

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



**Modelación Física de Cambios Operativos en Redes de
Distribución de Agua Potable: Modelaciones en Período
Extendido y Modelación de Flujo No Permanente**

Proyecto de Grado
Ingeniería Ambiental

Iván Camilo Viveros Góngora

Bogotá, Julio de 2013

A mis padres, yo también los amo.

Contenido

1	INTRODUCCIÓN	1
2	Montaje de Laboratorio	9
2.1	<i>Antecedentes</i>	9
2.2	<i>Accesorios de la Red Elevada</i>	9
2.3	<i>Sistema de Medición</i>	12
2.4	<i>Medición de presión</i>	12
2.5	<i>Medición de Demandas de Puntos de Extracción de Caudal</i>	15
2.6	<i>Escenarios</i>	17
2.6.1	Escenario 5 Inicial	18
2.6.2	Escenario 5 Final	20
2.6.3	Escenario 6 Inicial	21
2.6.4	Escenario 6 Final	22
2.7	<i>Resultados de mediciones de presión y demandas</i>	23
3	Modelo Computacional	26
3.1	<i>EPANET</i>	26
3.2	<i>REDES</i>	26
3.2.1	Método del Gradiente	27
3.2.2	Método de Gauss o Factorización de Cholesky	30
3.2.3	Descomposición de Cholesky	33
3.3	<i>Modelo Hidráulico</i>	34
3.3.1	Energía de Entrada	35
3.3.2	Demandas en Nudos de Extracción de Caudal	35
3.3.3	Diámetros Reales	36
3.3.4	Coeficientes de Pérdidas Menores	36
3.3.5	Representatividad del Modelo	37
3.3.6	Coeficiente de Determinación	37
3.3.7	Error Cuadrático Medio	38
3.3.8	Indicadores de Representatividad	39
4	Resultados	41
4.1	<i>Procedimiento</i>	41
4.2	<i>Ubicaciones</i>	41
4.2.1	Ubicación 1	41
4.2.2	Ubicación 2	55

4.2.3	Ubicación 3	71
4.3	<i>Comparación con Magnitudes de la Ecuación de Joukowsky</i>	86
4.4	<i>Comparación entre Escenarios en Estado Estable y Escenarios Sometidos a Variaciones Súbitas</i> .	88
5	Modelación en Período Extendido	91
5.1	<i>Características del Modelo</i>	91
5.2	<i>Energía de Entrada</i>	91
5.3	<i>Demandas</i>	91
5.4	<i>Patrones de Altura de Presión y de Demanda de Caudal</i>	92
	Patrones de la Variación del Escenario 5.....	93
5.4.1	Patrones de Variación del Escenario 6	95
5.5	<i>Resultados y Representatividad del Modelo</i>	96
5.5.1	Representatividad.....	96
6	Conclusiones	98
7	Agradecimientos	100
8	Bibliografía	101
9	Anexos	103
9.1	<i>Escenario 5</i>	103
9.2	<i>Escenario 6</i>	104

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1 Caída de Altura de Presión	3
Ilustración 2 Fluctuaciones de Presión.....	4
Ilustración 3 Válvula de Bola de 2 Pulgadas.....	10
Ilustración 4 Válvula de 3 Pulgadas.....	10
Ilustración 5 Transductor de Presión Vegabar 52.....	10
Ilustración 6 Válvula de 2 Pulgadas.....	10
Ilustración 7 Diámetros de Tuberías en la Red Elevada	11
Ilustración 8 <i>FieldPoint</i> FP-1601 y Extensión FP-AI-111.....	12
Ilustración 9 Vegabar 52.....	13
Ilustración 10 MAN LD3S (Kobold).....	13
Ilustración 11 Mapa de Transductores de Presión.....	14
Ilustración 12 Puntos de Extracción de Caudal.....	16
Ilustración 13 Gráfica Comparativa de Diferentes Válvulas.....	17
Ilustración 14 Escenario 5 Inicial.....	19
Ilustración 15 Escenario 5 Final.....	20
Ilustración 16 Escenario 6 Inicial.....	21
Ilustración 17 Escenario 6 Final.....	22
Ilustración 18 Modelo Computacional Epanet.....	36
Ilustración 19 Modelo Computacional Redes (vista 3D).....	37
Ilustración 20 Ubicación 1.....	42
Ilustración 21 Ubicación 2 del Caudalímetro.....	55
Ilustración 22 Ubicación 3.....	71

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1 de Joukowsky	2
Ecuación 2 Velocidad de Propagación de la Onda	2
Ecuación 3 Período de la Tubería	4
Ecuación 4 Presión Máxima en Tuberías de Conducción y Aducción	6
Ecuación 5 Presión de Diseño para Tuberías de Aducción y Conducción	6
Ecuación 6 Ecuación de Continuidad.	27
Ecuación 7 Ecuación de Darcy Weisbach.	27
Ecuación 8 Ecuación de Colebrook-White.	28
Ecuación 9 Ecuación Explícita para el Cálculo del Caudal a partir de las Ecuaciones de Darcy-Weisbach y Colebrook-White.....	28
Ecuación 10 Energía Total Disponible.	28
Ecuación 11 Pérdidas Totales.....	29
Ecuación 12 Constante de Pérdidas Totales.	29
Ecuación 13 Conservación de Energía.....	29
Ecuación 14 Ecuación de Continuidad.	30
Ecuación 15 Expresión Ensamblada de Continuidad y Energía.....	30
Ecuación 16 Expresión Iterativa de Alturas.....	30
Ecuación 17 Ecuación Iterativa de Caudales.	30
Ecuación 18 Ecuación de Cholesky.....	33
Ecuación 19 Ecuación de Cholesky.....	34
Ecuación 20 Coeficiente de Determinación	38
Ecuación 21 Suma de Cuadrados del Error	38
Ecuación 22 Suma Total de Cuadrados	38
Ecuación 23 Variación de Laboratorio.	86
Ecuación 24 Diferencia de Velocidades.	86
Ecuación 25 Diferencia Entre Variaciones.....	87
Ecuación 26 Factores de Multiplicación.....	92

Índice de Tablas

Tabla 1 Promedios de Demandas de Caudal.....	23
Tabla 2 Desviaciones Estándar de las Demandas de los Escenarios.	23
Tabla 3 Mediana de las Demandas de los Escenarios.	24
Tabla 4 Medias de Presión.	24
Tabla 5 Desviación Estándar de Presiones de Escenarios.	25
Tabla 6 Mediana de Presiones de Escenarios.	25
Tabla 7 Indicadores Estadísticos.	39
Tabla 8 Tabla Valores Máximos de Presión.....	54
Tabla 9 Valores Máximos del Escenario 6 Ubicación 2.	69
Tabla 10 Valores Mínimos del Escenario 6 Ubicación 2.	70
Tabla 11 Valores Máximos del Escenario 6 en la Ubicación 3.	84
Tabla 12 Valores Mínimos de Presión del Escenario 6 en la Ubicación 3.	85
Tabla 13 Escenario 5 Inicial Estable y Escenario 5 Sometido a Variación	89
Tabla 14 Escenario 5 Final Estable y Escenario 5 Sometido a Variación	89
Tabla 15 Escenario 6 Inicial Estable y Escenario 6 Sometido a Variación	90
Tabla 16 Escenario 6 Final Estable y Escenario 6 Sometido a Variación	90
Tabla 17 Representatividad de Modelación en Período Extendido.....	97

1 INTRODUCCIÓN

El presente proyecto de grado tiene como finalidad analizar el perfil de caudal y presión en estado de flujo no permanente. Otro de sus objetivos consiste en determinar la representatividad de los modelos EPANET y REDES a partir de configuraciones hidráulicas en estado estable. Finalmente, con los perfiles de variación de caudal y presión se busca determinar la representatividad de los modelos computacionales en período extendido.

Cuando se hace referencia a las diferentes clasificaciones de flujo es necesario tener en cuenta la variación de las características hidráulicas en relación con el espacio y con el tiempo. El flujo variado no permanente presenta fluctuaciones tanto en espacio como en tiempo; un ejemplo de éste es el golpe de ariete (Saldarriaga, 2007). Cuando se hace referencia a flujo inestable o flujo variado, la suposición acerca de la incompresibilidad del fluido no es adecuada y en transientes rápidos es engañosa (Thorley, 1991). Los transientes o rápidos tránsitos de presión ocurren en cortos períodos de tiempo cuando el estado estable del flujo es alterado (Bosserman II & Hunt, 2006). Desde hace poco más de un siglo la literatura científica ha presentado estudios relativos a las particularidades que se observan en la presión y en el caudal después de un cambio operativo súbito. Es importante mencionar que la literatura científica ha abordado extensamente el fenómeno del golpe de ariete.

Los transientes son causados por cierres súbitos de válvulas, saltos de línea, fallas del sistema de control, pérdida de potencia, pérdida de telemetría, interacción de servicios múltiples o una inadecuada selección del equipo (Stone, 2006). Cambios en la demanda, intrusión de aire, fallas en los sistemas de regulación de presión y ruptura de tubos también pueden originar el fenómeno (Bosserman II & Hunt, 2006). La energía del agua en un punto se distribuye entre cinética y potencial (el agua tiende a fluir de un punto de mayor energía a un punto de menor energía); un cambio súbito provoca un intercambio de energía entre el flujo y la presión (LeChevallier, Gullick, Karim, Friedman, & Funk, 2003).

Los fenómenos de presión no ocurren en todos los lugares del sistema al mismo tiempo, sin embargo su propagación sucede de manera inmediata. El intervalo en el cual la señal se distribuye en el sistema depende de la distancia desde el punto analizado al punto

donde se produce el cambio en el flujo. Otro factor que influye en la duración del proceso de dispersión de la señal es la velocidad de propagación de ondas del transiente, cuya magnitudes cercana o igual a la de la velocidad del sonido.

