la comprobación hidráulica el diseño realizado con la ecuación de Hazen-Williams. Cuando se comparan estos resultados con los costos para este material, se hace notorio que el sobre diseño de la red R28 por parte de la ecuación de Hazen-Williams causa que se aumenten estos costos (pues utiliza diámetros mayores a los que un diseño con la ecuación de Darcy-Weisbach utiliza), llevando a que el diseño con esta ecuación empírica deje de ser óptimo y sea descartable frente al diseño realizado con la ecuación físicamente basada de Darcy-Weisbach.

Para el PEAD no se profundizara demasiado en el análisis, ya que repitió el mismo comportamiento en costos y en hidráulica que con caudales normales y duplicados. Es decir, no se vio una diferencia grande entre los costos cuando se compararon las dos ecuaciones, e hidráulicamente la ecuación de Hazen-Williams tampoco incumplió con los requerimientos mínimos ni con sobrepresiones cuando se realizó su comprobación hidráulica con la ecuación de Darcy-Weisbach.

## 5.5 RED TESIS 1

Los resultados de esta red mostraron un cambio en el comportamiento hidráulico con los diseños del PVC con respecto a lo observado en las redes anteriores. A su vez esta red hizo evidente que el aumento de la demanda base (caudal) en cada uno de los Nudos si repercute en los efectos hidráulicos cuando se diseña con la ecuación de Hazen-Williams para el caso del hierro dúctil. El efecto del PEAD se mantuvo para todos los caudales.

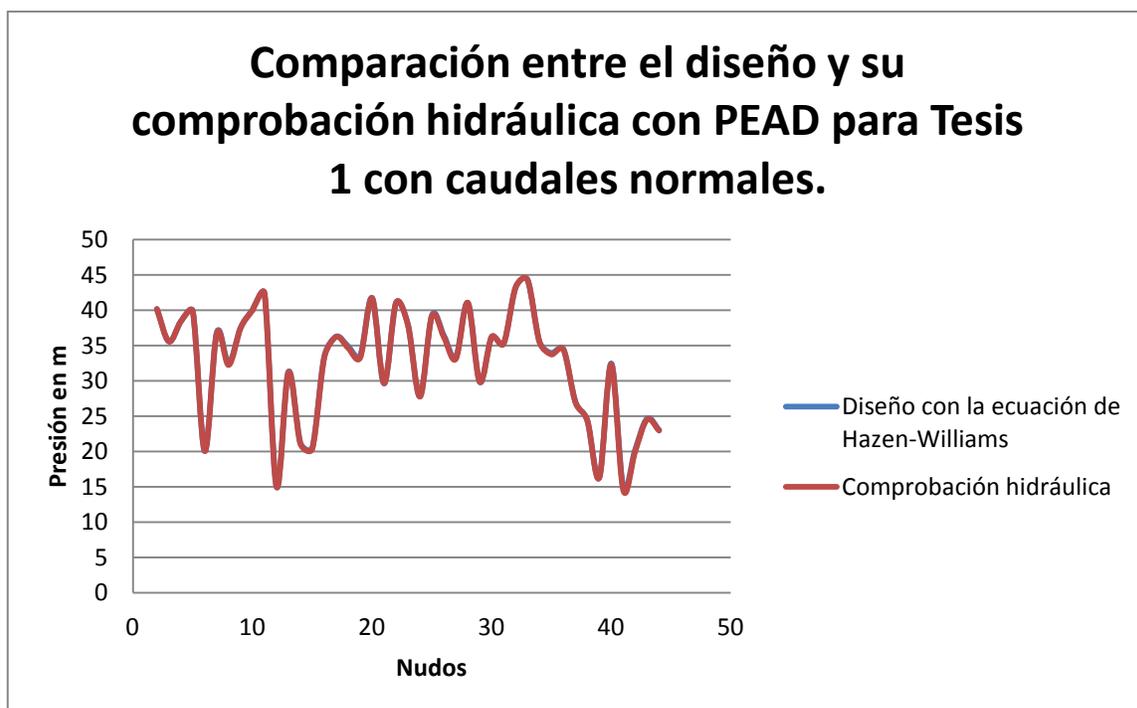
En los resultados con caudales normales se logró evidenciar que los costos presentaron la tendencia de las otras redes con excepción de PEAD, es decir, para hierro dúctil la red Tesis 1 presentó un diseño más económico cuando se diseñó con la ecuación de Hazen-Williams; a su vez el diseño con PVC resultó ser más económico con la ecuación de Darcy-Weisbach, aunque no tanto como en otras redes con los caudales normales; finalmente vino el caso de PEAD que presentó costos mucho más económicos al diseñar con Darcy-Weisbach.

Hidráulicamente la comprobación del diseño realizado con la ecuación de Hazen-Williams para hierro dúctil presentó incumplimiento de presión en un solo nudo y fue de menos de 1 m (**ver Ilustración 60**). Este resultado es extraño si se compara con los resultados obtenidos en otras redes, ya que el efecto de subestimación de las presiones no resultó tan evidente. Aun

así, el hecho de que se presente incumplimiento indica que los diseños con la ecuación de Hazen-Williams para hierro dúctil son peligrosos de utilizar.

El PVC cambio bastante con respecto a los resultados obtenidos en Balerma, Bogotá-Cazucá y R28, ya que en este caso no se evidenció una sobrestimación de las presiones en la comprobación hidráulica del diseño realizado con la ecuación de Hazen-Williams. Curiosamente los costos de la red mantuvieron la constante del trabajo y resultaron ser más económicos cuando se trabajó con la ecuación de Darcy-Weisbach, aun cuando no fue una diferencia tan grande.

En el PEAD para caudales normales se pudo evidenciar que aunque los costos resultaron mucho más baratos al utilizar la ecuación de Darcy-Weisbach, la hidráulica con la ecuación de Hazen-Williams no presente sobrestimación o incumplimiento de las presiones (**ver Ilustración 64**); estos resultados permiten concluir que aunque la hidráulica para las dos ecuaciones cumple con la normativa y no causa sobrepresiones dentro de la red, la distribución de diámetros entre los diseños es diferente, causando que el diseño con la ecuación de Hazen-Williams resulto más costoso que el de la ecuación de Darcy-Weisbach.



**ILUSTRACIÓN 83.COMPARACIÓN ENTRE EL DISEÑO Y SU COMPROBACIÓN.**

Los resultados con caudales duplicados mostraron que los costos para los 3 materiales presentaron un comportamiento inusual. Esto se ve reflejando en que la diferencia de costos entre las ecuaciones de diseño fue muy pequeña e insignificante (**ver Tabla 27**). Sin embargo,

este comportamiento pareció aislado dentro de este estudio y no representa una tendencia normal en los diseños de esta red.

Extrañamente al analizar el comportamiento hidráulico del hierro dúctil, se hizo mucho más evidente la subestimación de las presiones por parte de la ecuación de Hazen-Williams (**ver Ilustración 156**); en este caso se vio que el aumento de los caudales base de cada nudo si ejerció un efecto, y si se comparan las presiones que arroja el diseño original con la ecuación de Hazen-Williams frente a su comprobación hidráulica, se puede ver que esta ecuación está subestimando de forma alarmante las presiones en los Nudos, especialmente en los Nudos críticos de la red.

El PVC siguió el comportamiento de esta red con caudales normales, es decir, cuando se realizó la comprobación hidráulica del diseño que utilizó la ecuación de Hazen-Williams no se pudo evidenciar incumplimiento de las presiones mínimas o sobrestimación de presiones importantes (**ver Ilustración 158**). Y como se nombró anteriormente, para caudales duplicados tampoco se logró evidenciar una diferencia importante en los costos cuando se comparó la ecuación de Darcy-Weisbach con la ecuación de Hazen-Williams.

Los diseños con PEAD no presentaron sobrestimación de las pérdidas o incumplimiento de la presión mínima establecida cuando se realizó la comprobación hidráulica del diseño que utilizó la ecuación de Hazen-Williams (**ver Ilustración 160**). Los costos tampoco presentaron una gran diferencia entre los diseños con ambas ecuaciones. Todos estos resultados, junto con los resultados que se han obtenido de las otras redes corroboran el hecho de que no se evidencia un efecto negativo o benéfico al utilizar la ecuación de Hazen-Williams para PEAD.

Finalmente para caudales cuadruplicados, los costos presentaron una variación importante. Para empezar se hizo evidente que para hierro dúctil y PVC los diseños con la ecuación de Hazen-Williams resultaron más económicos que los diseños que utilizaron la ecuación de Darcy-Weisbach. Mientras que para los diseños del PEAD no se vio una diferencia grande en los diseños de las 2 ecuaciones, (**Ver Tabla 28**).

En el análisis hidráulico del hierro dúctil, se pudo ver que el aumento de los caudales causó que el efecto de la ecuación de Hazen-Williams se hiciera evidente, al revisar la comprobación hidráulica del diseño que utilizó la ecuación de Hazen-Williams (**ver Ilustración 163**); no solo se presentó en varios Nudos la subestimación de presiones, sino que varios de ellos incumplieron con la presión mínima que se estableció en la metodología de este proyecto. Adicionalmente en los costos se vio que el diseño con la ecuación de Hazen-Williams resultaba más tentador al presentar menores costos. Todo esto se ha venido repitiendo en las demás redes, lo que muestra una vez más que no es casualidad que la ecuación de Hazen-Williams arroje diseños más baratos pero que incumplen con los requerimientos hidráulicos establecidos. A su vez se confirma que un aumento importante en las demandas bases de los nudos causa que este efecto se vea incrementado.

Para el PVC se vio evidenciado que el diseño con la ecuación de Hazen-Williams resultó ser considerablemente más económico que el homólogo con la ecuación de Darcy-Weisbach. Pese

a obtener estos resultados en costos, hidráulicamente se observó que la ecuación de Hazen-Williams no presentó incumplimiento en la presión mínima de este trabajo, ni presentó sobrepresiones en sus nudos. Es claro que al igual que en un caso anterior, la distribución de diámetros en la red entre las dos ecuaciones sea la causante de la diferencia de costos.

Finalmente, y como se viene presentando en todo este trabajo de grado, los resultados para PEAD no presentaron ninguna diferencia en costos para las dos ecuaciones. Hidráulicamente tampoco se pudo establecer un efecto de subestimación o sobrestimación de las presiones al utilizar la ecuación de Hazen-Williams (**ver Ilustración 169**). Esto parece estar demostrando que no existe un efecto entre diseñar con la ecuación de Hazen-Williams o la ecuación de Darcy-Weisbach utilizando PEAD, salvo una pequeña diferencia de precios que no resulta significativa si se compara con el costo total de la red.

## 5.6 RED TESIS 2

Los resultados de la red Tesis 2 mostraron un comportamiento parecido al que se obtuvo con la red Tesis 1. Los costos para los tres caudales siempre mostraron un diseño más económico por parte de la ecuación de Hazen-Williams; el comportamiento del PVC y el PEAD fueron variables. La hidráulica de la red continuó su comportamiento con el hierro dúctil. Mientras que lo observado en red Balerma, Bogotá-Cazucá y R28 no se presentó para PVC y en el caso de PEAD los costos presentaron una variabilidad entre los diferentes caudales.

Los costos con caudales normales mostraron que el diseño de la red utilizando hierro dúctil con la ecuación de Hazen-Williams resultaba más económico que el diseño con la ecuación de Darcy-Weisbach. El PVC mostró un costo ligeramente más económico para la ecuación empírica que para la ecuación físicamente basada. Finalmente para PEAD se presentó una diferencia de costos entre las dos ecuaciones; sin embargo aunque el valor numérico de la diferencia parezca alto (**ver Tabla 16**), si se observa con detenimiento se ve que es una diferencia mínima con respecto a la magnitud global del costo de la red.

Hidráulicamente el hierro dúctil presentó la tendencia que se ha visto a lo largo de este proyecto de grado. Cuando se realizó la comprobación hidráulica del diseño que utilizó la ecuación de Hazen-Williams, se puede observar que un par de nudos se encuentran por debajo de la presión mínima establecida en este trabajo (**ver Ilustración 67**). Al presentarse este comportamiento, es posible afirmar que la ecuación de Hazen-Williams está subestimando las pérdidas por fricción ya sea porque su coeficiente de 140 está representando al material más liso de lo que realmente es o por que al ser una ecuación empírica se está saliendo de sus rangos óptimos de cumplimiento (zona de transición del flujo turbulento). Este comportamiento parece estar relacionado con el bajo costo de la red, ya que al calcular erróneamente las pérdidas en la tubería asigna un diámetro más pequeño que el que asignaría la ecuación físicamente basada de Darcy-Weisbach, llevando a que los costos con la ecuación empírica sean menores.

El PVC presentó un comportamiento diferente al que se observó en red Balerma, Bogotá-Cazucá y R28, pero presentó un comportamiento similar al observado en San Vicente y Tesis 1. Cuando se realizó la comprobación hidráulica al diseño de Hazen-Williams, no se puede observar un incumplimiento de la normativa o una sobrestimación de las presiones. Este comportamiento variable entre las diferentes redes parece indicar que las características de la red parecen incidir en la sobrestimación de las pérdidas por parte del PVC cuando se utiliza la ecuación de Hazen-Williams.

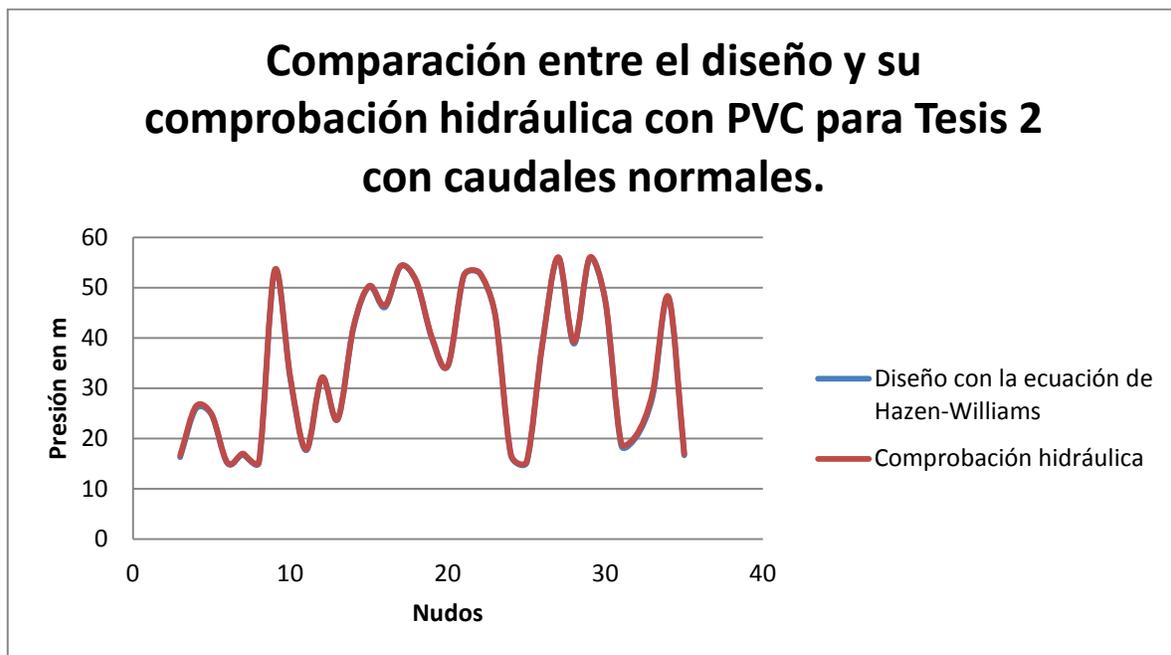


ILUSTRACIÓN 84.COMPARACIÓN ENTRE EL DISEÑO Y SU COMPROBACIÓN.

El PEAD presenta resultados similares a los que se han observado en todo este trabajo; cuando se realiza la comprobación hidráulica, no se logra evidenciar una sobrestimación de presiones o un incumplimiento de los diferentes requerimientos hidráulicos establecidos. Curiosamente es posible ver que se presenta una diferencia de costos entre los dos diseños; sin embargo esta se debe a que en algunos tramos no críticos de la red se presentaron diámetros mayores, esto combinado con el hecho de que los costos del PEAD sean los más altos causan que se genere una diferencia notoria entre los dos diseños sin que se afecte la hidráulica de forma dramática.

Cuando se analizaron los costos con los caudales duplicados fue posible observar que una vez más los costos para hierro dúctil seguían siendo más económicos cuando se utiliza la ecuación de Hazen-Williams para sus diseños. Para PVC se presentó un cambio importante; el diseño que se realizó con la ecuación de Hazen-Williams presentó un costo considerablemente más alto que el arrojado por el diseño con la ecuación de Darcy-Weisbach (**ver Tabla 29**). Finalmente el PEAD presentó un costo mayor para el diseño con la ecuación de Darcy-Weisbach.

La hidráulica para el hierro dúctil con los caudales duplicados presentó un cambio, cuando se comprobó la hidráulica del diseño que utilizó la ecuación de Hazen-Williams; se evidenció que más Nudos presentaron subestimación en las presiones, en otras palabras, más nudos en la red presentaron presiones menores a las que el diseño original con la ecuación de Hazen-Williams arrojaba (**ver Ilustración 173 e Ilustración 172**). Esto parece apoyar el hecho de que al aumentar las demandas base de los Nudos se esté haciendo más evidente el efecto negativo de aplicar la ecuación de Hazen-Williams con hierro dúctil.

El caso del PVC fue bastante peculiar, ya que al duplicar los caudales base no implicó que se presentara una sobrestimación importante de las presiones (un máximo del 4 % con respecto al diseño original utilizando la ecuación de Hazen-Williams). Esto significa que al realizar la comprobación hidráulica del diseño de Hazen-Williams, no se logró ver ningún efecto hidráulico frente a lo que arrojaba el diseño original con esta ecuación (**ver Ilustración 174 e Ilustración 175**). Sorpresivamente este efecto hidráulico no repercutió en los costos; todo se debió a que en los tramos largos, pero no críticos de la red se presentaron diámetros mayores con la ecuación de Hazen-Williams que con la ecuación de Darcy-Weisbach; esto llevó a que los costos se elevaran de gran forma dentro de la red sin que esto afectara la hidráulica de la misma.

Para PEAD no parecen haber efectos evidentes al utilizar la ecuación empírica de Hazen-Williams (**ver Ilustración 176 e Ilustración 177**), las presiones que arroja el diseño con la ecuación de Hazen-Williams frente a la comprobación del mismo utilizando la ecuación de Darcy-Weisbach no muestran una diferencia significativa. Los costos como se ha visto a través de esta tesis parecen no mostrar una diferencia importante cuando se comparan con el costo global de la red; sin embargo estas pequeñas diferencias están dadas por los altos costos (diámetro-metro de tubería) del PEAD, que al ser aumentados en tramos largos y no críticos de la red, aumentan significativamente el costo sin afectar la hidráulica de la misma.

Al realizar el análisis con los caudales cuadruplicados se puede observar que para los 3 materiales los diseños con la ecuación de Hazen-Williams resultaron más económicos. El fenómeno de que en tramos largos pero no críticos de la tubería se estén presentando diámetros más grandes con la ecuación de Darcy-Weisbach es el que está explicando este comportamiento de los costos.

La hidráulica en el diseño con el hierro dúctil cambió con respecto a los caudales duplicados; si bien se siguen presentando la subestimación de presiones en los nudos (al analizar la comprobación de la hidráulica del diseño que utilizó la ecuación de Hazen-Williams), en este caso en particular se presentó en más Nudos que cuando se analizaron los caudales normales y los caudales duplicados (**ver Ilustración 180**). Esto parece una vez más apoyar lo evidenciado en otras redes con caudales cuadruplicados, y es que este aumento de las demandas base de los nudos este agudizando el efecto de subestimación por parte de la ecuación de Hazen-Williams.

En el caso del PVC se vio una pequeña sobrestimación de las presiones cuando se realizó la comprobación hidráulica de la red diseñada con la ecuación de Hazen-Williams (**ver**

**Ilustración 183).** Este hecho es importante resaltarlo principalmente porque este efecto no se había presentado en lo absoluto con los caudales normales ni con los caudales duplicados en esta red, si bien la sobrestimación de las pérdidas solo alcanzo un máximo del 12% frente a lo que arrojó originalmente la ecuación de Hazen-Williams; esto muestra que en efecto la ecuación empírica puede sobrestimar la presiones en varios Nudos de la red. Aun en presencia de este efecto, los costos con la ecuación de Darcy-Weisbach resultaron más elevados, y es por el fenómeno que se nombró al principio de este análisis con caudales cuadruplicados.

Parece ser que el caso del PEAD no presenta cambios con respecto a las demás redes, cuando se compara la comprobación hidráulica del diseño realizado utilizando la ecuación de Hazen-Williams no se puede evidenciar un efecto de sobrepresiones o de subestimación de las mismas (**ver Ilustración 186**). Por otro lado los altos costos presentados con el diseño de Darcy-Weisbach, están asociados con ligero aumento de los diámetros en tramos largos y no críticos sumados con los altos costos del PEAD.

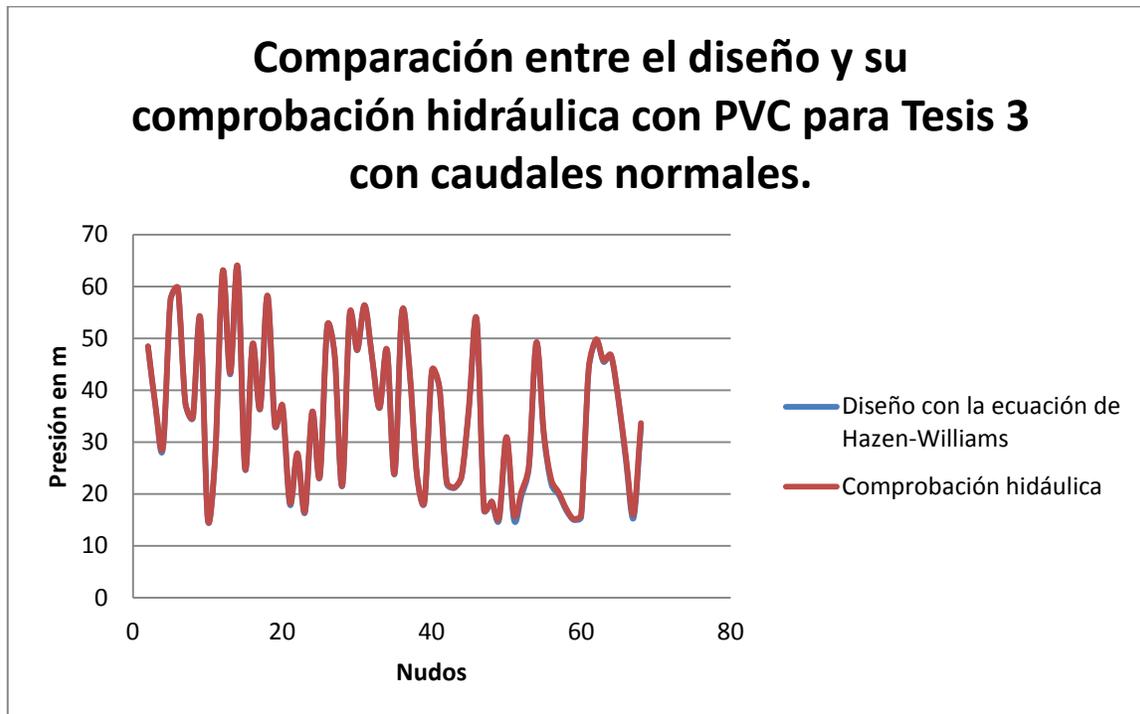
### 5.7 RED TESIS 3

Esta red presentó tendencias muy similares a las de red Tesis 1 y red Tesis 2 para el PVC en cuanto a la hidráulica de la red. El PEAD siguió con su comportamiento, es decir, se comportó como en la mayoría de las redes de este trabajo. El hierro dúctil siguió presentando diseños más económicos cuando se utilizó la ecuación de Hazen-Williams, presentando a su vez la misma subestimación de presiones.

Los caudales normales presentaron que el diseño utilizando la ecuación de Hazen-Williams para hierro dúctil arrojaba costos menores. Sin embargo al ver los costos con PVC y PEAD, se ve que esta tendencia desaparece y la diferencia entre ambos diseños no es evidente.

La hidráulica de la red para el material hierro dúctil presentó el mismo comportamiento de las otras redes. Al analizar la comprobación de diseño (de la red diseñada con Hazen-Williams), está presentó subestimación de las presiones en algunos Nudos de la red. Esto termina de corroborar lo visto en las otras redes, y es que la ecuación de Hazen-Williams que trabaja con un coeficiente constante de 140 subestima las pérdidas por fricción, generando diseños más económicos pero que incumplen con la presión mínima establecida.

En el caso del PVC se presentó una sobrestimación no superior al 7% cuando se comprobó la hidráulica de la red diseñada con Hazen-Williams. En esta ocasión este resultado se ve en reflejado en los costos, ya que estos no presentaron una variación significativa entre la ecuación empírica y la físicamente basada. Parece ser que al diseñar redes como Tesis 1, Tesis 2 y Tesis 3 con caudales normales, la ecuación de Hazen-Williams está operando dentro de sus rangos de cumplimiento presentando diferencias mínimas cuando se compara con la ecuación de Darcy-Weisbach.



**ILUSTRACIÓN 85 COMPARACIÓN ENTRE EL DISEÑO Y SU COMPROBACIÓN.**

El PEAD no presenta subestimación o sobrestimación de las presiones cuando se comprueba la hidráulica del diseño de Hazen-Williams. Esto muestra que los diseños con este material, independientemente del caudal demandado, se encuentran dentro de los rangos de cumplimiento de la ecuación empírica. Esto implica que no es relevante la ecuación que se utilice para diseñar ya que ambas cumplen con los requerimientos hidráulicos.

Cuando se analizan los caudales duplicados se puede ver que solo se presenta una diferencia de costos importante en PEAD con respecto a los costos con caudales normales. El hierro dúctil presentó igualmente un diseño más económico cuando se utilizó la ecuación de Hazen-Williams aunque no fue muy significativa. Así mismo el PVC presentó costos similares al comparar las dos ecuaciones.

En el análisis hidráulico se puede ver que para hierro dúctil, se presenta una subestimación de presiones cuando se comprueba el diseño de Hazen-Williams (**ver Ilustración 190**). Si bien esta subestimación se presenta en un nudo, este nudo excede por mucho la presión mínima de la red; la presión que se presenta es de 12 m en comparación con la presión mínima de 15 m. Esta subestimación se ve reflejada en menores diámetros que causa que en efecto se reduzcan los costos de la red pero que se incumplan con las necesidades hidráulicas de la misma.

El caso del PVC no muestra resultados concluyentes; cuando se analiza la comprobación hidráulica de la red diseñada con Hazen-Williams, se puede ver que no se incumple ni se sobrestima con las presiones de la red. Si bien este resultado contrasta con lo encontrado en

red Balerma, Bogotá-Cazucá y R28, no está muy alejado de los resultados con estos mismos caudales para Tesis 1 y Tesis2.

El PEAD presentó una hidráulica similar cuando se comprobó la red diseñada con Hazen-Williams. Sin embargo, cuando se vieron los costos finales de la red, se vio que la diferencia entre el diseño con la ecuación de Hazen-Williams y Darcy-Weisbach era abismal siendo este último casi 230 millones de pesos más económico. Este sobre costo se debió a que en los tramos más largos de la tubería se presentaron diferencias importantes de diámetros, esto causó que el costo se elevara bastante sin incumplir con los requerimientos hidráulicos. Sin embargo la ecuación de Darcy-Weisbach utilizando diámetros menores, logró obtener un diseño óptimo (presiones cercanas 15 m) y no tan conservador como el de la ecuación empírica.

Cuando se cuadruplicaron los caudales solo se presentó un ahorro de recursos en hierro dúctil al utilizar la ecuación de Hazen-Williams. Para los otros dos materiales no fue evidente una diferencia importante en los costos de diseños **(ver Tabla 32)**.

El análisis hidráulico con los caudales cuadruplicados mostró que para hierro dúctil el efecto de subestimación de las presiones por parte de la ecuación de Hazen-Williams se incrementara notoriamente **(ver Ilustración 197)**. A su vez, esta subestimación de las presiones y las pérdidas por fricción causó que los diseños resultaran más económicos y que incumplieran en más de un 40% de los Nudos con la presión mínima establecida.

Hidráulicamente el PVC no mostró subestimaciones de las presiones y un máximo de 8% en las sobrestimaciones de las presiones de la red cuando se analizaron los caudales cuadruplicados **(ver Ilustración 200)**. Esta diferencia tan pequeña a su vez se vio plasmada en los costos, que si bien arrojaban un diseño más económico con la ecuación de Darcy-Weisbach, no era significativa y resultaba prácticamente igual diseñar con la ecuación físicamente basada o con la ecuación empírica.

Finalmente el PEAD mostró costos e hidráulica similares a los que se presentaron en caudales normales y duplicados; así mismo el comportamiento que se logró evidenciar en los resultados demuestra lo que se ha venido mostrando en todas las redes de este trabajo, y es que el PEAD no tiene un efecto claro de subestimación o de sobrestimación de las presiones en los Nudos de la red **(ver Ilustración 203)**. Esto lleva a que tampoco se vea una diferencia clara en los costos de diseño de la red Tesis 3, ya que tanto la ecuación de Hazen-Williams como la ecuación de Darcy-Weisbach están evaluando las pérdidas por fricción de manera similar, sus diseños no son tan diferentes y solo presentan cambios en algunos tramos poco importantes de la red.

## 5.8 RESUMEN DE RESULTADOS

Resultados Obtenidos		Caudales		
		Normales	Duplicados	Cuadruplicados
M a t e r i a l e s	Hierro Dúctil	Se obtienen menores costos con la ecuación de Hazen-Williams pero no cumplen los requerimientos de presiones. Los números de Reynolds de estas redes oscilaban entre los 7000 y un máximo de 1'750.000.	Al igual que en caudales normales se ve el mismo fenómeno. Los números de Reynolds aumentaron considerablemente frente a los caudales normales se encontraron entre los 20000 y lo 2'800.000	La tendencia permaneció en todo el trabajo de que se incumplieran las presiones con la ecuación empírica pese a que presentara costos menores. Los rangos de Reynolds que se presentaron estuvieron entre los 70000 y los 5'000000.
	PVC	El PVC no mostro una diferencia clara entre los dos diseños. Sin embargo algunas redes diseñadas con la ecuación empírica presentaron sobrestimación de las presiones lo que implicaba una diferencia entre los costos de diseños. Los rangos de Reynolds estaban entre los 5000 y los 2'300.000.	Con los caudales duplicados la sobrestimación de las presiones se hizo más evidente. A pesar de esto no todas las redes presentaron este fenómeno y las que lo presentó solo una leve diferencia de costos no superior al 20%. Los números de Reynolds asociados a estos caudales rondaron entre 12000 y los 4'750.000.	Los caudales cuadruplicados incrementaron aun más la tendencia de sobrestimación de las presiones. Si bien no todas las redes lo presentaron, el fenómeno se hizo presente en varios de los diseños causando que en los que se presentó se encontraran costos mayores al utilizar la ecuación de Hazen-Williams. Los números de Reynolds encontrados oscilaron entre 15000 y los 4'000000.
	PEAD	El PEAD no presento ningún tipo de diferencia en su comportamiento hidráulico o en sus costos al comparar ambas ecuaciones salvo en 2 excepciones donde los costos se aumentaron debido a una leve sobrestimación de las presiones por parte de la ecuación de Hazen-Williams. Los rangos del número de Reynolds oscilaron entre 4000 y 2'800000. Aunque existieron un par de tuberías aisladas en 2 redes que presentaron Reynolds inferiores a 2000.	Siguiendo la tendencia de los caudales normales, estos diseños tampoco presentaron una diferencia clara cuando se compararon las dos ecuaciones tanto en la parte hidráulica como en los costos. Los números de Reynolds oscilaron entre los 5000 y 3'200000. Una vez más se volvieron a presentar algunos tramos de tubería con números de Reynolds inferiores a los 2000 lo que llevaría a que el flujo fuera laminar.	Finalmente con los caudales cuadruplicados tampoco se evidenciaron diferencias notorias entre los diseños al comparar las dos ecuaciones. Sus números de Reynolds variaron entre los 3000 y los 3'700000. Con un par de nodos con valores cercanos a los 2000. La mayoría de estos resultados parecen encontrarse dentro del rango sugerido por Christensen (B.A. Christensen, 2000). En los anexos se encuentran diagramas de Moody donde se pueden ver los factores de fricción de las comprobaciones de diseño.

**TABLA 18. RESUMEN DE RESULTADOS ENCONTRADOS EN EL PROYECTO.**

---

## CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES

---

- Los resultados permiten concluir que las redes diseñadas con la ecuación de Hazen-Williams utilizando hierro dúctil resultaban más económicos que los diseños con la ecuación de Darcy-Weisbach para esta ecuación. A pesar de esto, también fue evidente que la reducción de costos fue consecuencia de una subestimación de las presiones por parte de la ecuación empírica.
- El PEAD no mostró ningún efecto importante. Esto se vio reflejado en que los costos con PEAD variaron para la mayoría de las redes, y el utilizar una ecuación sobre otra no implicaba tener un diseño más económico ni más óptimo. Así mismo la hidráulica tampoco arrojó resultados que diferenciaron el efecto de utilizar la ecuación de Hazen-Williams frente a la ecuación de Darcy-Weisbach.
- Los resultados para el PVC en todas las redes muestran resultados contradictorios. Si bien se pueden presentar sobrestimaciones por parte de la ecuación de Hazen-Williams en algunos diseños (redes: Balerma, Bogotá-Cazucá y R28), este comportamiento no fue generalizado, y en otras redes no se pudo observar esta tendencia.
- El efecto de los caudales en los resultados solo se hizo evidente en el caso del hierro dúctil donde se hacía más evidente la subestimación de las pérdidas y las presiones en la red (caso de la ecuación de Hazen-Williams) al aumentar las demandas bases de los Nudos. Para el caso del PVC, solo con caudales cuadruplicados se pudo observar un cambio en las sobrestimaciones de las presiones.
- Con base a los resultados del hierro dúctil y del PVC, es posible afirmar que utilizar la ecuación de Hazen-Williams genera resultados hidráulicos indeseados en la práctica de la ingeniería. No solo porque todas las redes presentaron falencia de presiones cuando se diseñaron con la ecuación de Hazen-Williams en hierro dúctil, sino porque se presentaron sobrestimaciones de presiones por parte de esta ecuación cuando se utilizó el PVC en 3 redes de este trabajo.
- Los métodos computacionales permiten una solución rápida a la obtención del factor de fricción de la ecuación de Colebrook-White. Adicionalmente la iteración necesaria para la ecuación de Darcy-Weisbach deja de ser un problema, ya que existen nuevas tecnologías y equipos de cómputo que lo solucionan en segundos, haciendo innecesario el uso de la ecuación de Hazen-Williams, y ahorrarse el trabajo de verificar si su coeficiente de Hazen-Williams es el indicado o si el diseño se encuentra dentro de los rangos de cumplimiento.
- Se concluye que la normativa colombiana es muy laxa en la regulación de los diseños con Hazen-Williams. Si bien el RAS especifica que esta ecuación solo se debe de utilizar para sus límites establecidos, esta normativa no especifica cuáles son los rangos de cumplimiento.

---

## CAPÍTULO 7 RECOMENDACIONES

---

- Los resultados de este trabajo debe de ser verificados con datos de campo para asegurar su validez como investigación; en otras palabras, es recomendable trabajar una red que se halla diseñado con la ecuación de Hazen-Williams, con caudales reales y comparar sus resultados para el modelo computacional y los datos en campo.
- Si se desea utilizar la ecuación de Hazen-Williams para los diseños de acueductos, es importante tener en cuenta sus rangos de validez y tener una lista de coeficientes de Hazen-Williams en vez de solo uno, ya que como se mostró en los resultados y en el análisis de este trabajo, utilizar un único valor para este coeficiente puede representar erróneamente las características del material y llevar a errores de subestimación de las pérdidas por fricción.
- Tal como lo recomendó Rafael Alejandro Flechas en su tesis, el autor también recomienda que se utilicen otras metodologías para la validación de los datos; esta puede ser la Búsqueda de Armonía, Algoritmos Genéticos e inclusive el diseño rápido para ver si los efectos vistos en esta tesis se repiten.
- Se recomienda endurecer la normativa colombiana en cuanto al uso de la ecuación de Hazen-Williams, ya que existe suficiente evidencia científica para mostrar los riesgos si se usa por fuera de sus rangos de cumplimiento.
- Estudiar más a fondo el coeficiente del hierro dúctil ya que los resultados de este trabajo parecen mostrar que está representando al material mucho más liso de lo que en la realidad es.
- En el caso del PVC, es importante verificar si la sobrestimación de las presiones en los Nudos se repite en redes reales. Como se mostró en este trabajo varias redes diseñadas con PVC utilizando la ecuación de Hazen-Williams presentaron este fenómeno y es idóneo verificarlo con alguna red real o con datos de campo.
- Continuar esta investigación con redes que presenten más de 3 años de edad sería ideal, ya que se podría estudiar más afondo la hidráulica de las mismas, en especial para redes que hayan sido con la ecuación empírica de Hazen-Williams y un solo coeficiente.
- Se recomienda verificar los resultados del PEAD con algún otro método, ya que como se mostró en el análisis y en los resultados, los diseños con este material no parecen mostrar un efecto adverso ni en los costos al utilizar la ecuación de Hazen-Williams para sus diseños.

---

## BIBLIOGRAFÍA

---

- B.A. Christensen, F. A. (2000). Discussion Limitations and proper use of the Hazen-Williams Equation. *Journal of hydraulics engineering* , 167-170.
- Empresas Públicas de Medellín. (2006-2009). <http://es.scribd.com>. Recuperado el 10 de Febrero de 2012, de <http://es.scribd.com>: <http://es.scribd.com/doc/35115401/Normas-Acueducto-Vesion-Final>
- Fabián A. Bombardelli, M. H. (2003). Hydraulic Design of Large-Diameter Pipes. *Journal of Hydraulic Engineering* , 839-846.
- Gardner Williams, A. H. (1905). *Hydraulic Tables*. Library of the University of California.
- Liou, C. P. (1998). LIMITATIONS AND PROPER USE OF THE HAZEN-WILLIAMS EQUATION. *Journal of hydraulics Engineering* , 951-954.
- M. Moghazi, H. E.-D. (1998). Estimating Hazen-Williams Coefficient for Polyethylene Pipes. *Journal of Transportation Engineering* , 197-199.
- Ministerio de Desarrollo Economico. (2000). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico Título B*. Bogotá: Ministro de desarrollo Economico.
- Ochoa, S. (2009). *DISEÑO OPTIMIZADO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE CON BASE EN EL CONCEPTO ENERGÉTICO DE SUPERFICIE ÓPTIMA DE GRADIENTE HIDRÁULICO*. Bogota: Uniandes.
- PAVCO. (2012). *LISTA DE PRECIOS*. Bogota: PAVCO.
- PAVCO. (2011). *Manual Técnico Tubosistemas para ACUEDUCTO Union de Platino y Alta presión Acometidas Domiciliarias PF+UAD*. Bogota: PAVCO.
- PAVCO. (2011). *Manual Técnico Tubosistemas PEAD para Conduccion de Agua Potable ACUFLEX*. Bogota: PAVCO.
- Quentin B. Travis, L. W. (2007). Relationship between Hazen-Williams and Colebrook-White Roughness Values. *Journal of Hydraulic Engineering* , 1270-1273.
- Saint-Gobain PAM . (2012). *Tuberías, válvulas y accesorios en hierro dúctil para sistemas de acueducto, alcantarillado, riego e industrial Hydroclass*. Bogota: PAM.
- Saldarriaga, J. G. (2007). *Hidráulica de Tuberías Abastecimiento de agua, redes, riesgos*. Bogotá: Alfaomega.
- Valiantzas, J. D. (2008). Explicit Power Formula for the Darcy-Weisbach Pipe Flow Equation: Application in Optimal Pipeline Design. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* , 454-461.

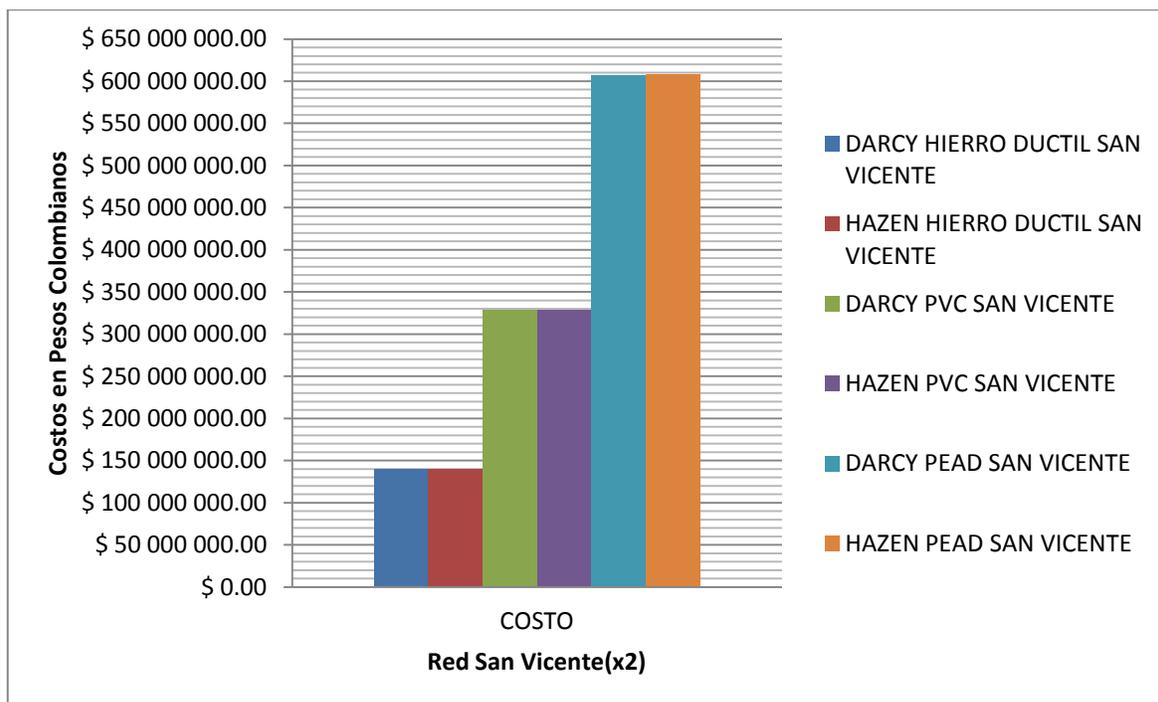
## ANEXOS

En esta sección se encuentran los resultados para caudales duplicados y cuadruplicados para todas las redes que se trabajaron durante el proyecto.

- Costos

COSTOS \$	RED SAN VICENTE CAUDALES X2		
	HIERRO DÚCTIL	PVC	PEAD
HAZEN-WILLIAMS	\$ 139 187 498.00	\$ 328 624 925.00	\$ 607 495 979.00
DARCY-WEISBACH	\$ 139 728 065.00	\$ 328 624 925.00	\$ 607 245 431.00
DIFERENCIA	\$ (540 567.00)	\$ -	\$ 250 548.00

**TABLA 19. COSTOS DE LA RED SAN VICENTE CON CAUDALES DUPLICADOS**



**ILUSTRACIÓN 86. GRÁFICA DE COSTOS RED SAN VICENTE CAUDALES DUPLICADOS.**

- Resultado de presiones con Hierro Dúctil

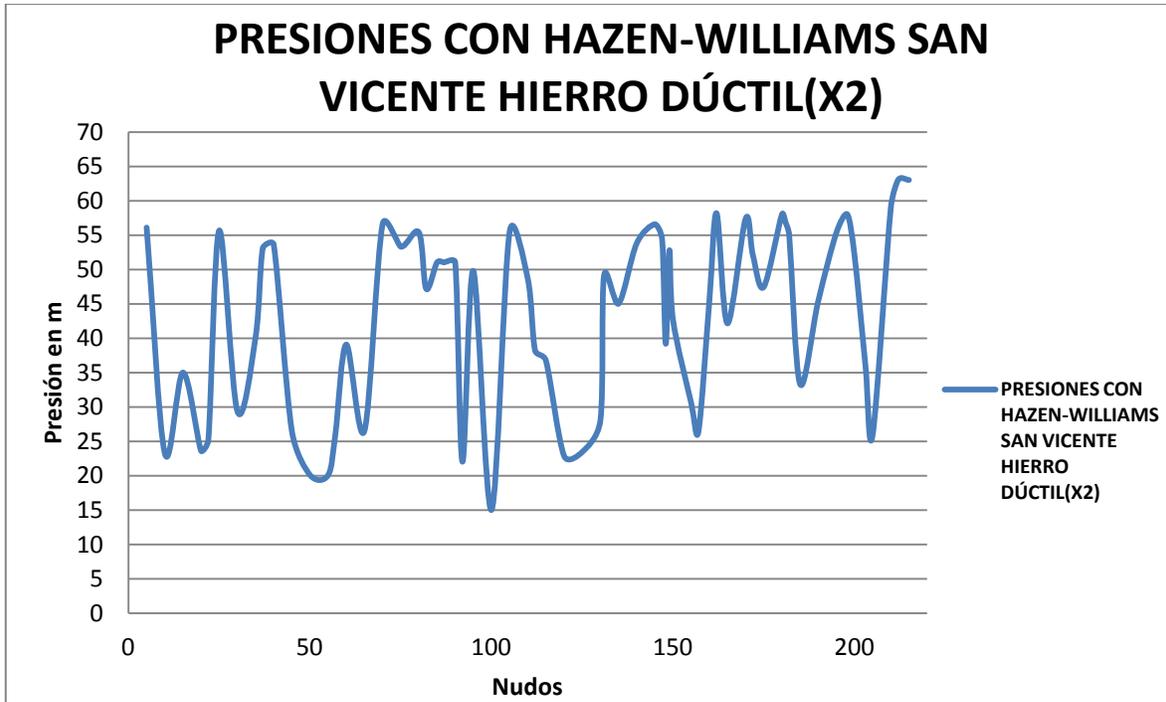


ILUSTRACIÓN 87. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA HIERRO DÚCTIL.

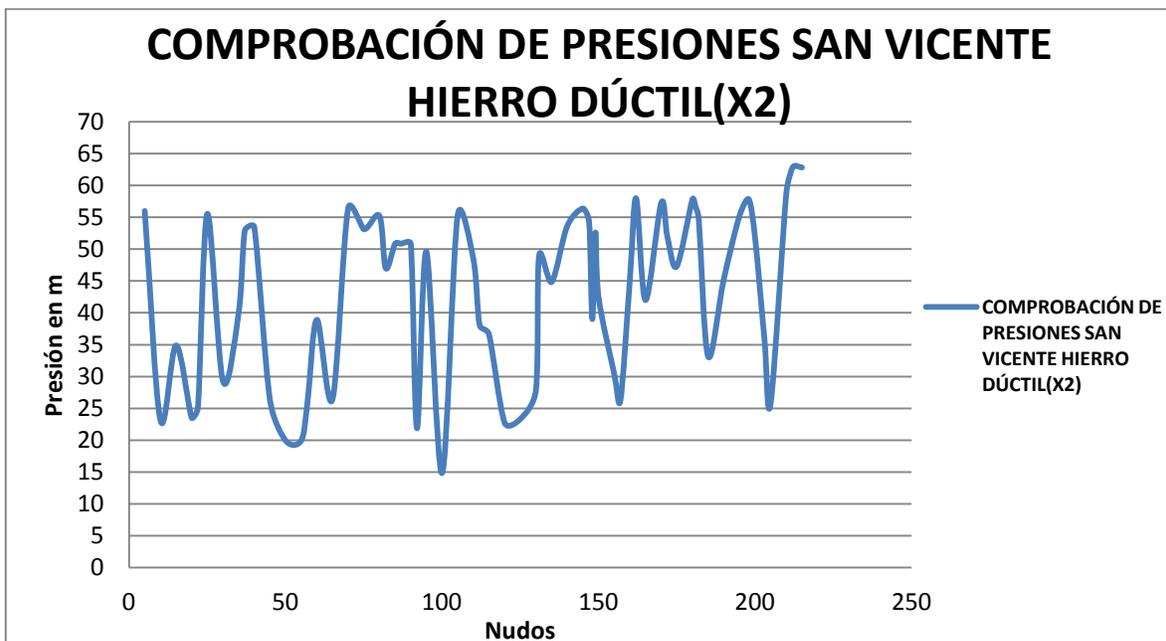


ILUSTRACIÓN 88. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUES DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACION DE DARCY-WEISBACH PARA HIERRO DÚCTIL.

- Resultados de presiones con PVC.

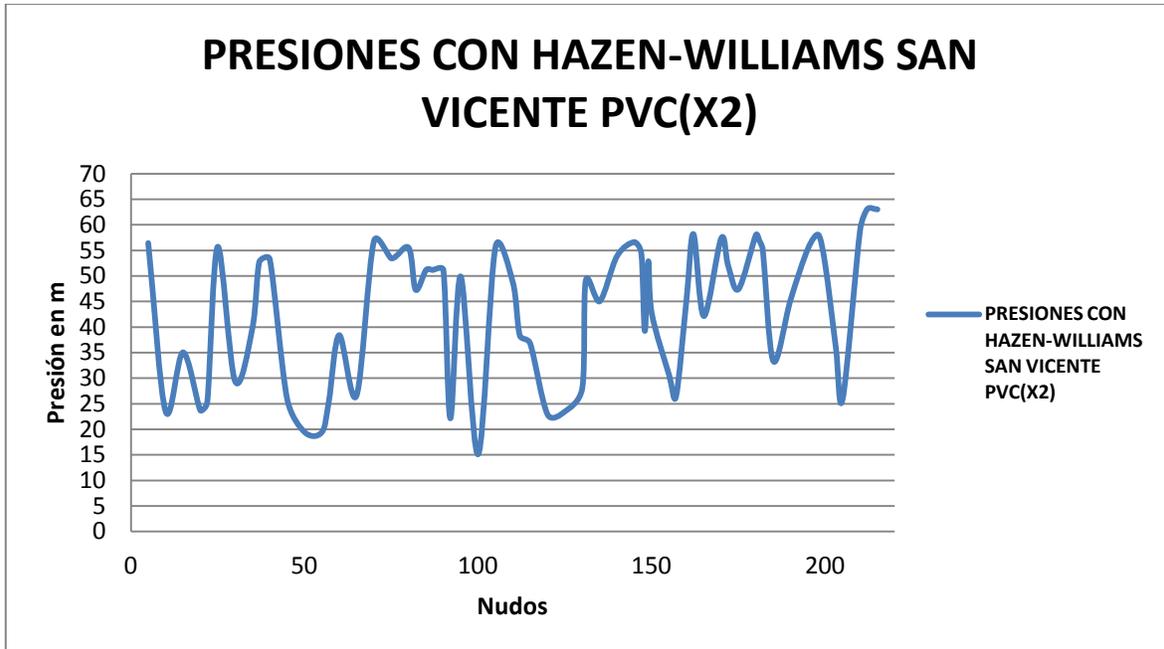


ILUSTRACIÓN 89. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA PVC.

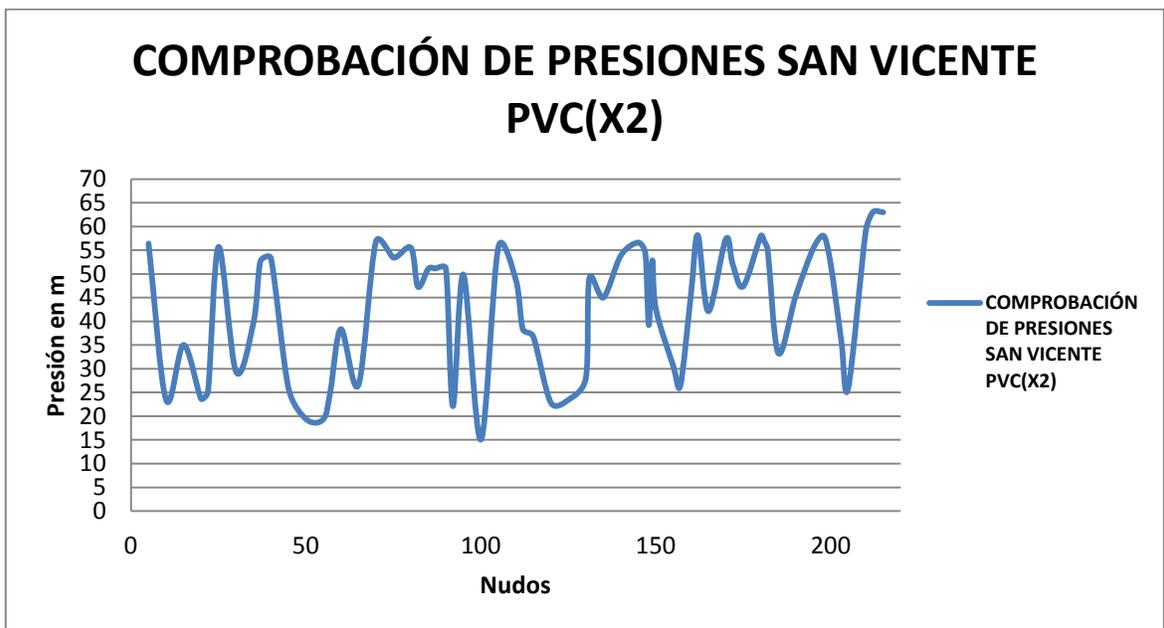


ILUSTRACIÓN 90. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PVC.

- Resultados de presiones para PEAD.

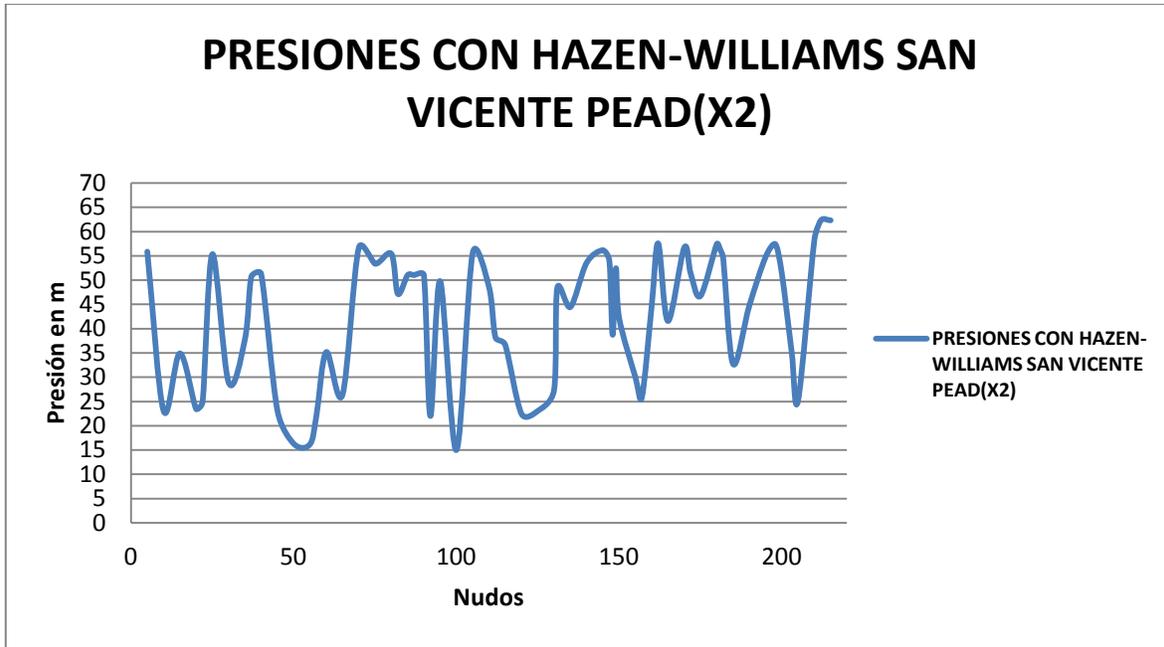


ILUSTRACIÓN 91. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA PEAD.

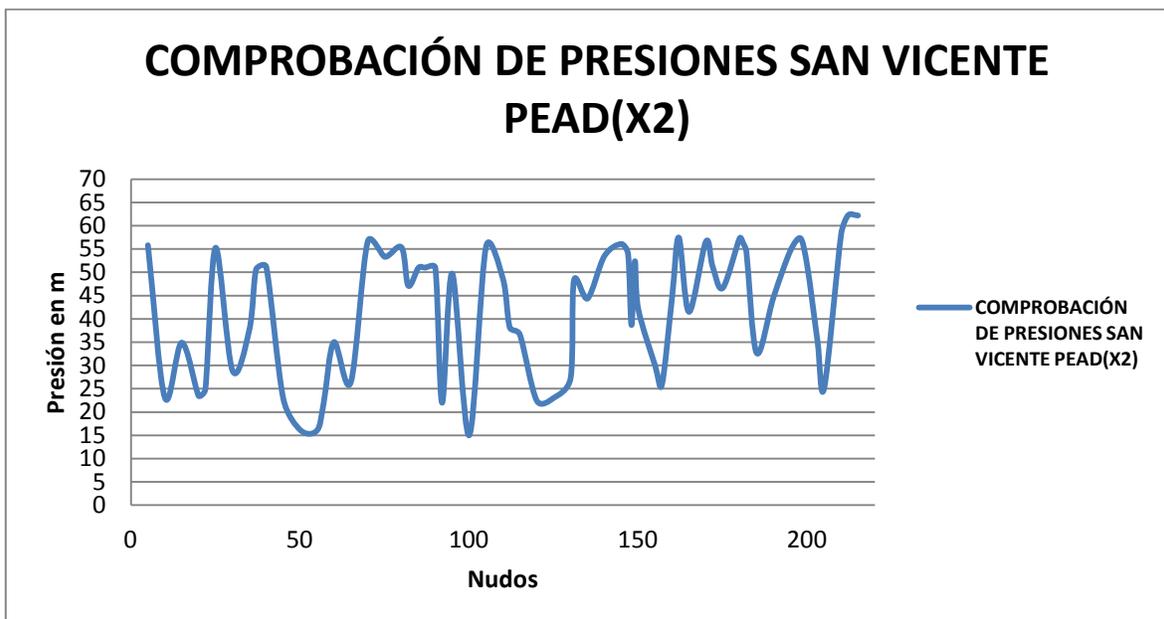
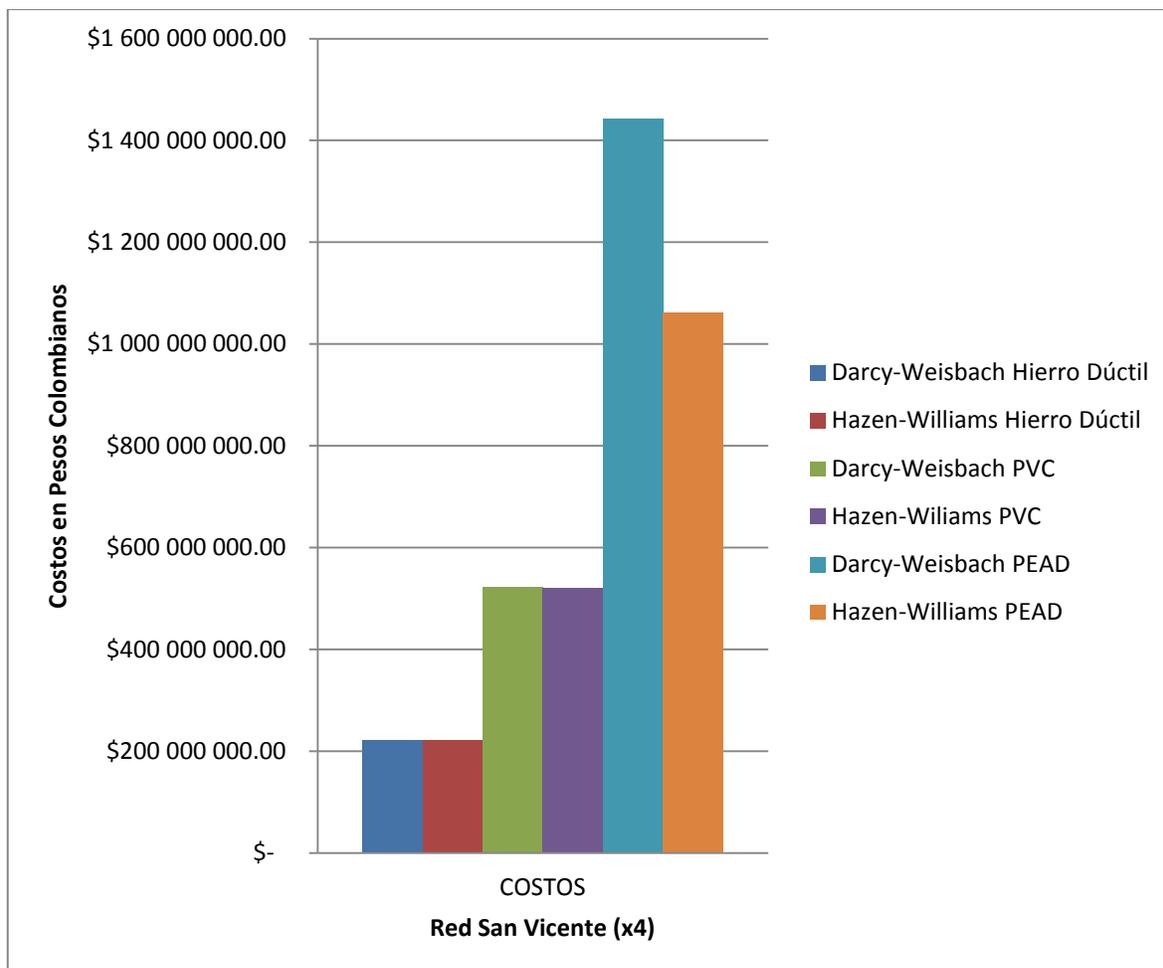


ILUSTRACIÓN 92. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PEAD.

- Costos.

	RED SAN VICENTE CAUDALES X4		
COSTOS \$	HIERRO DÚCTIL	PVC	PEAD
HAZEN-WILLIAMS	\$ 221 887 880.00	\$ 521 468 802.00	\$ 1 062 612 088.00
DARCY-WEISBACH	\$ 222 059 591.00	\$ 522 339 619.00	\$ 1 443 096 528.00
DIFERENCIA	\$ (171 711.00)	\$ (870 817.00)	\$ (380 484 440.00)

**TABLA 20. COSTOS DE LA RED SAN VICENTE CON CAUDALES CUADRUPLICADOS.**



**ILUSTRACIÓN 93. GRÁFICA DE COSTOS RED SAN VICENTE CON CAUDALES CUADRUPLICADOS.**

- Resultados de presiones para Hierro Dúctil

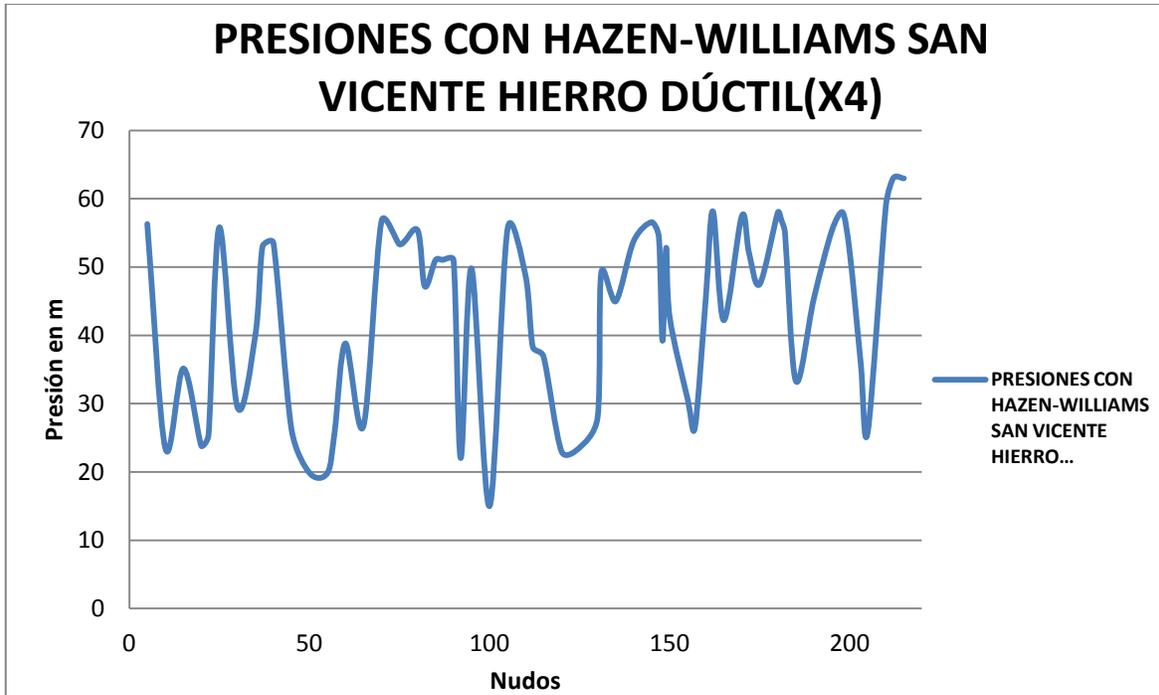


ILUSTRACIÓN 94. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA HIERRO DÚCTIL.

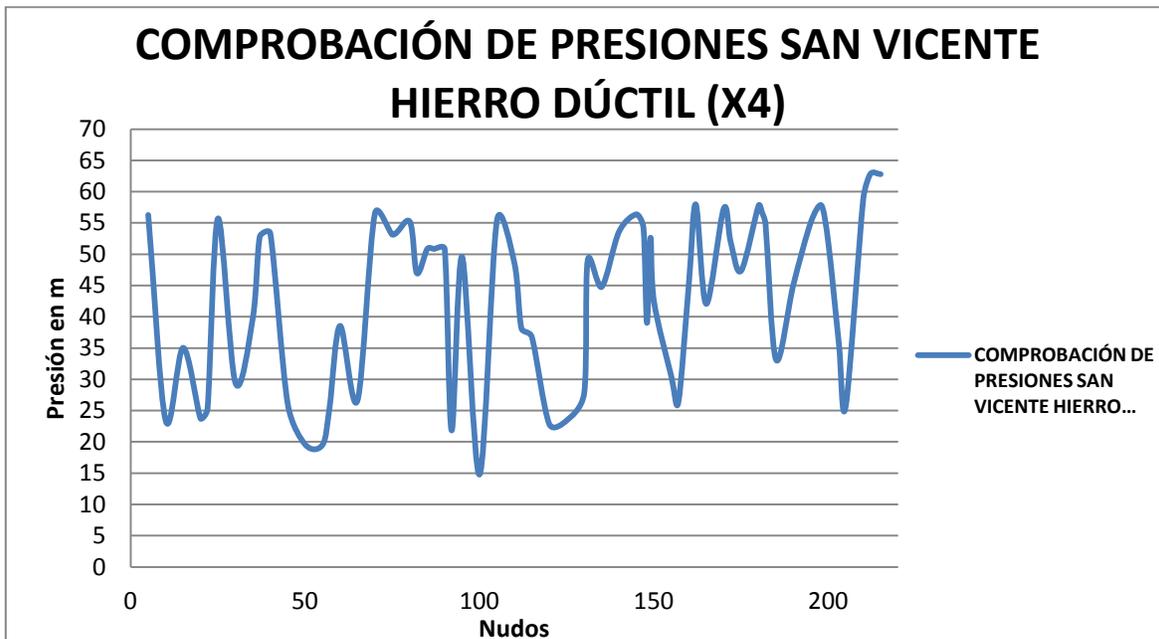


ILUSTRACIÓN 95. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA HIERRO DÚCTIL.

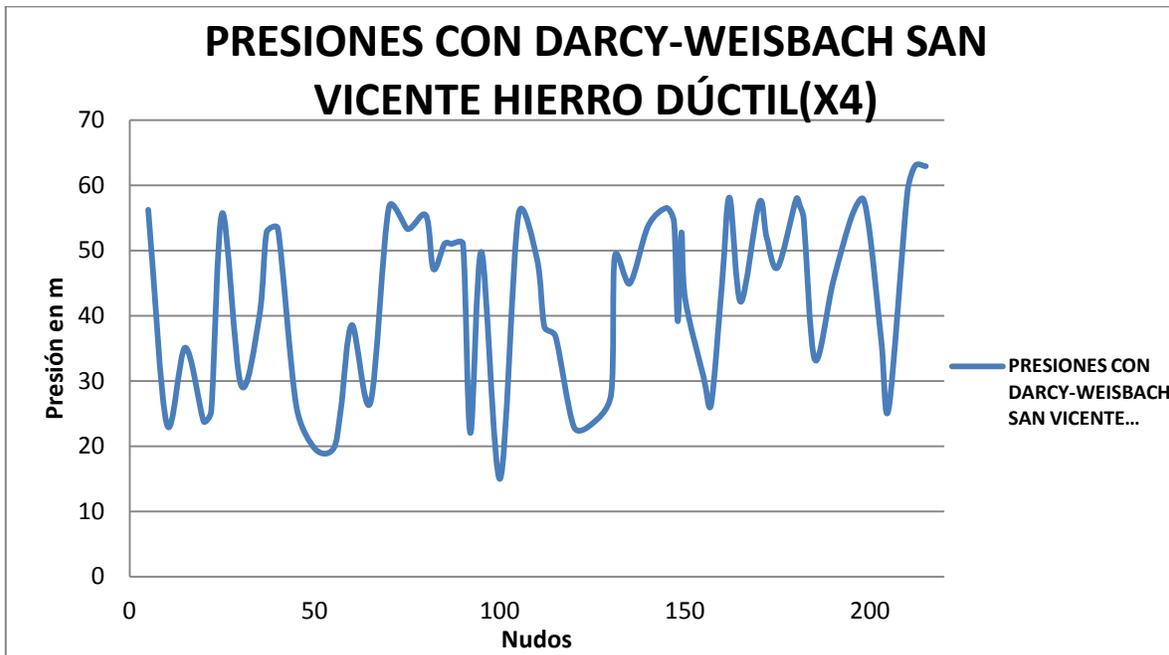


ILUSTRACIÓN 96. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA HIERRO DÚCTIL.

- Resultados para PVC

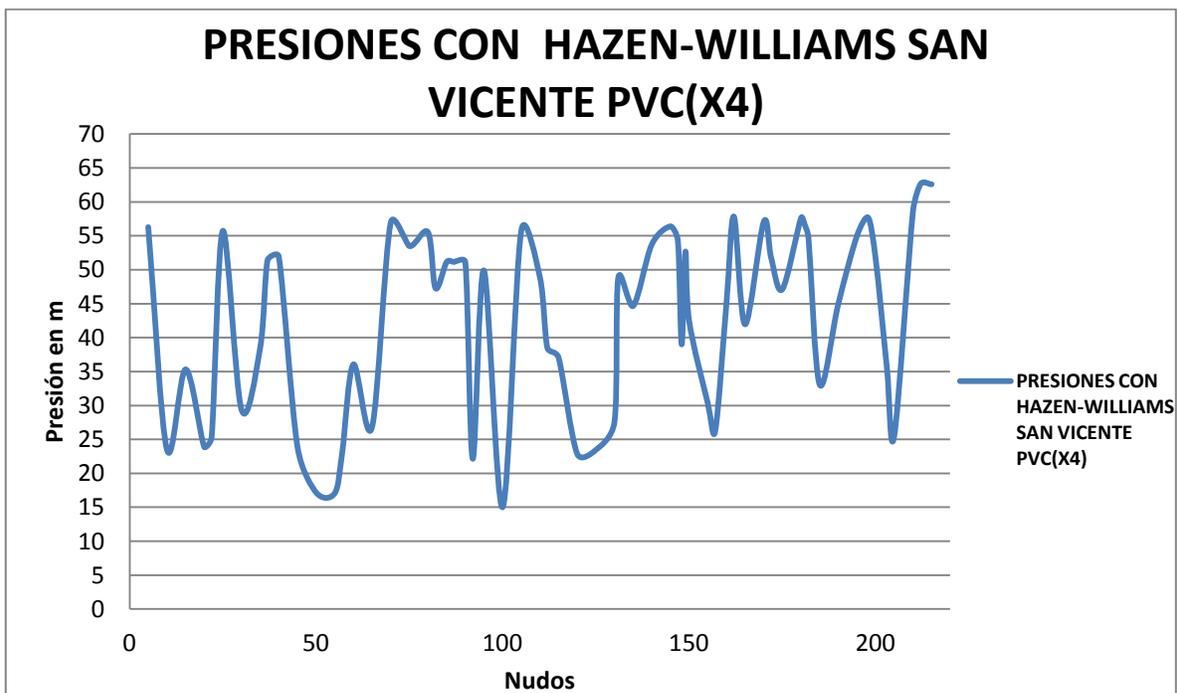
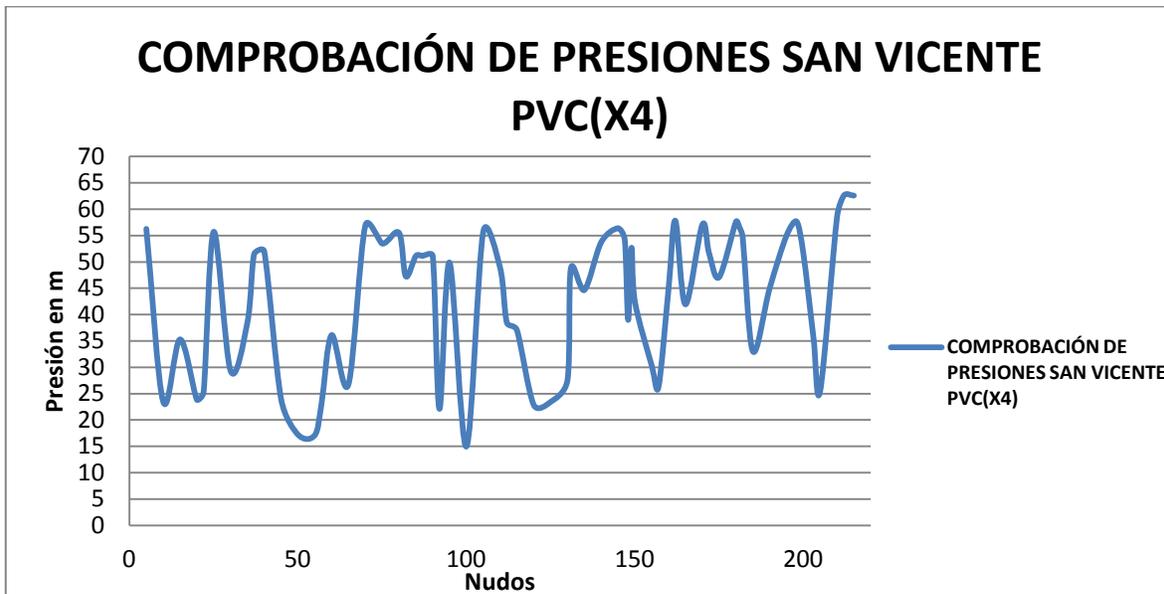
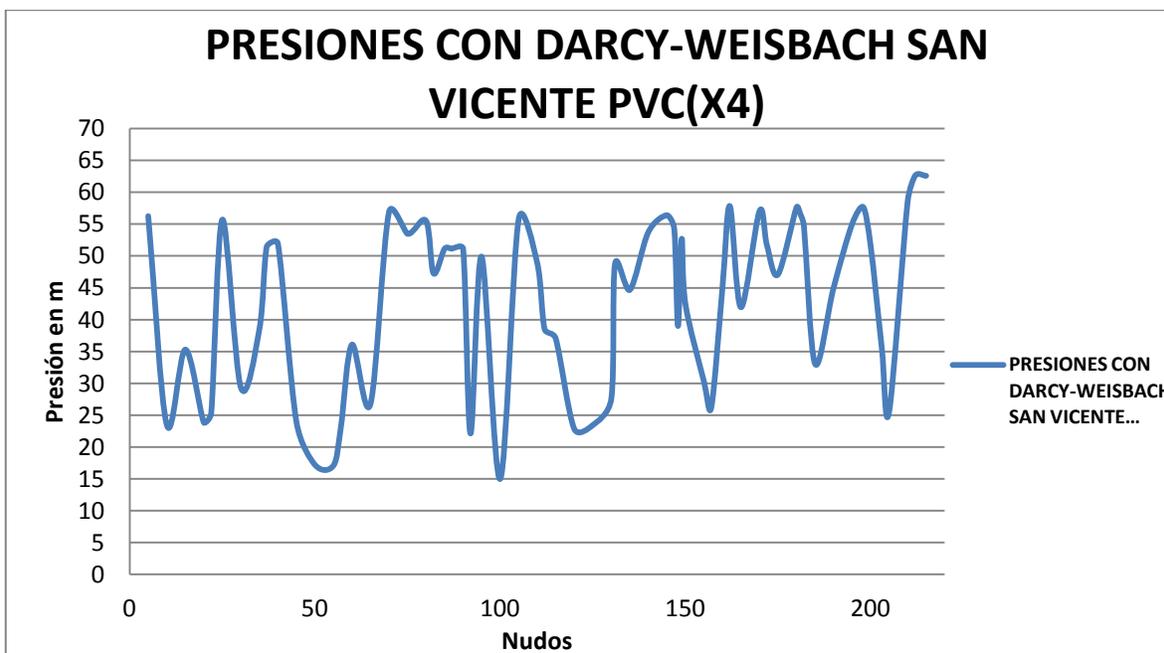


ILUSTRACIÓN 97. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS CON PVC.



**ILUSTRACIÓN 98. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH.**



**ILUSTRACIÓN 99. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PVC.**

- Resultados para PEAD.

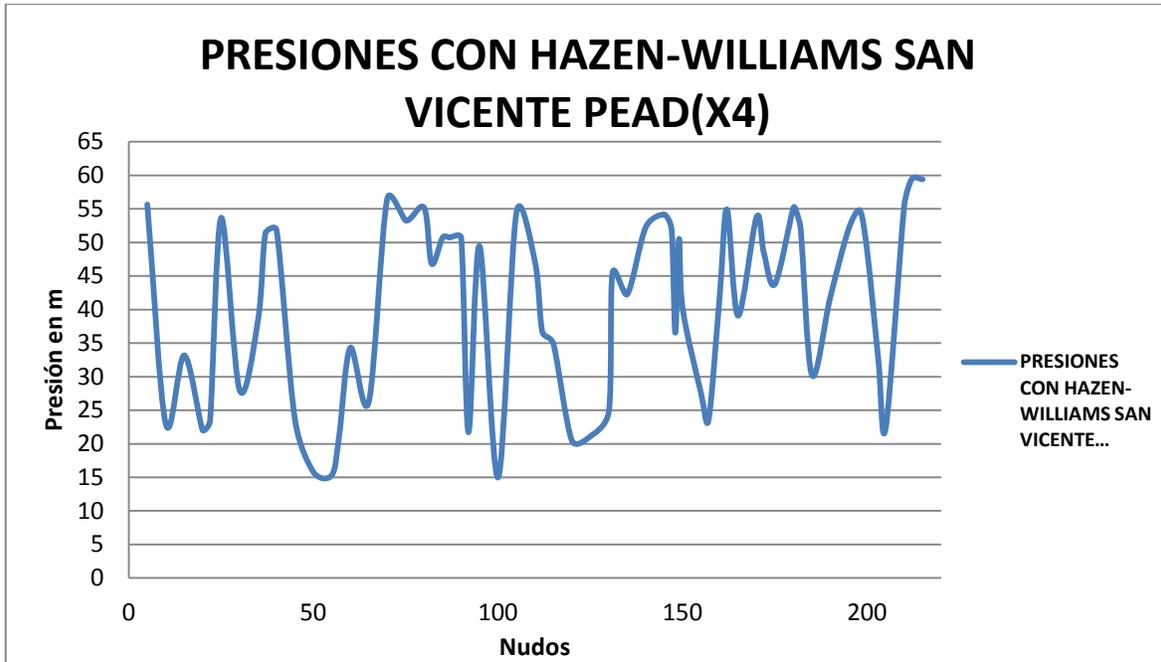


ILUSTRACIÓN 100. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA PEAD.

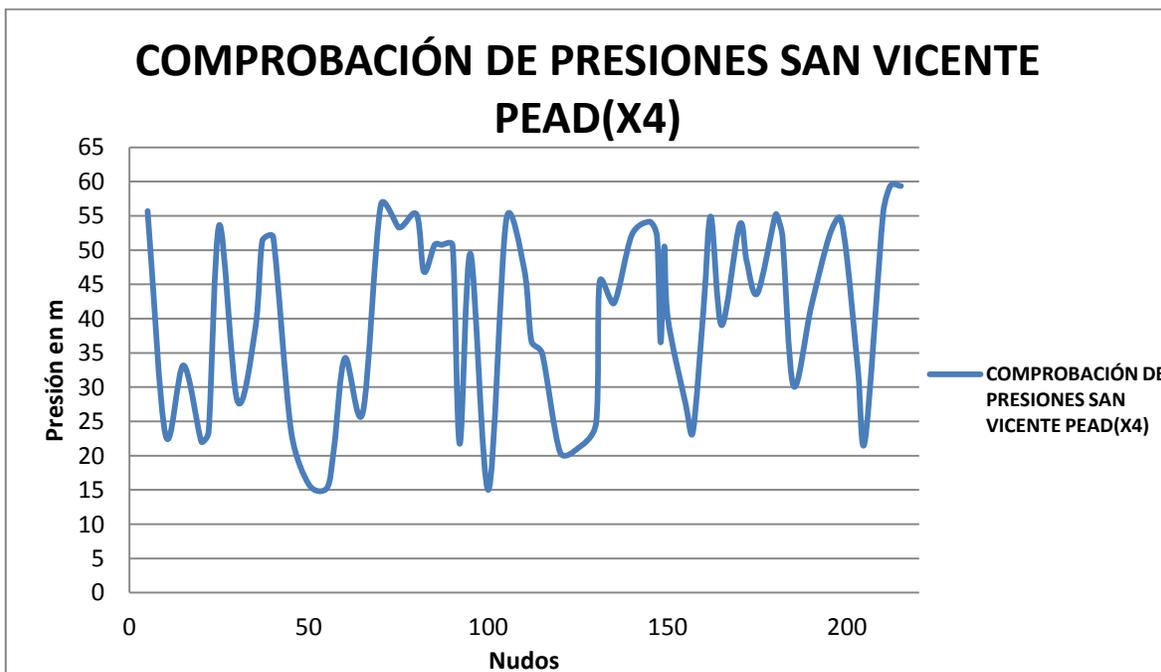
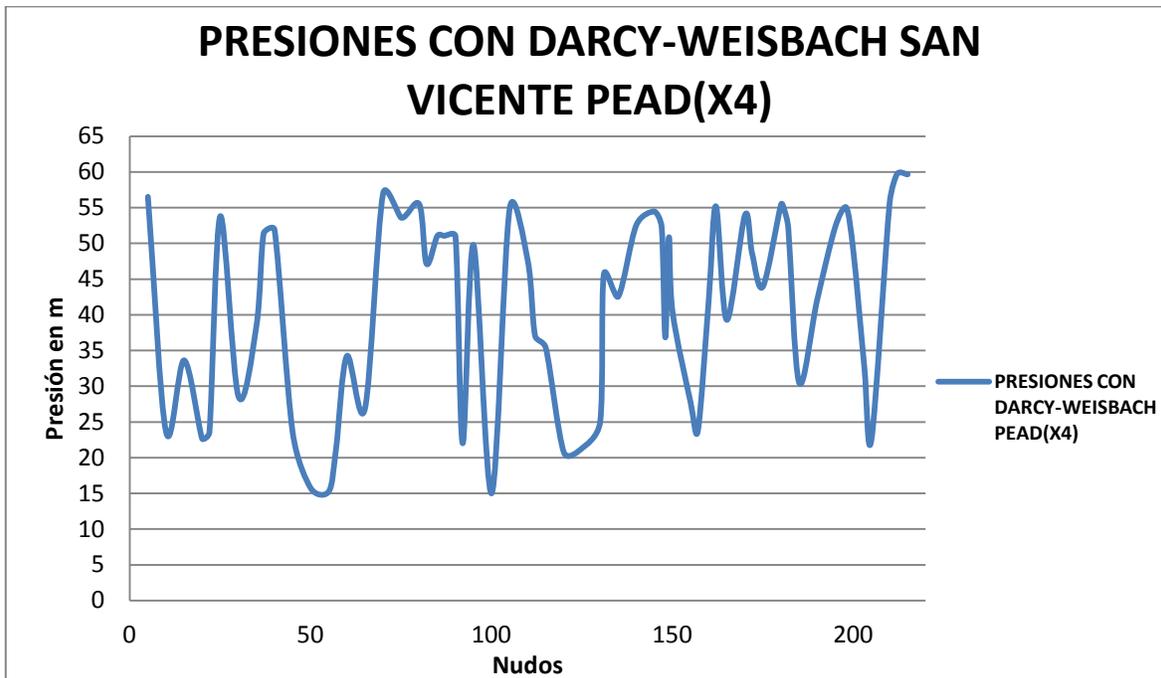


ILUSTRACIÓN 101. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PEAD.



**ILUSTRACIÓN 102. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PEAD.**

- Costos:

COSTOS \$	RED BALERMA CAUDALES X2		
	HIERRO DÚCTIL	PVC	PEAD
HAZEN-WILLIAMS	\$ 7 612 855 286.00	\$ 15 839 378 398.00	\$ 45 262 861 878.00
DARCY-WEISBACH	\$ 7 562 234 179.00	\$ 14 531 353 707.00	\$ 43 806 220 696.00
DIFERENCIA	\$ 50 621 107.00	\$ 1 308 024 691.00	\$ 1 456 641 182.00

**TABLA 21. COSTOS DE LA RED BALERMA CON CAUDALES DUPLICADOS.**

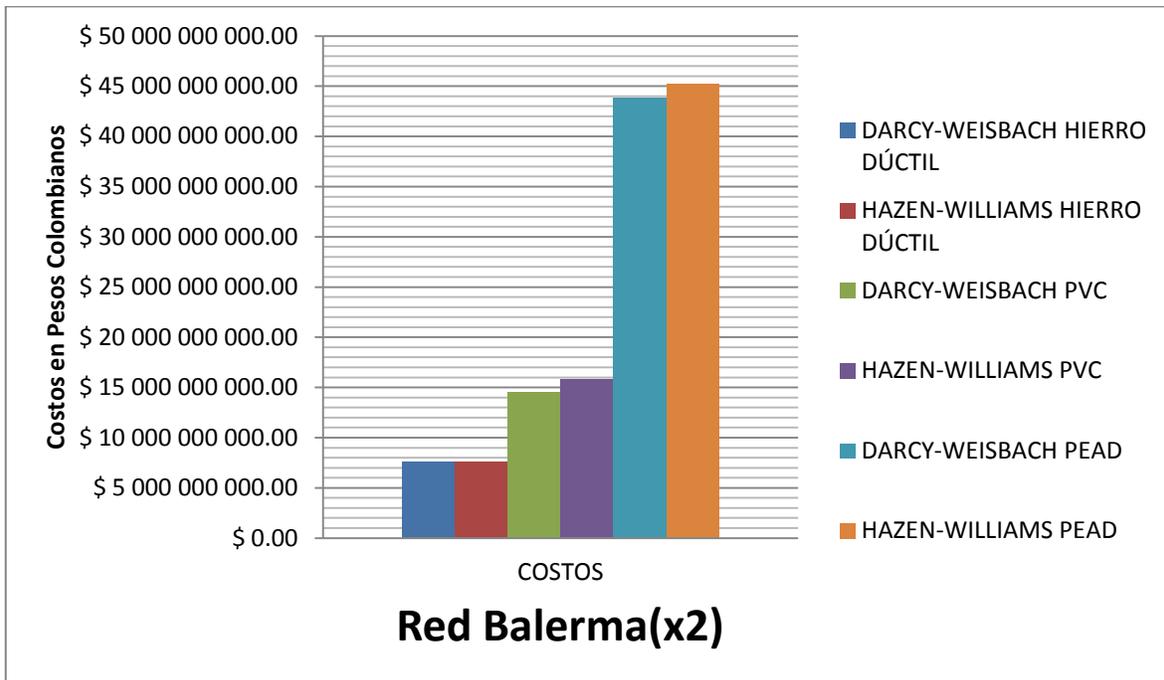


ILUSTRACIÓN 103. GRÁFICA DE LOS COSTOS DE LA RED BALERMA CON CAUDALES DUPLICADOS.

- Resultados de presiones con Hierro Dúctil.