La magnitud del cambio de presión fue descrita hace más de un siglo por Joukowsky. El término ΔH representa la variación en la altura de presión esperada, a la velocidad de propagación de la onda y ΔV los cambios de velocidad con respecto a los escenarios en estado estable antes y después del cambio súbito que tuvo lugar en el sistema (Thorley, 1991). En algunos artículos es denominado ley de golpe de ariete instantáneo (Bergant, Simpsom, & Tijsseling, 2006) (Joukowsky, 1900).

$$\Delta H = \frac{a * \Delta V}{g}$$

Ecuación 1 (Joukowsky, 1900)

Los términos relativos a la gravedad y a la velocidad del flujo pueden ser extraídos de textos o directamente de montajes de laboratorio. La velocidad de propagación “ a ” de la onda fue descrita por Kortweg quien la relaciona con “ e ” el espesor, “ K ” el módulo de compresibilidad, “ D ” el diámetro de la tubería, “ ρ ” la densidad del fluido y “ E ” el módulo de elasticidad del material (Korteweg, 1878).

$$a = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \left(\frac{K}{E}\right) * \left(\frac{D}{e}\right)}}$$

Ecuación 2 Velocidad de Propagación de la Onda (Korteweg, 1878)

Una manera clara de exponer el comportamiento de los transientes es a través del ejemplo que brinda Thorley en su libro “*Fluid Transients in Pipelines*”(Thorley, 1991). Supóngase hay una bomba que impulsa agua desde el punto A al punto B el cual se encuentra a una altura superior. Si la bomba cesa su actividad de manera súbita la fracción de agua en puntos distantes conserva el *momentum* y tiende a mantener el movimiento. Por el contrario, el volumen del fluido en las vecindades de la bomba se detiene. Si se divide el flujo en varios anillos, el más cercano al punto donde se efectuó el cambio “hala” al segundo y así sucesivamente hasta que la altura de presión disminuye en una magnitud similar a la que se plantea en la ecuación de Joukowsky.

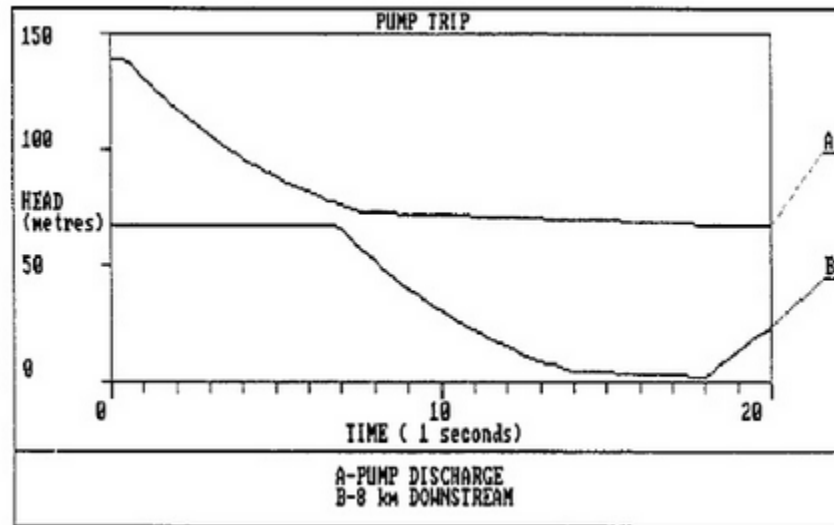


Ilustración 1 Caída de Altura de Presión (Thorley, 1991)

En la ilustración se ven dos líneas que disminuyen de manera significativa con respecto a la altura inicial. Como se mencionó anteriormente, el efecto del transiente no ocurre al mismo tiempo en todo el sistema, sin embargo cuenta con una enorme velocidad de propagación. La línea A representa el perfil de presión en la descarga de la bomba mientras que la B un punto situado a ocho kilómetros aguas abajo. Como regla general se supone que por cada 0.3 m/s de velocidad que sea forzada a detenerse de manera súbita, la presión del agua aumenta de 345 a 414 kPa (Kirmeyer, y otros, 2001).

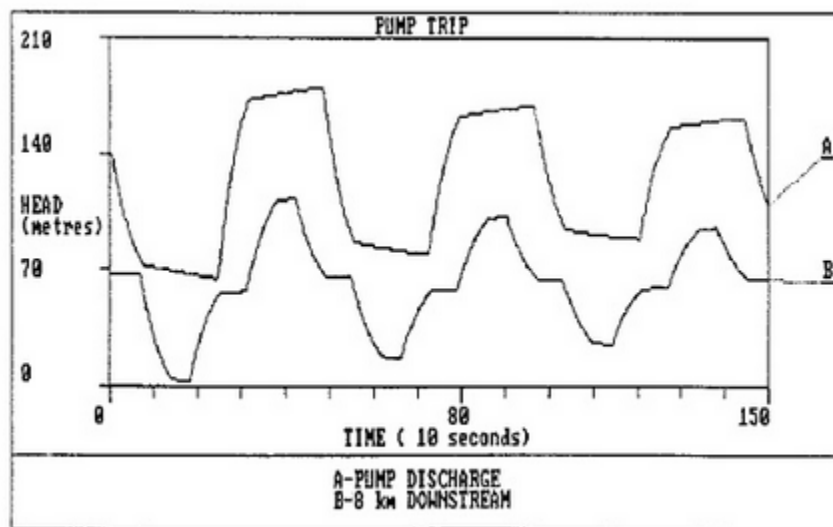


Ilustración 2 Fluctuaciones de Presión (Thorley, 1991)

La disminución súbita en la presión insta al sistema a buscar el equilibrio por lo cual la sustancia en la tubería tiende a fluir, suceso que causa fluctuaciones de presión. La onda viaja constantemente desde el punto donde se originó el cambio hacia aguas abajo y viceversa. El tiempo que requiere la onda para recorrer la tubería y volver al punto inicial es llamado “período de la tubería” y hace parte de los términos de la ecuación de Joukowski. “L” representa la longitud de la tubería y “a” la velocidad de propagación de la onda.

$$\text{Período de la Tubería} = \frac{2L}{a}$$

Ecuación 3 Período de la Tubería (Thorley, 1991)

En algunos experimentos la configuración de un sistema de embalse, tubería y válvula permite identificar los patrones de variación de la presión. En algunos casos, debido a la superposición de ondas (producto de la reflexión relacionada con el cierre súbito de una válvula) se puede llegar a inducir cambios de presión superiores a los pronosticados en la ecuación de Joukowski (Simpson & Wylie, 1991). La fricción también puede modificar la magnitud de variación, especialmente en tuberías largas.

Durante el proceso de disminución de la altura de presión la presencia de gases y/o aire son factores modificadores de la onda y del perfil de altura de presión del transiente. Una

vez se transmite la señal existe la posibilidad de alcanzar la presión de vapor, lo cual conlleva al cambio de fase del fluido. La presencia de múltiples fases conlleva a cambios en la magnitud de la aceleración de la onda. La diferencia entre los segmentos del volumen del fluido implica en algunos casos un choque el cual produce un aumento en la presión (Thorley, 1991).

Las ondas de tensión que se propagan en las paredes modifican las predicciones basadas en Joukowsky. Se debe considerar que aumentos en la presión modifican ligeramente el diámetro de la tubería; las ondas producto de las alteraciones viajan más rápido en el material de la tubería que en el fluido, lo cual genera pequeñas fluctuaciones de presión; por este motivo la tubería debe estar protegida con soportes (Thorley, 1991).

El efecto de los gases y/o el aire no sólo se reduce a un aumento de presión. Aquellas zonas que cuentan con una gran cantidad de éstos, sirven como punto de reflexión del transiente. Los lugares que cuentan con cantidades pequeñas y dispersas disminuyen la velocidad de transmisión del fenómeno.

Hay consecuencias en ámbitos esenciales como la calidad del agua e infraestructura debido a las variaciones de presión. Se puede presentar resuspensión de partículas sedimentadas, así como desprendimiento de biopelículas, ruptura de tuberías (por ende intrusión de elementos externos) y como resultado un desmejoramiento en términos de calidad (Wood, 2005). Vibraciones, desplazamientos de tuberías, deformación y cavitación también hacen parte de los posibles efectos asociados con el fenómeno (Bosserman II & Hunt, 2006).

La producción de transientes negativos de presión crea circunstancias aptas para una contrapresión de agua no potable de origen doméstico, industrial o institucional (LeChevallier, Gullick, Karim, Friedman, & Funk, 2003). En el suelo y el agua al exterior del sistema de distribución de agua potable hay presencia de indicadores fecales y virus humanos; sin embargo no hay suficiente información para afirmar que los transientes representan un riesgo significativo para la calidad del agua, en parte porque los sistemas de monitoreo no consideran las zonas vulnerables a presiones bajas y no cuentan con equipos de medición de alta frecuencia (LeChevallier, Gullick, Karim, Friedman, & Funk, 2003).

Puesto que en algunos casos el transiente se considera un fenómeno indeseable hay disponible una amplia variedad de métodos para suprimirlos agrupados en dos categorías:

acciones directas y tácticas de distracción. Las acciones directas tienen como objetivo influenciar o modificar las causas primarias que inducen el cambio de flujo. Modificar el patrón de apertura de una válvula es una solución perteneciente a la primera categoría. Las tácticas de distracción se enfocan en expulsar o modificar el flujo; algunos ejemplos son las válvulas de control, las vesículas de aire y los tanques de alimentación.

Dentro de los documentos técnicos o recomendaciones impulsadas por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio se destaca el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS). En el Título B abarca amplitud de lineamientos relacionados con el diseño y operación del sistema de acueducto. En lo relacionado con el golpe de ariete, cuenta con especificaciones para el proceso de diseño y operación de las tuberías de aducción, conducción y red de distribución.

Relativo a las tuberías de aducción y conducción establece criterios que guardan conexidad con el fenómeno de golpe de ariete para la selección del material, los rangos de presión y el análisis hidráulico. En el proceso de selección del material de las tuberías, se debe tener en cuenta las condiciones hidráulicas del proyecto, incluidas las fluctuaciones de presión producto del golpe de ariete. La presión de diseño debe tener en cuenta la diferencia entre las condiciones estáticas y el máximo valor producto de un golpe de ariete, además se debe multiplicar dicho rango por un factor de seguridad estipulado en el documento. El análisis de golpe de ariete debe realizarse en condiciones normales y excepcionales de operación.

$$P_{max} = \max(P_{estática}, P_{transiente})$$

Ecuación 4 Presión Máxima en Tuberías de Conducción y Aducción

$$P_{diseño} = k * P_{max}$$

Ecuación 5 Presión de Diseño para Tuberías de Aducción y Conducción

En los sistemas por bombeo y gravedad el análisis de golpe de ariete debe ser realizado a través del método de las características o algún método de elementos finitos, bajo la consideración del agua como columna elástica para condiciones específicas de operación. Una vez se haya construido el proyecto se deben realizar pruebas de golpe de ariete con el escenario de operación normal que presente las mayores sobrepresiones o las menores subpresiones.