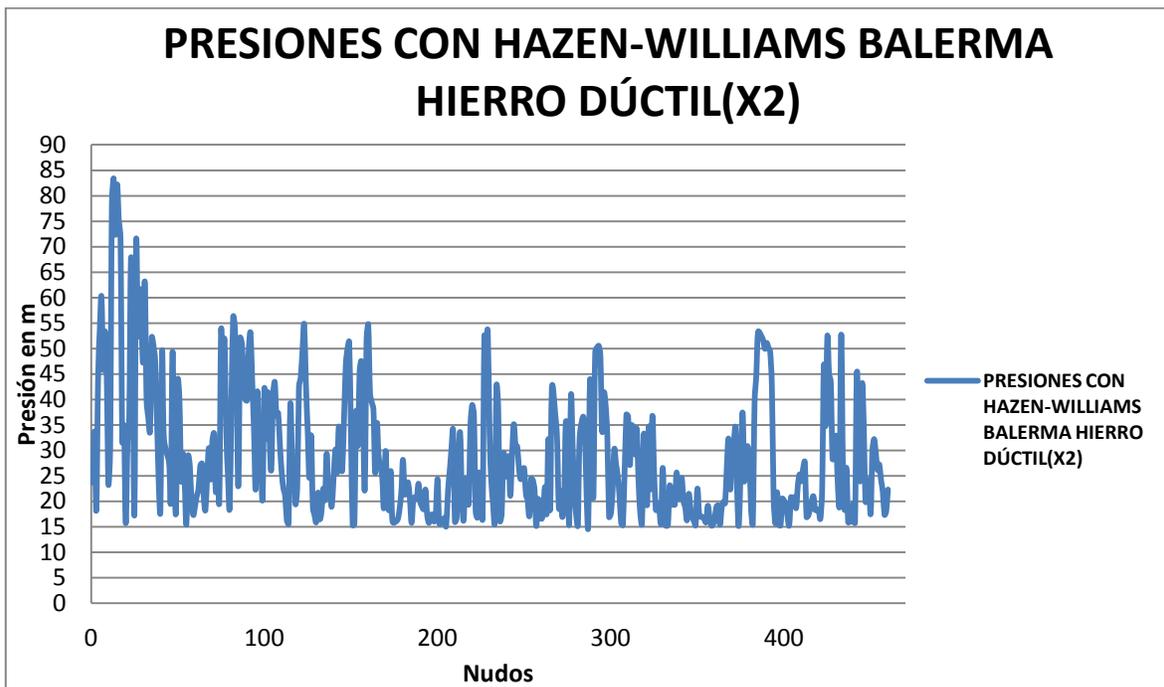
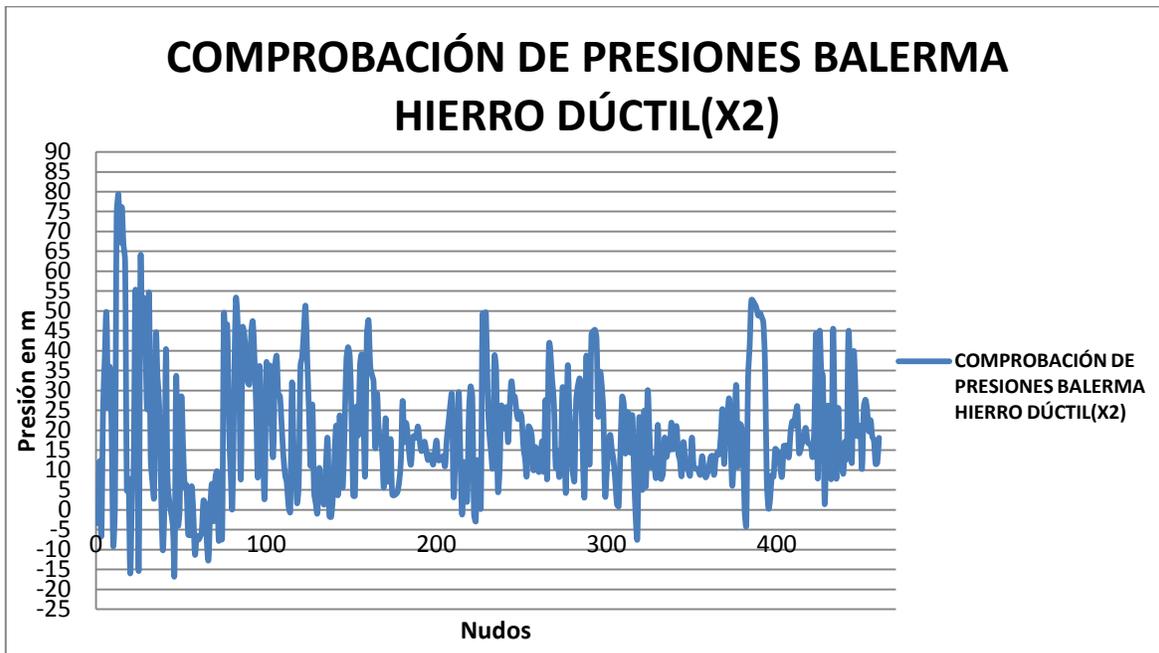
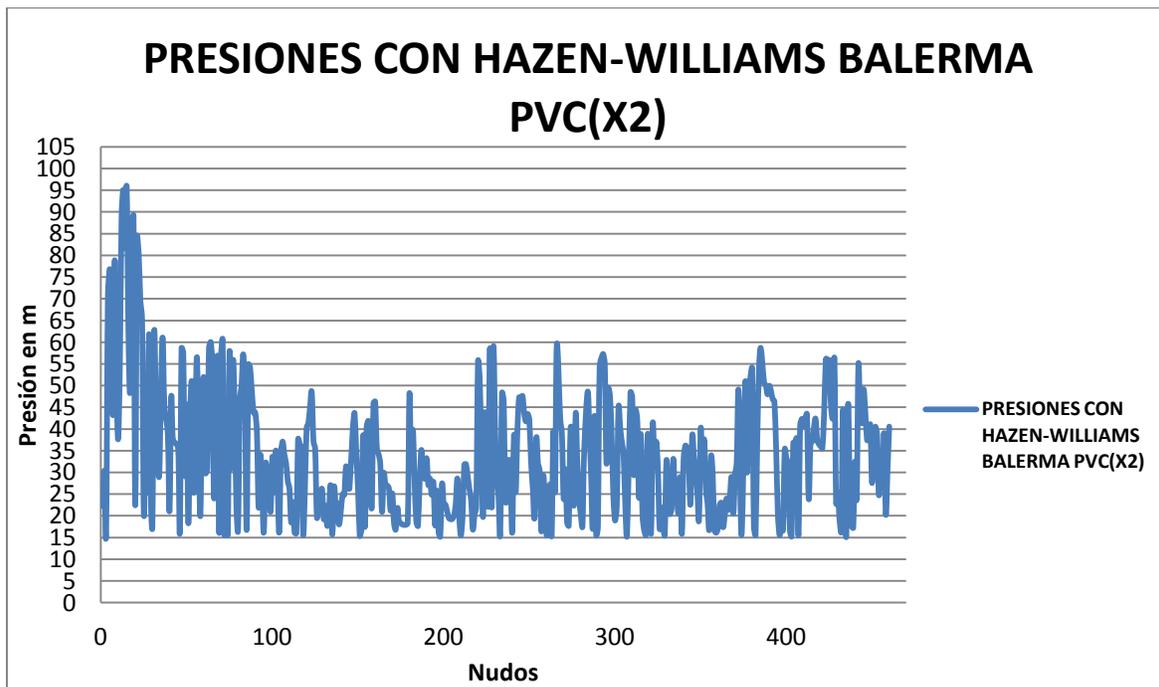


ILUSTRACIÓN 104. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS CON HIERRO DÚCTIL.

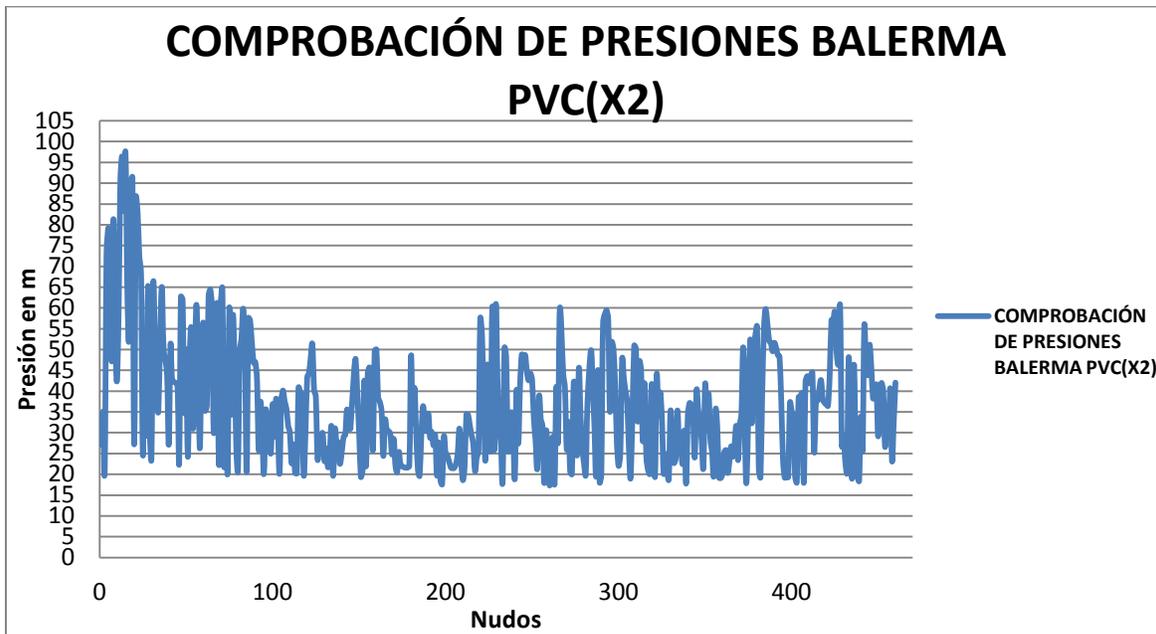


**ILUSTRACIÓN 105. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA HIERRO DÚCTIL.**

- Resultados de presiones con PVC.

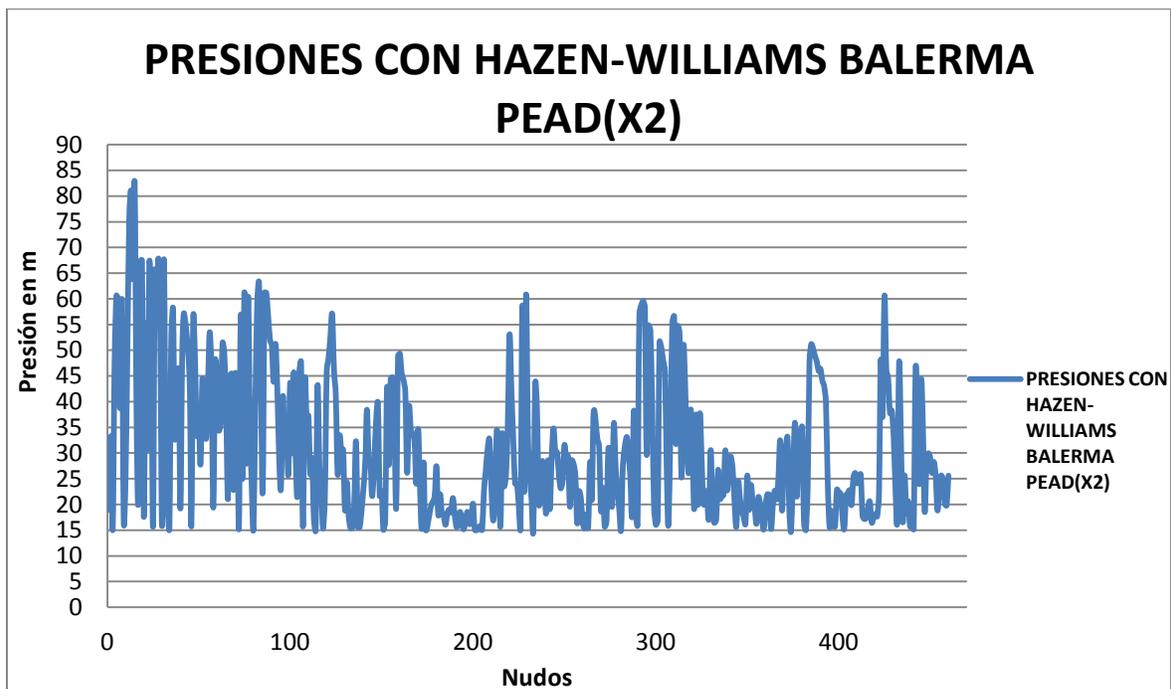


**ILUSTRACIÓN 106. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA PVC.**

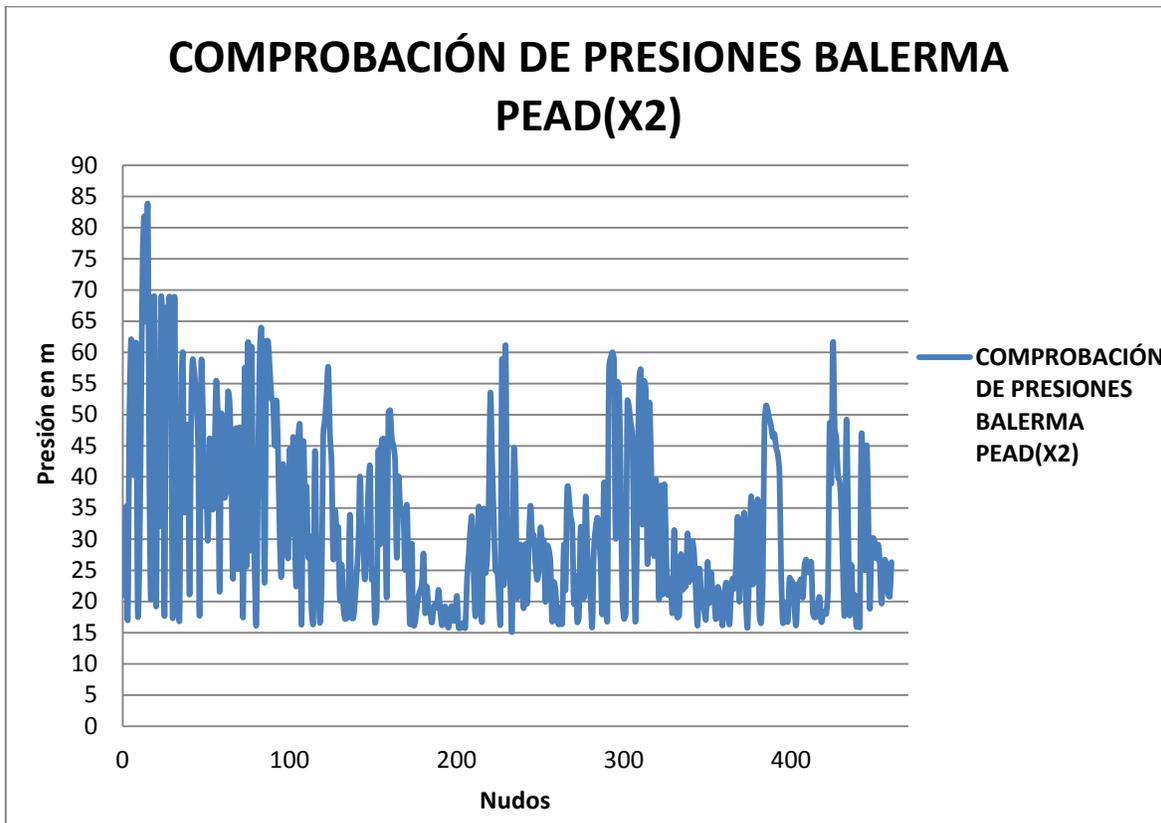


**ILUSTRACIÓN 107. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PVC.**

- Resultados de presiones con PEAD.



**ILUSTRACIÓN 108. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA PEAD.**



**ILUSTRACIÓN 109. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PEAD.**

- Costos.

	RED BALERMA CAUDALES X4		
COSTOS \$	HIERRO DÚCTIL	PVC	PEAD
HAZEN-WILLIAMS	\$ 10 305 635 802.00	\$ 32 856 752 197.00	\$ 79 250 492 943.00
DARCY-WEISBACH	\$ 11 289 412 631.00	\$ 32 566 698 293.00	\$ 78 497 450 167.00
DIFERENCIA	\$ (983 776 829.00)	\$ 290 053 904.00	\$ 753 042 776.00

**TABLA 22. COSTOS DE LA RED BALERMA CON CAUDALES CUADRUPLICADOS.**

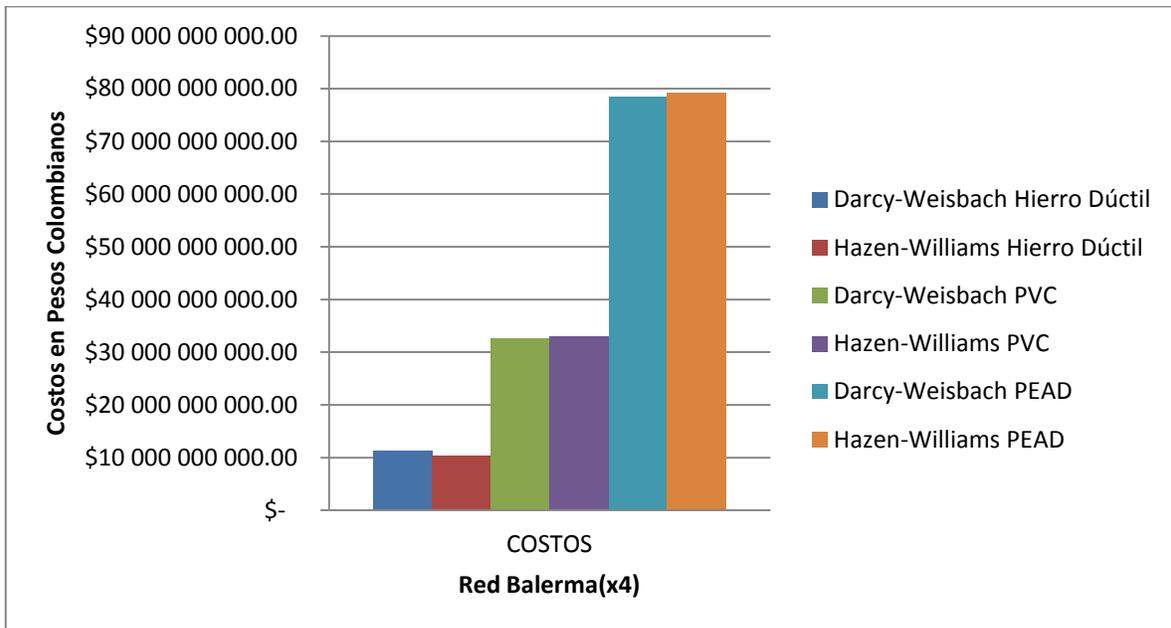


ILUSTRACIÓN 110. GRÁFICA DE COSTOS DE LA RED BALERMA CON CAUDALES CUADRUPPLICADOS.

- Resultados de presiones para Hierro Dúctil.

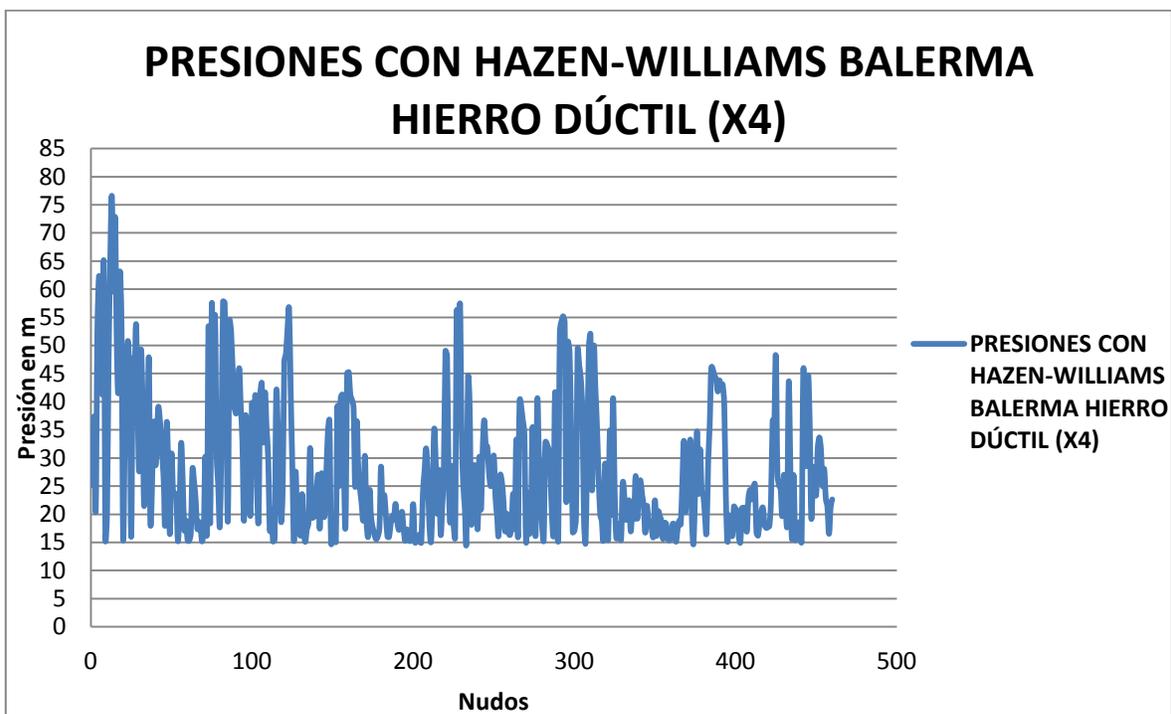


ILUSTRACIÓN 111. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA HIERRO DÚCTIL.

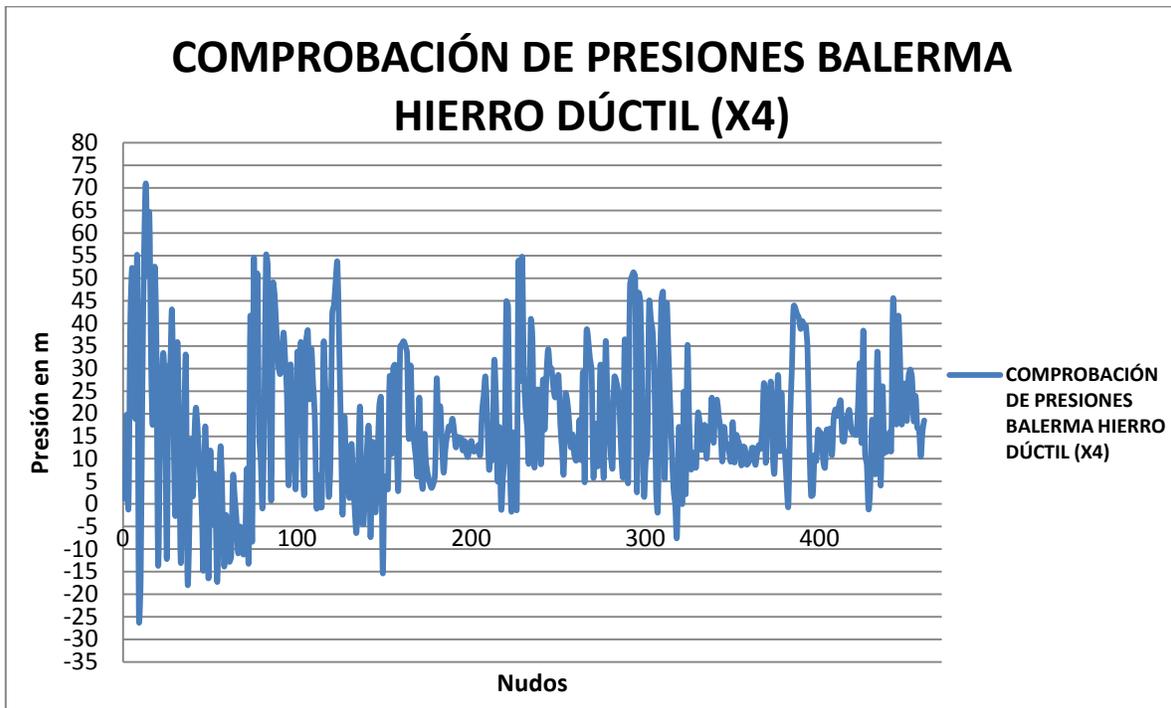


ILUSTRACIÓN 112. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA HIERRO DÚCTIL.

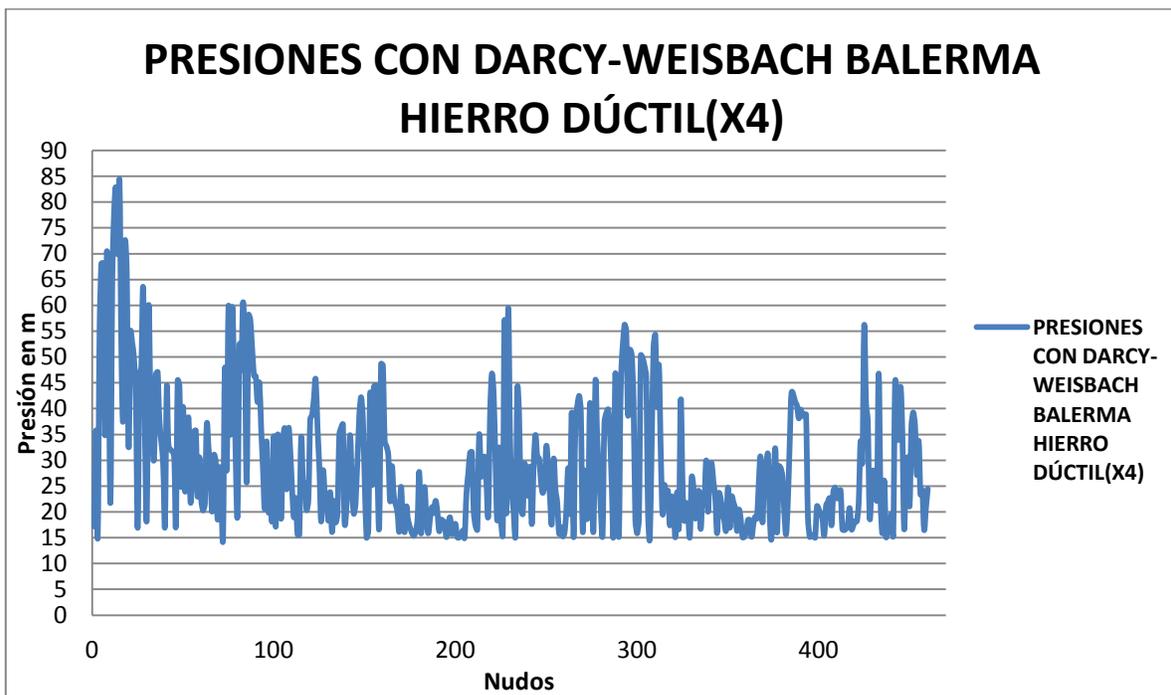


ILUSTRACIÓN 113. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA HIERRO DÚCTIL.

- Resultados de presiones con PVC.

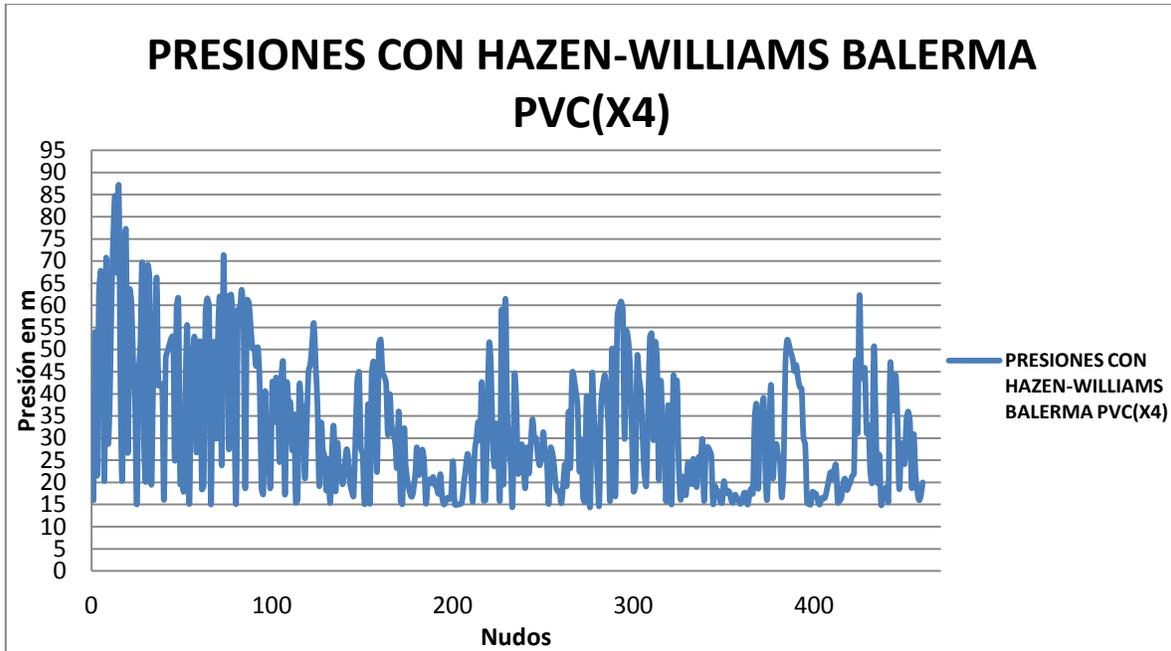


ILUSTRACIÓN 114. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA PVC.

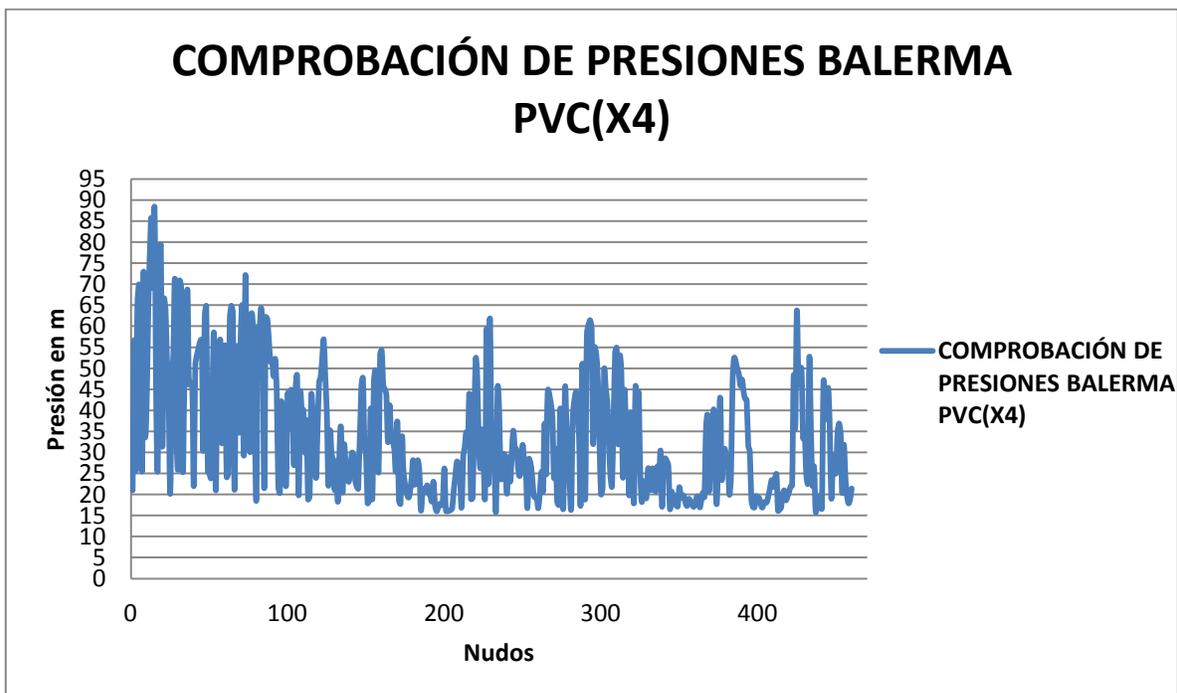


ILUSTRACIÓN 115. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PVC.

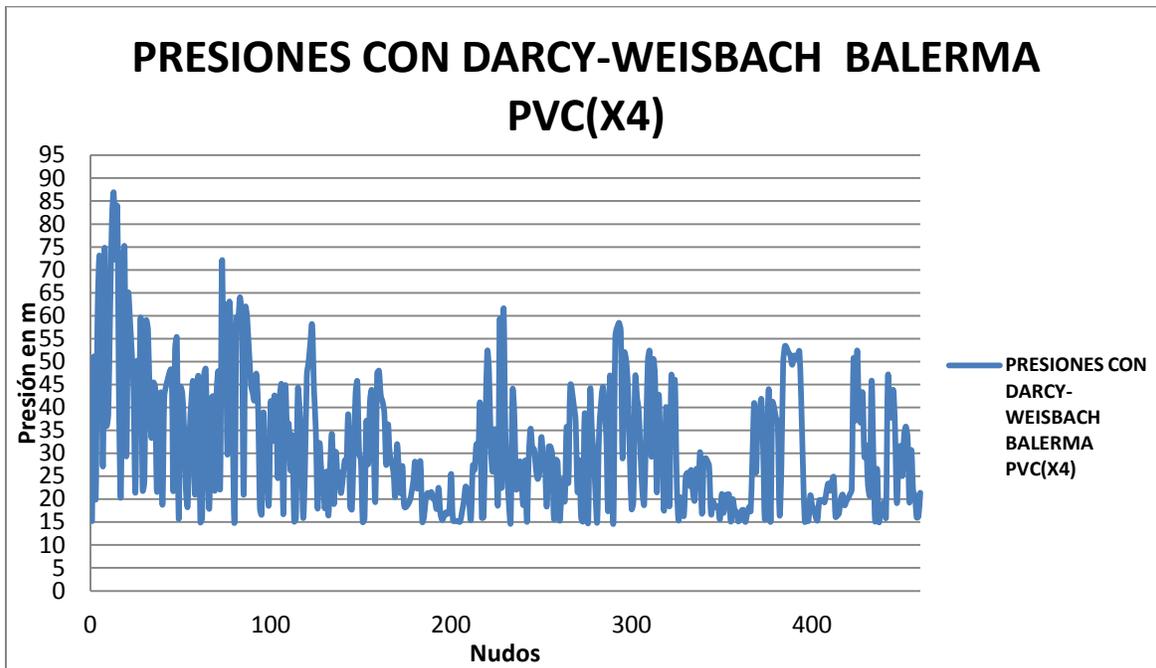


ILUSTRACIÓN 116. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PVC.

- Resultados de presiones para PEAD.

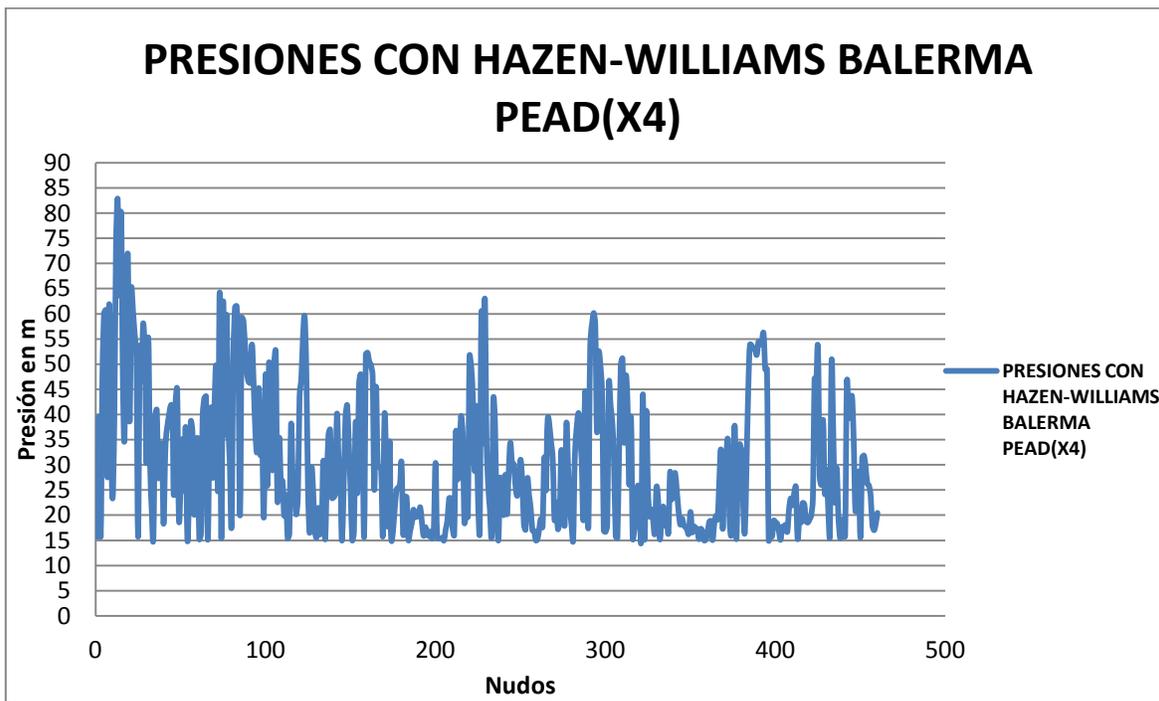


ILUSTRACIÓN 117. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA PEAD.

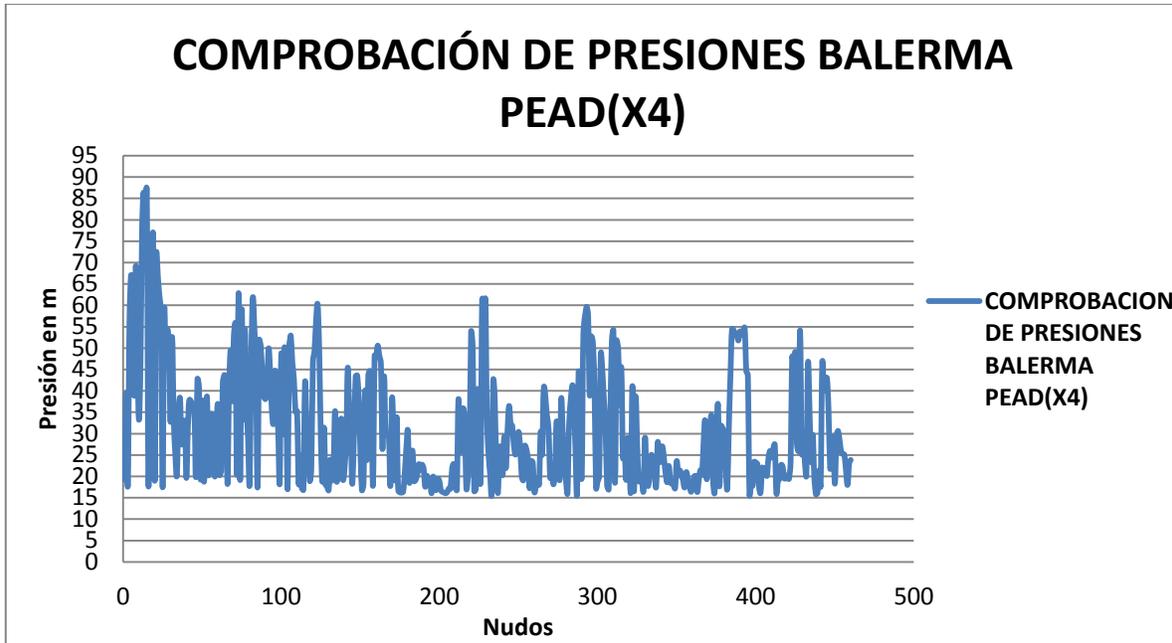


ILUSTRACIÓN 118. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PEAD.

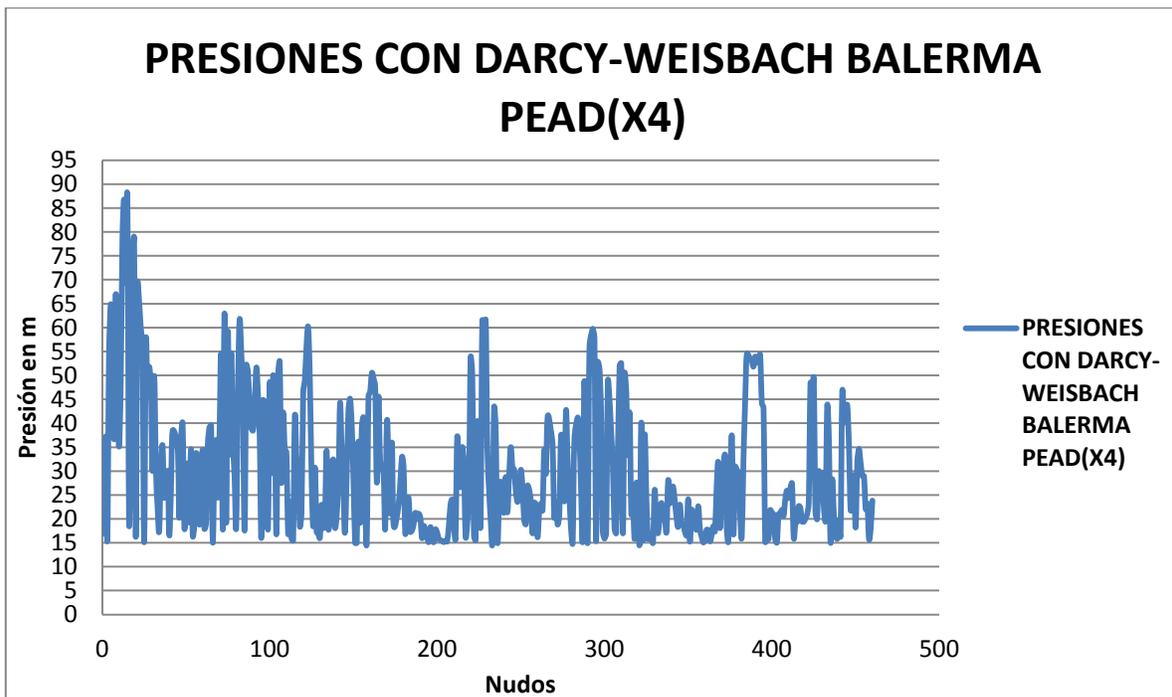
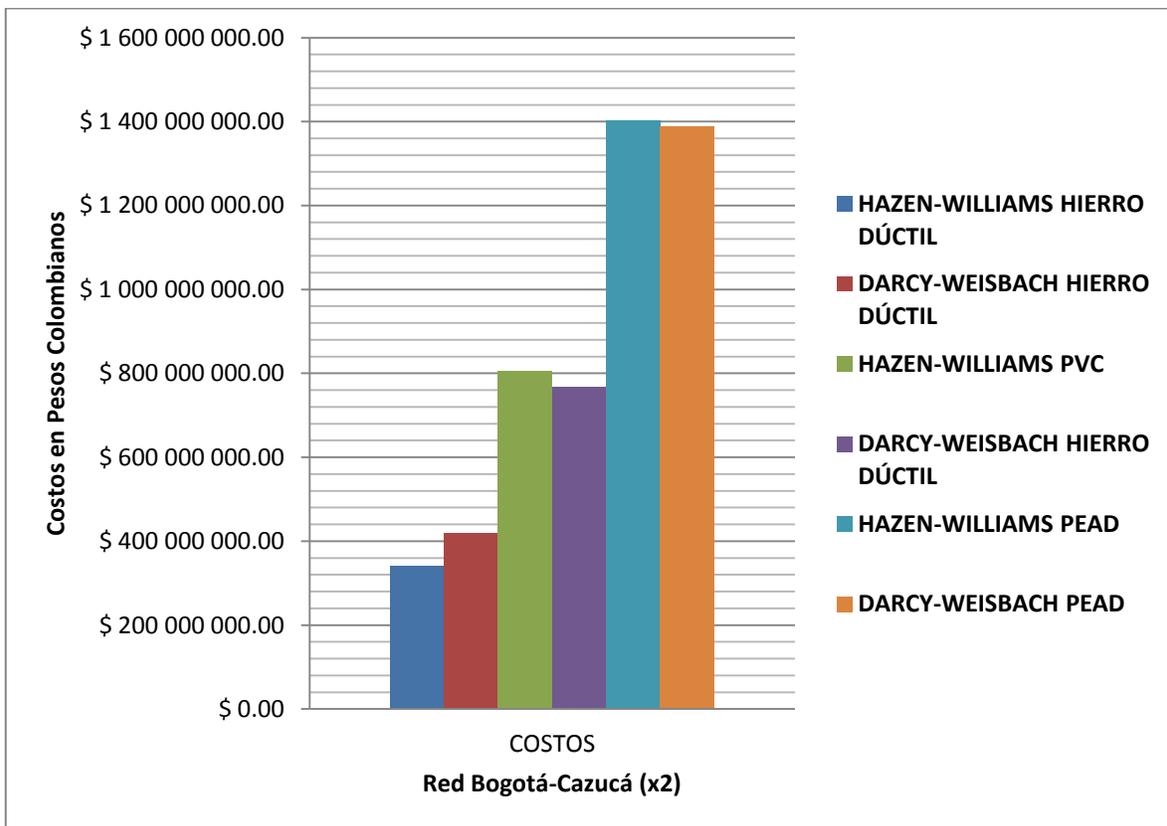


ILUSTRACIÓN 119. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PEAD.

- Costos.

COSTOS \$	RED BOGOTÁ-CAZUCÁ CAUDALES X2		
	HIERRO DÚCTIL	PVC	PEAD
HAZEN-WILLIAMS	\$ 339 485 347.00	\$ 805 009 939.00	\$ 1 400 998 498.00
DARCY-WEISBACH	\$ 419 570 665.00	\$ 767 281 864.00	\$ 1 387 261 284.00
DIFERENCIA	\$ (80 085 318.00)	\$ 37 728 075.00	\$ 13 737 214.00

**TABLA 23. COSTOS DE LA RED BOGOTÁ-CAZUCÁ CON CAUDALES DUPLICADOS.**



**ILUSTRACIÓN 120. GRÁFICA DE COSTOS DE LA RED BOGOTÁ-CAZUCÁ CON CAUDALES DUPLICADOS.**

- Resultados de presiones con Hierro Dúctil.

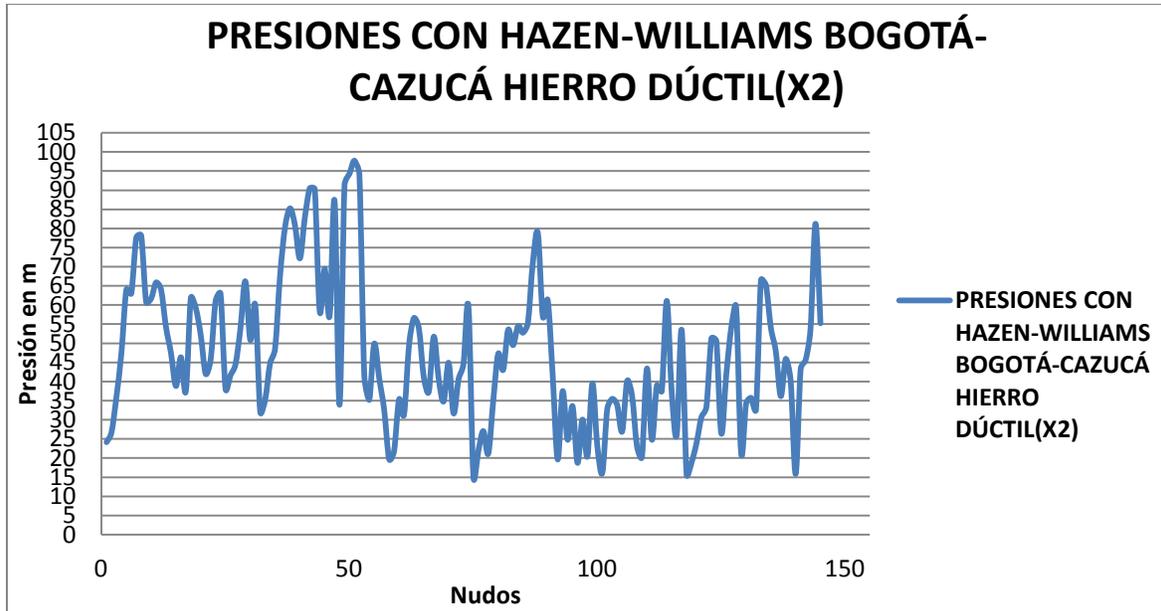


ILUSTRACIÓN 121. PRESIONES CON AL ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA HIERRO DÚCTIL.