Las redes de distribución, en el RAS Título B, también cuentan con la ocurrencia del golpe de ariete como criterio para la selección de material, el análisis hidráulico y proceso de verificación. Además de consideraciones de toxicidad, resistencia mecánica y aspectos económicos, en el proceso de selección de materiales de la red deben considerarse las condiciones hidráulicas especialmente las presiones normales de trabajo, las presiones estáticas y aquéllas producto de un golpe de ariete. Una vez se ha implementado en su totalidad la red de distribución debe hacerse una prueba de golpe de ariete con el fin de verificar que ningún segmento posea presiones que superen el máximo admitido, hecho que podría conducir a estallidos. Se debe verificar que no se produzcan durante el fenómeno, presiones negativas que induzcan la intrusión de agua desde el exterior de la red.

El diseño de estaciones de bombeo debe considerar la pérdida de suministro eléctrico y la consecuente interrupción del flujo de agua. Se debe enfatizar en los efectos relacionados con la sobre elevación de presiones, las subpresiones y la velocidad de la onda de compresión. Las condiciones de operación deben ser verificadas durante toda la vida útil en condiciones estáticas y de flujo no permanente. Finalmente, se debe realizar pruebas en condiciones normales que produzcan las mayores sobrepresiones y las menores subpresiones; los datos tomados en campo deben ser conservados por la Persona Prestadora del Servicio con el fin de someterlos a comparación con aquéllos durante los períodos de operación normal.

Se puede afirmar que el transiente de presión ocurre durante eventos de flujo variado no permanente, inducido por cambios súbitos como el cierre de una válvula de control, cambios en la demanda o suspensión de la actividad de una bomba, entre otros. La suposición acerca de la compresibilidad no es fiel a las características del fenómeno, especialmente en aquéllos de corta duración. El tiempo de propagación es bastante corto, inclusive puede durar menos de un segundo, motivo por el cual se deben considerar equipos de medición de alta frecuencia. Durante las fluctuaciones de presión existen períodos positivos y negativos que pueden afectar las características de la hidráulica de una red o la calidad del agua. Aún se requiere más documentación científica para declarar el fenómeno un riesgo para la salud pública. La magnitud del tránsito súbito de presiones ha sido explicada a través de la ecuación de Joukowsky; sin embargo, puede haber variaciones no pronosticadas debido a la presencia de gases o aire, y a la propagación de la onda en el material de la tubería. Existen dos categorías de métodos de supresión del

transiente: métodos directos y tácticas de distracción. Las recomendaciones técnicas locales están enfocadas a la selección del material, modelación hidráulica, rangos de presión y pruebas de operación en los sistemas de aducción, de conducción, de la red de distribución y de las estaciones de bombeo.

2 Montaje de Laboratorio

El montaje de laboratorio propuesto en este proyecto de grado tuvo como escenario la red elevada del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de los Andes, ubicado en el edificio Mario Laserna (Carrera 1 # 18^a-10).

Dos escenarios cuyas características fueron medidas en estado estable (presión y caudal) son sometidos a transiciones en períodos de tiempo cortos, en este caso a un cierre súbito de una válvula. Se contaba con cuatro Escenarios: 5 Inicial, 5 Final, 6 Inicial y 6 Final. Sus nombres obedecen a la recopilación de información en trabajos previos.

2.1 Antecedentes

En la tesis de César Mauricio Prieto Gamboa “Modelación física y calibración de sustancias en redes de distribución de agua potable” (Prieto Gamboa, 2011) se hizo un levantamiento topológico y topográfico a la red elevada del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Los Andes, se crearon escenarios hidráulicos, se estimaron las demandas, se midieron las presiones, se determinaron las pérdidas menores y se analizó el comportamiento de sustancias. Además se llevó a cabo un proceso de calibración y validación en EPANET y Redes.

El proyecto de grado presente, retomó el modelo calibrado y validado en el proyecto de grado de César Prieto. La nomenclatura relativa a nodos de extracción y transmisores de presión, se conserva con el fin de permitir comparaciones.

El trabajo de grado previo creó seis escenarios. Con base en los promedios de las mediciones de presión, se llevó a cabo para cada uno, un proceso de calibración de las pérdidas menores. El resultado más satisfactorio fue el del Escenario 5 Inicial, el cual fue validado en todos los escenarios y arrojó mejores resultados que los modelos previos.

Dos escenarios fueron retomados de los estudios previos: el 5 y el 6; para evitar confusiones son llamados 5 Inicial y 6 Inicial, puesto que fueron el punto de partida para evolucionar a los Escenarios 5 Final y 6 Final.

2.2 Accesorios de la Red Elevada

La red elevada cuenta con 31 puntos de extracción de caudal dotados de válvulas de bola de 2 pulgadas; en más de siete hay tuberías disponibles para dirigir el flujo a unas zonas de descarga. También posee 23 válvulas de 2, 3 y 4 pulgadas las cuales permiten modificar la dirección del flujo. Los tubos son de PVC de 2, 3 y 4 pulgadas, en algunas zonas unidos por reducciones y tes (Ilustración 7 Diámetros de Tuberías en la Red Elevada). En nueve puntos de la red hay transductores de presión instalados los cuales permiten mediciones en tiempo real.

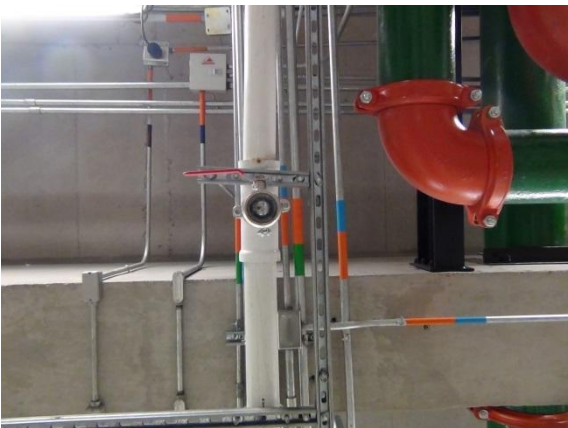


Ilustración 3 Válvula de Bola de 2 Pulgadas.



Ilustración 4 Válvula de 3 Pulgadas.

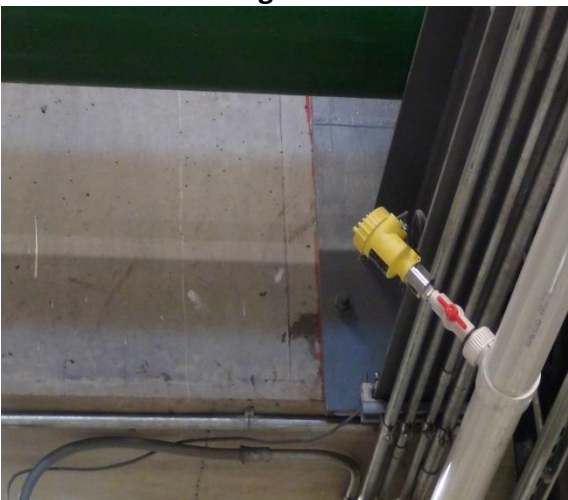


Ilustración 5 Transductor de Presión Vegabar 52.



Ilustración 6 Válvula de 2 Pulgadas.



Universidad de los Andes
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados – CIACUA
*“Modelación Física de Cambios Operativos en Redes de Distribución
de Agua Potable: Modelaciones en Período Extendido y Modelación
de Flujo No Permanente”*