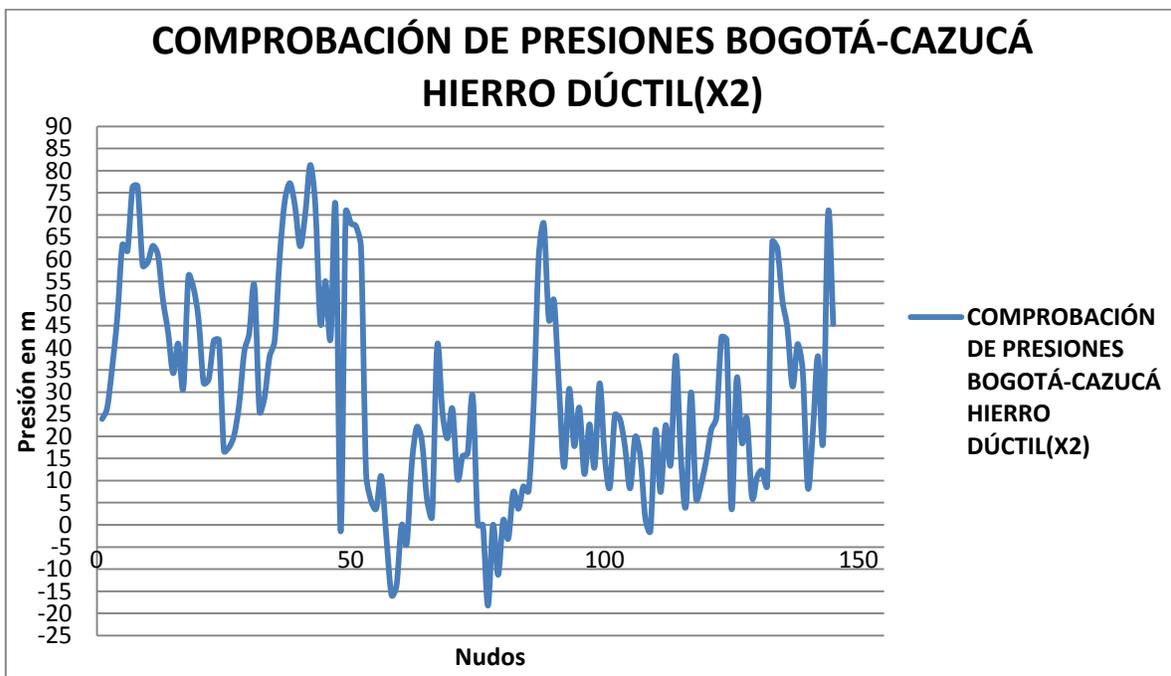


ILUSTRACIÓN 122. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA HIERRO DÚCTIL.

- Resultados de presiones para PVC

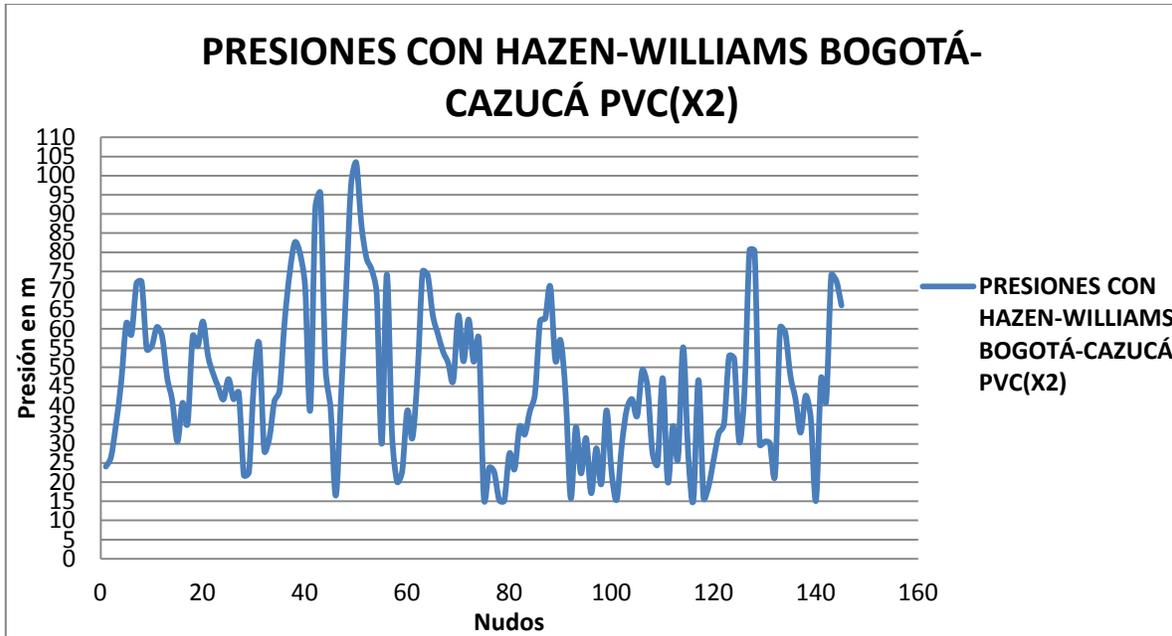


ILUSTRACIÓN 123. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA PVC.

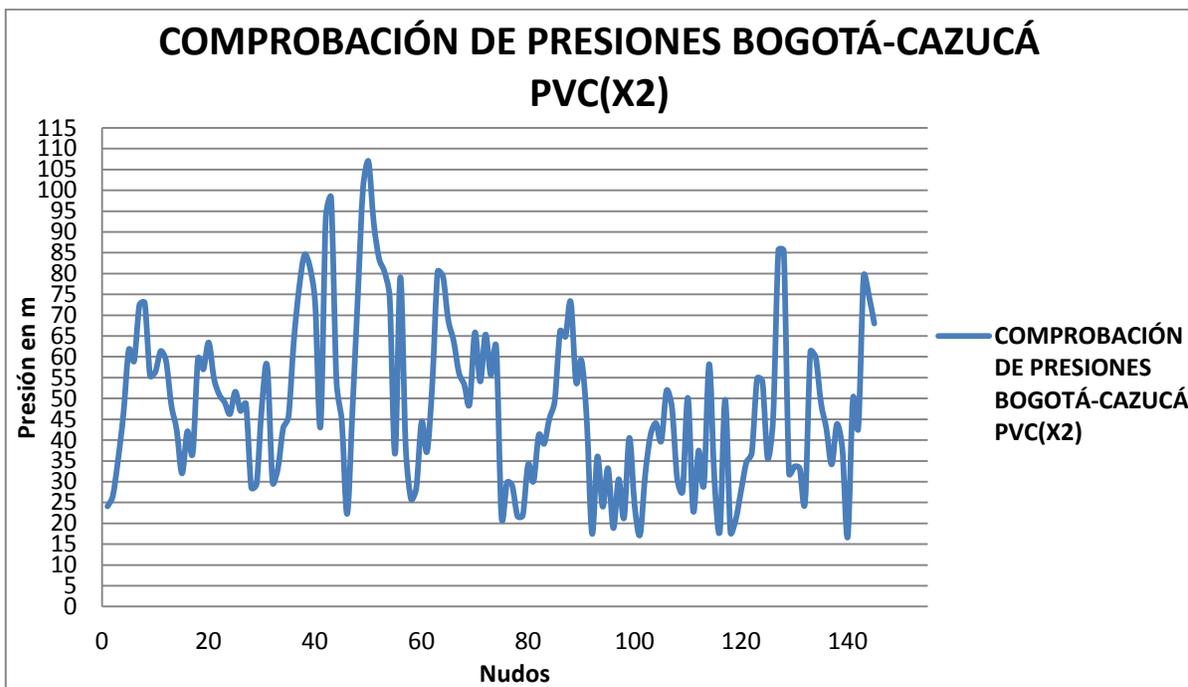


ILUSTRACIÓN 124. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PVC.

- Resultados de presiones para PEAD.

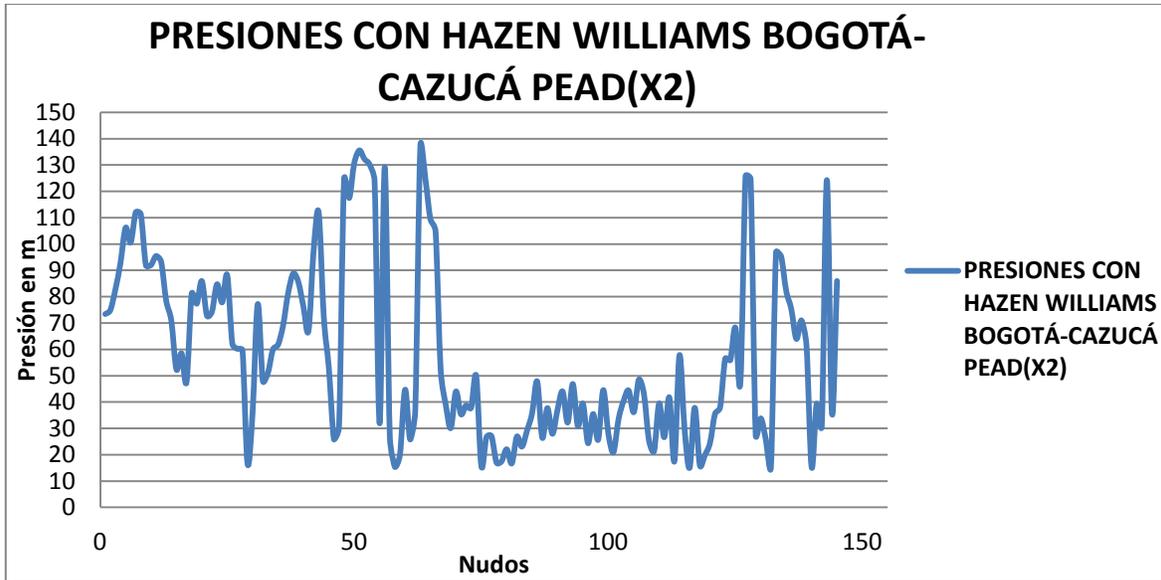


ILUSTRACIÓN 125. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA PEAD.

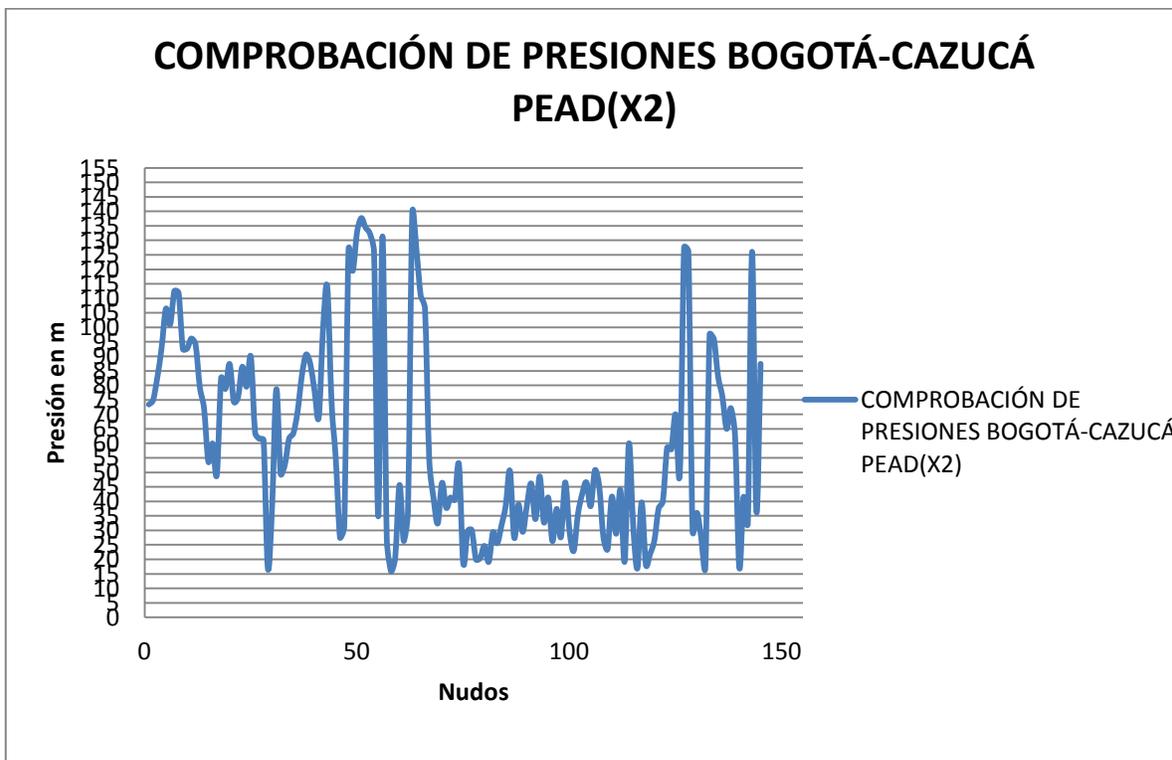


ILUSTRACIÓN 126. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PEAD.

- Costos.

RED BOGOTÁ-CAZUCÁ CAUDALES X4			
COSTOS \$	HIERRO DÚCTIL	PVC	PEAD
HAZEN-WILLIAMS	\$ 613 121 017.00	\$ 1 586 795 310.00	\$ 3 383 470 704.00
DARCY-WEISBACH	\$ 632 444 331.00	\$ 1 599 529 400.00	\$ 3 477 459 602.00
DIFERENCIA	\$ (19 323 314.00)	\$ (12 734 090.00)	\$ (93 988 898.00)

TABLA 24. COSTOS DE LA RED BOGOTÁ-CAZUCÁ CON CAUDALES CUADRUPLICADOS.

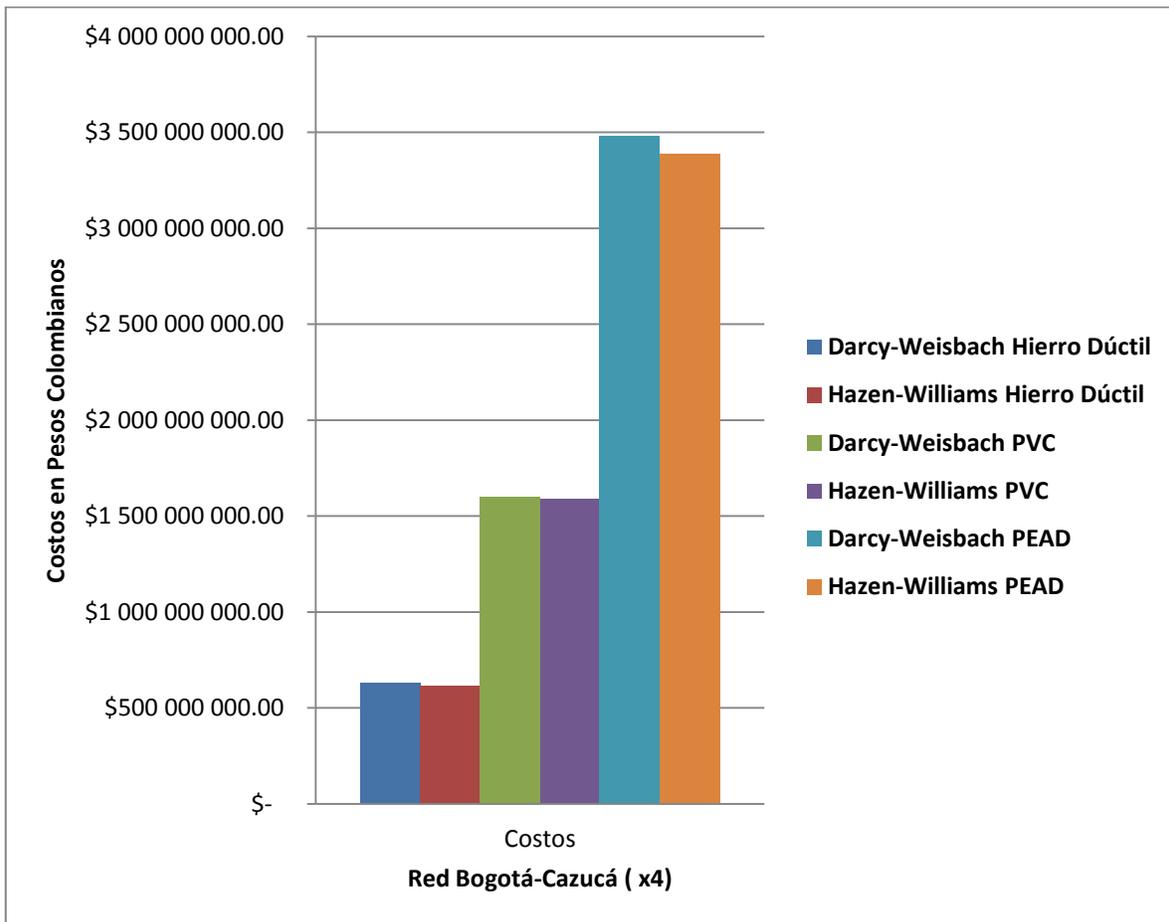


ILUSTRACIÓN 127. GRÁFICA DE COSTOS DE LA RED BOGOTÁ-CAZUCÁ CON CAUDALES CUADRUPLICADOS.

- Resultados de presiones para Hierro Dúctil.

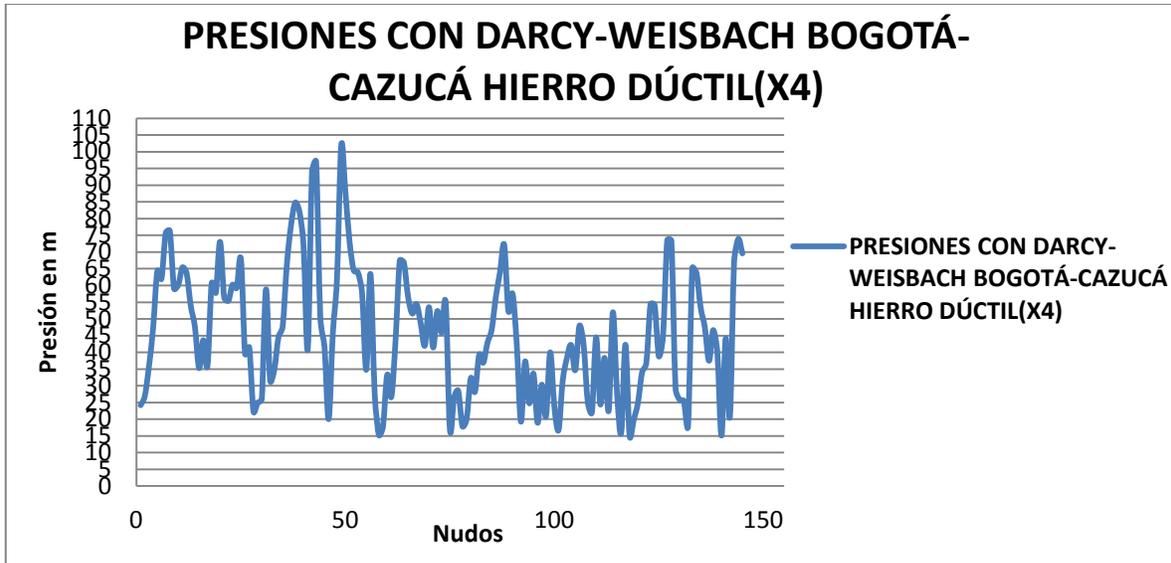


ILUSTRACIÓN 128. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA HIERRO DÚCTIL.

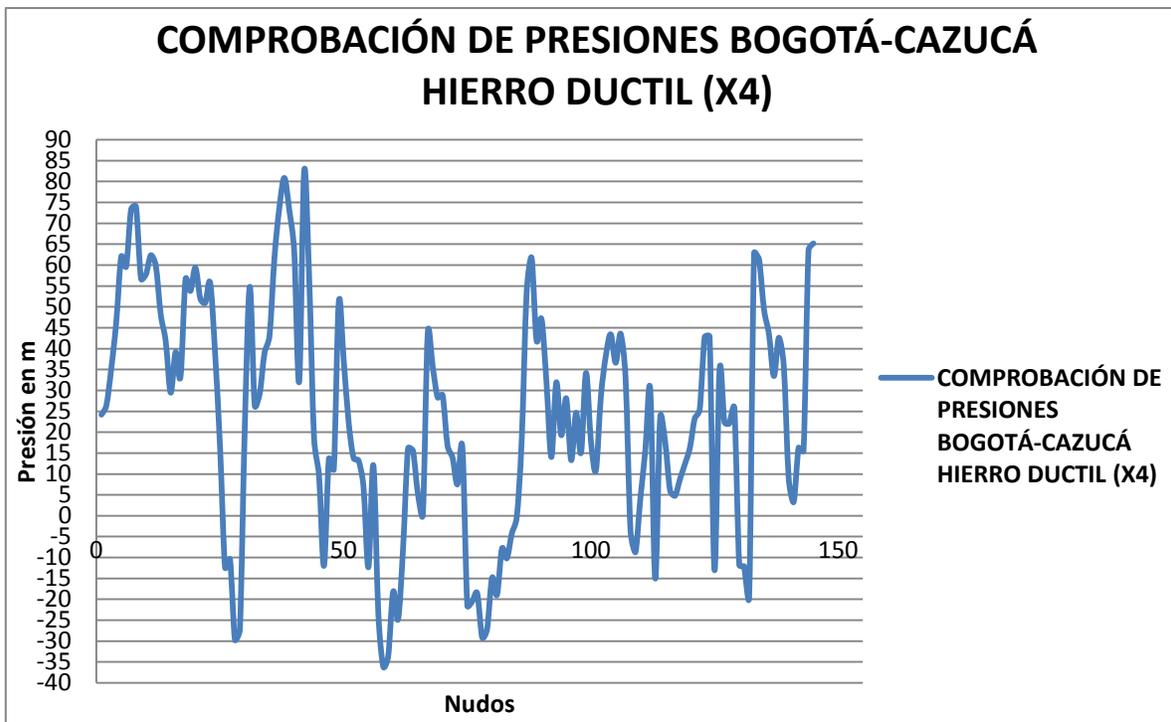


ILUSTRACIÓN 129. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA HIERRO DÚCTIL.

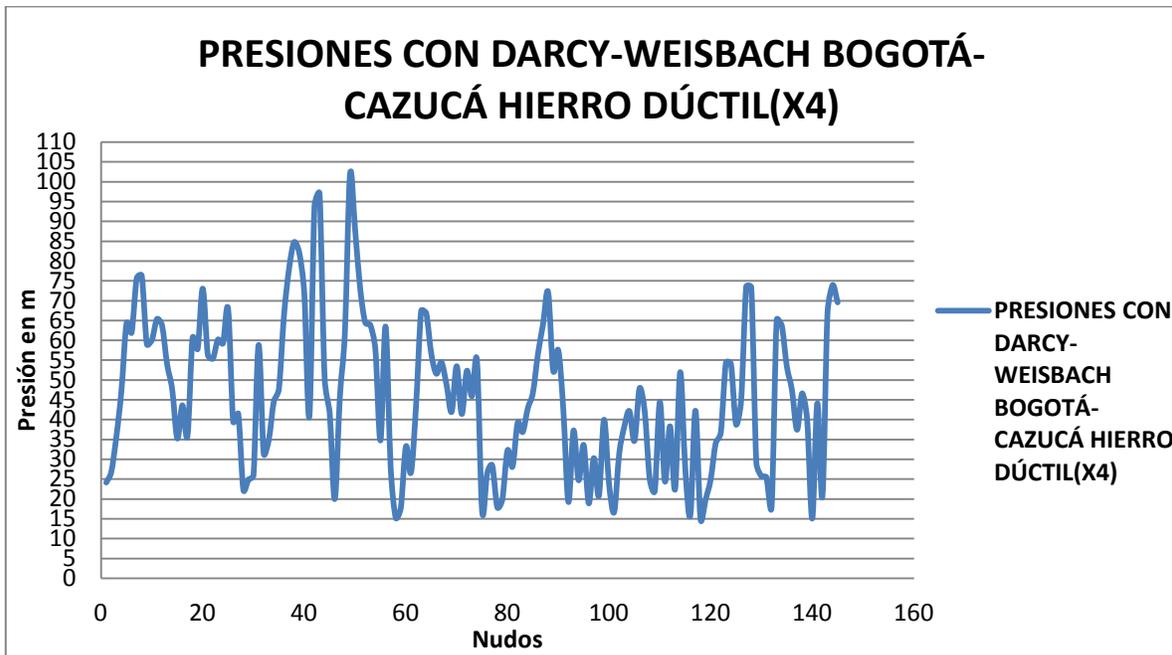


ILUSTRACIÓN 130. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA HIERRO DÚCTIL.

- Resultados de presiones con PVC.

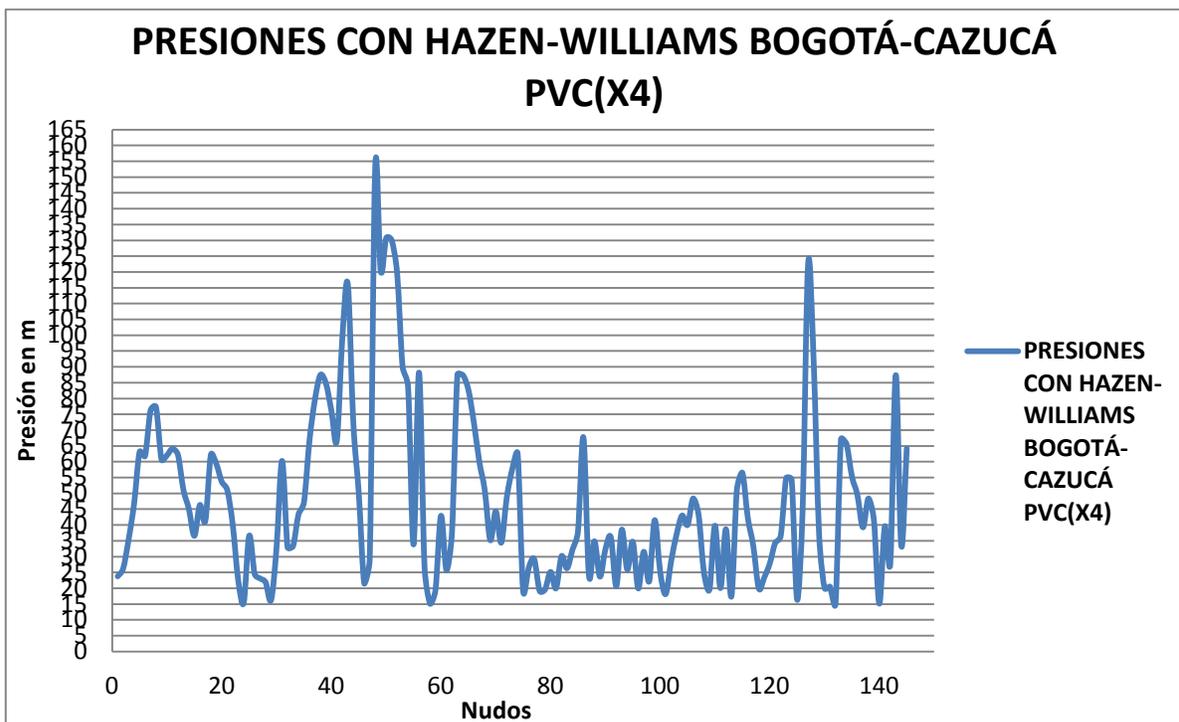


ILUSTRACIÓN 131. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA PVC.

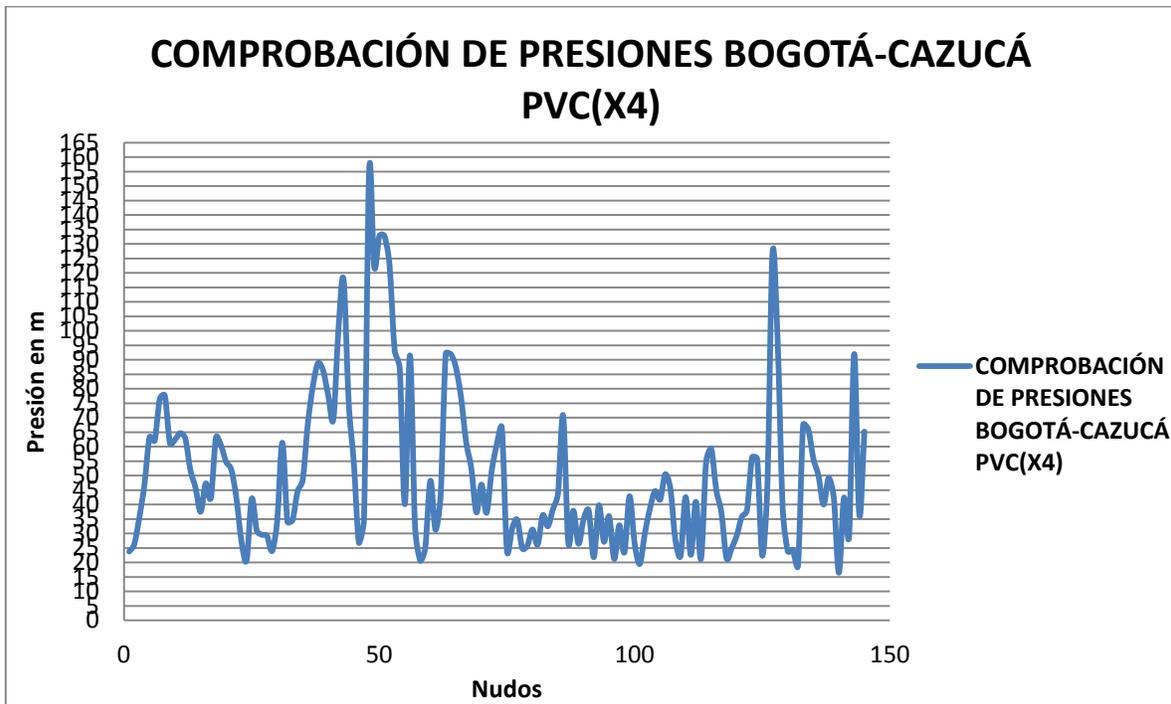


ILUSTRACIÓN 132. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PVC.

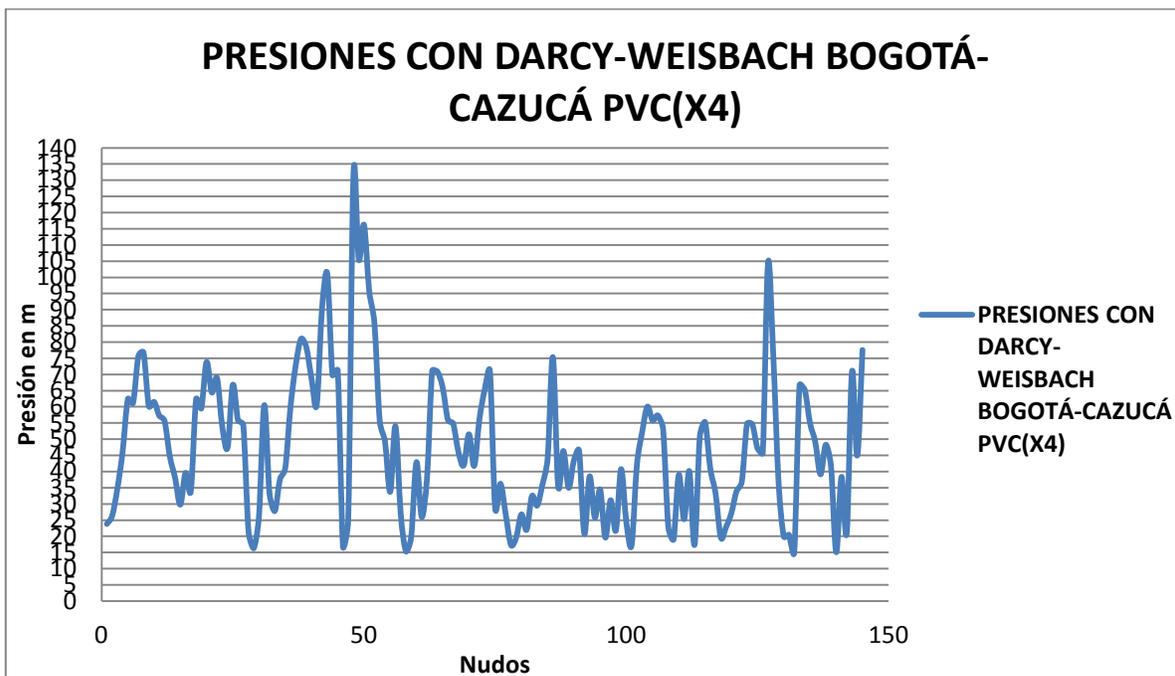


ILUSTRACIÓN 133. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PVC.

- Resultados de presiones para PEAD.

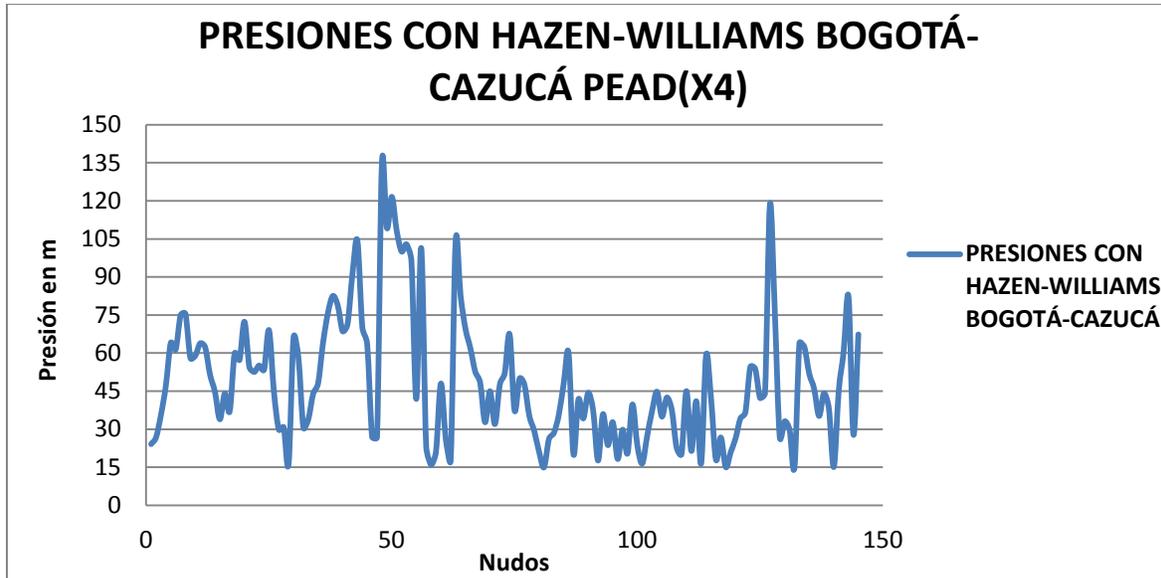


ILUSTRACIÓN 134. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA PEAD.

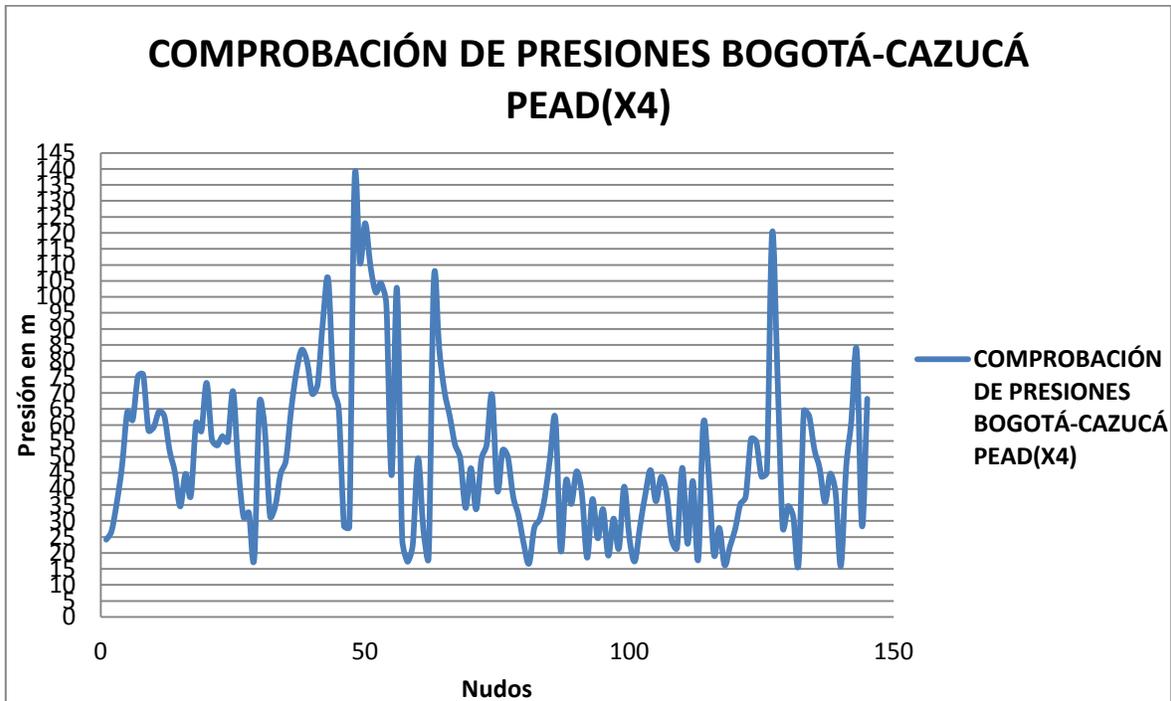
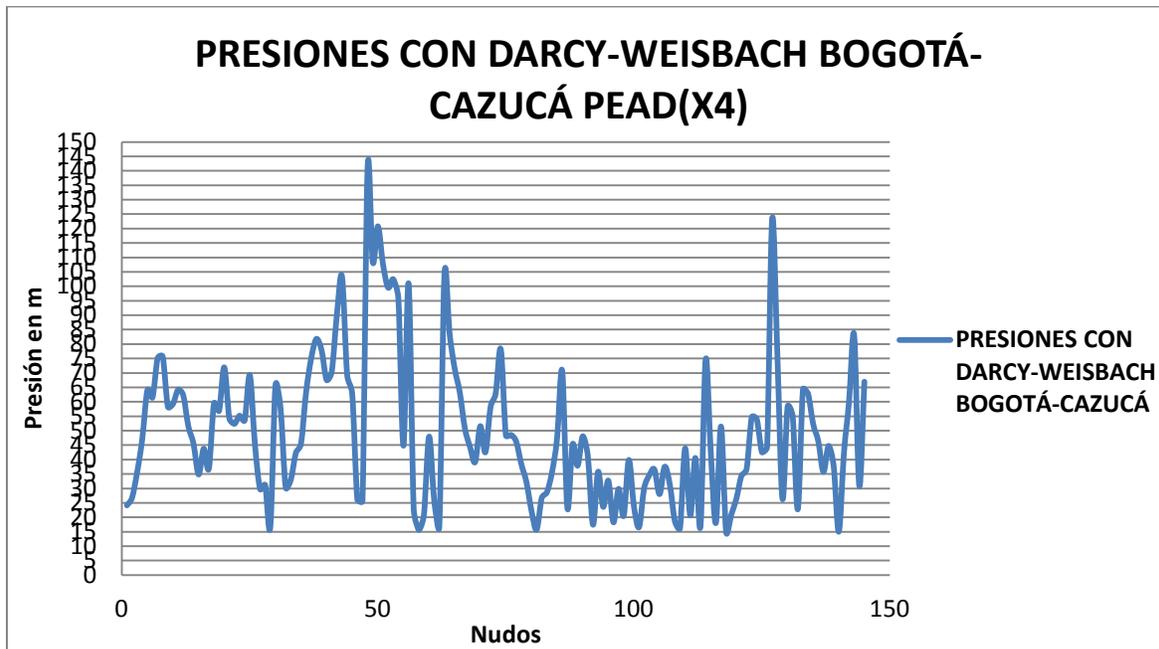


ILUSTRACIÓN 135. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PEAD.



**ILUSTRACIÓN 136. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PEAD.**

- Costos.

COSTOS \$	RED R28 CAUDALES X2		
	HIERRO DÚCTIL	PVC	PEAD
HAZEN-WILLIAMS	\$ 323 226 773.00	\$ 587 029 233.00	\$ 1 458 785 597.00
DARCY-WEISBACH	\$ 353 536 623.00	\$ 580 928 906.00	\$ 1 460 334 559.00
DIFERENCIA	\$ (30 309 850.00)	\$ 6 100 327.00	\$ (1 548 962.00)

**TABLA 25. COSTOS DE LA RED R28 CON CAUDALES DUPLICADOS.**

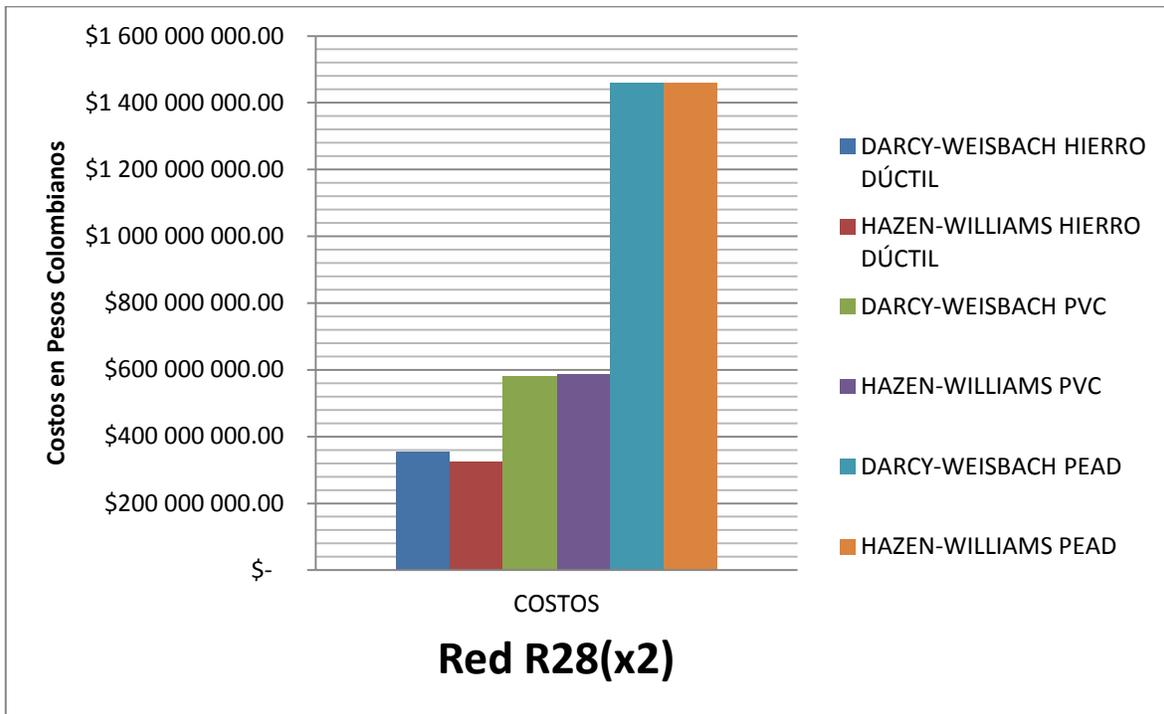


ILUSTRACIÓN 137. GRÁFICA DE COSTOS PARA LA RED R28 CON CAUDALES DUPLICADOS.

- Resultados de presiones con Hierro Dúctil.

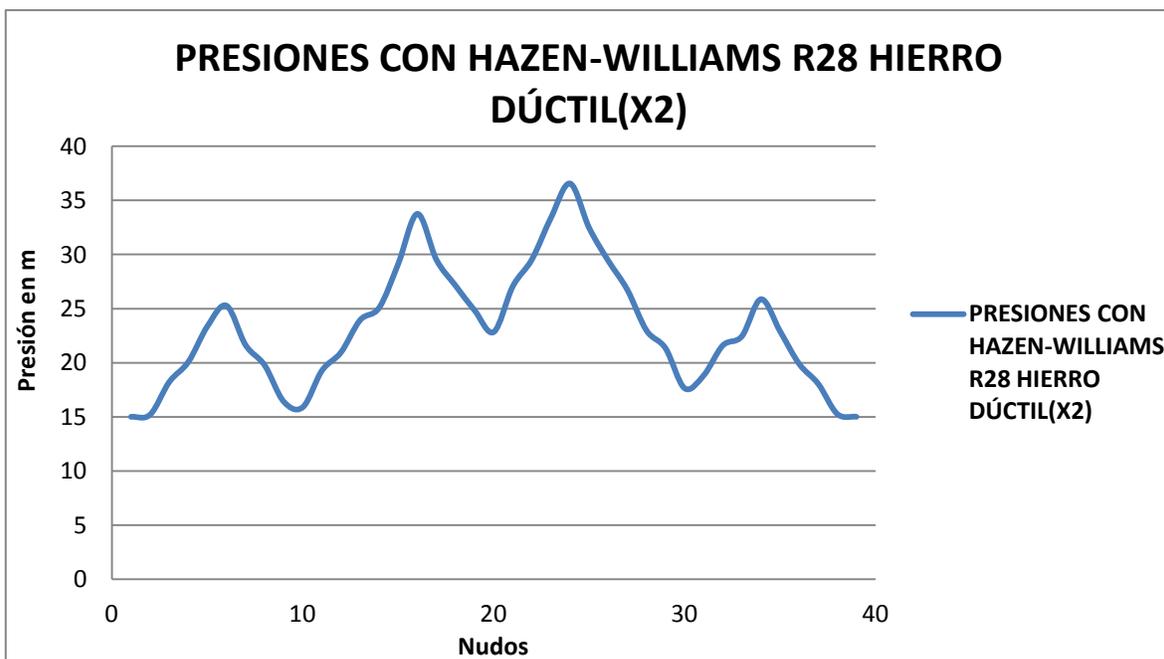
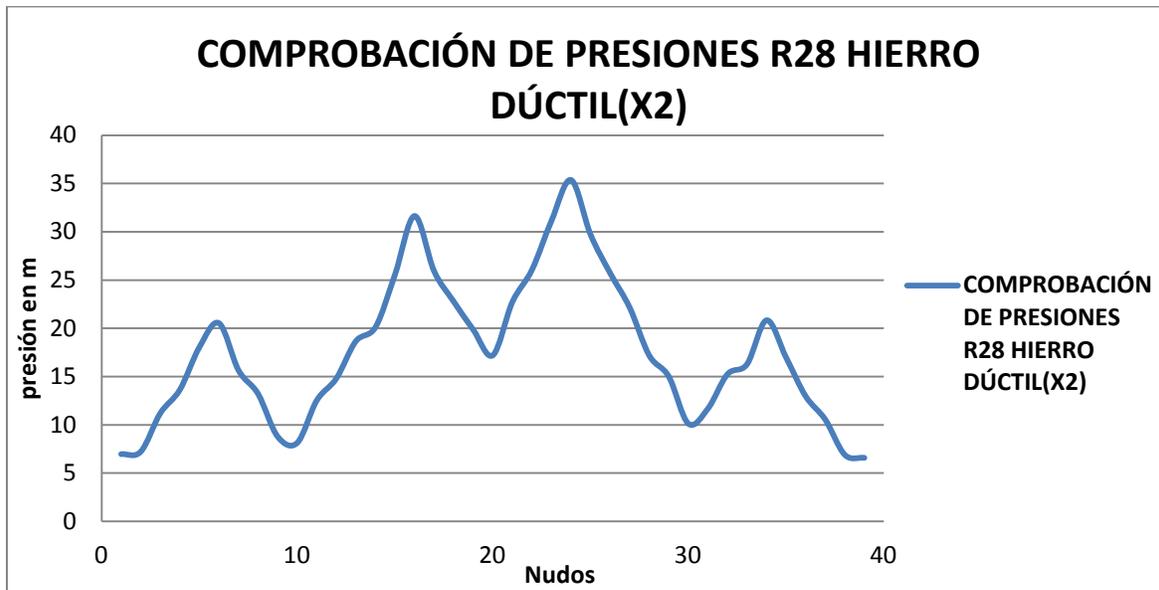
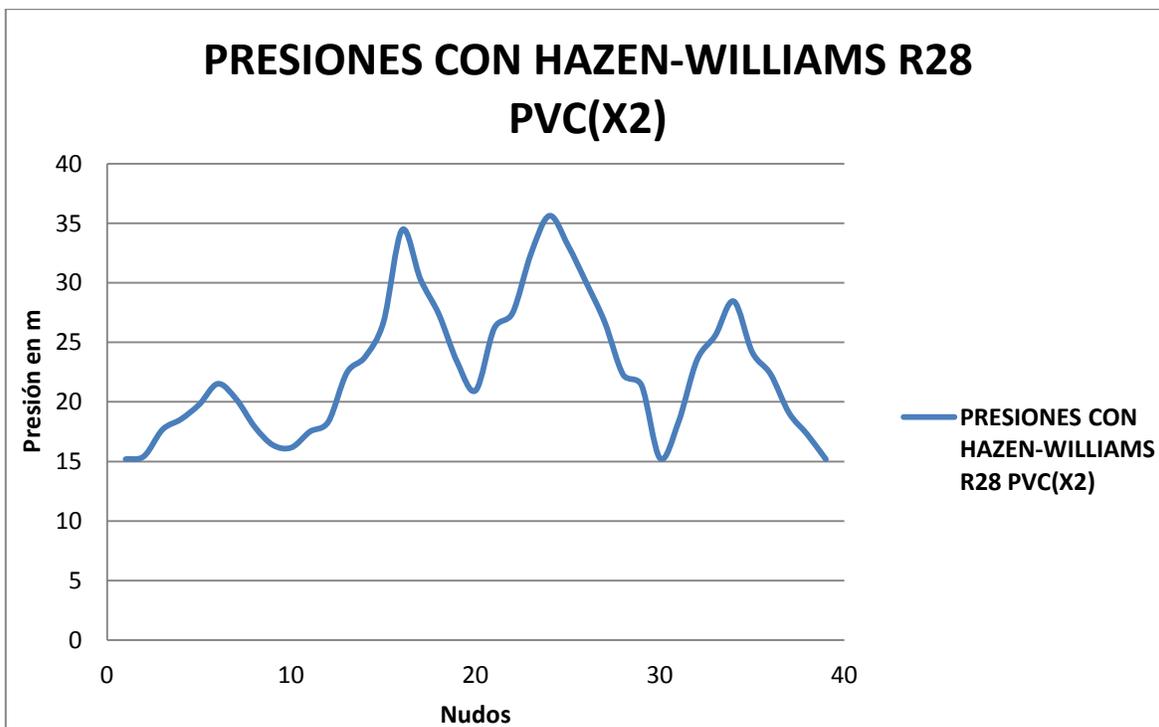


ILUSTRACIÓN 138 PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA HIERRO DÚCTIL.



**ILUSTRACIÓN 139. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA HIERRO DÚCTIL.**

- Resultados de presiones para PVC.



**ILUSTRACIÓN 140. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA PVC.**

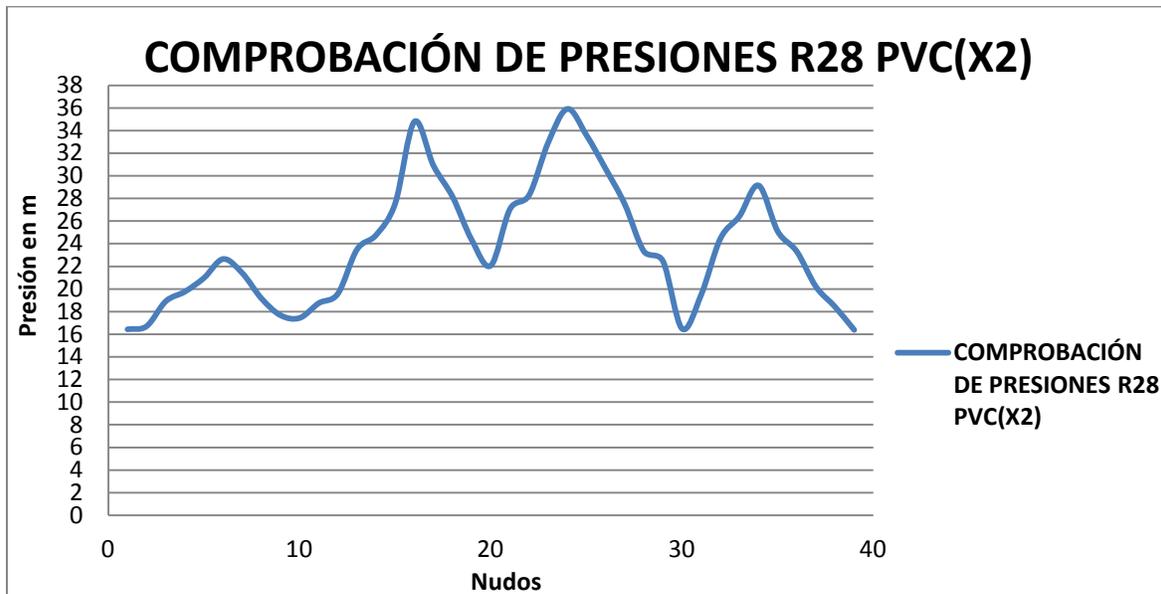


ILUSTRACIÓN 141. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PVC.

- Resultados de presiones para PEAD.

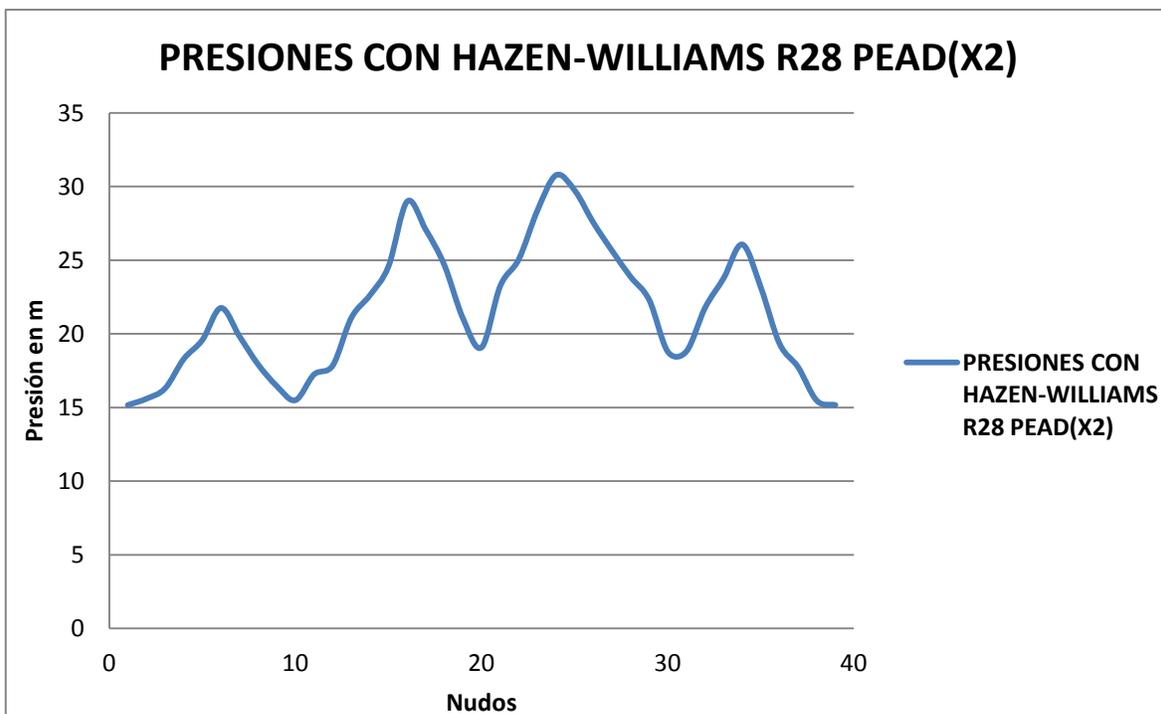
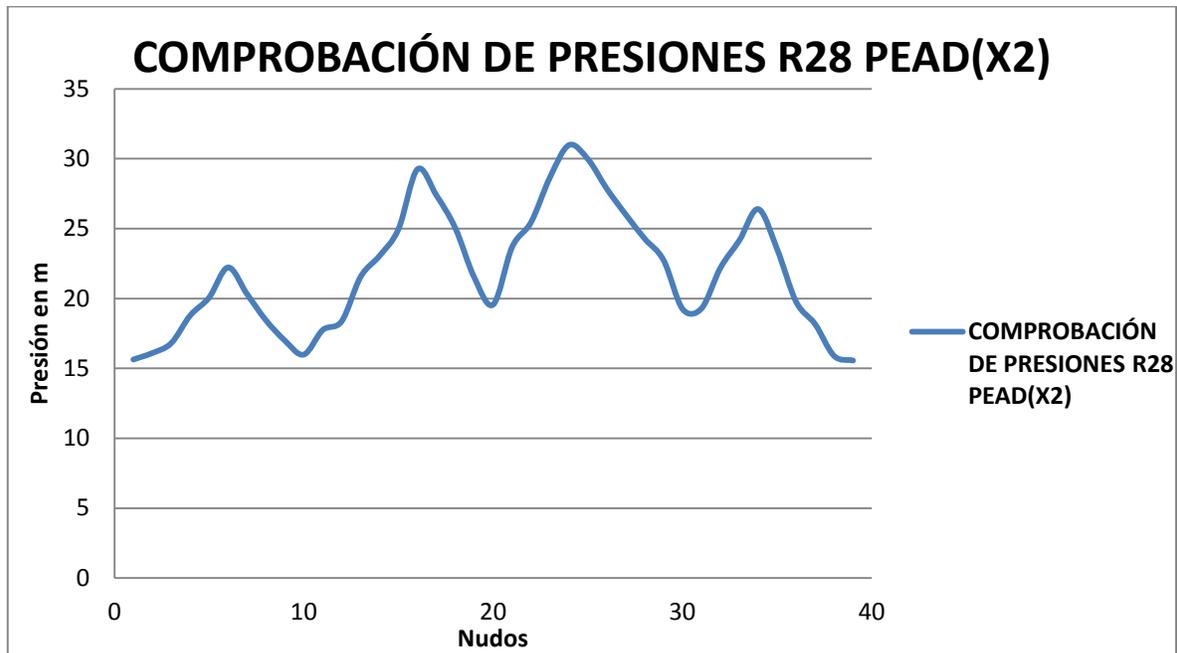


ILUSTRACIÓN 142. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA PEAD.



**ILUSTRACIÓN 143. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PEAD.**

- Costos.

COSTOS \$	RED R28 CAUDALES X4		
	HIERRO DÚCTIL	PVC	PEAD
HAZEN-WILLIAMS	\$ 480 688 165.00	\$ 996 745 336.00	\$ 2 352 812 274.00
DARCY-WEISBACH	\$ 522 773 934.00	\$ 969 144 343.00	\$ 2 347 982 702.00
DIFERENCIA	\$ (42 085 769.00)	\$ 27 600 993.00	\$ 4 829 572.00

**TABLA 26. COSTOS DE LA RED R28 CON CAUDALES CUADRUPLICADOS.**

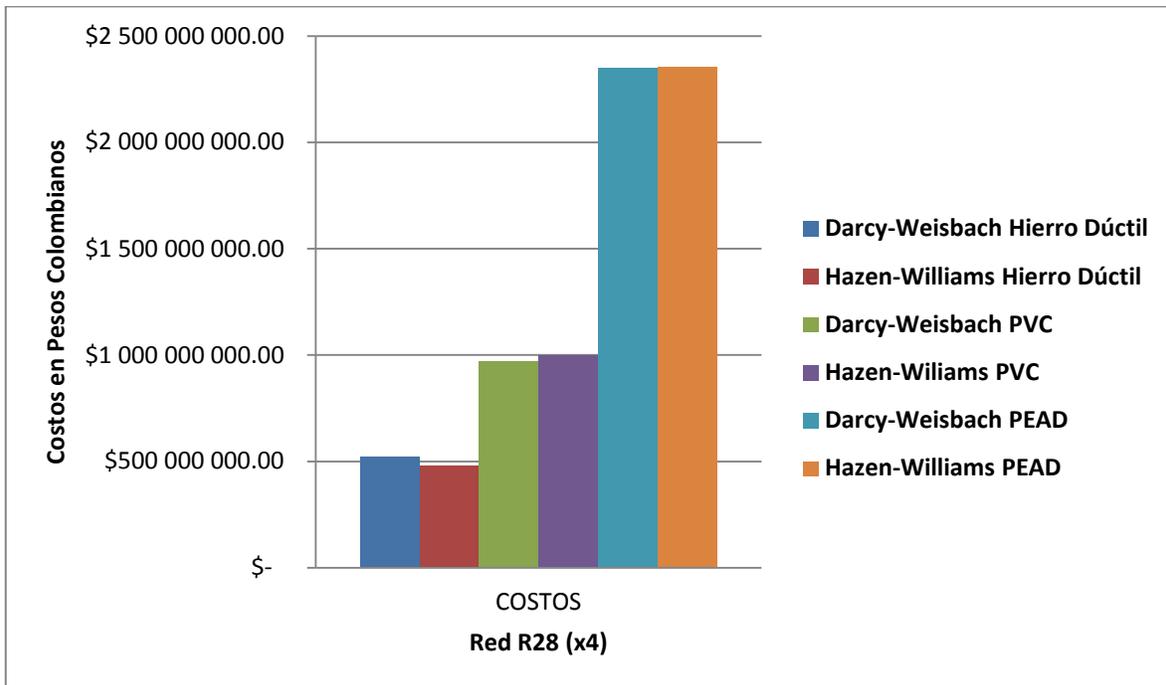


ILUSTRACIÓN 144. GRÁFICA DE COSTOS DE LA RED R28 CON CAUDALES CUADRUPLICADOS.

- Resultados de presiones con Hierro Dúctil

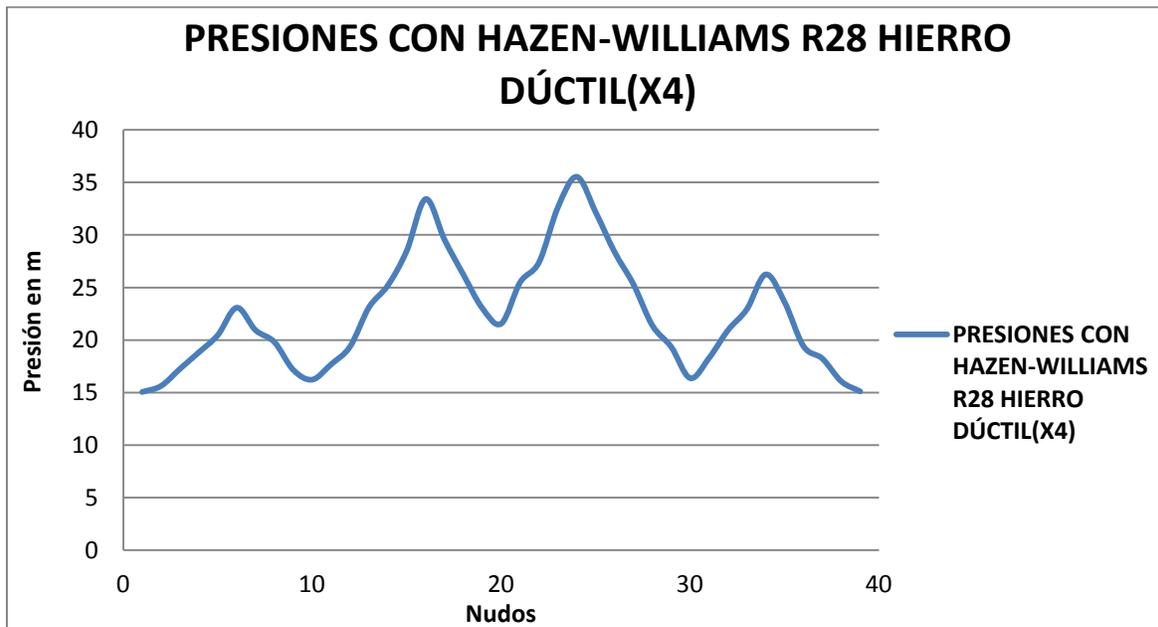


ILUSTRACIÓN 145. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA HIERRO DÚCTIL.

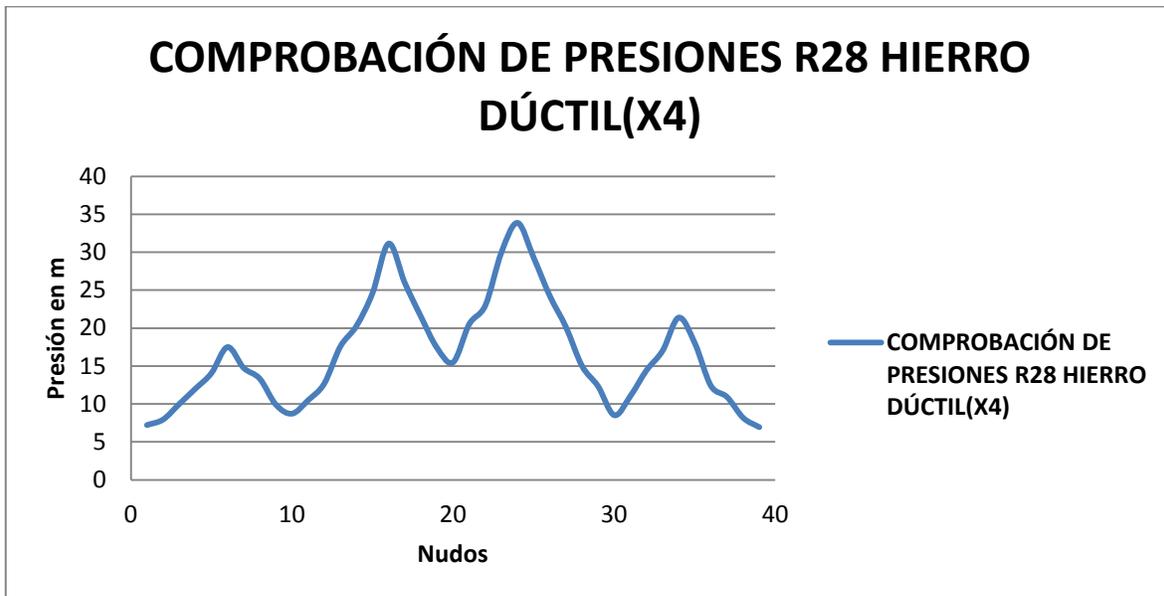


ILUSTRACIÓN 146. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA HIERRO DÚCTIL.

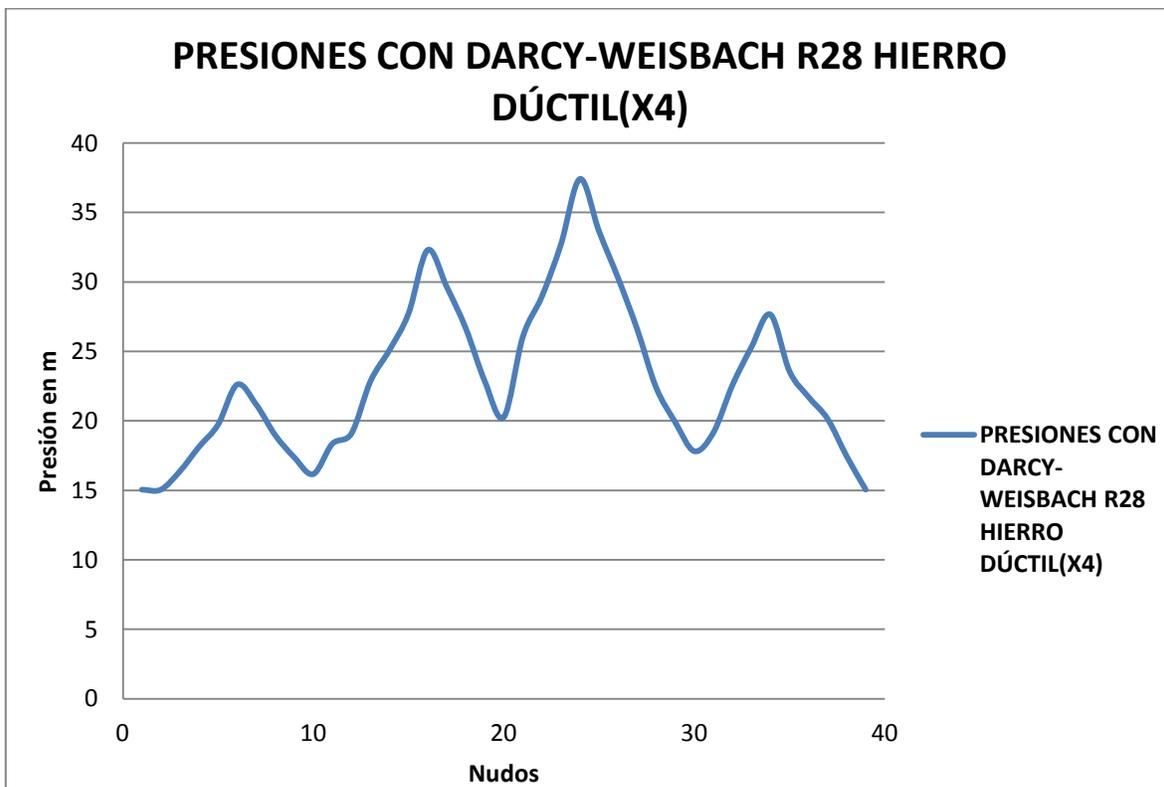


ILUSTRACIÓN 147. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA HIERRO DÚCTIL.

- Resultados de presiones para PVC.

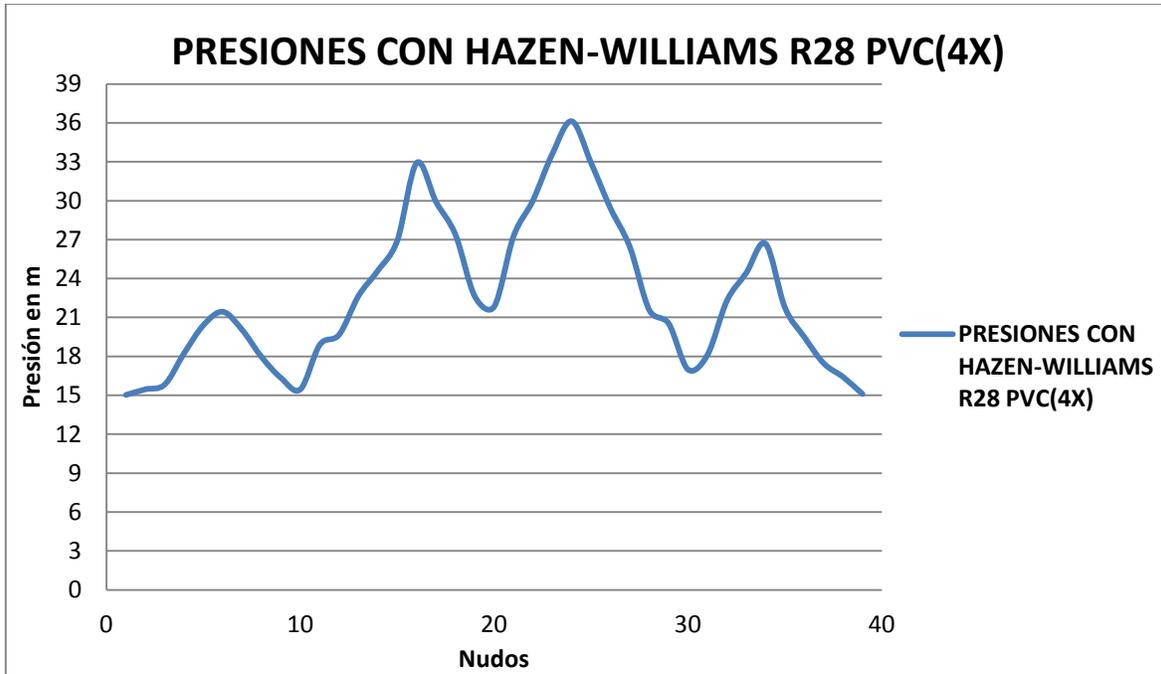


ILUSTRACIÓN 148. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA PVC.

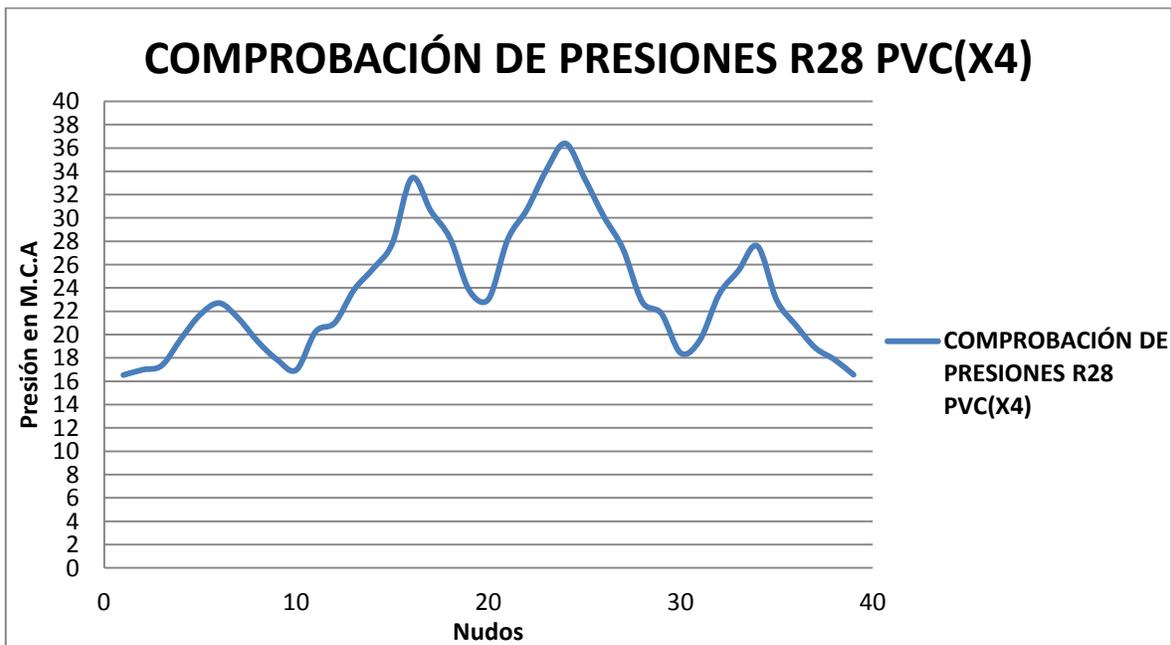


ILUSTRACIÓN 149. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PVC.

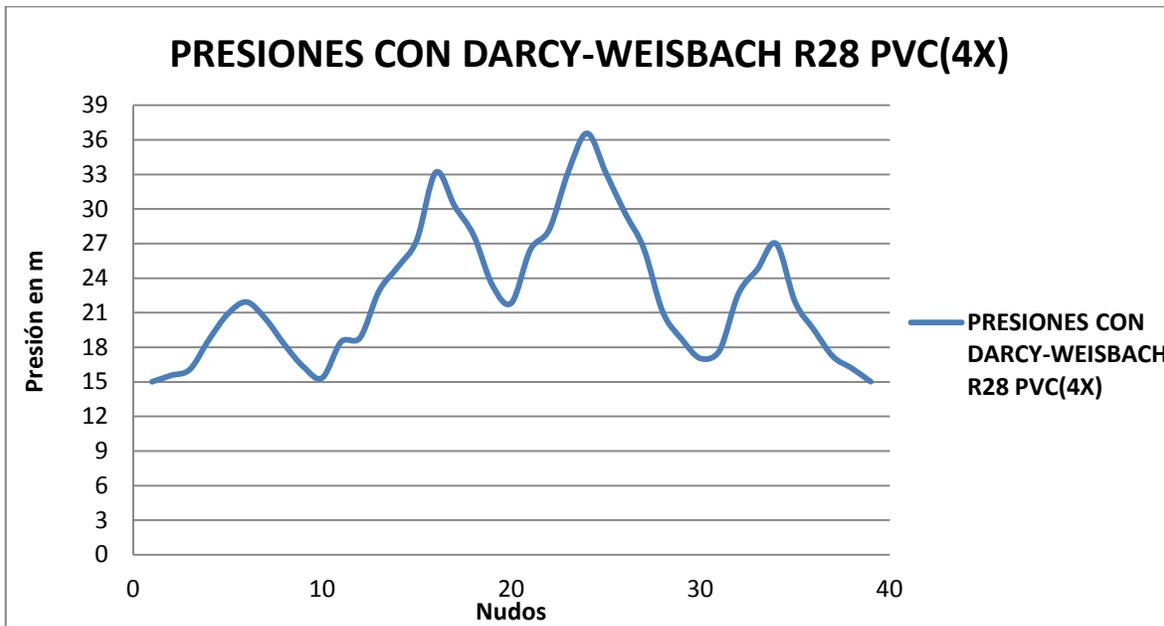


ILUSTRACIÓN 150. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PVC.

- Resultados de presiones para PEAD.

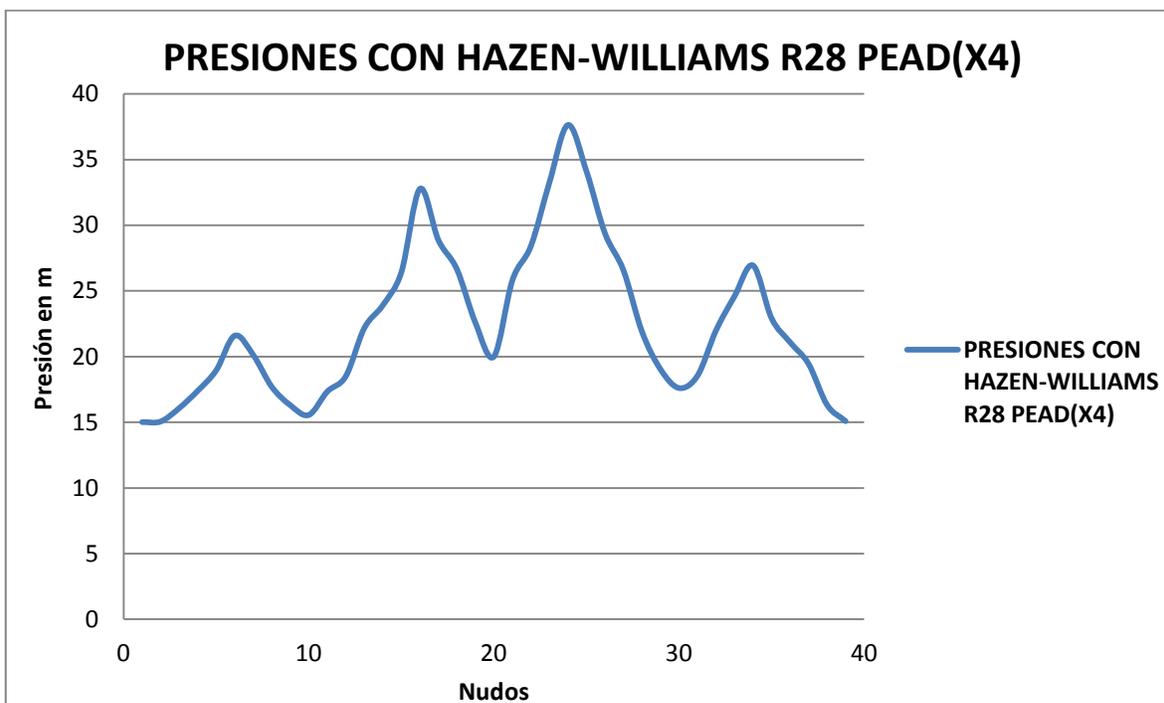


ILUSTRACIÓN 151. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA PEAD.

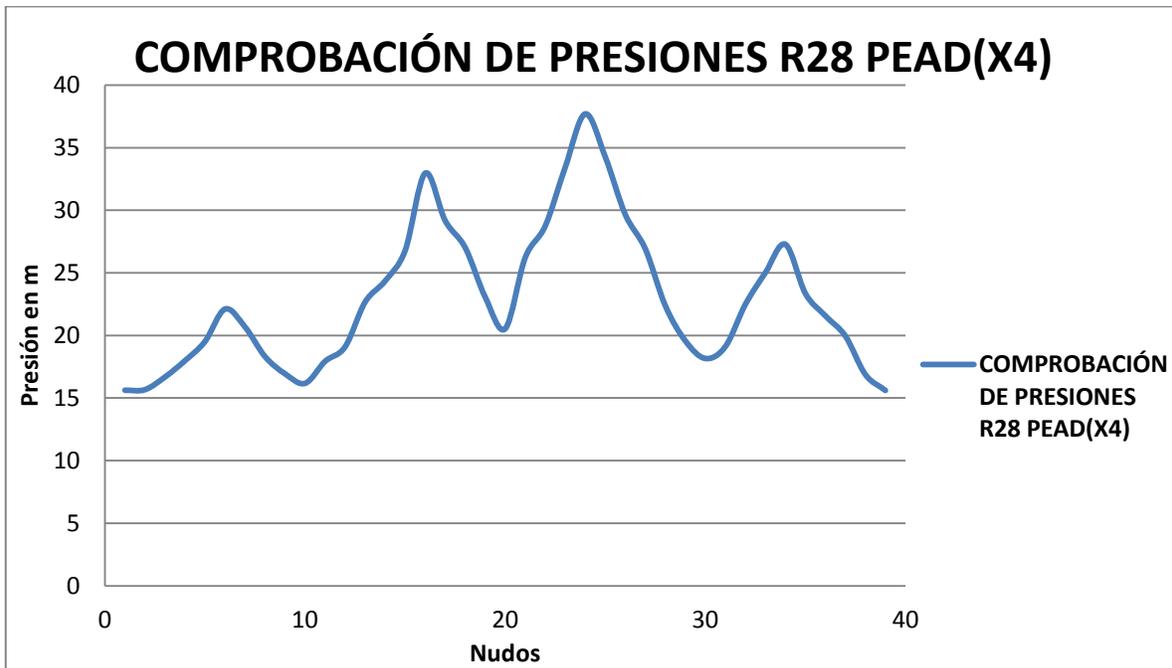


ILUSTRACIÓN 152. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PEAD.

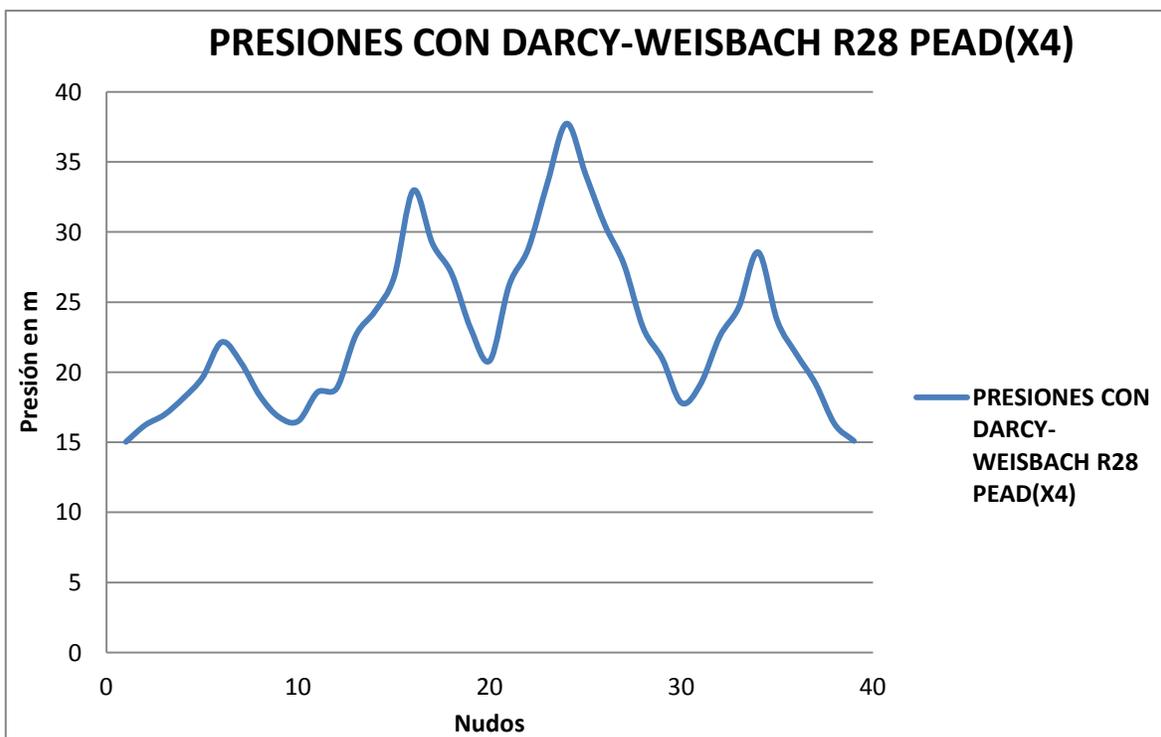
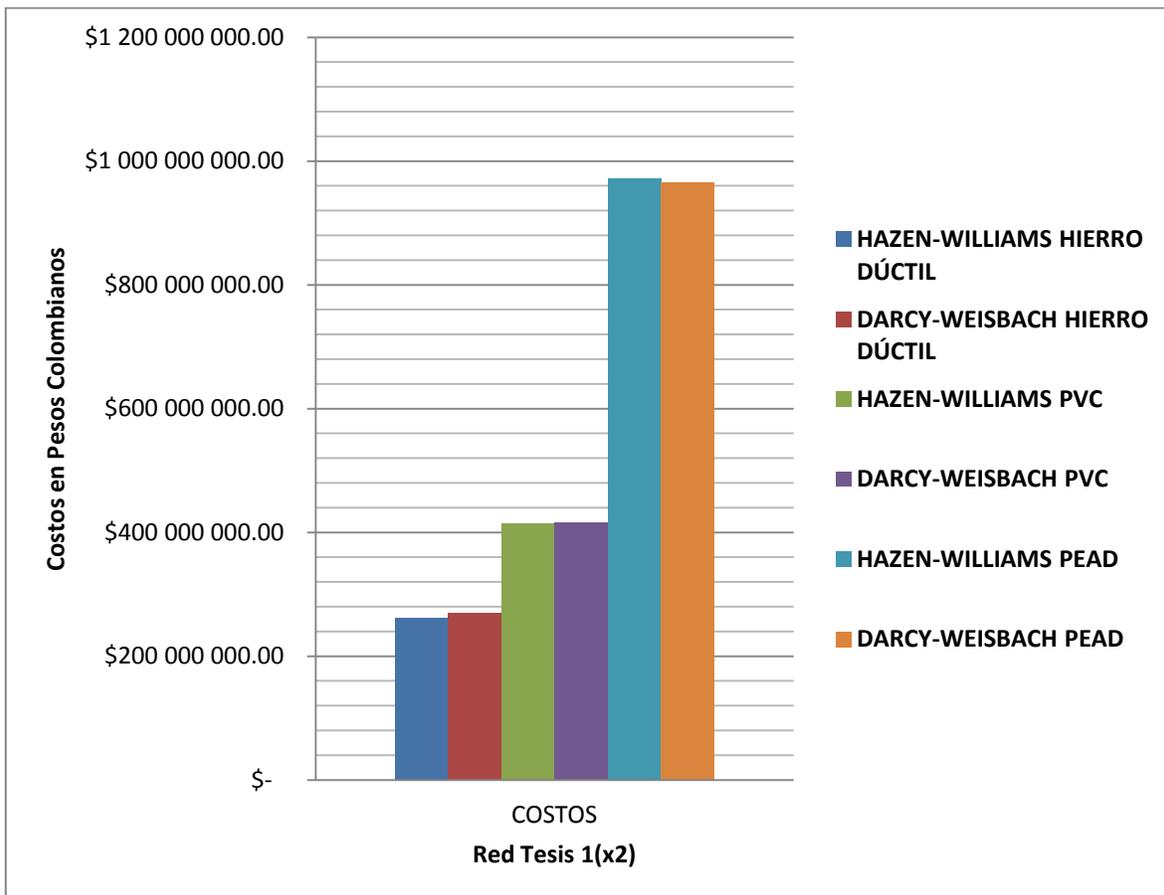


ILUSTRACIÓN 153. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PEAD.

- Costos.

COSTOS \$	RED TESIS 1 CAUDALES X2		
	HIERRO DÚCTIL	PVC	PEAD
HAZEN-WILLIAMS	\$ 261 767 444.00	\$ 413 528 622.00	\$ 972 139 777.00
DARCY-WEISBACH	\$ 270 209 747.00	\$ 415 203 673.00	\$ 965 380 172.00
DIFERENCIA	\$ (8 442 303.00)	\$ (1 675 051.00)	\$ 6 759 605.00

**TABLA 27. COSTOS DE LA RED CON CAUDALES DUPLICADOS.**



**ILUSTRACIÓN 154. GRÁFICA DE COSTOS DE LA RED TESIS 1 PARA CAUDALES DUPLICADOS.**

- Resultados de presiones para Hierro Dúctil

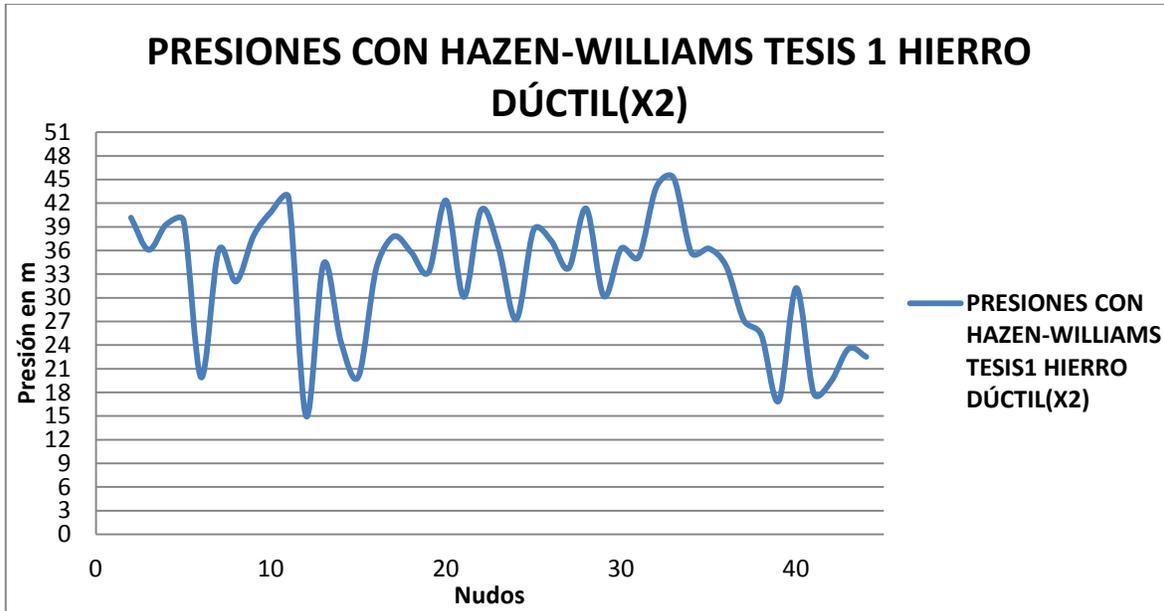


ILUSTRACIÓN 155. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA HIERRO DÚCTIL.

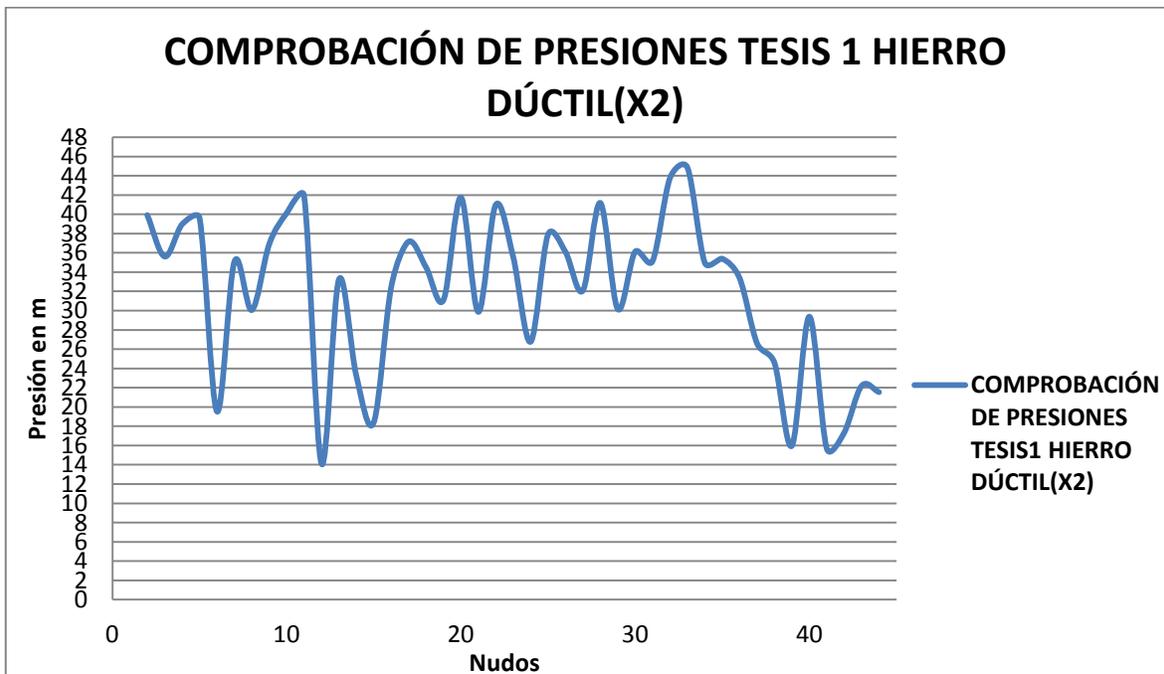


ILUSTRACIÓN 156. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA HIERRO DÚCTIL.