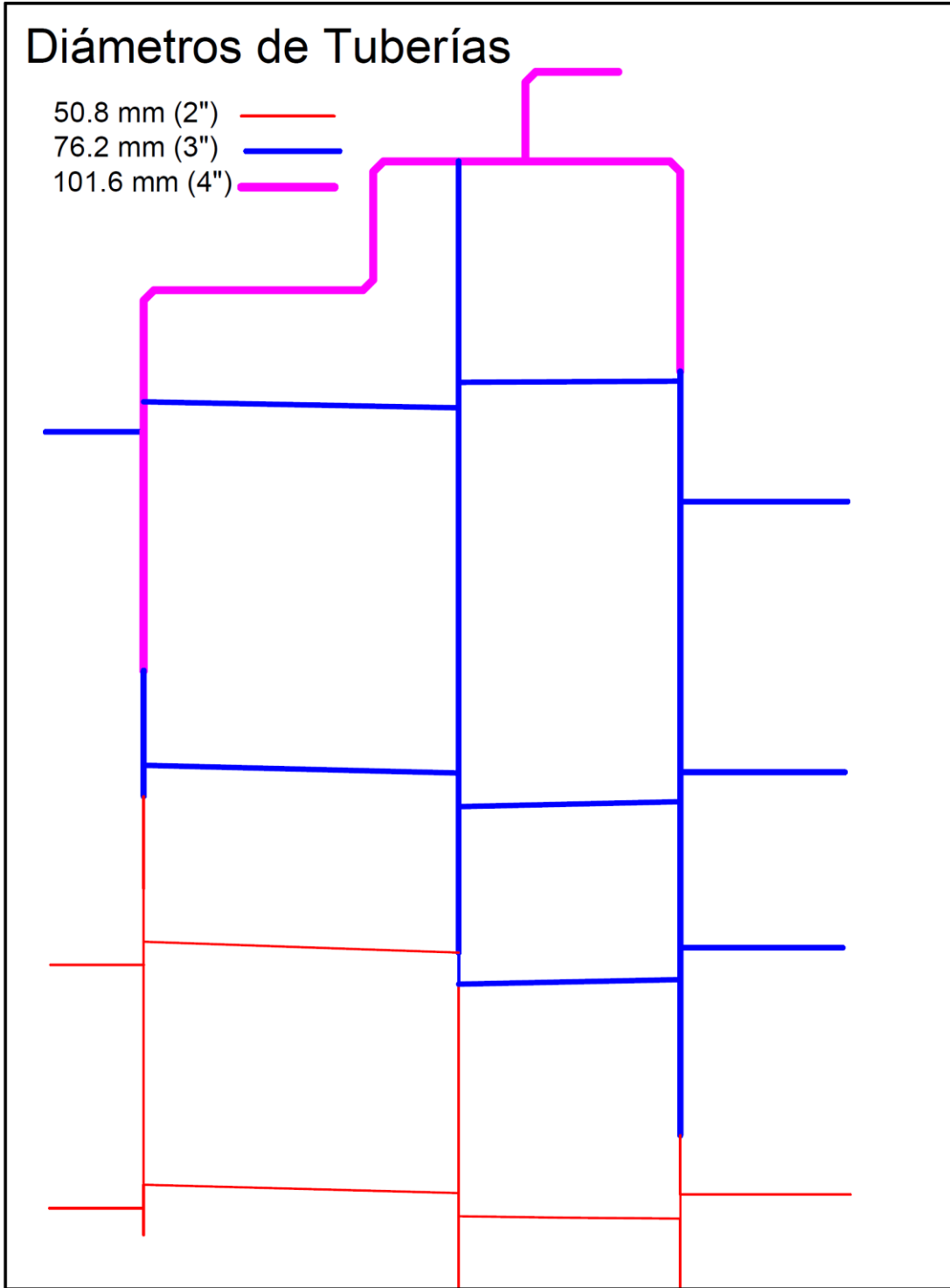


Ilustración 7 Diámetros de Tuberías en la Red Elevada

2.3 Sistema de Medición

La red elevada cuenta con diferentes puntos en los cuales hay instalados sensores que miden la presión. Éstos están conectados a una compleja red que direcciona la señal a un “*fieldpoint*” de National Instruments cuya referencia es FP-1601 y cuenta con una extensión FP-AI-111 (National Instruments, 2003). Usualmente este tipo de instrumentos alberga máximo nueve conexiones pero la presencia de una extensión, amplía su rango. Esta configuración de la red permite recibir en tiempo real la información de los nueve puntos de presión en un “*software*” diseñado para el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA) de la Universidad de Los Andes.



Ilustración 8 *FieldPoint* FP-1601 y Extensión FP-AI-111.

2.4 Medición de presión

La red elevada cuenta con 12 puntos en los cuales pueden ser instalados transductores de presión. Sin embargo, no todos pueden ser utilizados debido a que algunos no cuentan con la instalación y conducción de cables, algo indispensable para la transmisión de la señal. “El punto A es esencial para los modelos computacionales puesto que con base en éste se determina la altura del primer nodo”. La Ilustración 11 Mapa de Transductores de Presión” es un esquema de los medidores en la red, la ubicación de los puntos y su nomenclatura.

Inicialmente se contaba con transmisores de dos modelos MAN-SD2S B2 (Kobold) y Vegabar 52. Dado que el rango de medición de éstos abarcaba de 0 a 1 bar, se decidió adquirir 4 nuevos transmisores de presión los cuales estuvieran en capacidad de detectar

presiones de -1 a 5bar, su referencia es MAN LD3S (Kobold). Éstos fueron instalados en los puntos de mayor variabilidad de presión.



Ilustración 9 Vegabar 52.



Ilustración 10 MAN LD3S (Kobold).

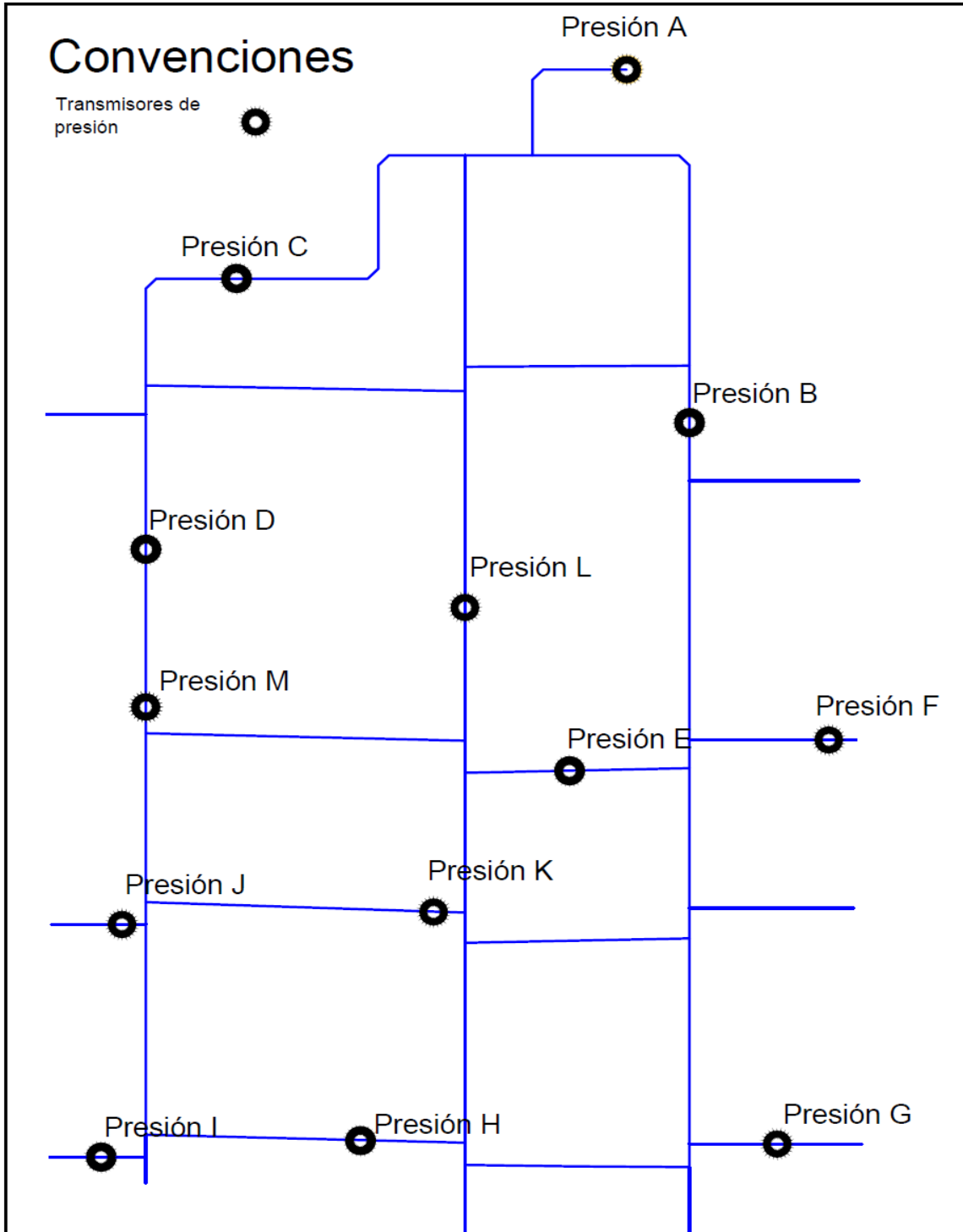


Ilustración 11 Mapa de Transductores de Presión.

2.5 Medición de Demandas de Puntos de Extracción de Caudal

Determinar el caudal en los nodos de extracción es esencial para cuantificar las demandas e implementarlas en los diferentes modelos computacionales. Se debe considerar que a la entrada de la red hay un caudalímetro electrónico WATERMASTER FEV. En total hay 31 puntos desde los cuales se puede extraer agua por medio de válvulas de bola de 2 pulgadas. En estos puntos se instalaron mangueras las cuales transportaban el fluido a baldes de volumen conocido. La ubicación de los nodos y su nomenclatura puede ser consultada en el esquema de la Ilustración 12 Puntos de Extracción de Caudal”.

Para la medición de caudal se retomó la metodología usada en estudios previos. Los baldes de 10.90L y 10.94L se llenaron y con un cronómetro se determinó el tiempo que esta actividad requirió. Después de diez intentos se calculó el promedio y la desviación estándar.

Las mangueras utilizadas para la extracción de caudal no son parte de la red y no están presurizadas. Éstas se instalan a alguna de las válvulas de bola y se permite el flujo de agua. En el interior del balde, producto de la acumulación del fluido hay turbulencia. Factores como la dirección de la manguera y la fricción del material, en conjunto con las situaciones mencionadas anteriormente son fuentes de incertidumbre.