- Resultados de presiones para PVC.

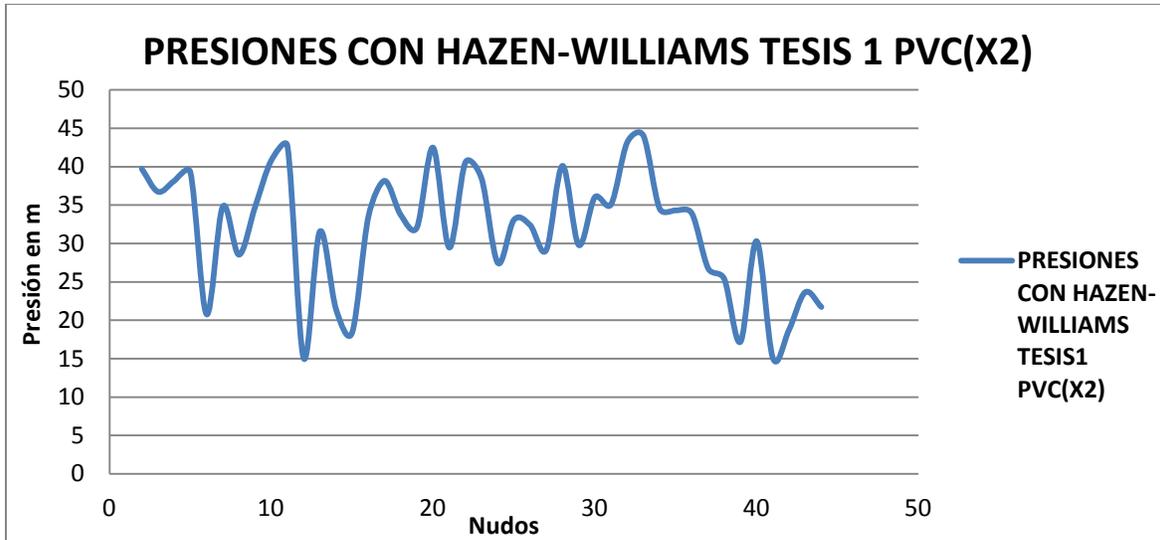


ILUSTRACIÓN 157. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA PVC.

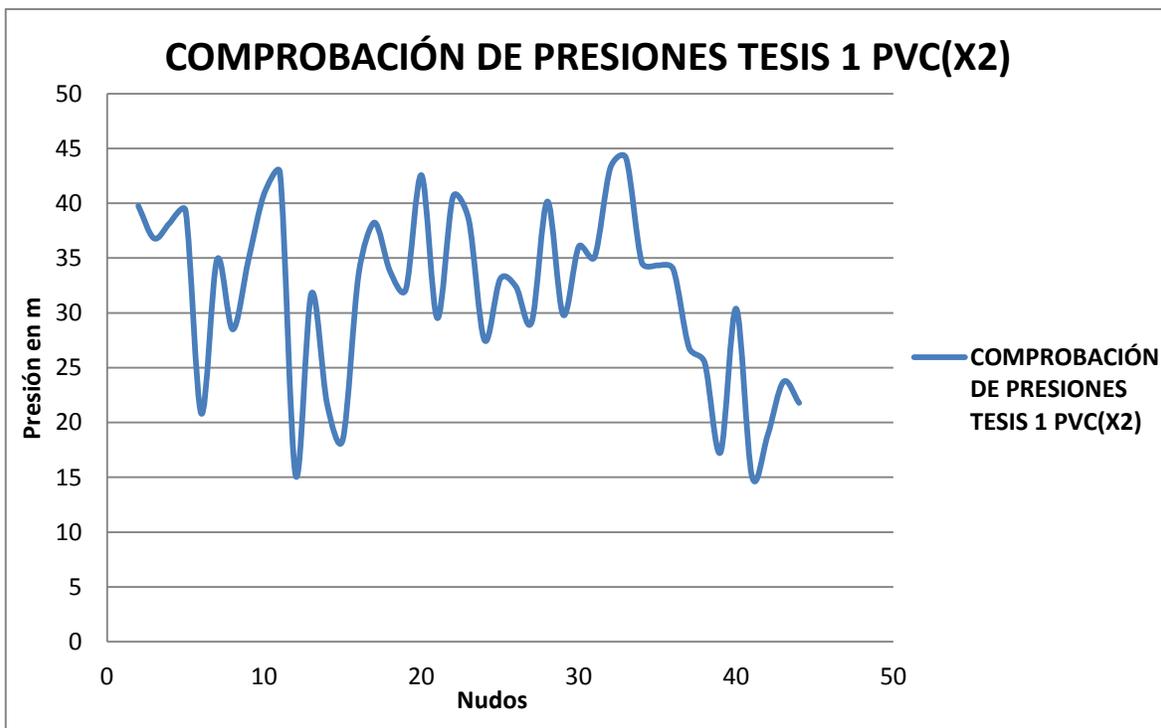


ILUSTRACIÓN 158. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PVC.

- Resultados de presiones para PEAD

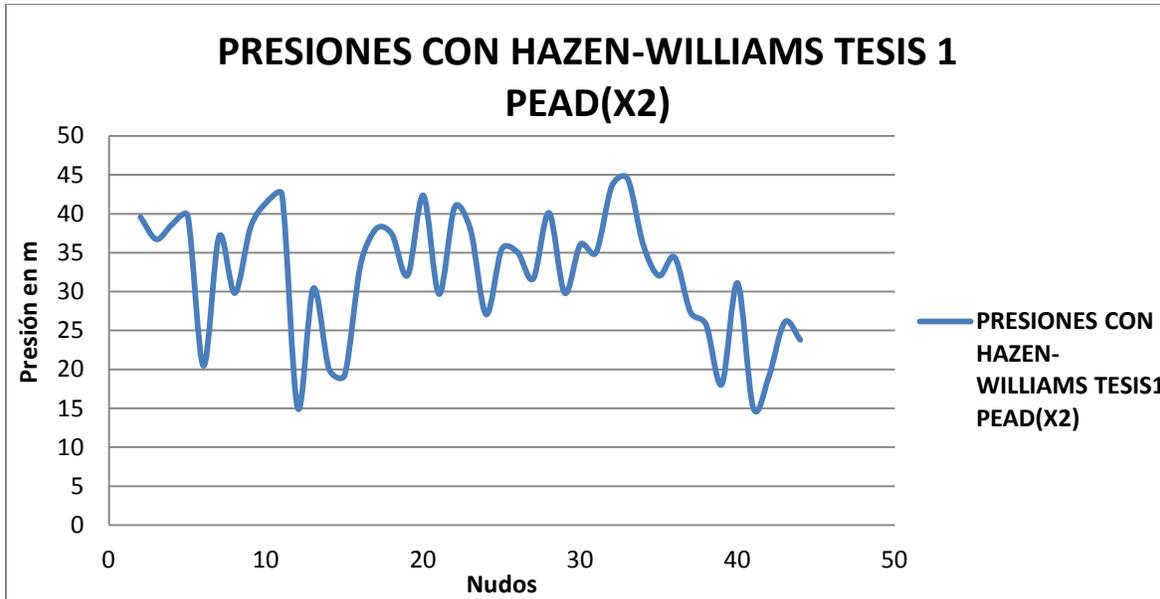


ILUSTRACIÓN 159. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA PEAD.

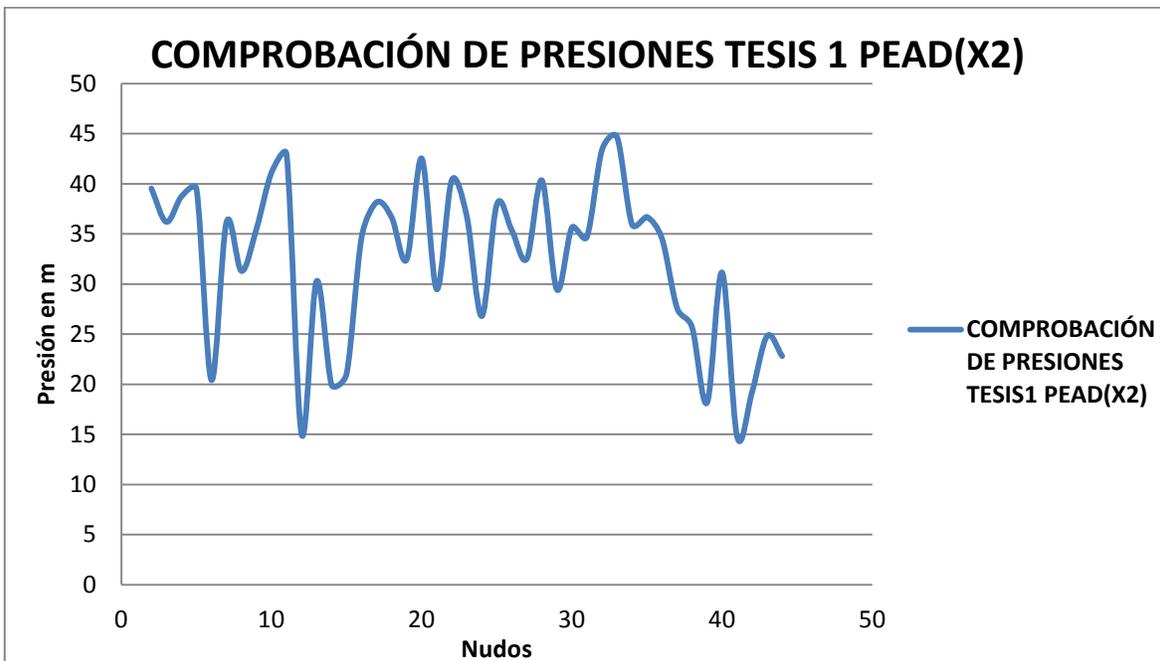
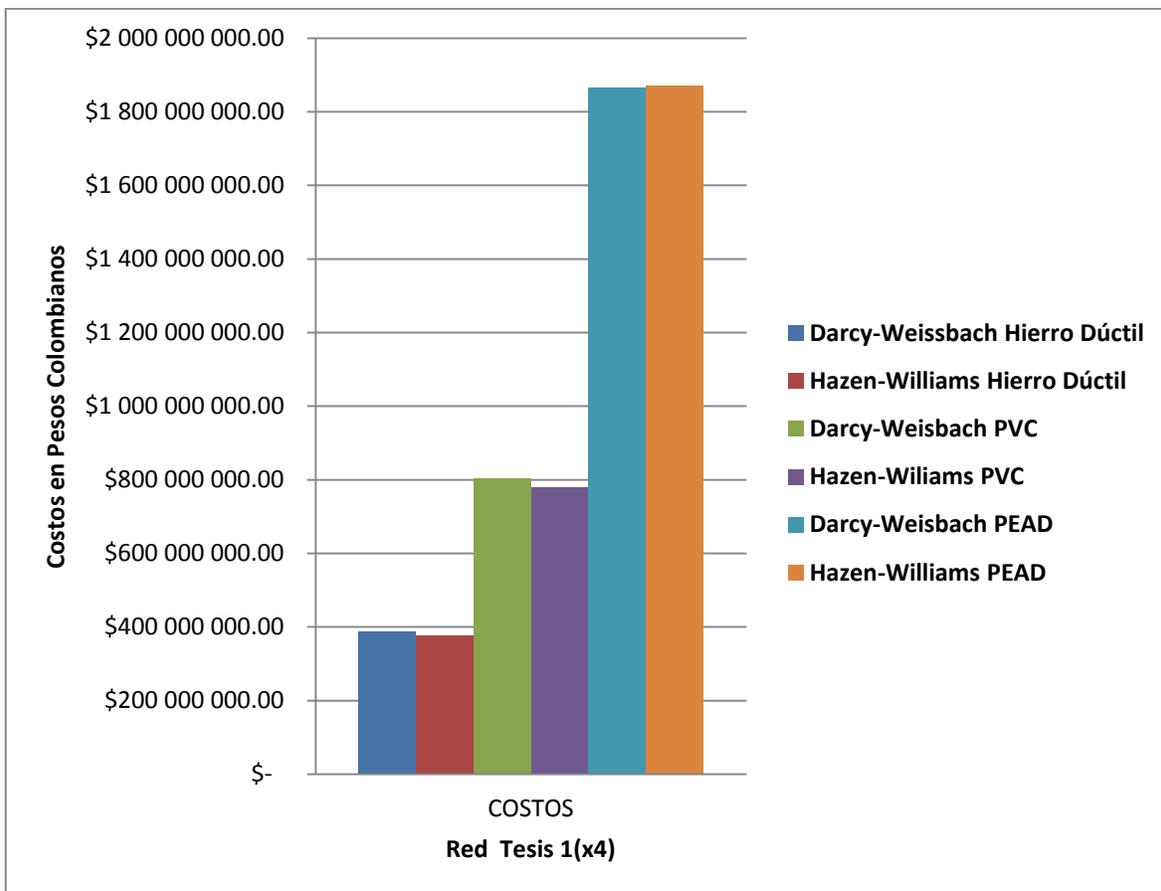


ILUSTRACIÓN 160. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PEAD.

- Costos.

COSTOS \$	RED TESIS 1 CAUDALES X4		
	HIERRO DÚCTIL	PVC	PEAD
HAZEN-WILLIAMS	\$ 375 554 846.00	\$ 778 419 341.00	\$ 1 870 147 404.00
DARCY-WEISBACH	\$ 387 561 043.00	\$ 803 469 384.00	\$ 1 864 532 255.00
DIFERENCIA	\$ (12 006 197.00)	\$ (25 050 043.00)	\$ 5 615 149.00

**TABLA 28 COSTOS DE LA RED TESIS 1 CON CAUDALES CUADRUPLICADOS.**



**ILUSTRACIÓN 161. GRÁFICA DE COSTOS PARA LA RED TESIS 1 CON CAUDALES CUADRUPLICADOS.**

- Resultados de presiones para Hierro Dúctil.

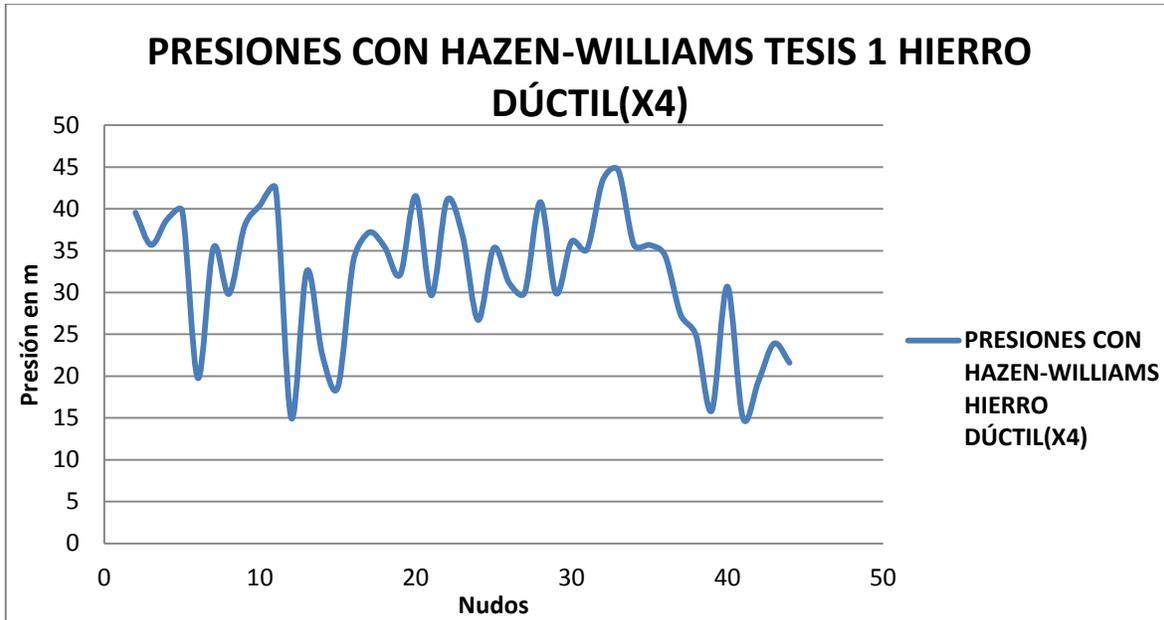


ILUSTRACIÓN 162. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA HIERRO DÚCTIL.

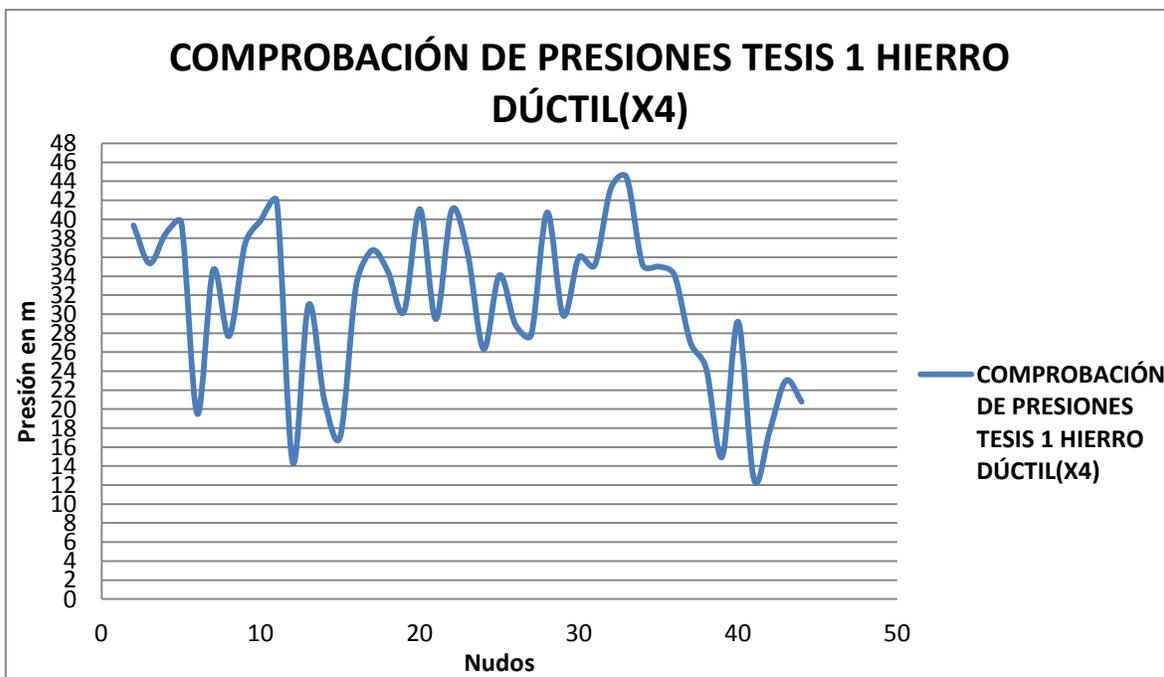


ILUSTRACIÓN 163. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA HIERRO DÚCTIL.

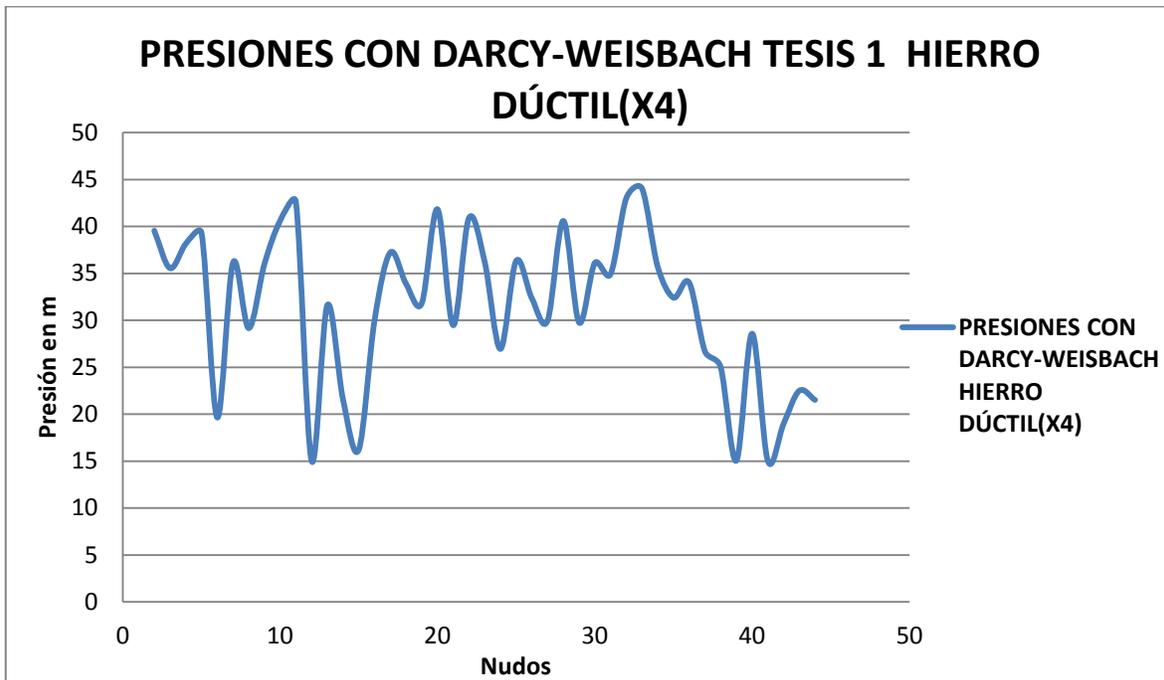


ILUSTRACIÓN 164. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA HIERRO DÚCTIL.

- Resultados de presiones para PVC.

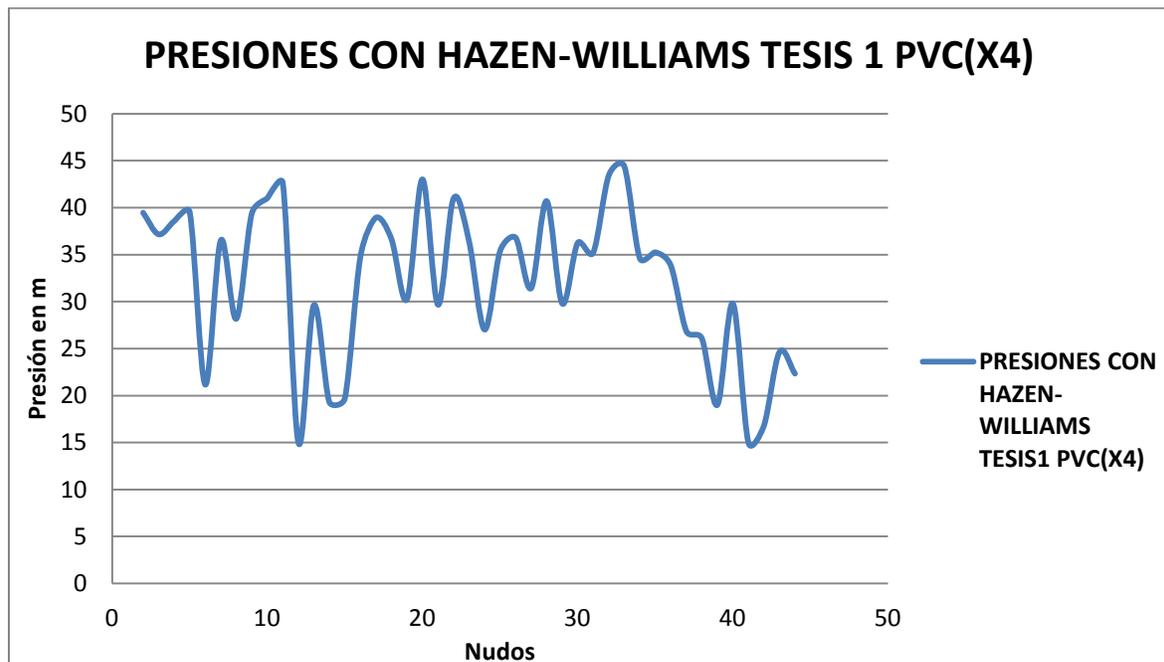


ILUSTRACIÓN 165. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA PVC.

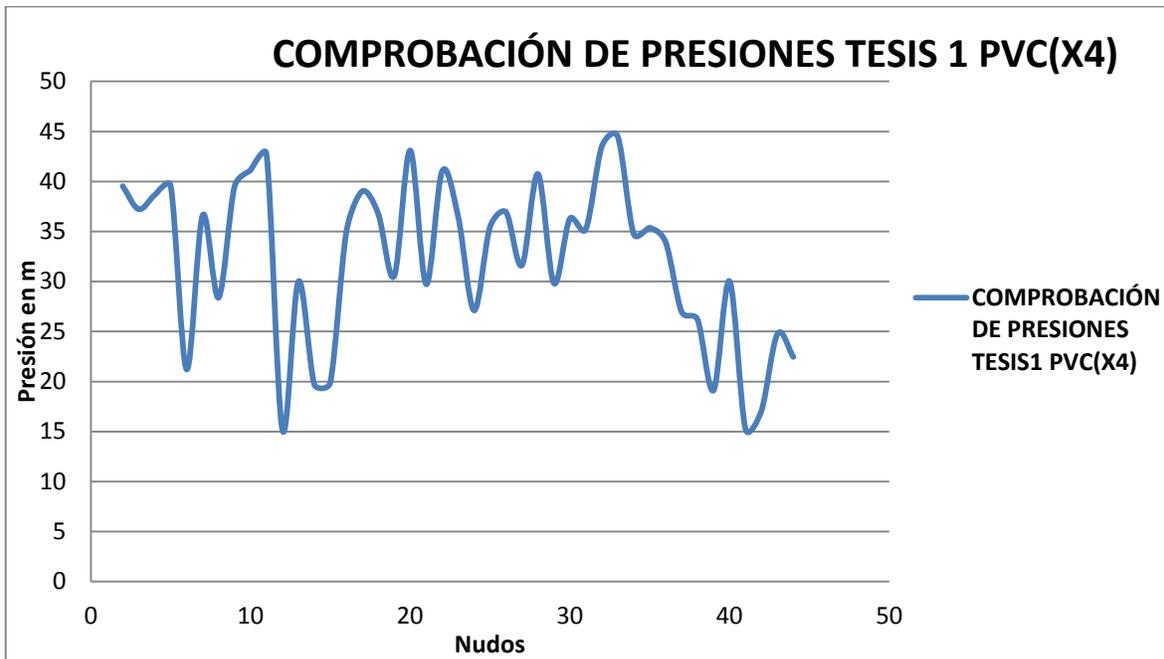


ILUSTRACIÓN 166. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PVC.

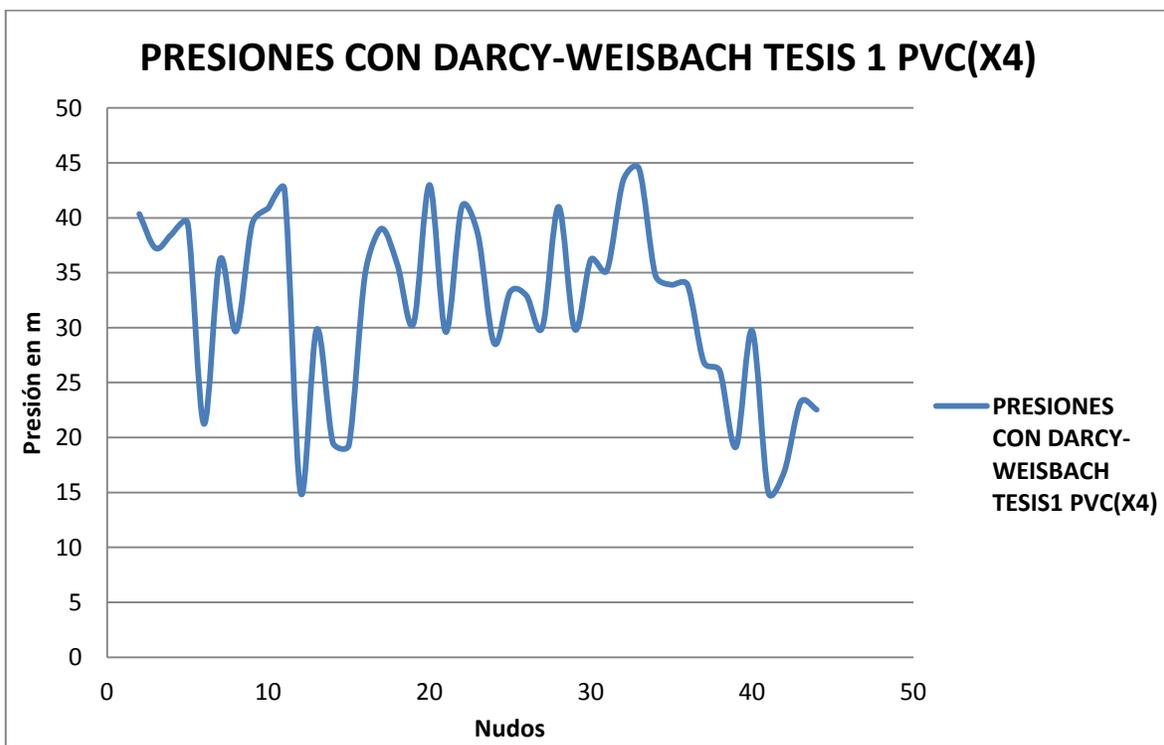


ILUSTRACIÓN 167. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PVC.

- Resultado de presiones para PEAD.

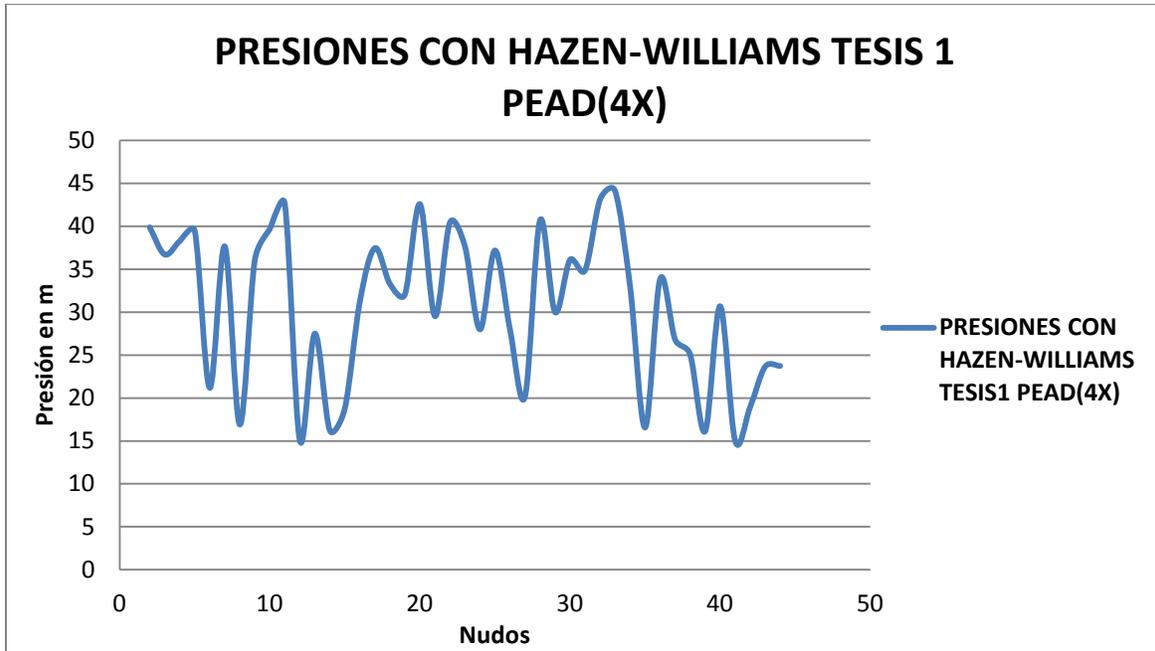


ILUSTRACIÓN 168. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA PEAD.

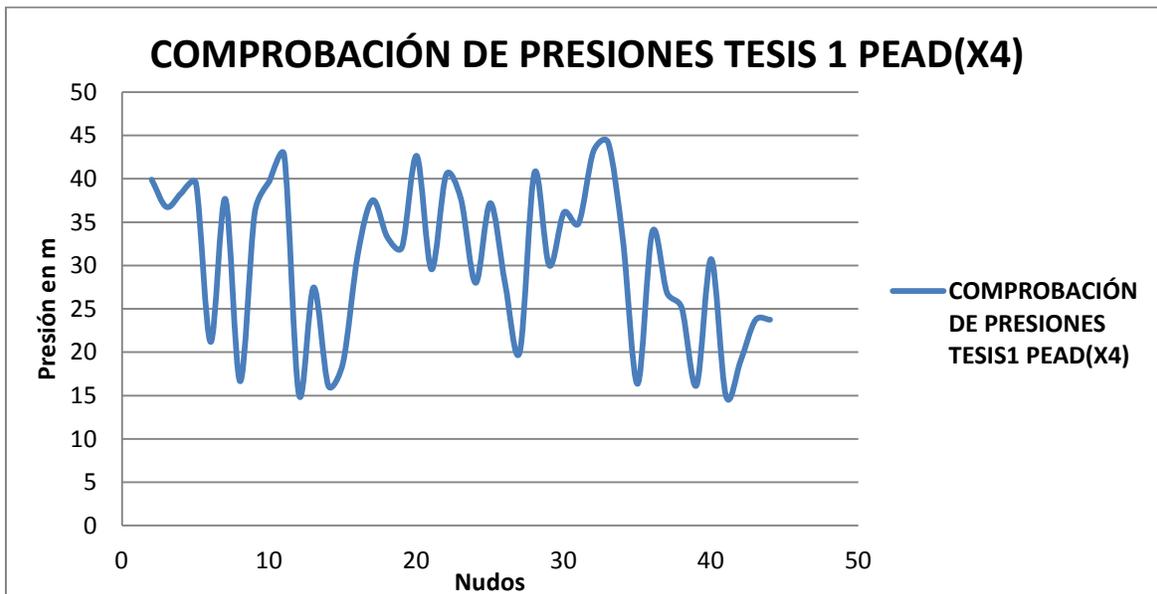
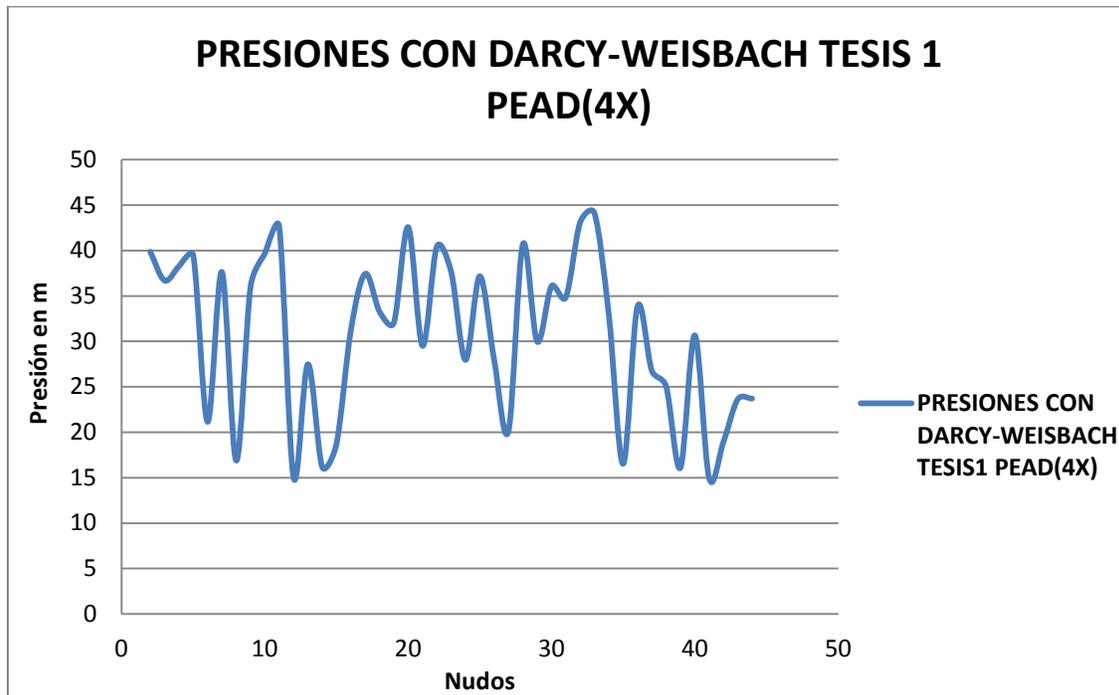


ILUSTRACIÓN 169. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PEAD.



**ILUSTRACIÓN 170. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PEAD.**

- Costos.

	RED TESIS 2 CAUDALES X2		
COSTOS \$	HIERRO DÚCTIL	PVC	PEAD
HAZEN-WILLIAMS	\$ 408 116 612.00	\$ 751 731 271.00	\$ 1 579 203 765.00
DARCY-WEISBACH	\$ 431 719 690.00	\$ 667 592 454.00	\$ 1 633 808 835.00
DIFERENCIA	\$ (23 603 078.00)	\$ 84 138 817.00	\$ (54 605 070.00)

**TABLA 29. COSTOS DE LA RED TESIS 2 CON CAUDALES DUPLICADOS.**

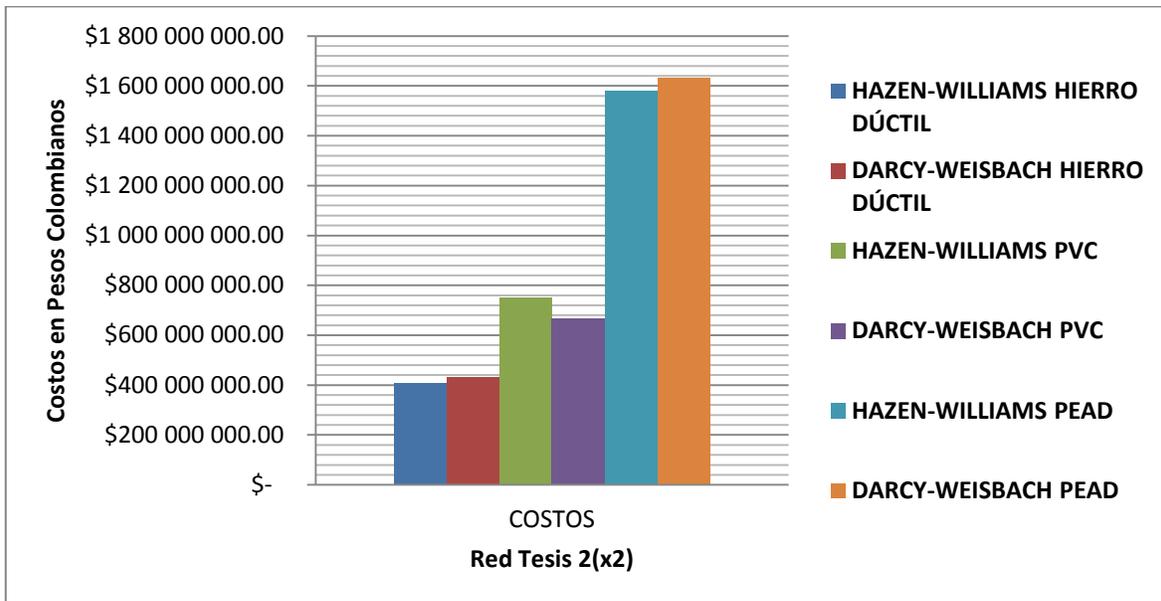


ILUSTRACIÓN 171. GRÁFICA DE COSTOS PARA LA RED TESIS 2 CON CAUDALES DUPLICADOS.

- Resultados de presiones para Hierro Dúctil.

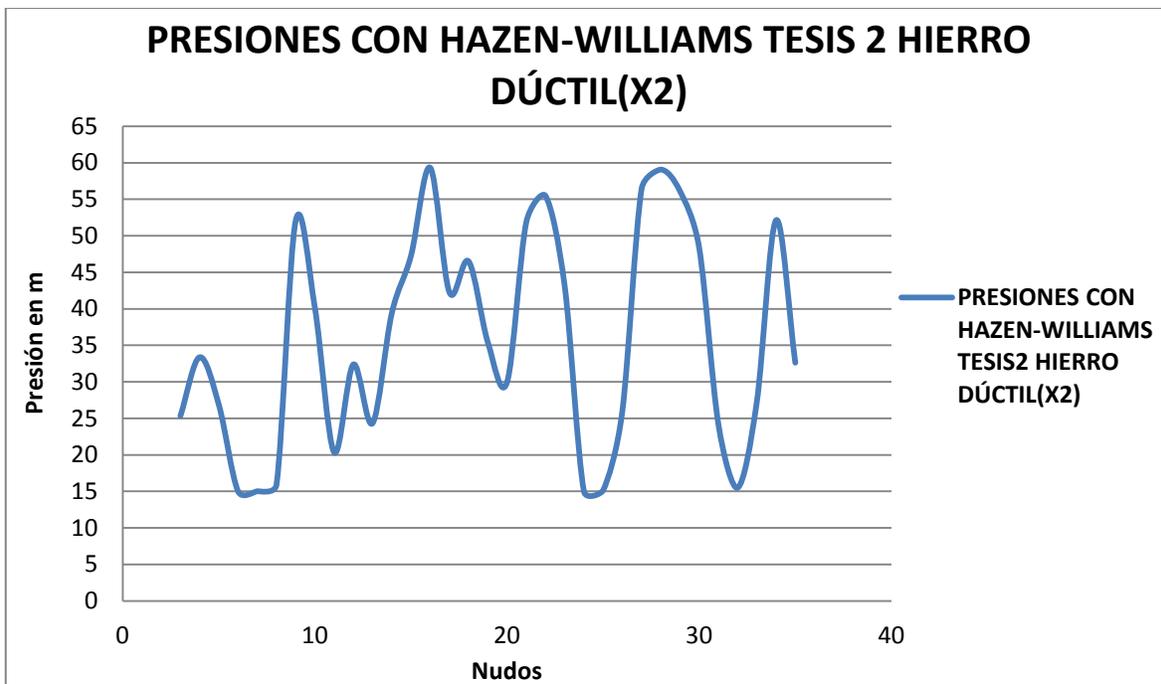
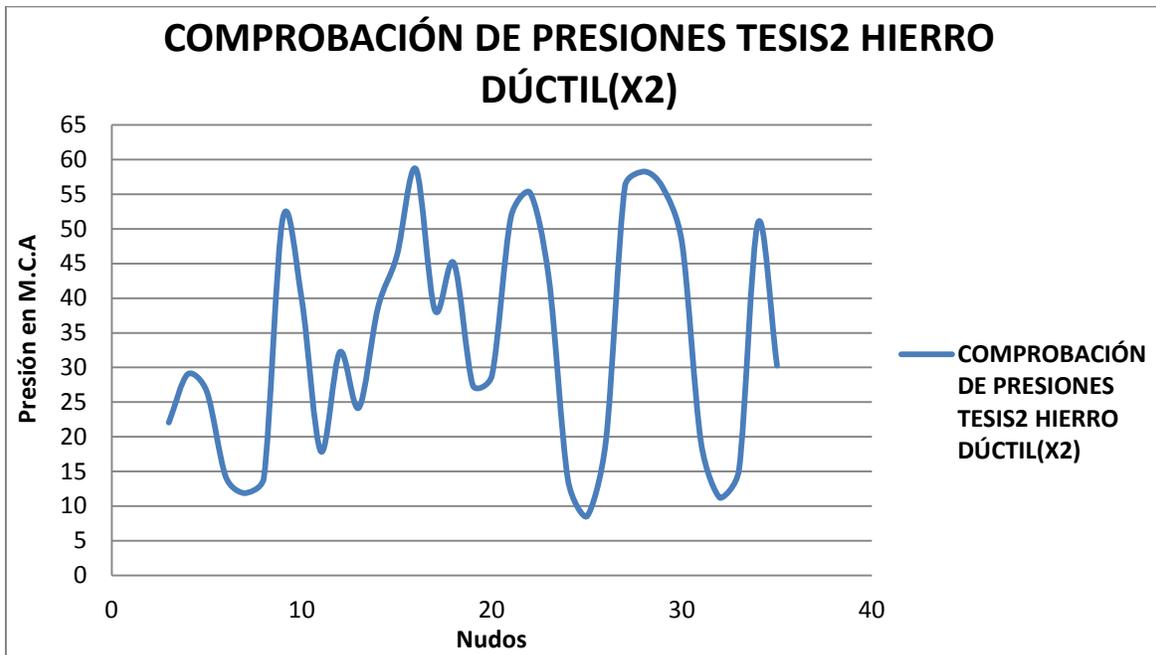
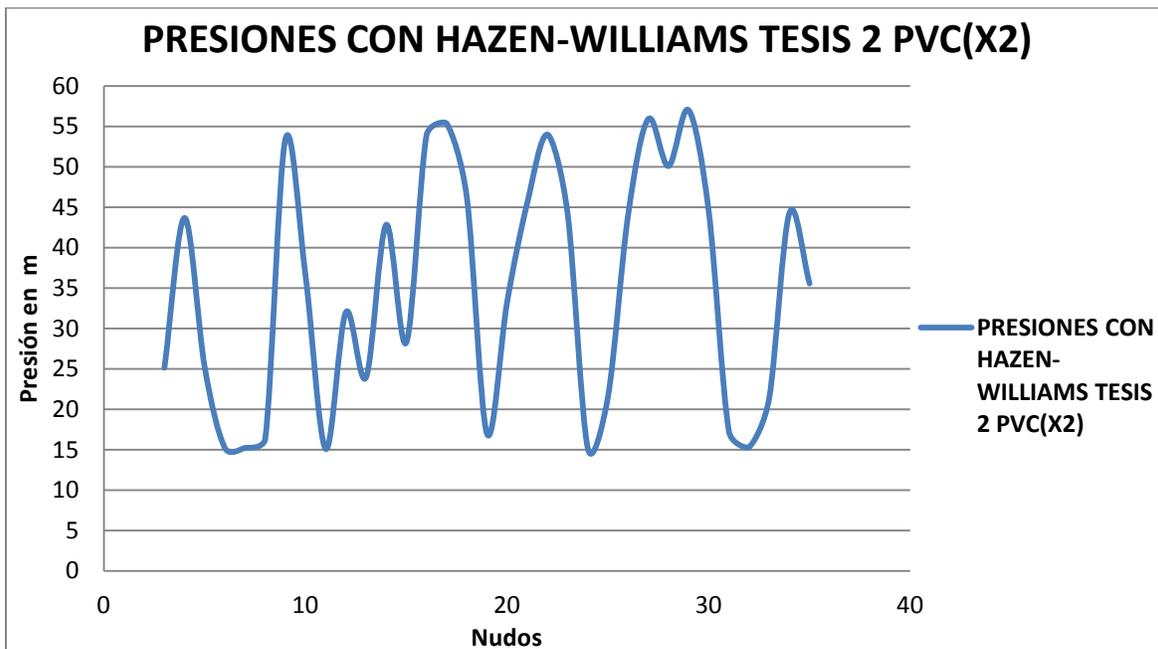


ILUSTRACIÓN 172. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA HIERRO DÚCTIL.