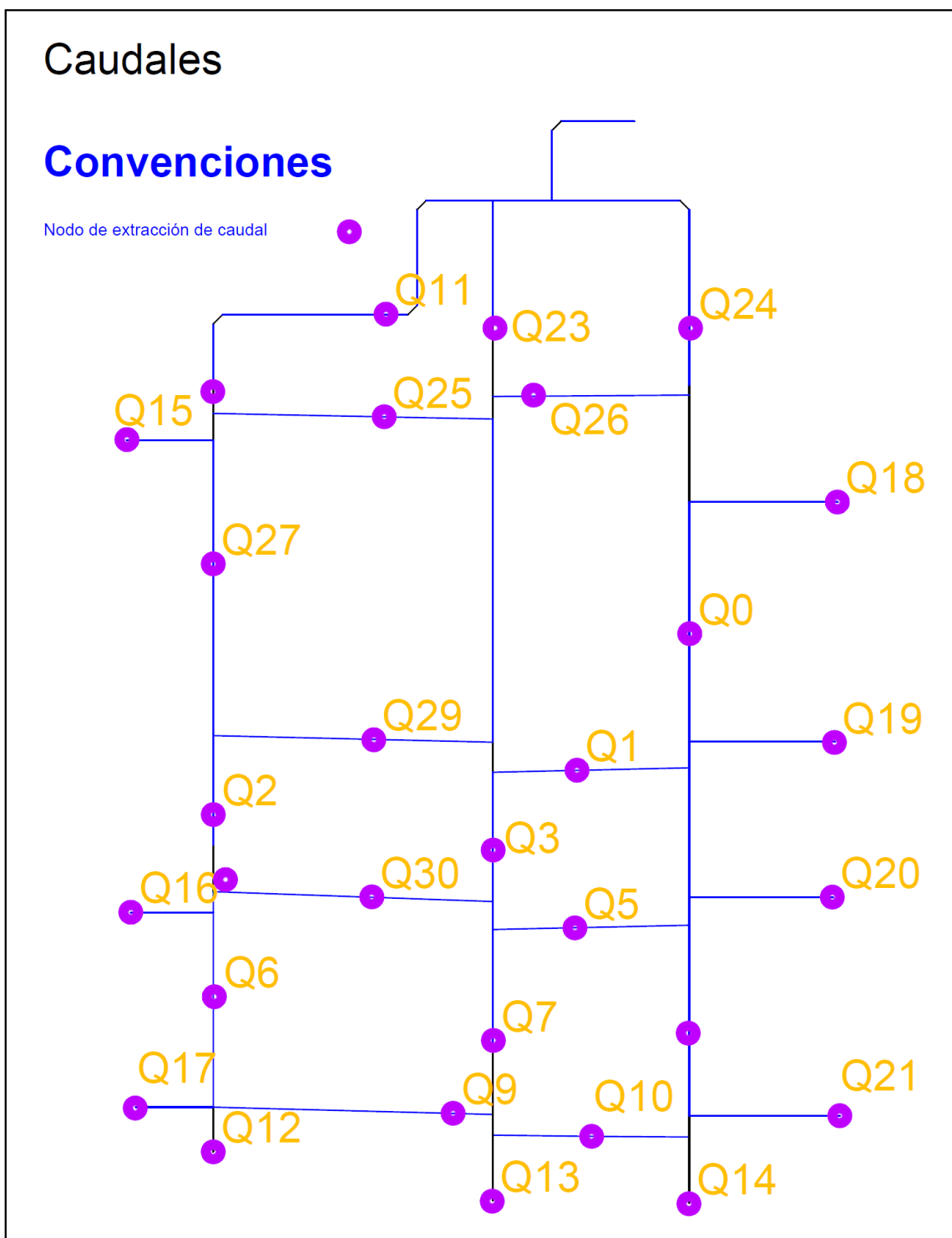


Ilustración 12 Puntos de Extracción de Caudal.

2.6 Escenarios

A continuación se presentan los esquemas de los escenarios implementados. Los cambios súbitos fueron del Escenario 5 Inicial al Escenario 5 Final y del Escenario 6 Inicial al Escenario 6 Final. Se tenía conocimiento de los caudales demandados para el 5 Inicial y el 6 Inicial, debido a estudios previos. En el caso de los montajes 5 Final y 6 Final, fue necesario seguir el procedimiento planteado para la determinación de los caudales demandados en los nodos de extracción.

La diferencia básica entre uno y otro escenario, radica en el cierre súbito de una válvula. Para decidir qué puntos eran idóneos para dicho cambio se consideraron los cambios en presión y demanda. En relación con los transientes, se puede afirmar que las válvulas de bola incumplen con los tres componentes recomendados para evitar el fenómeno: componentes móviles ligeros, corto desplazamiento para cierre y movimiento asistido por resortes (Thorley, 1991).

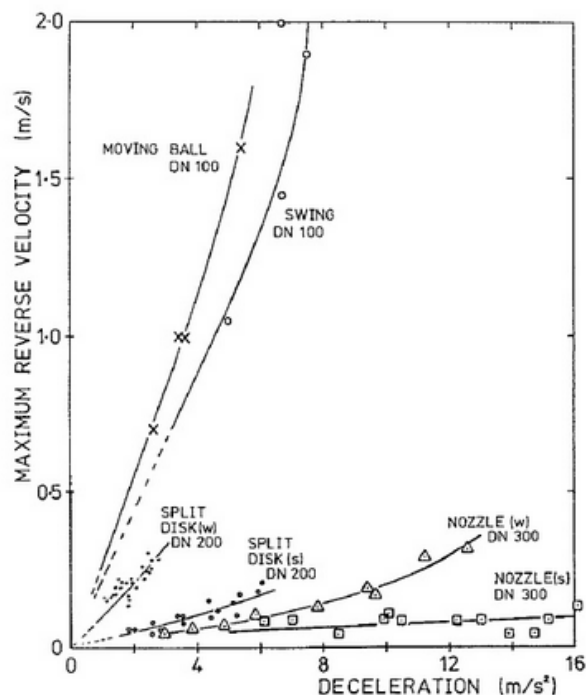


Ilustración 13 Gráfica Comparativa de Diferentes Válvulas (Thorley, 1991).

En la gráfica se puede apreciar que las válvulas ideales son las de boquilla porque tienen una excelente relación entre deceleración y máxima velocidad reversa. Al contrario, las válvulas de bola pueden inducir fácilmente un transiente. Éstas para pequeñas magnitudes de deceleración del flujo tienen enormes aumentos en lo que respecta a la máxima velocidad reversa. Si se analiza la ecuación de Joukowski, es evidente que esto repercute en los cambios de presión que sean observados durante y después del evento.

2.6.1 Escenario 5 Inicial

El Escenario 5 Inicial (ver Ilustración 14 Escenario 5 Inicial.) es el que mejor se adecúa a los programas validados (Prieto Gamboa, 2011). Esta configuración del sistema se caracteriza por tener todas las válvulas abiertas y siete puntos de extracción de caudal.

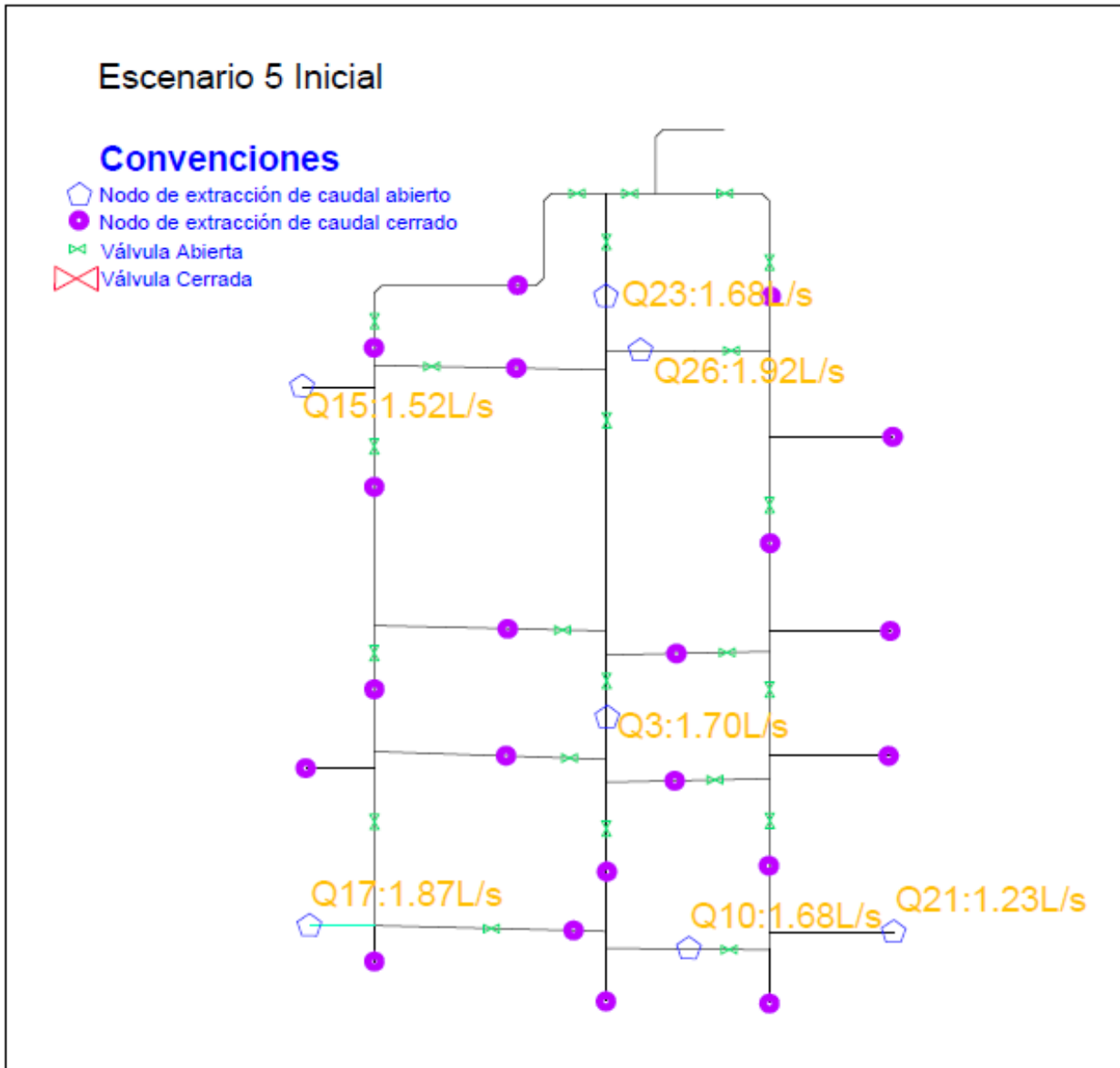


Ilustración 14 Escenario 5 Inicial.

2.6.2 Escenario 5 Final

El Escenario 5 Final (Ilustración 15), al igual que el inicial tiene únicamente una de las válvulas cerradas. Ésta se encuentra cerca a uno de los puntos de mayor presión reportados por el Escenario 5 Inicial.