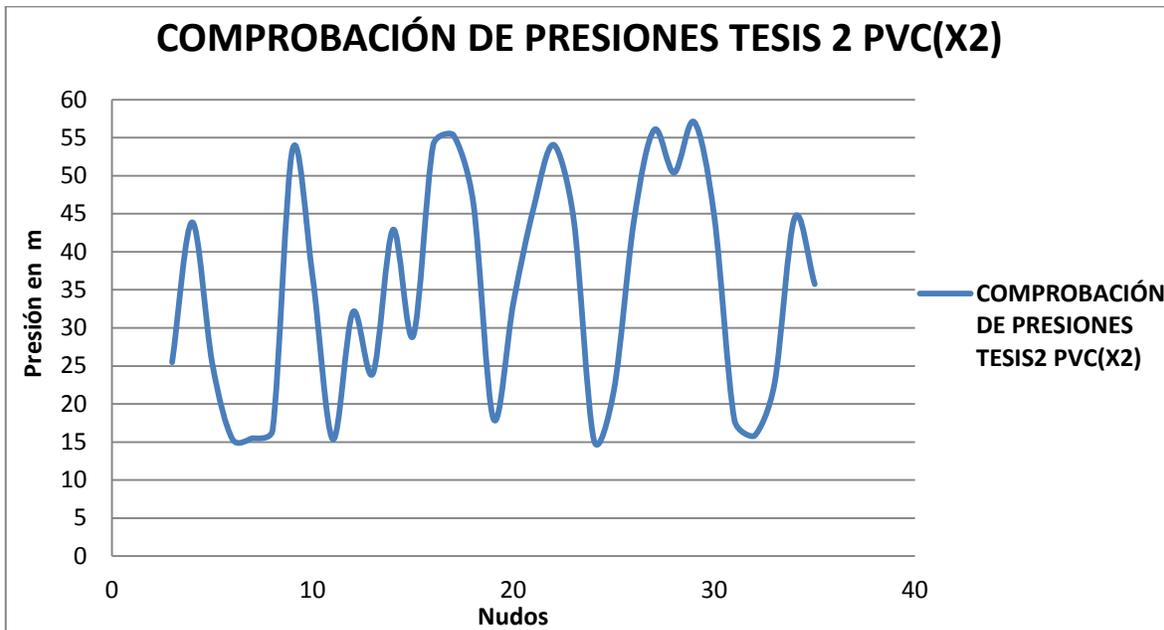


**ILUSTRACIÓN 173. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA HIERRO DÚCTIL.**

- Resultados de presiones para PVC.

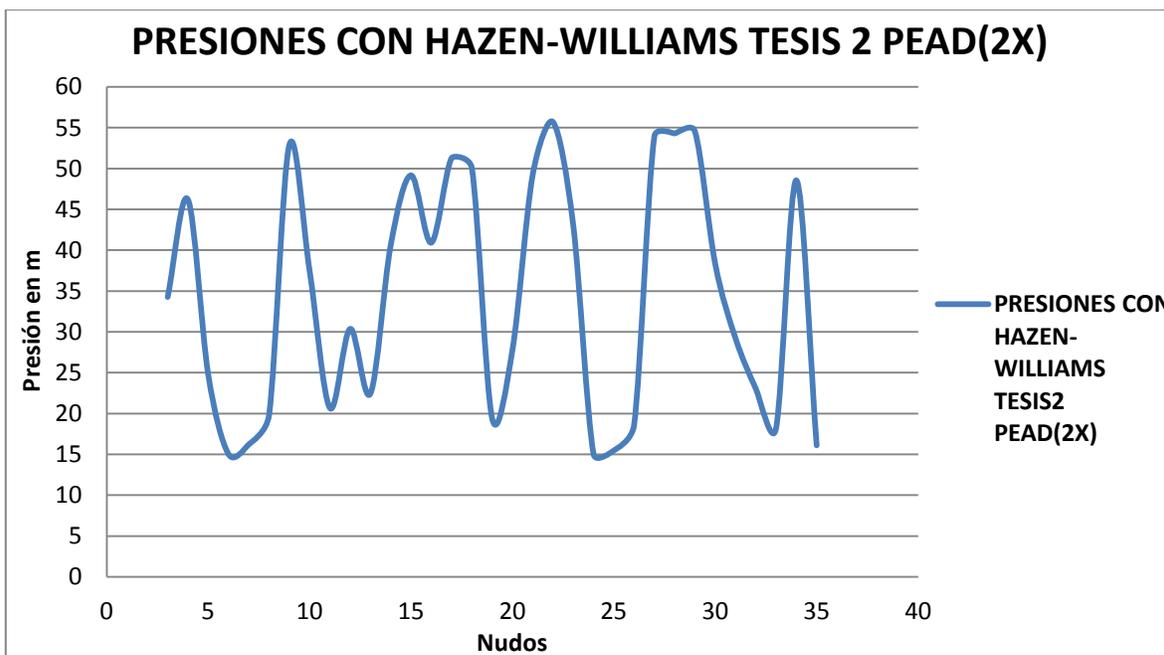


**ILUSTRACIÓN 174. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA PVC.**

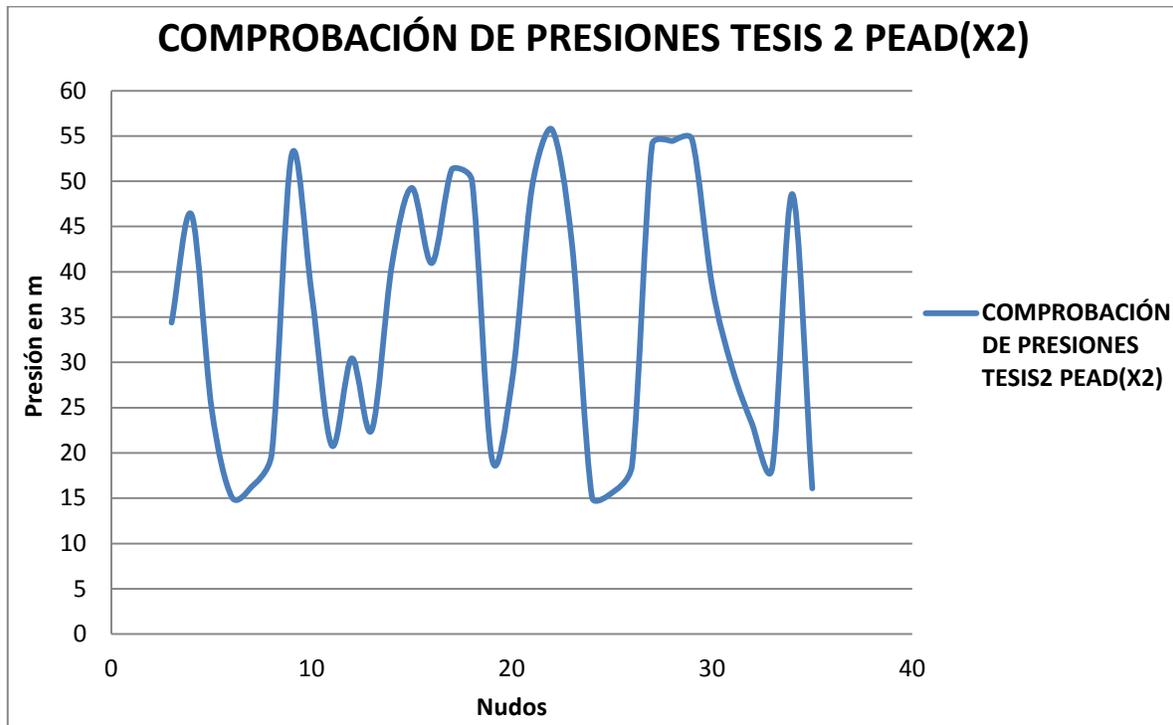


**ILUSTRACIÓN 175. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PVC.**

- Resultados de presiones para PEAD.



**ILUSTRACIÓN 176. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA PEAD.**



**ILUSTRACIÓN 177. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PEAD.**

- Costos.

COSTOS \$	RED TESIS 2 CAUDALES X4		
	HIERRO DÚCTIL	PVC	PEAD
HAZEN-WILLIAMS	\$ 558 745 249.00	\$ 1 257 247 373.00	\$ 2 640 552 699.00
DARCY-WEISBACH	\$ 576 904 087.00	\$ 1 303 913 585.00	\$ 2 732 550 411.00
DIFERENCIA	\$ (18 158 838.00)	\$ (46 666 212.00)	\$ (91 997 712.00)

**TABLA 30. COSTOS DE LA RED TESIS 2 CON CAUDALES CUADRPLICADOS.**

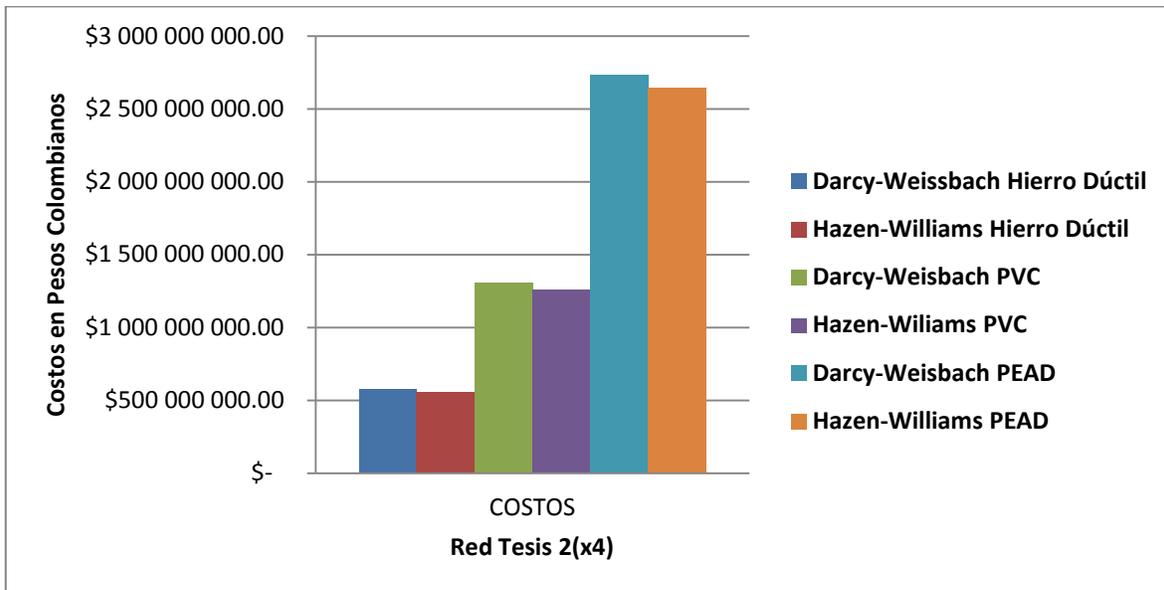


ILUSTRACIÓN 178. GRÁFICA DE COSTOS DE LA RED TESIS 2 CON CAUDALES CUADRUPPLICADOS.

- Resultados de presiones para Hierro Dúctil.

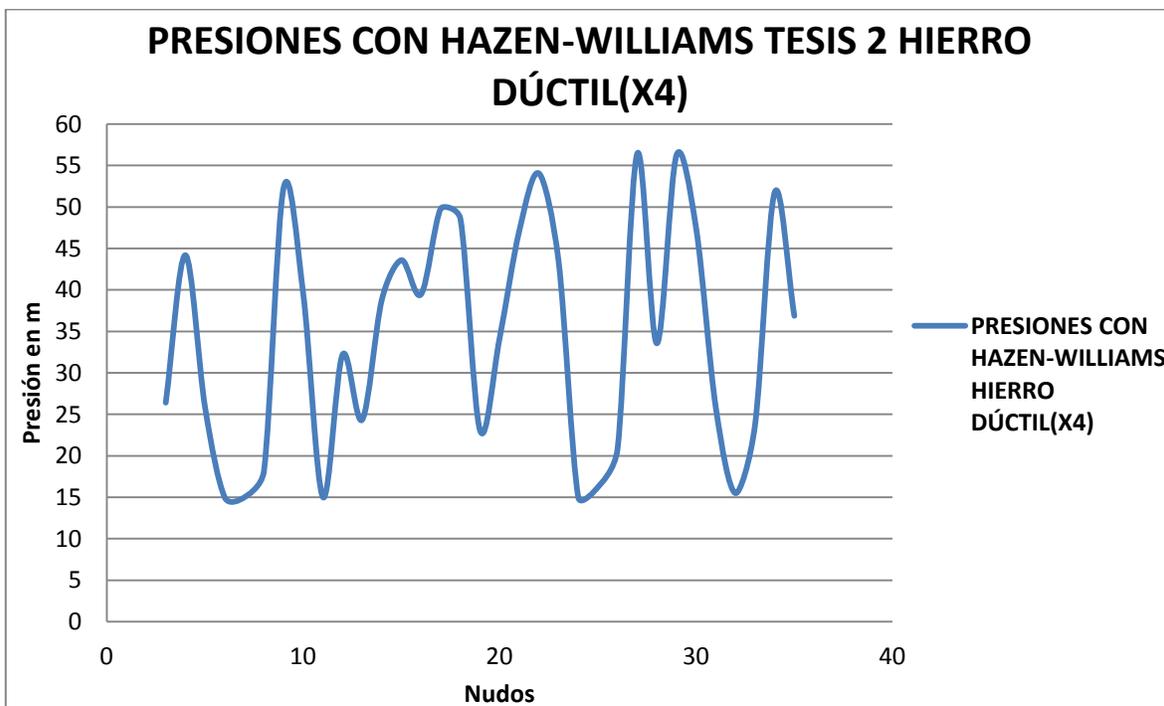


ILUSTRACIÓN 179. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA HIERRO DÚCTIL.

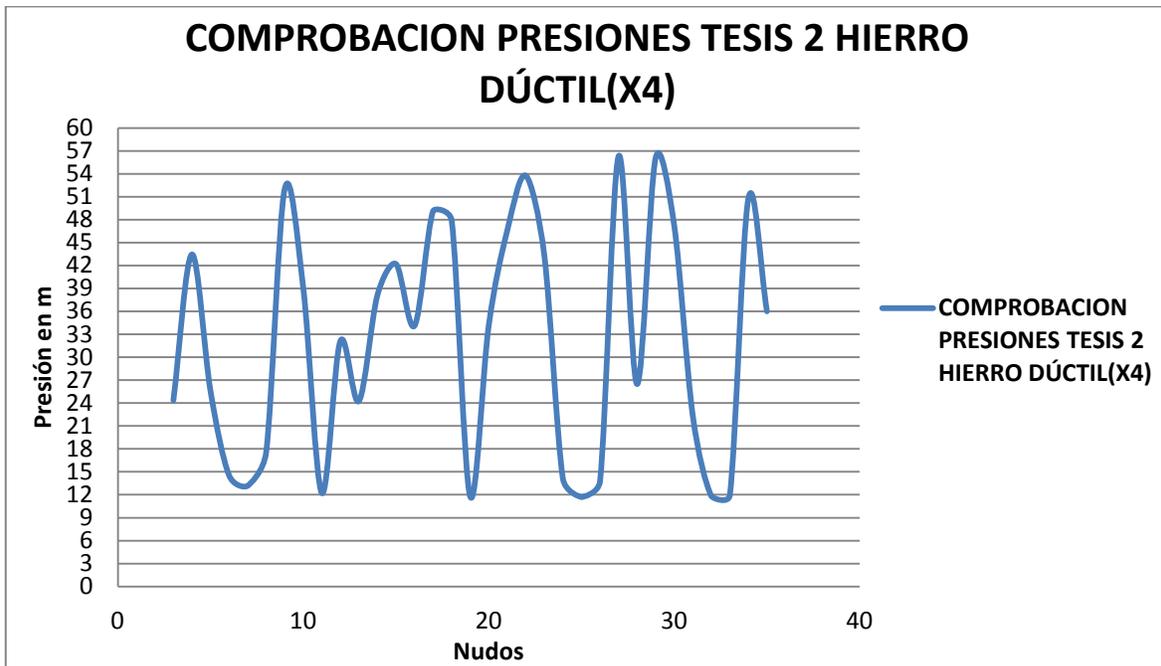


ILUSTRACIÓN 180. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA HIERRO DÚCTIL.

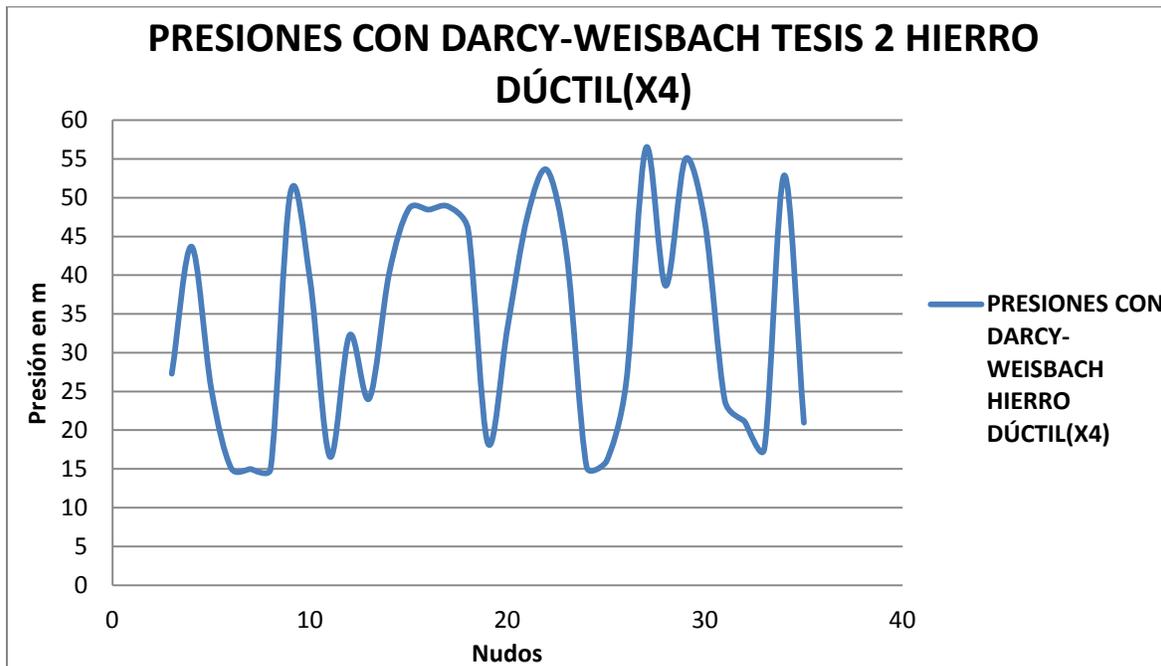


ILUSTRACIÓN 181. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA HIERRO DÚCTIL.

- Resultados de presiones para PVC.

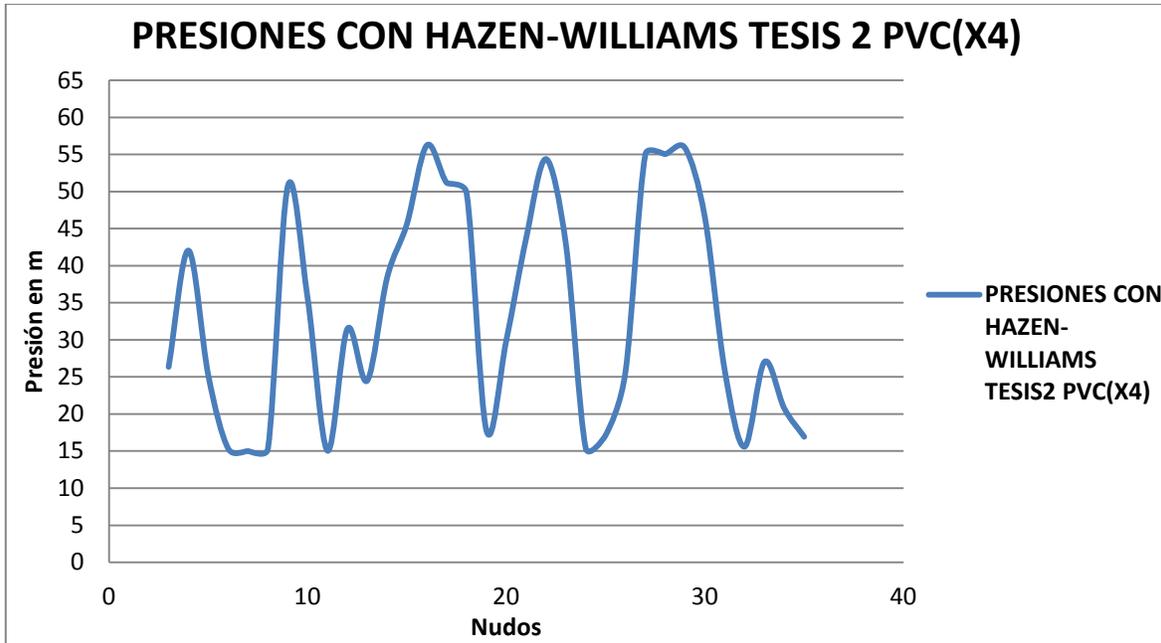


ILUSTRACIÓN 182. PRESIONES CON LA DE HAZEN-WILLIAMS PARA PVC.

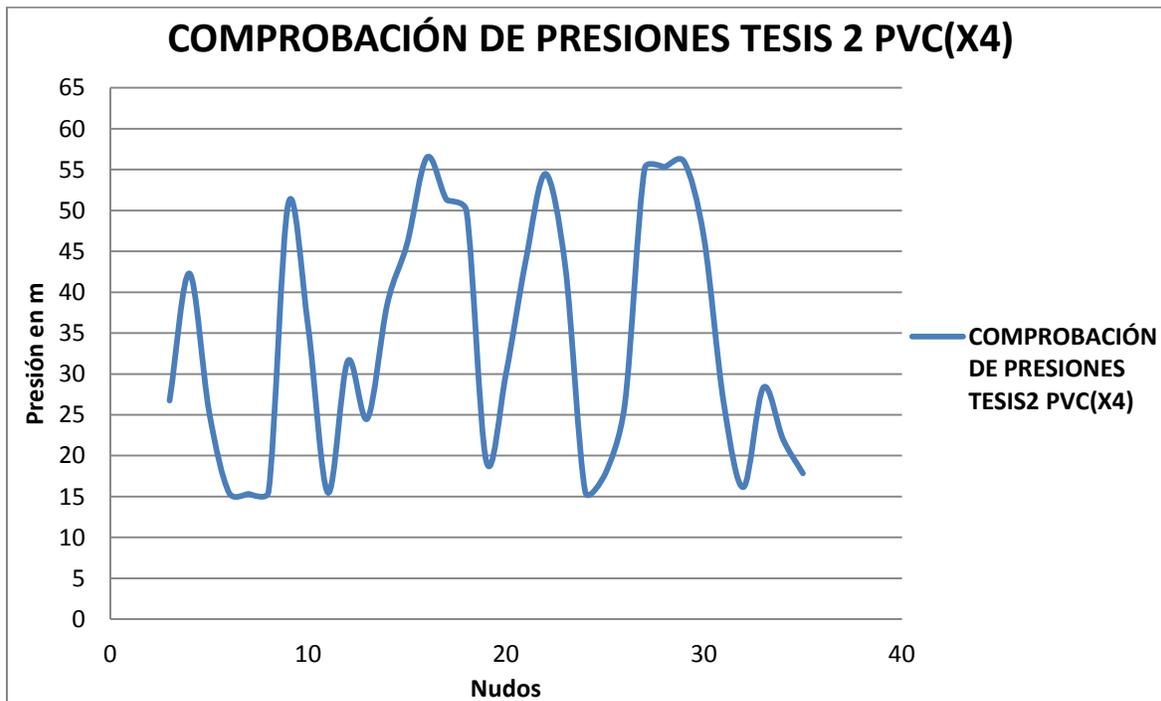


ILUSTRACIÓN 183. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PVC.

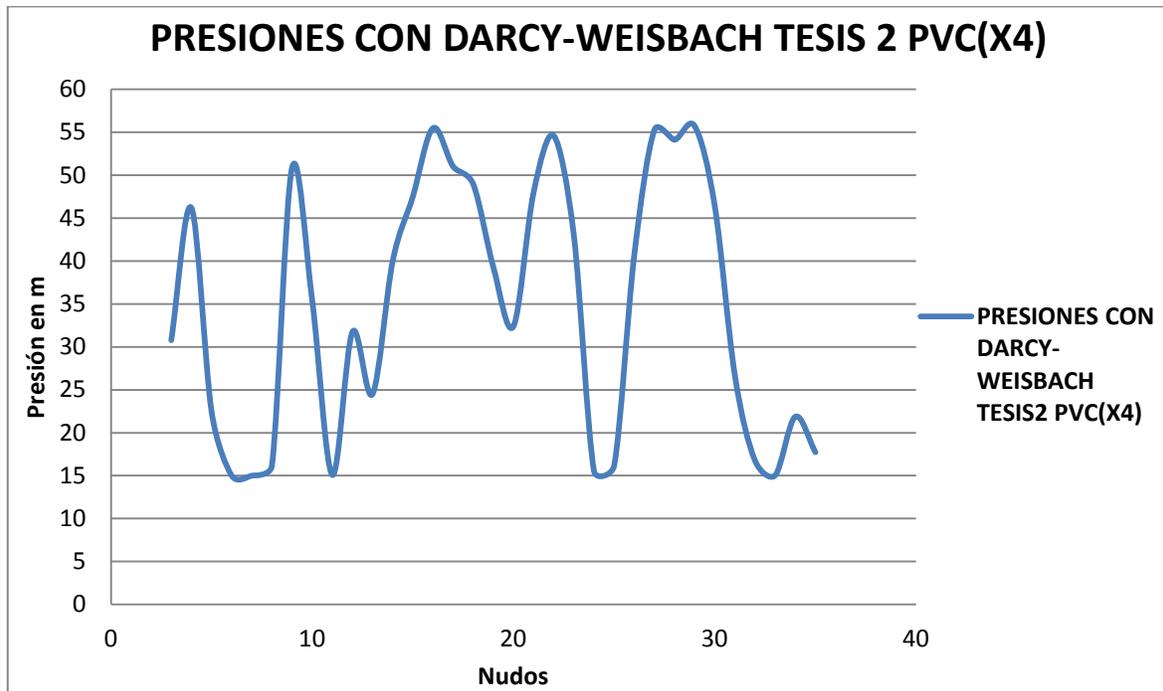


ILUSTRACIÓN 184. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PVC.

- Resultados de presiones para PEAD.

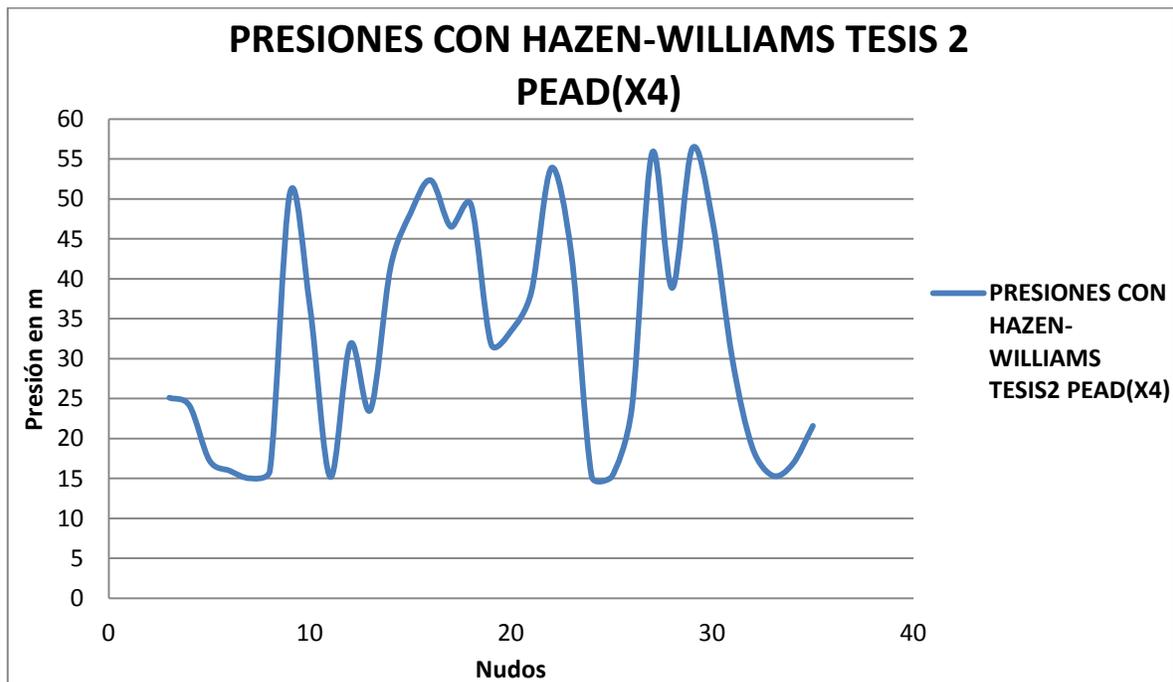


ILUSTRACIÓN 185. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA PEAD.

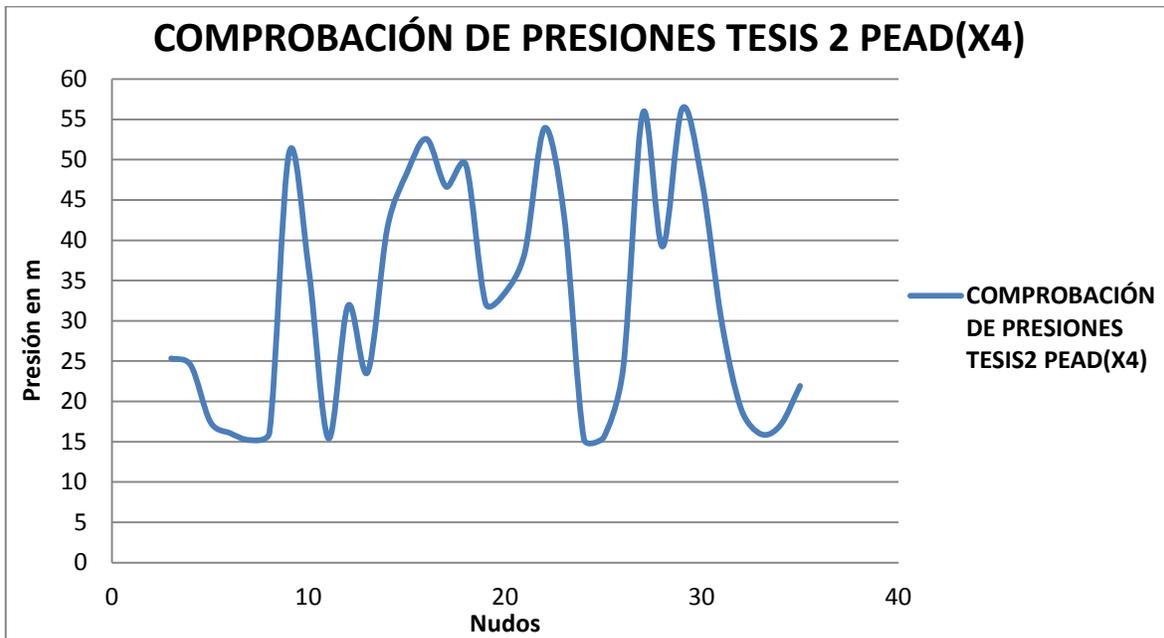


ILUSTRACIÓN 186. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PEAD.

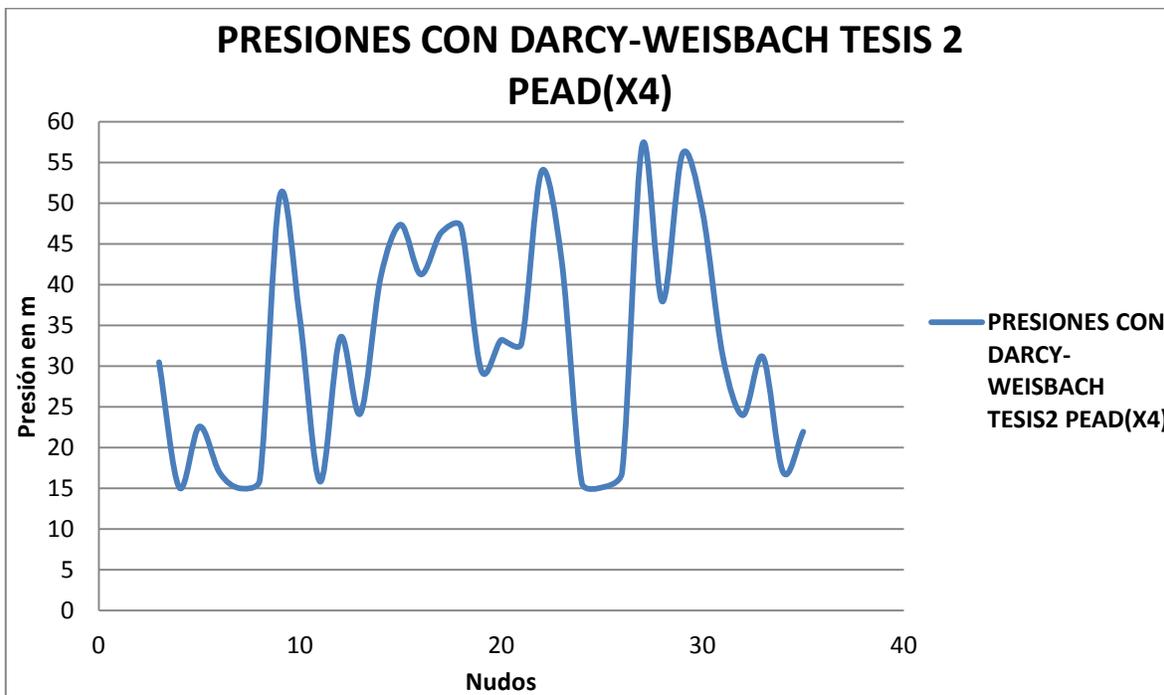
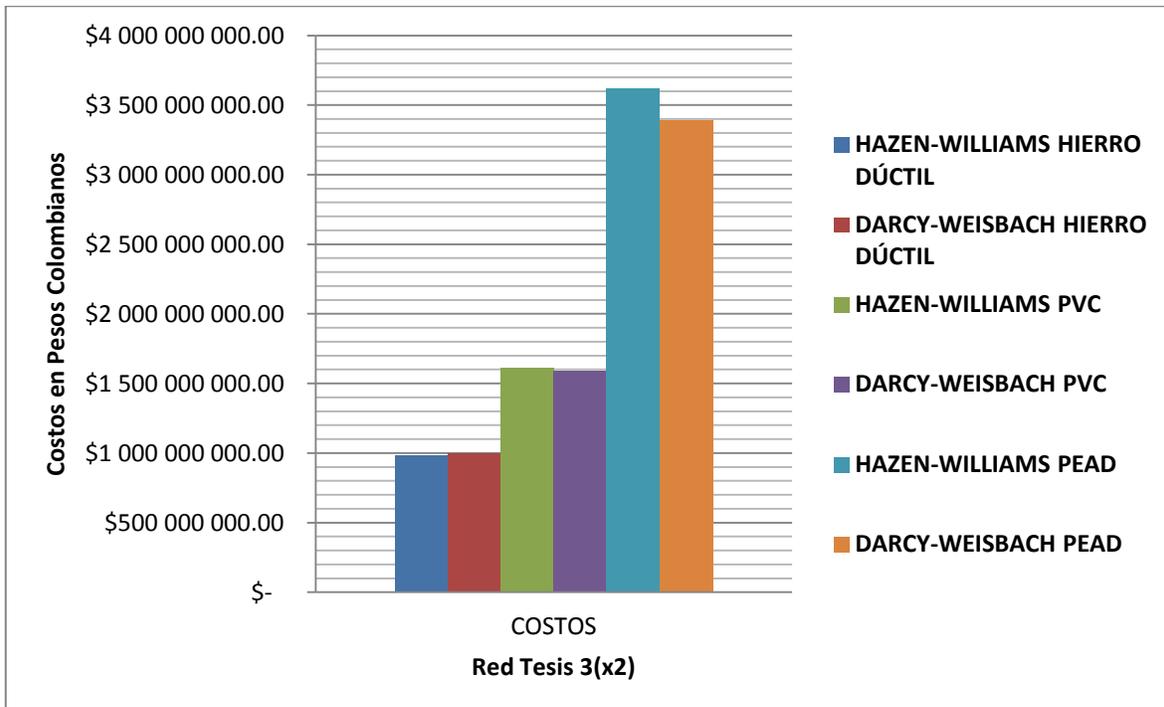


ILUSTRACIÓN 187. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PEAD.

- Costos.

COSTOS \$	RED TESIS 3 CAUDALES X2		
	HIERRO DÚCTIL	PVC	PEAD
HAZEN-WILLIAMS	\$ 983 747 748.00	\$ 1 612 342 648.00	\$ 3 617 739 194.00
DARCY-WEISBACH	\$ 996 444 626.00	\$ 1 587 695 768.00	\$ 3 389 634 830.00
DIFERENCIA	\$ (12 696 878.00)	\$ 24 646 880.00	\$ 228 104 364.00

**TABLA 31. COSTOS DE LA RED TESIS 3 CON CAUDALES DUPLICADOS.**



**ILUSTRACIÓN 188. GRÁFICA DE COSTOS PARA LA RED TESIS 3 CON CAUDALES DUPLICADOS.**

- Resultados de presiones para Hierro Dúctil.

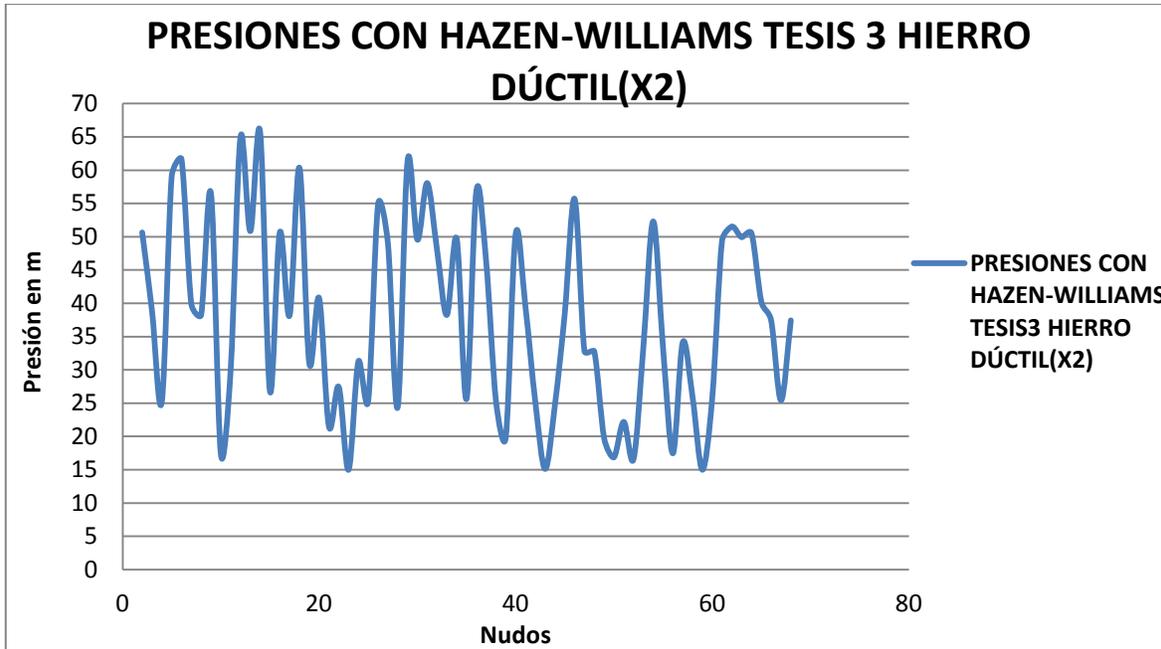


ILUSTRACIÓN 189. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA HIERRO DÚCTIL.

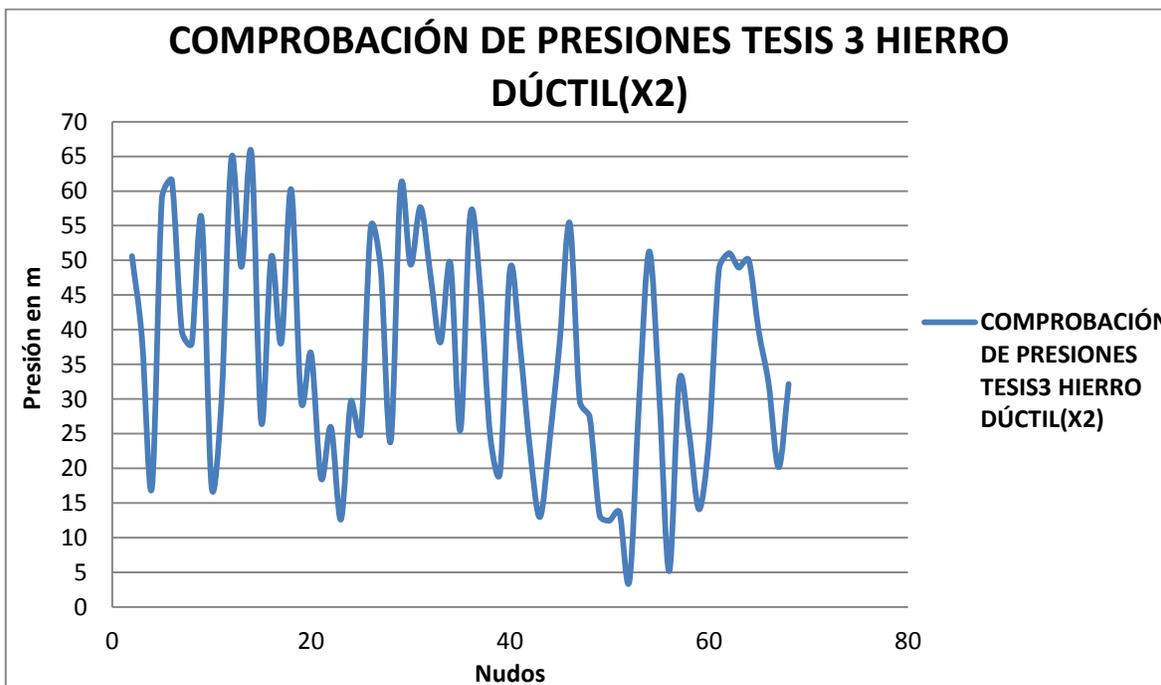


ILUSTRACIÓN 190. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA HIERRO DÚCTIL.

- Resultados de presiones para PVC.

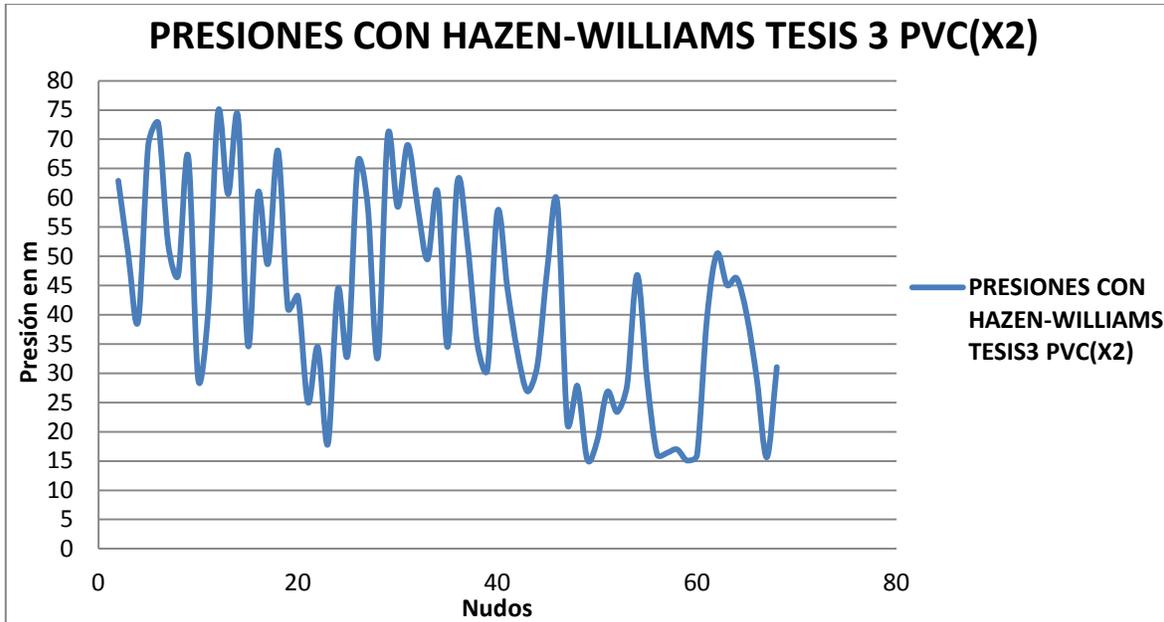


ILUSTRACIÓN 191. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA PVC.

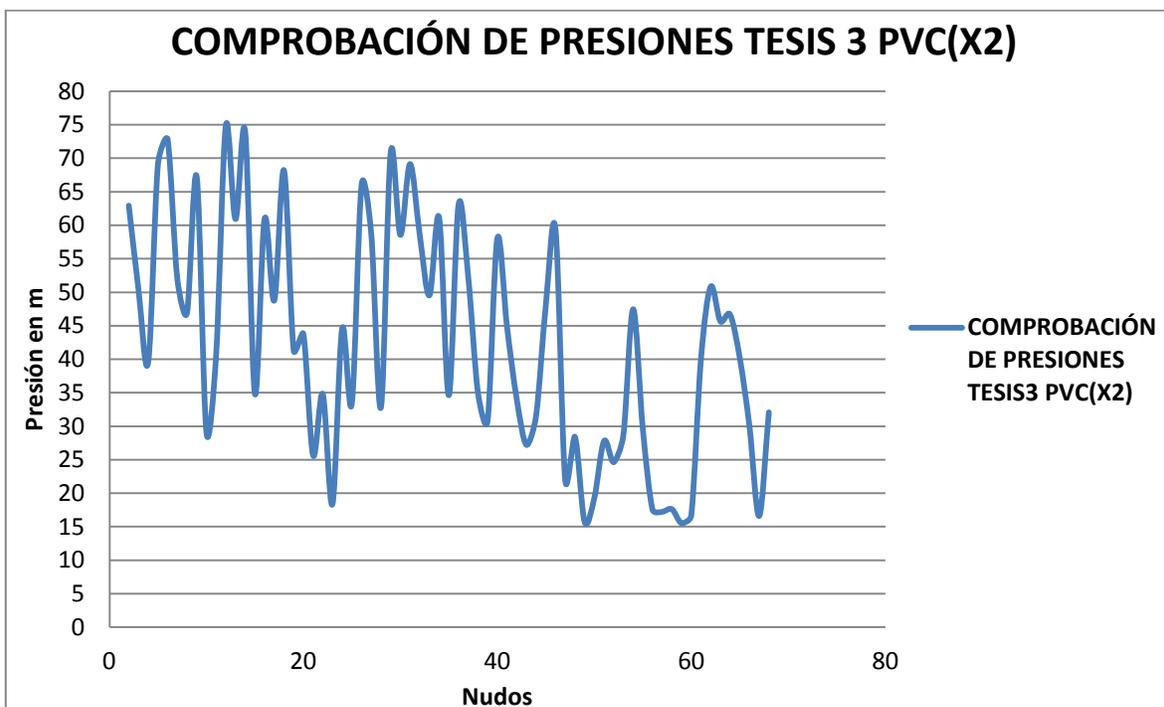


ILUSTRACIÓN 192. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PVC.

- Resultados de presiones para PEAD.

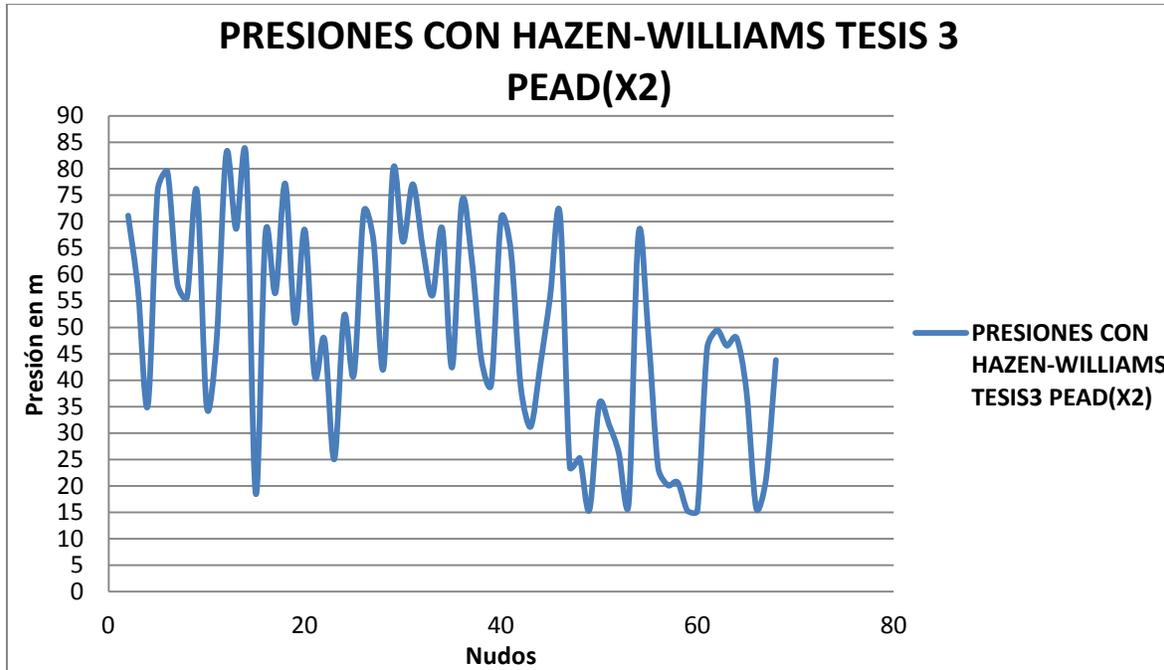


ILUSTRACIÓN 193. PRESIONES CON LA ECUACION DE HAZEN-WILLIAMS PARA PEAD.

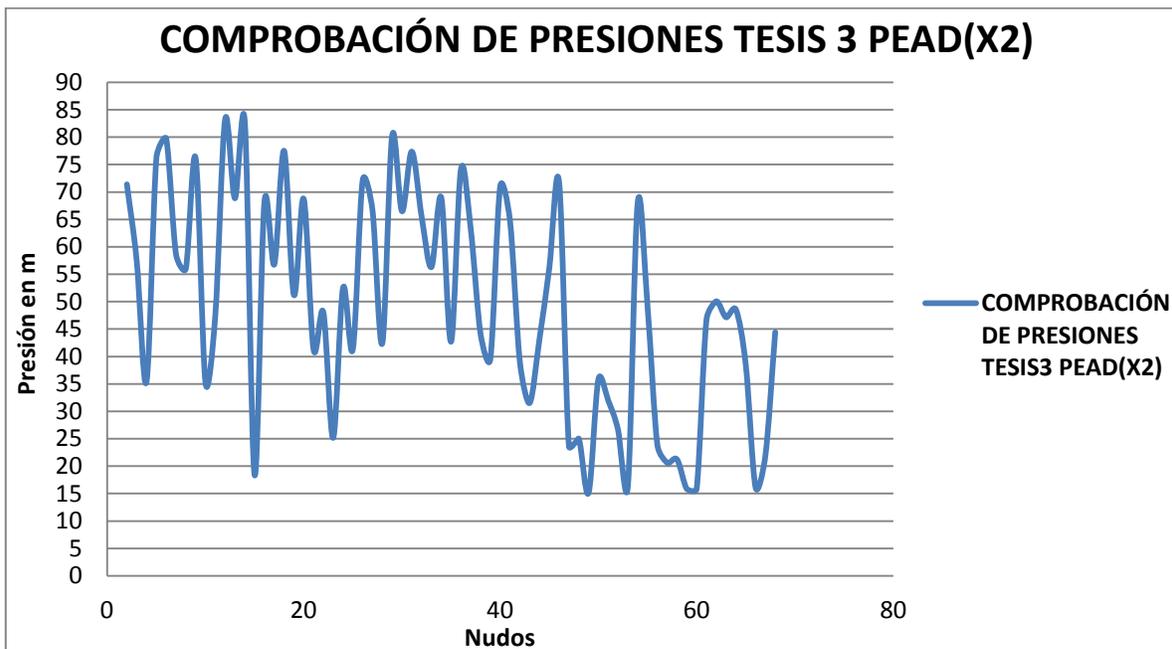
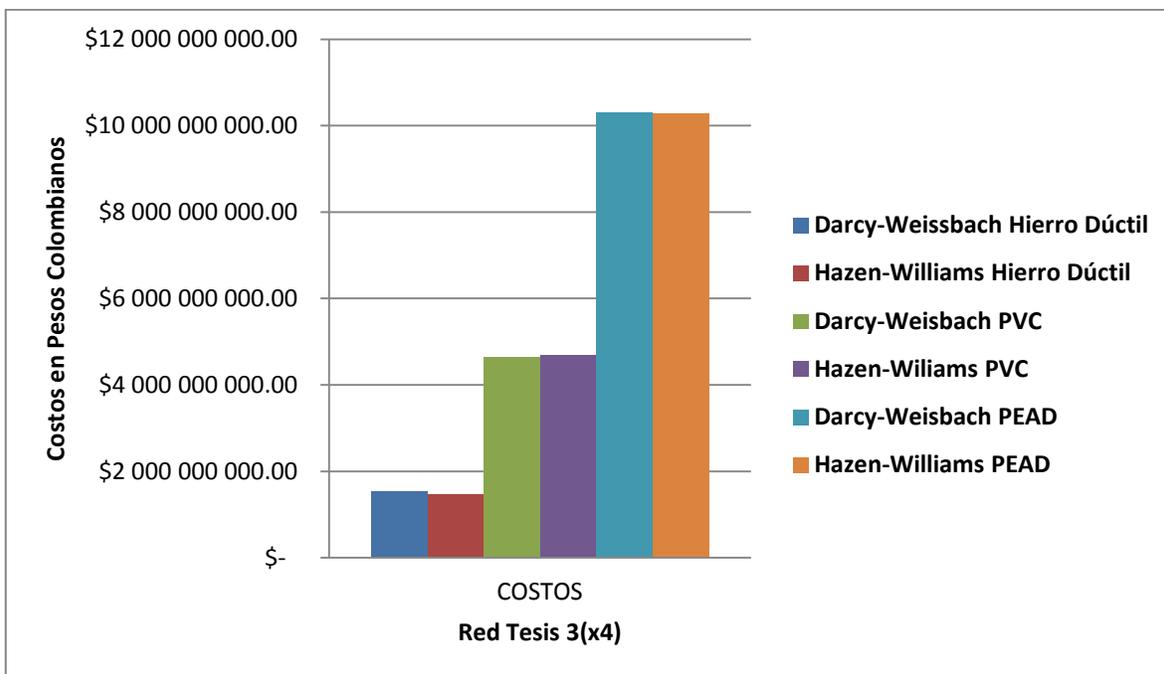


ILUSTRACIÓN 194. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PEAD.

- Costos.

	RED TESIS 3 CAUDALES X4		
COSTOS \$	HIERRO DÚCTIL	PVC	PEAD
HAZEN-WILLIAMS	\$ 1 475 485 923.00	\$ 4 674 793 382.00	\$ 10 270 362 389.00
DARCY-WEISBACH	\$ 1 540 521 729.00	\$ 4 642 152 360.00	\$ 10 298 405 339.00
DIFERENCIA	\$ (65 035 806.00)	\$ 32 641 022.00	\$ (28 042 950.00)

**TABLA 32. COSTOS DE LA RED TESIS 3 CON CAUDALES CUADRUPLICADOS.**



**ILUSTRACIÓN 195. GRÁFICA DE COSTOS DE LA RED TESIS 3 CON CAUDALES CUADRUPLICADOS.**

- Resultados de presiones para Hierro Dúctil.

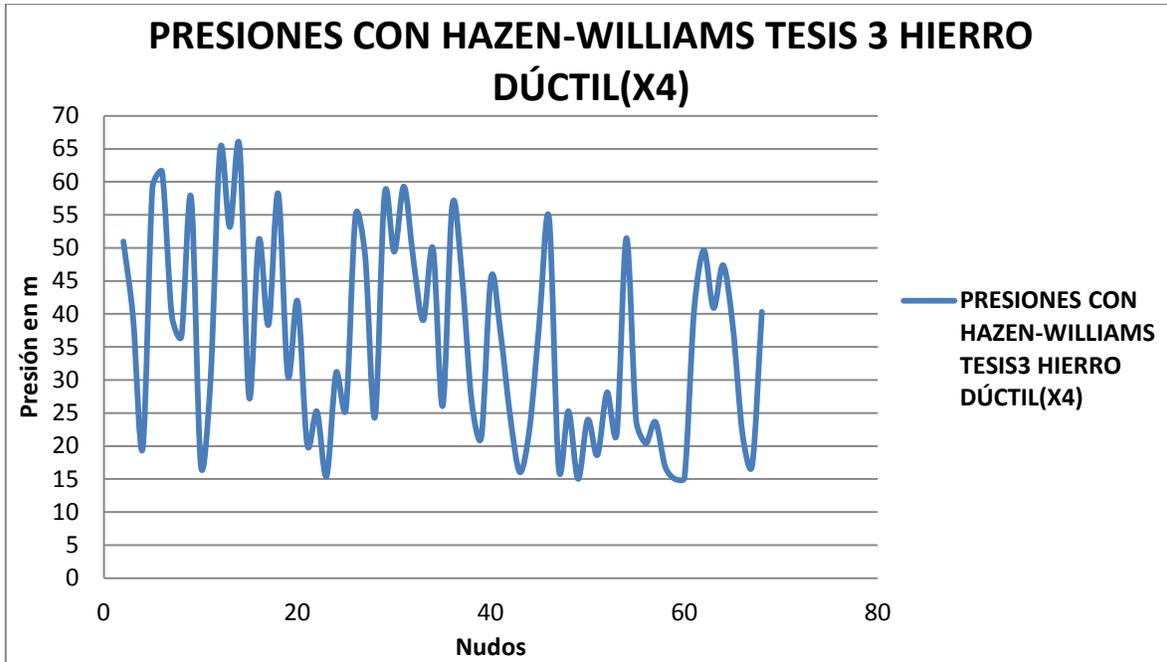


ILUSTRACIÓN 196. PRESIONES DE LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA HIERRO DÚCTIL.

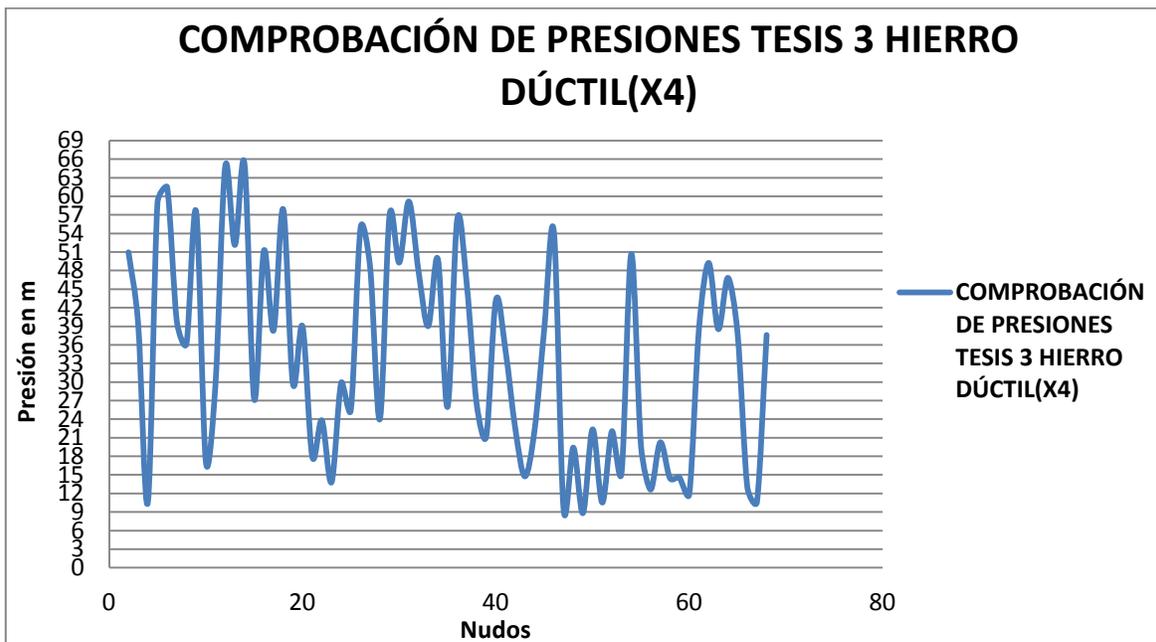


ILUSTRACIÓN 197. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA HIERRO DÚCTIL.

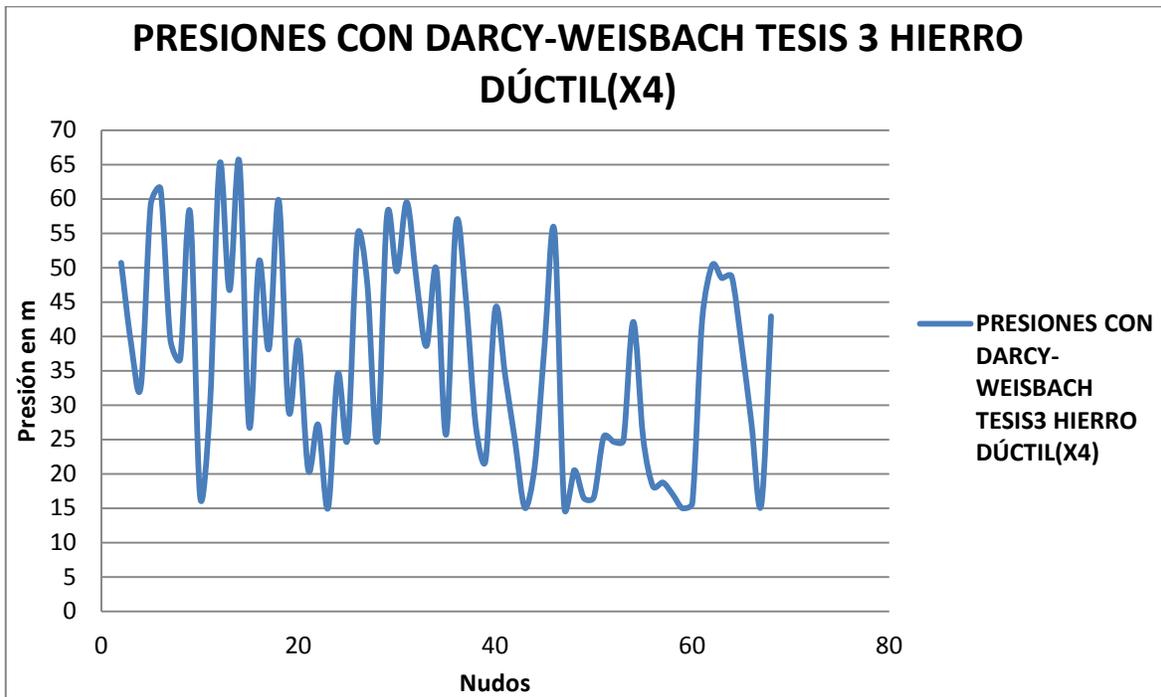


ILUSTRACIÓN 198. PRESIONES PARA LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA HIERRO DÚCTIL.

- Resultados de presiones para PVC.

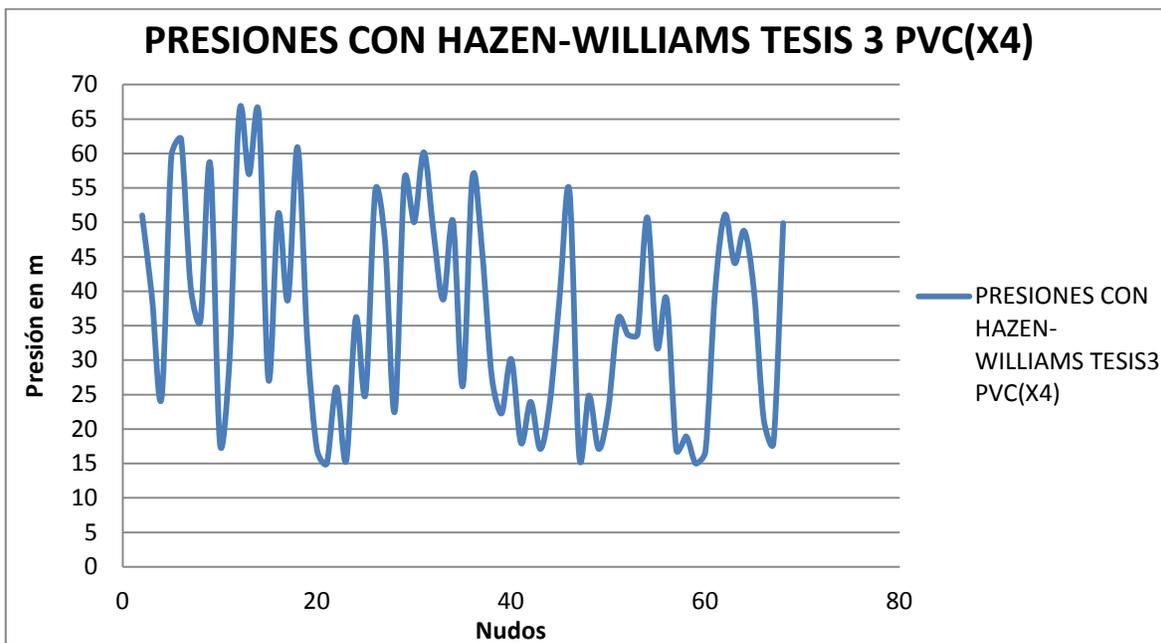
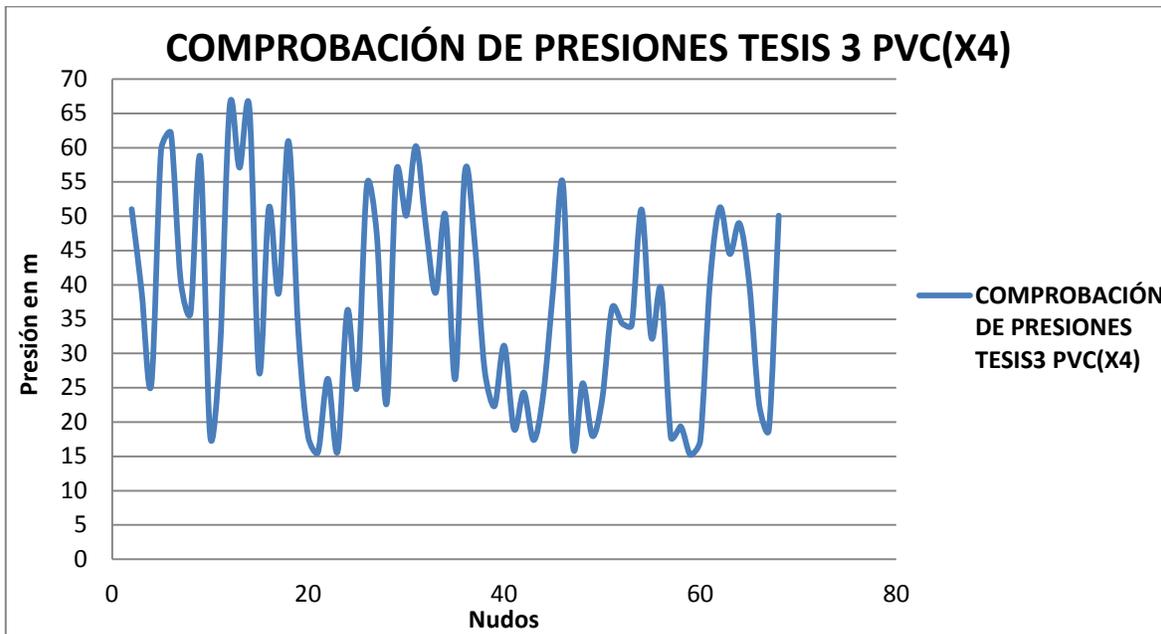
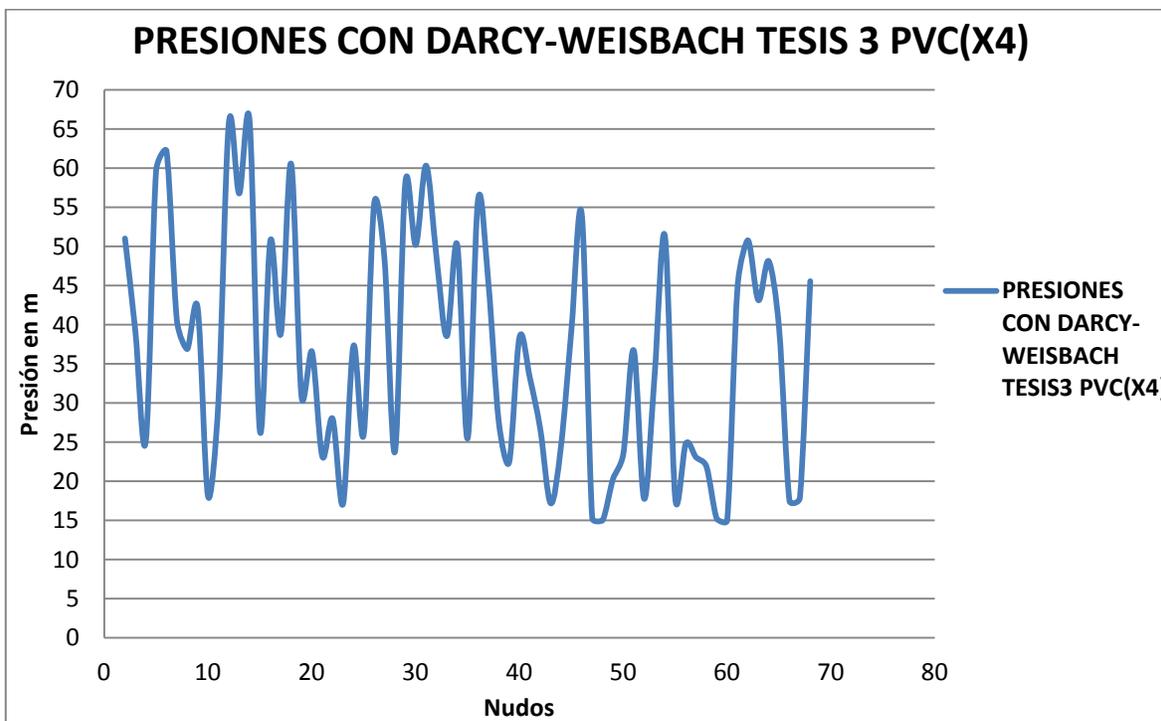


ILUSTRACIÓN 199. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA PVC.



**ILUSTRACIÓN 200. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PVC.**



**ILUSTRACIÓN 201. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PVC.**

- Resultados de presiones para PEAD.

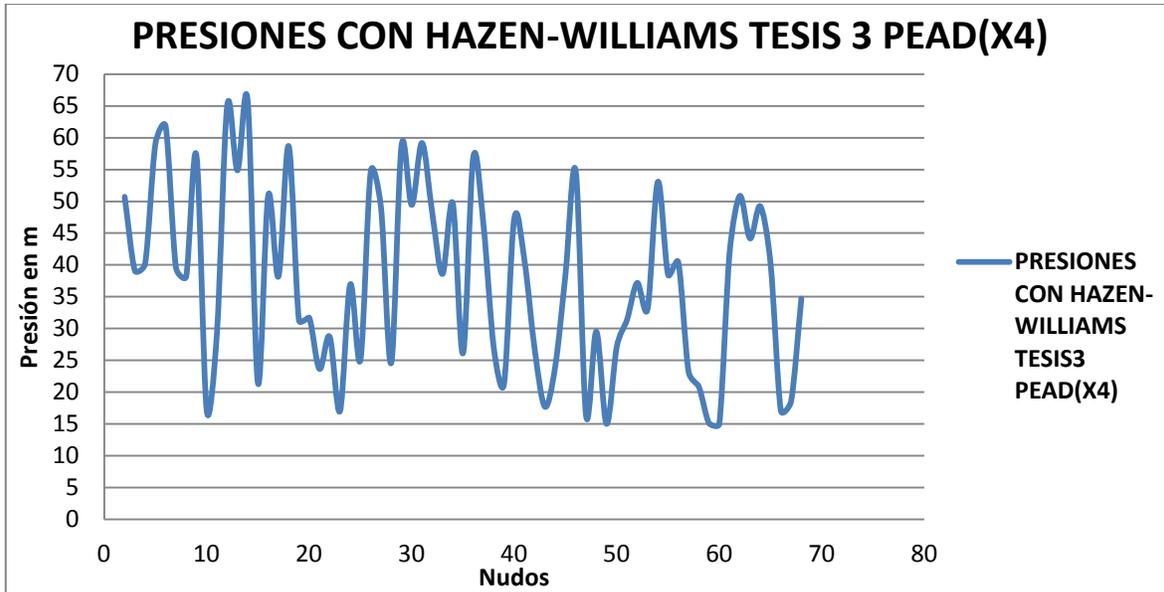


ILUSTRACIÓN 202. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS PARA PEAD.

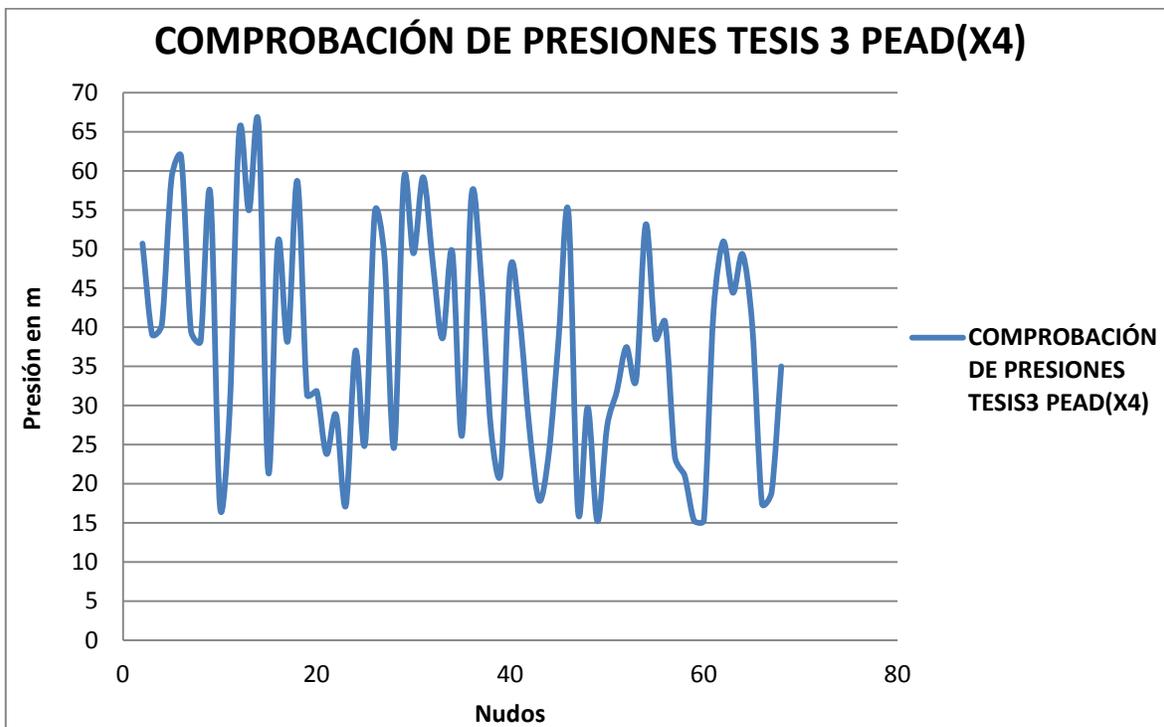


ILUSTRACIÓN 203. PRESIONES DE LA RED DISEÑADA CON HAZEN-WILLIAMS DESPUÉS DE CORRER LA HIDRÁULICA CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PEAD.

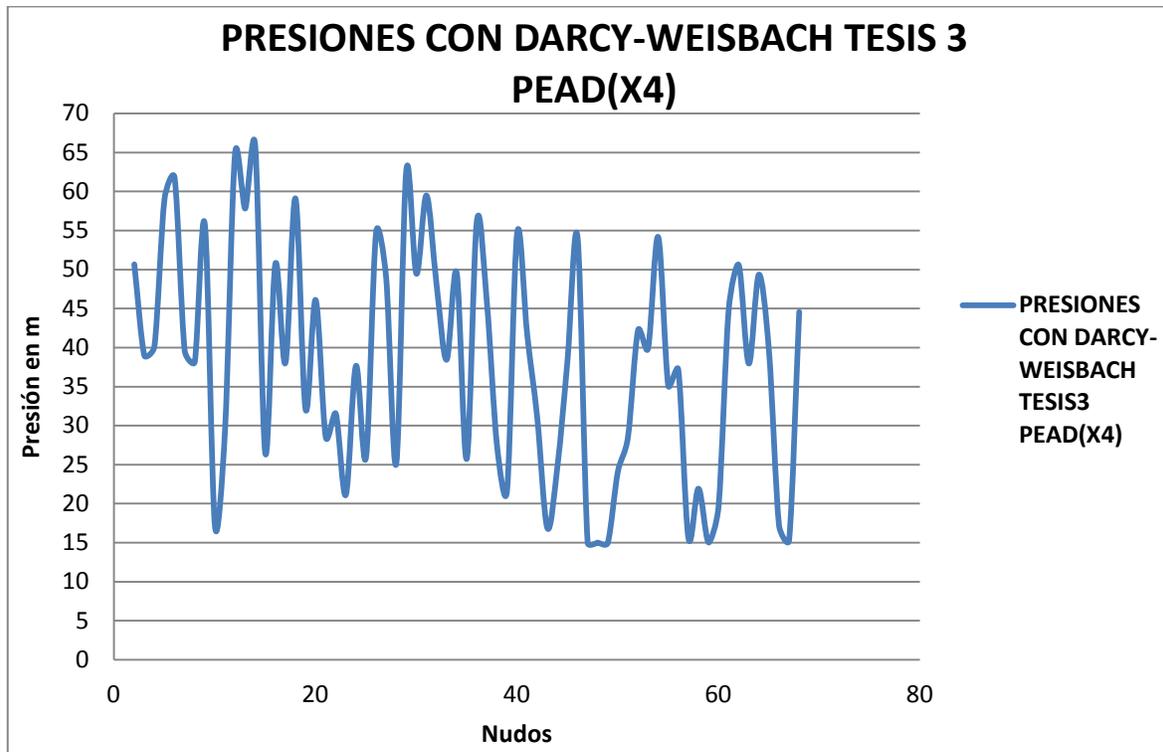


ILUSTRACIÓN 204. PRESIONES CON LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH PARA PEAD.

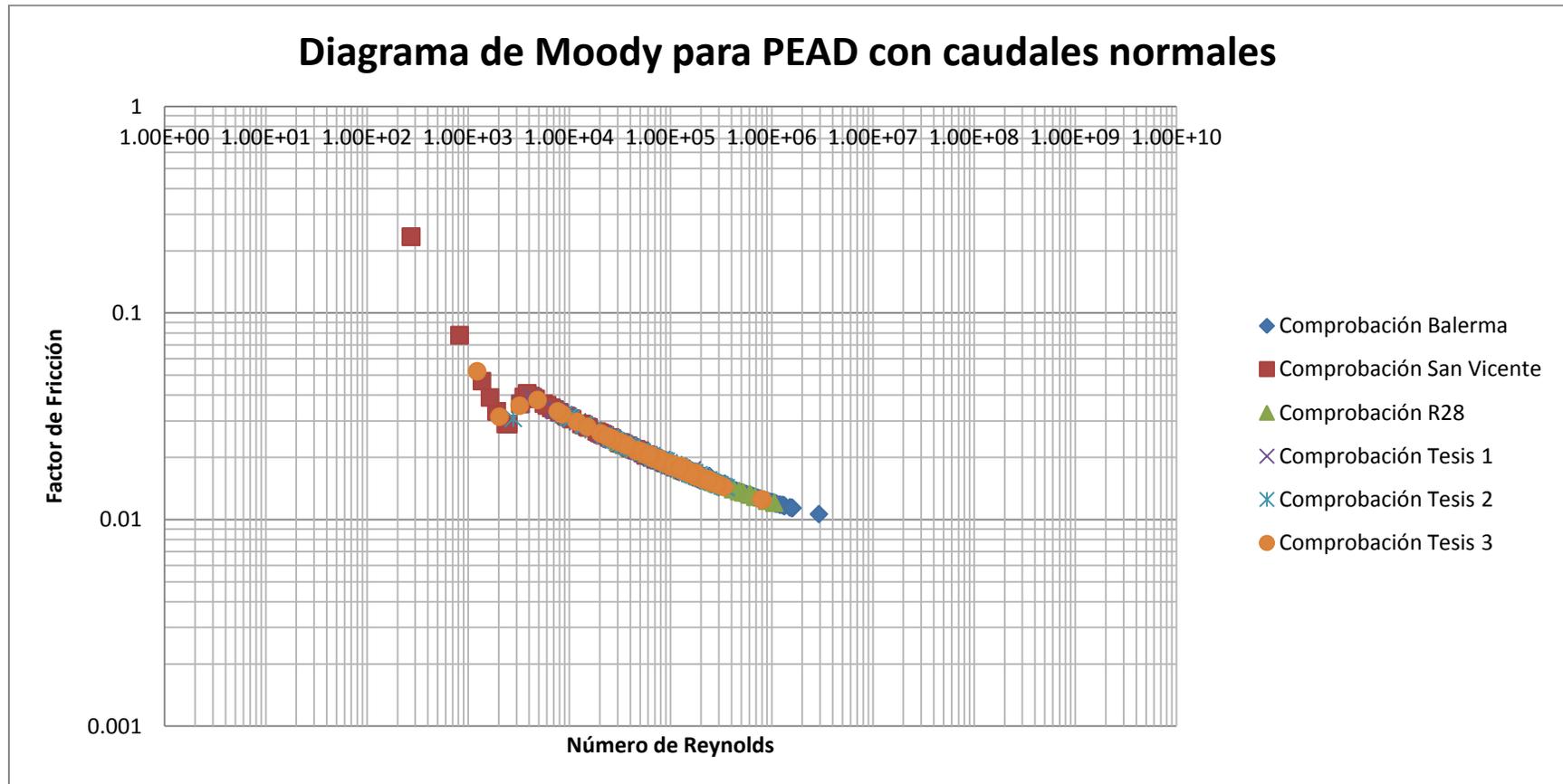


ILUSTRACIÓN 205. DIAGRAMA DE MOODY CON FACTORES DE FRICCIÓN DE REDES CON CAUDALES NORMALES UTILIZANDO PEAD.

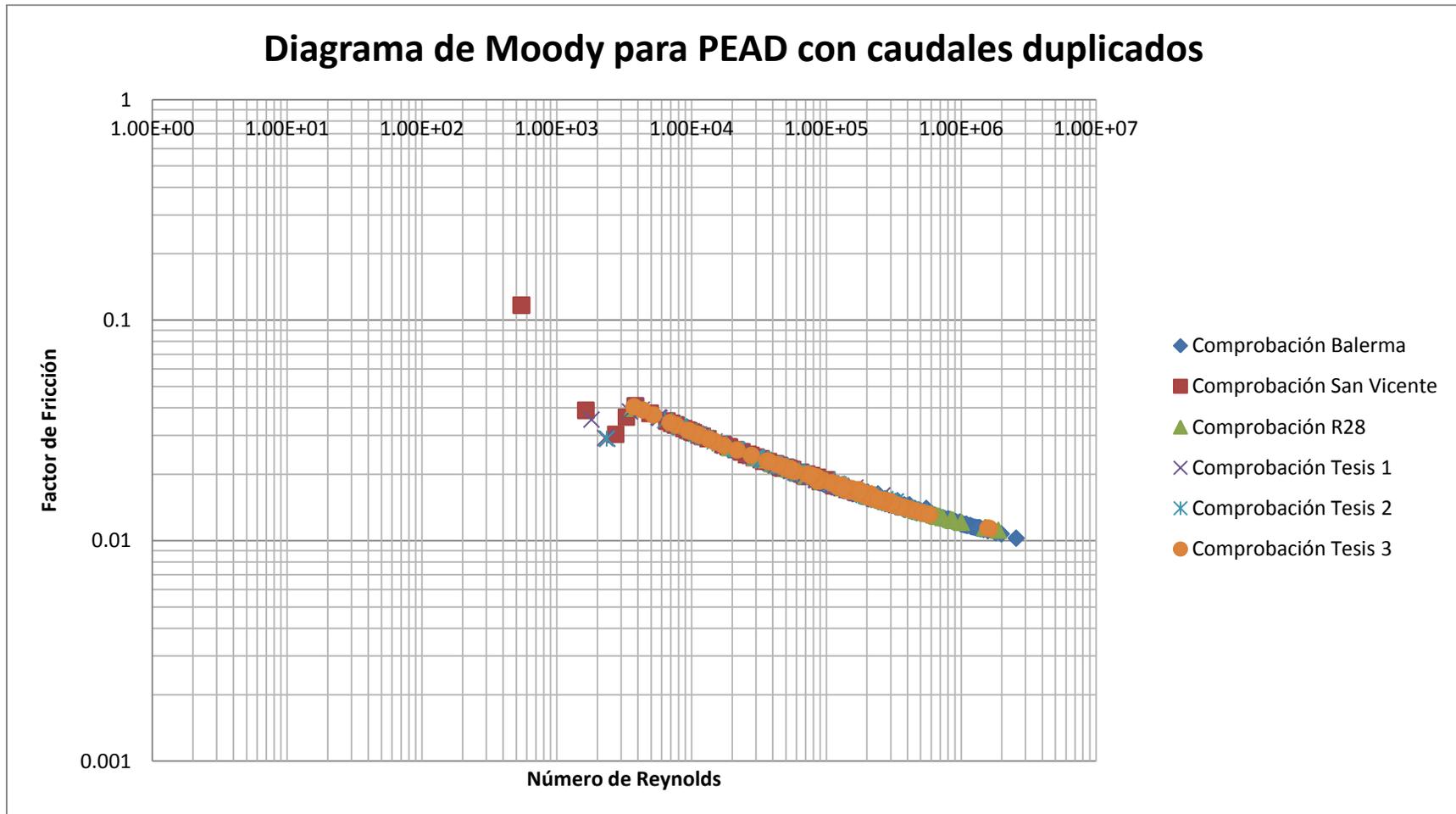


ILUSTRACIÓN 206. DIAGRAMA DE MOODY CON FACTORES DE FRICCIÓN DE REDES CON CAUDALES NORMALES UTILIZANDO PEAD.

## Diagrama de Moody para PEAD con caudales cuadruplicados

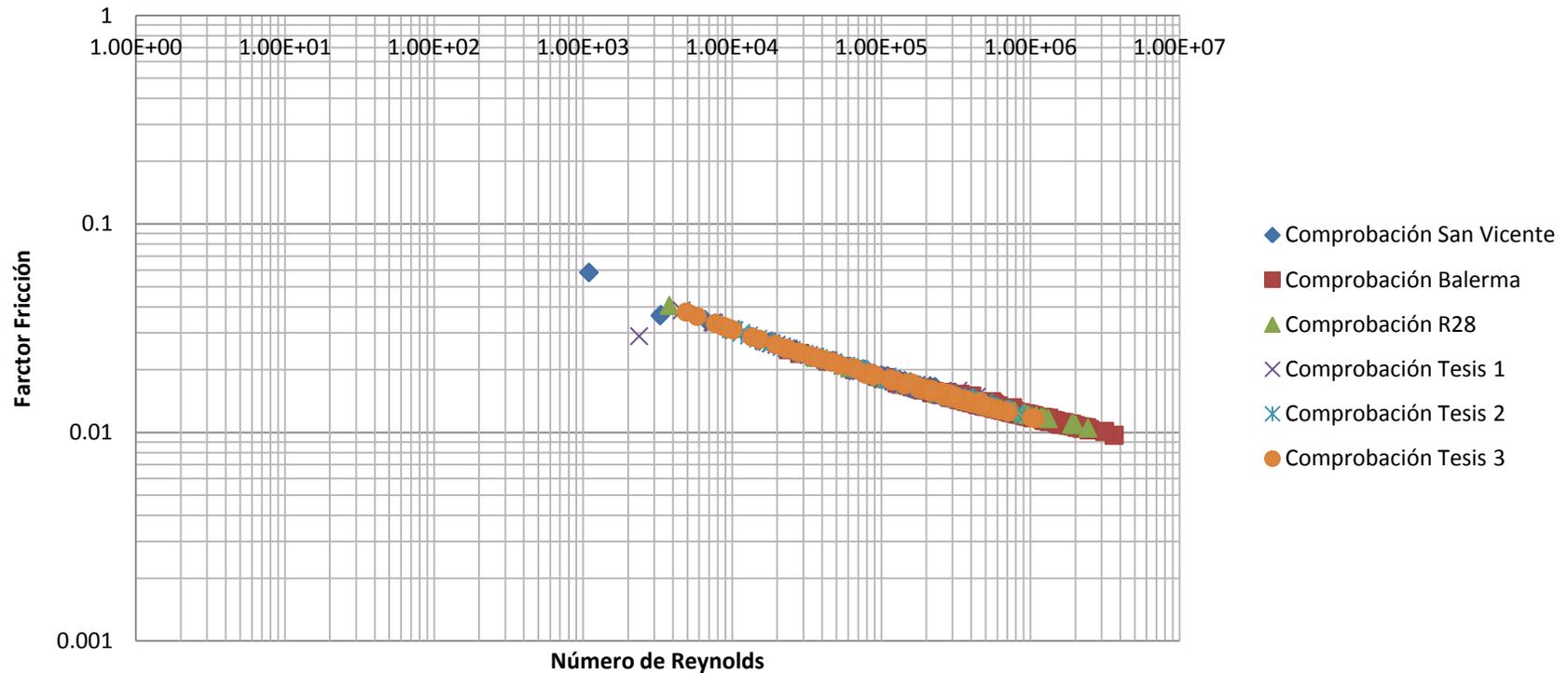


ILUSTRACIÓN 207. DIAGRAMA DE MOODY CON FACTORES DE FRICCIÓN DE REDES CON CAUDALES CUADRUPPLICADOS UTILIZANDO PEAD.



Universidad de los Andes  
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental  
Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA  
*Efecto del uso de ecuaciones empíricas vs ecuaciones físicamente  
basadas sobre los costos de diseños optimizados en acueductos.*

---

IAMB 201210 29