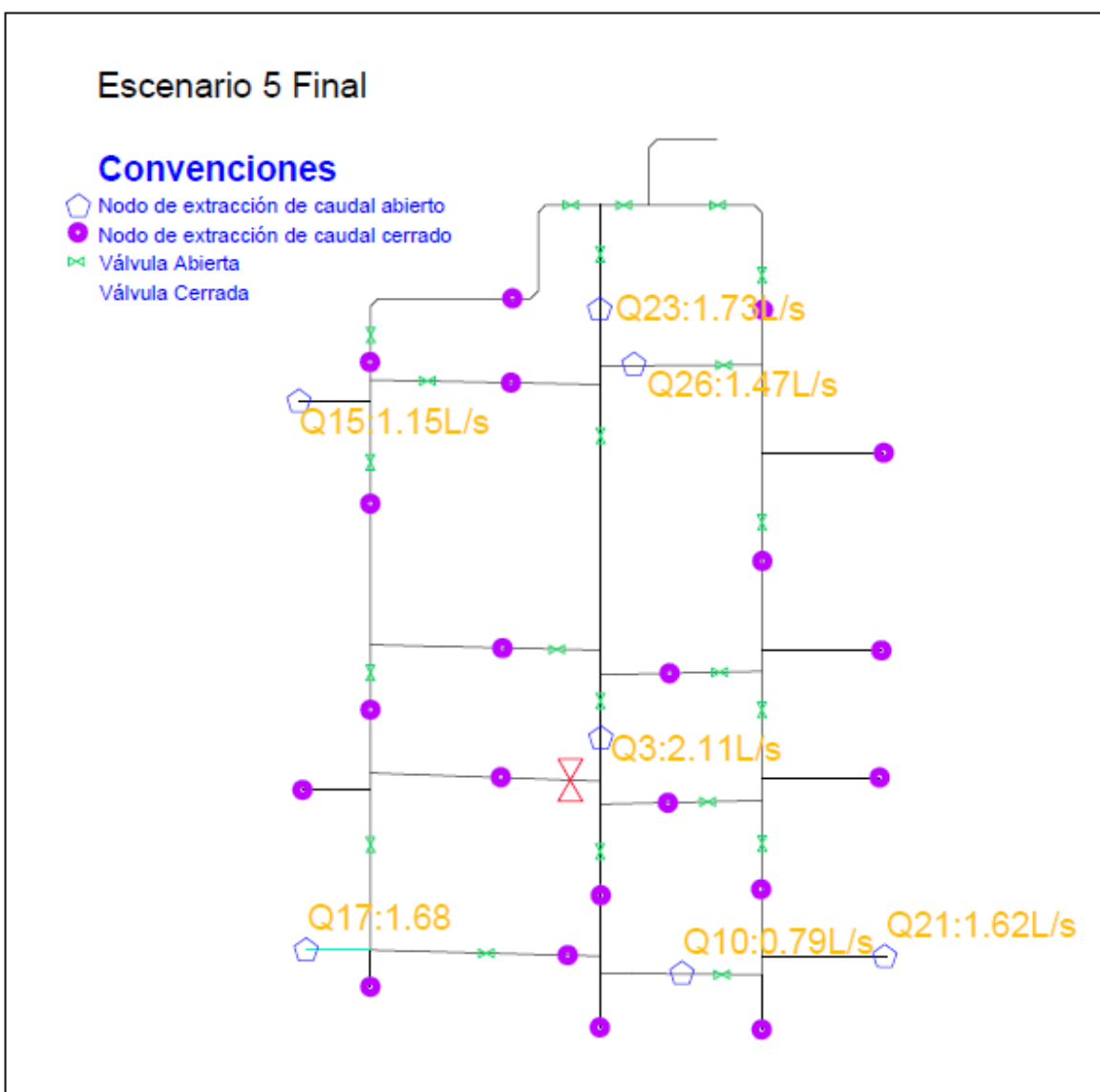


Ilustración 15 Escenario 5 Final.

2.6.3 Escenario 6 Inicial

El Escenario 6 Inicial (Ilustración 16) cuenta con 8 válvulas cerradas, las cuales permiten el flujo a través de tres líneas. Hay 4 puntos de extracción de caudal. La válvula al inicio de la red se encuentra completamente abierta.

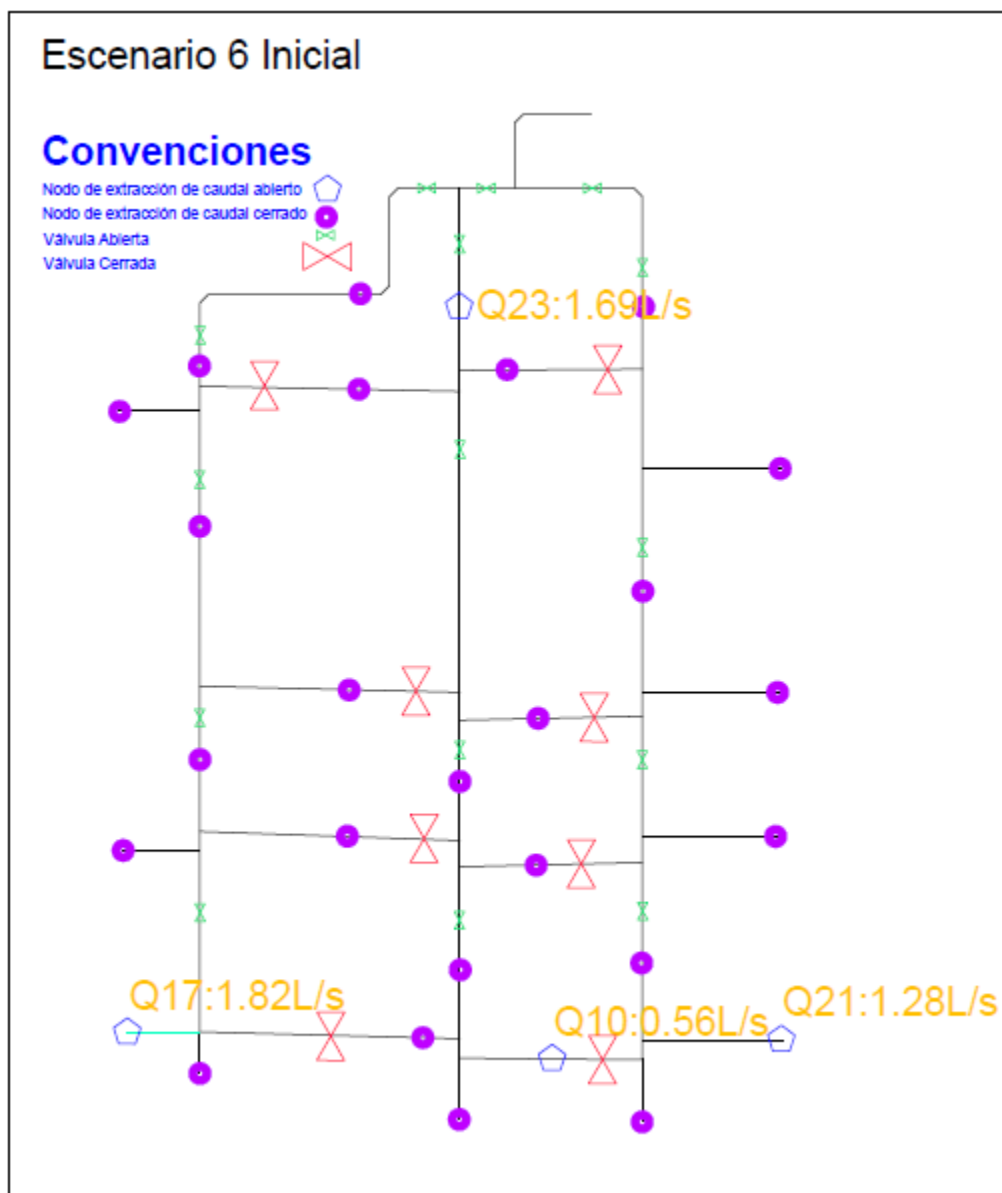


Ilustración 16 Escenario 6 Inicial.

2.6.4 Escenario 6 Final

En el Escenario 6 Final (Ilustración 17) únicamente se extrae caudal desde tres puntos. Se permite el flujo a través de las tres principales ramificaciones de la red elevada, para lo cual se deben cerrar las válvulas en las interconexiones. La diferencia con el Escenario 6 Inicial radica en el cierre de una de las válvulas en la línea central, está se encuentra en las vecindades de uno de los puntos que registraron mayor presión para las condiciones iniciales. En total las válvulas cerradas son nueve.

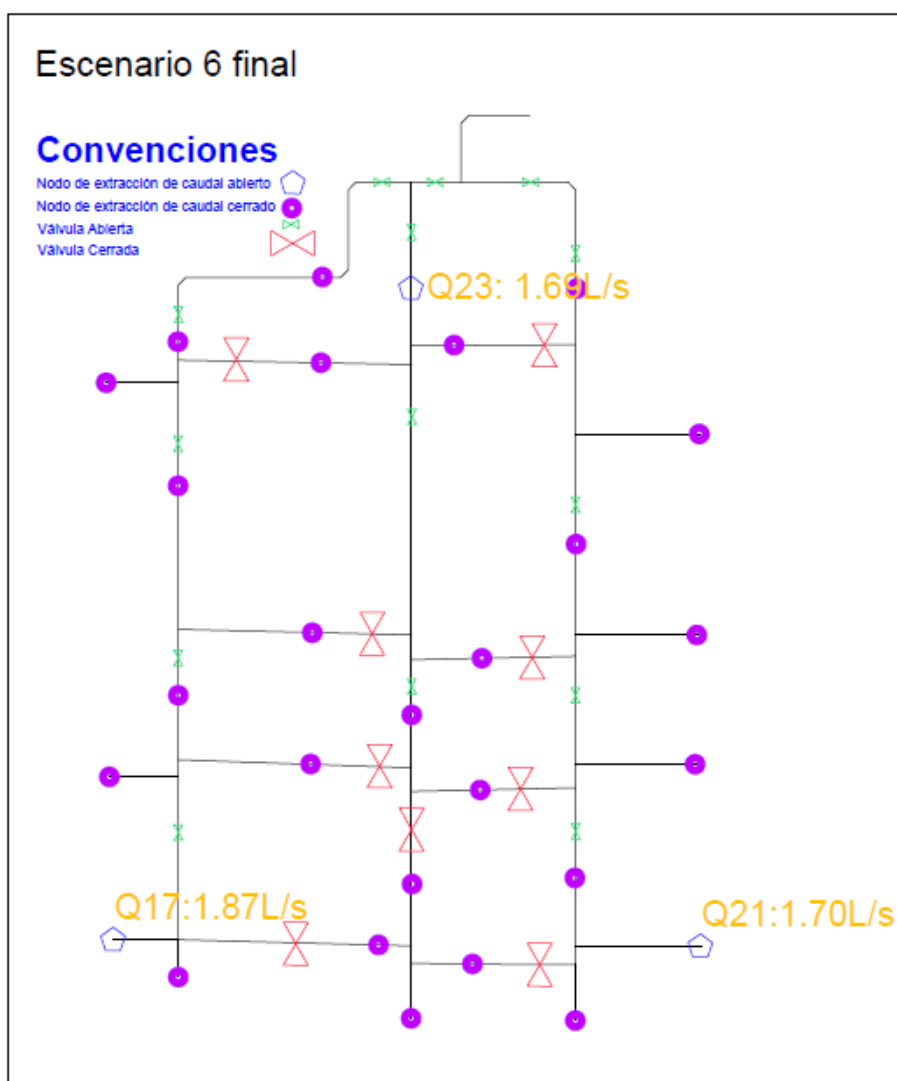


Ilustración 17 Escenario 6 Final.

2.7 Resultados de mediciones de presión y demandas

A continuación se presentan los promedios de las demandas o caudales medidos para cada uno de los puntos (Tabla 1). El Escenario 5 Final reportó el mayor caudal total en promedio. En contraparte, el Escenario 6 Final cuenta con la demanda total de menor magnitud.

Promedios de las Demandas de los Escenarios								
Caudal [L/s]	Q15	Q23	Q26	Q3	Q21	Q10	Q17	Total
Escenario 5 Inicial	1.52	1.68	1.92	1.70	1.23	0.56	1.87	10.48
Escenario 5 Final	1.15	1.73	1.47	2.11	1.62	0.79	1.68	10.55
Escenario 6 Inicial	-	1.69	-	-	1.28	0.56	1.82	5.35
Escenario 6 Final	-	1.69	-	-	1.70	0.00	1.87	5.26

Tabla 1 Promedios de Demandas de Caudal.

Las siguientes dos tablas (Tabla 2 y Tabla 3) resumen la información referente a dos importantes indicadores estadísticos: desviación estándar y mediana. El motivo de presentarlos es analizar la variabilidad de los datos (y por ende su confiabilidad). Se puede analizar que las diferencias entre los promedios y las medianas poseen magnitudes bajas. Adicionalmente, la desviación estándar no tienen valores que puedan sugerir variaciones significativas.

Al lector le pueden llamar la atención los datos reportados del Escenario 5 Final, en el nudo de extracción Q10. Una desviación estándar y una varianza igual a cero puede ser motivo de sospecha; sin embargo al analizar la configuración del montaje es evidente que las válvulas restringen por completo el paso de agua por el nudo (a pesar de que esté abierto) lo cual explica los valores presentados.

Desviación Estándar de las Demandas de los Escenarios							
Caudal [L/s]	Q15	Q23	Q26	Q3	Q21	Q10	Q17
Escenario 5 Final	0.07	0.08	0.02	0.07	0.04	0.02	0.05
Escenario 6 Final	-	0.04	-	-	0.05	0.00	0.06

Tabla 2 Desviaciones Estándar de las Demandas de los Escenarios.

Mediana de Las Demandas de los Escenarios

Caudal [L/s]	Q15	Q23	Q26	Q3	Q21	Q10	Q17
Escenario 5 Final	1.12	1.72	1.46	2.14	1.62	0.79	1.68
Escenario 6 Final	-	1.69	-	-	1.69	0.00	1.85

Tabla 3 Mediana de las Demandas de los Escenarios.
Medias de Presiones

[M.C.A]	Escenario 5 Inicial	Escenario 5 final	Escenario 6 Inicial	Escenario 6 Final
Presión A	4.0455	4.0460	4.3844	4.4110
Presión B	3.8905	3.8913	4.3020	3.3316
Presión C	4.0312	4.0270	4.4275	4.4782
Presión D	3.4626	3.4619	3.9169	3.9517
Presión E	3.8555	3.8543	4.2527	4.2893
Presión F	3.4133	3.4125	3.8541	3.9093
Presión G	3.2986	3.2964	3.7434	3.7801
Presión H	3.3488	3.3493	3.8084	3.8873
Presión I	3.2807	3.2770	3.6483	3.6980

Tabla 4 Medias de Presión.

En la tabla “medias de presión” (Tabla 4) se presentan los resultados de presión relacionados con cada uno de los escenarios, medidos en metros de columna de agua. La presión A es esencial para la construcción de los modelos, puesto que corresponde a la altura del embalse al inicio de la red. La mayor presión a la entrada de la red la reportó el Escenario 6 Final, el cual también cuenta con el mayor promedio de presiones.

Desviación Estándar de Presiones

[M.C.A]	Escenario 5 Inicial	Escenario 5 Final	Escenario 6 Inicial	Escenario 6 Final
Presión A	0.0031	0.0032	0.0009	0.0011
Presión B	0.0022	0.0025	0.0010	0.0009
Presión C	0.0070	0.0070	0.0080	0.0080
Presión D	0.0065	0.0063	0.0059	0.0054
Presión E	0.0064	0.0060	0.0063	0.0064
Presión F	0.0052	0.0052	0.0068	0.0073
Presión G	0.0042	0.0045	0.0035	0.0072
Presión H	0.0022	0.0019	0.0010	0.0009
Presión I	0.0059	0.0053	0.0047	0.0048

Tabla 5 Desviación Estándar de Presiones de Escenarios.
Mediana de Presiones

[M.C.A]	Escenario 5 Inicial	Escenario 5 Final	Escenario 6 Inicial	Escenario 6 Final
Presión A	4.0453	4.0461	4.3845	4.4108
Presión B	3.8911	3.8913	4.3024	4.3318
Presión C	4.0347	4.0265	4.4311	4.4819
Presión D	3.4588	3.4586	3.9176	3.9481
Presión E	3.8568	3.8566	4.2548	4.2855
Presión F	3.4112	3.4112	3.8554	3.905
Presión G	3.2995	3.2991	3.7436	3.7867
Presión H	3.3485	3.3491	3.8088	3.8872
Presión I	3.2794	3.2794	3.6448	3.6961

Tabla 6 Mediana de Presiones de Escenarios.

Es importante analizar si los datos son precisos, o se encuentran dentro de un rango adecuado de precisión; por este motivo se presentan dos indicadores estadísticos: la mediana y la desviación estándar. Se puede inferir de las magnitudes de las desviaciones estándar que la dispersión en el proceso de medición no fue considerablemente alta (del orden de milímetros). Por otro lado, las medianas son bastante cercanas a las medias lo cual indica que no hay un sesgo considerable en la toma de datos.

3 Modelo Computacional

El presente proyecto de grado consideró la modelación estática y en período extendido de los escenarios, en los programas REDES y EPANET. Éstos son ampliamente utilizados en el campo profesional y cuentan con una base teórica sujeta a revisión y actualizada.

3.1 EPANET

EPANET es un programa que simula el comportamiento del agua en período extendido y en estado estático en sistemas de tuberías presurizadas (United States Environmental Protection Agency, 2013); además permite introducir diferentes accesorios como válvulas y tanques. Se puede descargar de manera gratuita desde el sitio web de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América.

“Soluciona matemáticamente la red con el método del gradiente” y permite manejar tres tipos de ecuaciones relativas a las pérdidas por fricción: Darcy-Weisbach, Hazen-Williams y Chézy-Manning, así como la simulación del comportamiento de solutos en redes de distribución (Saldarriaga, 2007).

3.2 REDES

El programa redes fue desarrollado en el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA) del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Los Andes (Saldarriaga, 2007). Se trata de un “*software*” que modela sistemas de tuberías de flujo a presión. Está basado en investigaciones de diferentes universidades; una de las más relevantes está relacionada con los criterios análogos de optimización económica y diámetros de tuberías en redes de distribución de agua, cuyos autores son Ronald Featherstone y Karim El-Jumaily (quienes a su vez retoman el criterio de Wu) (Saldarriaga, 2007).

Nacido en 1998 en un proyecto especial y desarrollado a través de diferentes proyectos de grado, en el año 2001 se unificó (Saldarriaga, 2007). Está programado bajo el paradigma orientado por objetos, su lenguaje computacional es Delphi, es compatible con el sistema operativo Windows, utiliza dos ecuaciones de fricción (la unificación Colebrook-White y

Darcy-Weisbach, y Hazen-Williams), su método de cálculo es el del gradiente y el sistema matricial es resuelto a través del método de Gauss o Factorización de Cholesky (Saldarriaga, 2007).

3.2.1 Método del Gradiente

El método del gradiente fue desarrollado por Ezio Todini, E.P.O Connell y R. Salgado (Saldarriaga, 2007). Este método soluciona las ecuaciones de energía y masa simultáneamente. Esto permite un grado mayor de precisión en períodos más cortos de tiempo. Juan Saldarriaga explica el método en su libro “Hidráulica de Tuberías” con base en el cual se basa esta elucidación (Saldarriaga, 2007). Para entender el método se presenta la ecuación de continuidad la cual es aplicable en flujo permanente.

$$\sum_{j=1}^{NTi} Q_{ij} - Q_{Di} + Q_{ei} = 0$$

Ecuación 6 Ecuación de Continuidad.

La nomenclatura “Q” representa un caudal de una tubería, “i” la nomenclatura del nodo, “j” el rótulo de la tubería, “QD” el caudal demandado y “Qe” el caudal que es introducido a ese punto de la tubería. Esta ecuación expresa la relación entre los caudales de las tuberías y un determinado nodo: la suma de los caudales de los tubos asociados con un determinado nodo, menos el caudal demandado, más el caudal que le es aportado, resulta en cero.

El texto presenta la relación entre la ecuación de Darcy-Weisbach para pérdidas por fricción y la de Colebrook-White.

$$hf = f * \left(\left(\frac{l}{d} \right) * \left(\frac{v^2}{2 * g} \right) \right)$$

Ecuación 7 Ecuación de Darcy Weisbach.

“Hf” representa las pérdidas por fricción, “f” el factor de fricción, “l” la longitud de la tubería, “d” el diámetro, “v” la velocidad y “g” la gravedad. Las pérdidas por fricción son directamente proporcionales a un factor, a la longitud y al cuadrado de la velocidad; éstas son inversamente proporcionales al diámetro y a la gravedad.

El lector puede preguntarse por el factor de fricción y la manera de calcularlo. Existen diferentes ecuaciones, en este trabajo se utiliza Colebrook-White debido a que es físicamente basada.

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

Ecuación 8 Ecuación de Colebrook-White.

“F” es el factor de fricción, “ks” la rugosidad de la tubería, “d” el diámetro y “Re” el número de Reynolds. En términos de cálculo, esta ecuación se resuelve de manera no explícita, es decir, a través de métodos numéricos. La unión de las ecuaciones de Darcy-Weisbach y Colebrook White resulta en una nueva que comprende una relación entre caudal y pérdidas por fricción.

$$Q = -2 * \left(\frac{\sqrt{(2 * g * d * hf)}}{\sqrt{(l)}} \right) * A * \log_{10} \left(\left(\frac{ks}{3.7 * d}\right) + \left(\frac{2.51 * v * \sqrt{l}}{\sqrt{2 * g * d^3 * \sqrt{hf}}}\right) \right)$$

Ecuación 9 Ecuación Explícita para el Cálculo del Caudal a partir de las Ecuaciones de Darcy-Weisbach y Colebrook-White.

Las letras conocidas como por ejemplo “g”, conservan la representación asignada anteriormente, en este caso gravedad. “A” representa el área perpendicular al sentido del flujo (en ocasiones denominada área mojada) y “v” la viscosidad cinemática.

Se sabe que las pérdidas en un sistema están asociadas tanto con las pérdidas por fricción, como con las pérdidas menores.

$$H_i = hf + \sum km * \frac{v^2}{2 * g}$$

Ecuación 10 Energía Total Disponible.

En la ecuación que explica este concepto “H” representa pérdidas totales, “hf” pérdidas por fricción, “km” factor de pérdidas menores, “v” velocidad y “g” gravedad.

Considérese cualquier tipo de pérdida asociada con diferentes accesorios. Las pérdidas totales pueden ser modeladas a través de una ecuación con exponentes y constantes.

$$H_t = \alpha * Q^n + \beta * Q + \gamma$$

Ecuación 11 Pérdidas Totales.

Los factores " α ", " β " y " γ " son constantes. El exponente n depende de la ecuación de pérdidas por fricción seleccionada, en este caso se utiliza DarcyWeisbach, por ende su valor es 2. El segundo y el tercer término son necesarios únicamente cuando hay pérdidas menores atípicas. De las dos ecuaciones de pérdidas totales se puede deducir una expresión para α .

$$\alpha = \frac{\left(f * \left(\frac{l}{d}\right) + \sum km\right)}{2 * g * A^2}$$

Ecuación 12 Constante de Pérdidas Totales.

Para cada una de las tuberías la pérdida de altura piezométrica puede ser expresada de manera matricial, en cada uno de los tramos constituidos por dos nodos.

$$[A11] * [Q] + [A12] * [H] = -[A10] * [H_0]$$

Ecuación 13 Conservación de Energía.

A11 representa una matriz cuya diagonal contiene la ecuación de pérdidas totales, sus dimensiones son $NT * NT$, donde NT es el número de tuberías.

Q es un vector de caudales con dimensión $NT * 1$.

A12 es la matriz de conectividad cuyas dimensiones son $NT * NN$, donde NN es el número de nudos. Indica de qué nudo parte la tubería y hacia qué nudo se dirige: -1 para el punto inicial y 1 para el punto final.

H es el vector de alturas piezométricas desconocidas cuyas dimensiones son $NN * 1$.

A10 es la matriz que contiene la información de los nudos con altura piezométrica conocida. Su dimensión es $NT * NS$, con valores de -1 para aquellas filas conectadas a alguno de estos nudos conocidos.

En un inicio se habló de la simultaneidad entre la ecuación de energía y la ecuación de continuidad para el método del gradiente. Ésta última puede ser expresada a través de matrices.

$$[A21] * [Q] = [q]$$

Ecuación 14 Ecuación de Continuidad.

A21 es la matriz transpuesta de A12.

Q es el vector de caudales.

q es el vector de consumo u oferta de cada nodo cuyas dimensiones son NN*1.

Dado que se desea que las dos ecuaciones mencionadas estén en sinergia, pueden ser representadas a través de matrices en una sola expresión.

$$\begin{bmatrix} [A11] & [A12] \\ [A21] & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [Q] \\ [H] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -[A10] & * & [H_0] \\ & [q] & \end{bmatrix}$$

Ecuación 15 Expresión Ensamblada de Continuidad y Energía.

La parte superior de la matriz relaciona caudal y altura piezométrica, mientras que la parte inferior representa la conservación de la masa en cada uno de los puntos; dado que no se puede resolver el sistema matricial de manera directa, debe aplicarse un algoritmo iterativo; el método del gradiente realiza una expansión truncada de una serie de Taylor (Saldarriaga, 2007).

$$[H_{i+1}] = -\{[A21]([N][A11]')^{-1}[A12]\}^{-1}x\{[A21]([N][A11]')^{-1}([A11][Q_i] + [A10][H_0]) - ([A21][Q_i] - [q])\}$$

Ecuación 16 Expresión Iterativa de Alturas.

$$[Q_{i+1}] = \{[l] - ([N^{-1}][A11]') - [A11]\}[Q_i] - \{([N][A11]')^{-1}([A12][H_{i+1}] + [A10][H_0])\}$$

Ecuación 17 Ecuación Iterativa de Caudales.

Con las dos ecuaciones de iteración, se establece el nivel de error o tolerancia deseado y se calculan alturas y caudales.

3.2.2 Método de Gauss o Factorización de Cholesky

3.2.2.1 Factorización LU

La factorización LU permite expresar una matriz A como el producto de una matriz triangular inferior L y una matriz triangular superior U. Si A es cuadrada (n*n) puede ser reducida por renglones a una matriz triangular superior U; si U tiene pivotes, es decir, es invertible, la factorización es única (Grossman, 2008).

A través del Método de Gauss A es transformada en una matriz triangular superior; sin embargo los números en la diagonal no son llevados a 1 (aun cuando es posible); dicha matriz corresponde a U.

A la derecha de las matrices se puede ver paso a paso las modificaciones que se realizan. Las primera operación consisten en restar dos veces la fila 1 (R1) a la fila 3 (R3). Posteriormente se le resta la fila 1 (R1) a la fila 4 (R4). Tanto a la fila 3 (R3) como a la fila 4 (R4) se les resta la fila 2 (R2). Finalmente se le resta 4 veces la fila 3 (R3) a la fila 4 (R4). A través de este proceso se logra obtener una matriz triangular superior.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & -1 & 4 \\ 0 & -1 & 5 & 8 \\ 2 & 3 & 1 & 4 \\ 1 & -1 & 6 & 4 \end{pmatrix} \begin{array}{l} R3 \rightarrow R3 - 2R1 \\ R4 \rightarrow R4 - R1 \end{array} \rightarrow$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & -1 & 4 \\ 0 & -1 & 5 & 8 \\ 0 & -1 & 3 & -4 \\ 0 & -3 & 7 & 0 \end{pmatrix} \begin{array}{l} (R3 \rightarrow R3 - R2) \\ (R4 \rightarrow R4 - R2) \end{array} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 2 & -1 & 4 \\ 0 & -1 & 5 & 8 \\ 0 & 0 & -2 & -12 \\ 0 & 0 & -8 & -24 \end{pmatrix} (R4 \rightarrow R4 - 4R3)$$

$$\rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 2 & -1 & 4 \\ 0 & -1 & 5 & 8 \\ 0 & 0 & -2 & -12 \\ 0 & 0 & 0 & 24 \end{pmatrix} = U$$

Para determinar cuál es la matriz U se expresa el procedimiento para llegar a la matriz

triangular superior en matrices elementales. La multiplicación de tales matrices permite determinar L. Es necesario aclarar que para matrices cuadradas singulares, se puede hallar $A=LU$; sin embargo su solución no es única.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 3 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 1 \end{bmatrix} U$$

$$\rightarrow L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 3 & 4 & 1 \end{bmatrix}$$

Si A es una matriz que para ser triangular superior requiere alguna permutación, es necesario aplicar una matriz de permutación P (Grossman, 2008). Se requiere modificar la expresión general $P*A=L'U'$, donde la factorización corresponde a la matriz permutada.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 4 \\ 0 & 3 & 7 \\ 4 & 1 & 5 \end{bmatrix} \xrightarrow{R1 \leftrightarrow R3} \begin{bmatrix} 4 & 1 & 5 \\ 0 & 3 & 7 \\ 0 & 2 & 4 \end{bmatrix} \xrightarrow{R3 \rightarrow R3 - (2/3)R2} \begin{bmatrix} 4 & 1 & 5 \\ 0 & 3 & 7 \\ 0 & 0 & -2/3 \end{bmatrix}$$

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad U = \begin{bmatrix} 4 & 1 & 5 \\ 0 & 3 & 7 \\ 0 & 0 & -2/3 \end{bmatrix} \quad L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2/3 & 1 \end{bmatrix}$$

Si la matriz A ($m*n$) es no cuadrada, se deben plantear sistemas de ecuaciones que permitan su solución. Una matriz no cuadrada ($m*n$) puede ser factorizada en una matriz triangular superior ($m*m$) con unos en la mitad y otra matriz triangular superior ($m*n$) cuya primera fila corresponda a la primera fila de A. De la relación entre las incógnitas y el producto esperado se pueden inferir los números correspondientes a las matrices.

$$A = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ -1 & 4 \\ 6 & 0 \end{bmatrix} \quad L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ a & 1 & 0 \\ b & c & 1 \end{bmatrix} \quad U = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 0 & d \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$2a = -1 \rightarrow a = -\frac{1}{2}$$

$$a + d + 0 = 4 \rightarrow d = 4 + \frac{1}{2} = \frac{9}{2}$$

$$2b = 6 \rightarrow b = 3$$

$$b + c * d + 0 = 0 \rightarrow c = -\frac{b}{d} = -\frac{\left(\frac{3}{1}\right)}{\left(\frac{9}{2}\right)} = -\frac{6}{9} = -\frac{2}{3}$$

$$\begin{array}{ccc}
 \mathbf{A} = & \begin{array}{cc} 2 & 1 \\ -1 & 4 \\ 6 & 0 \end{array} & \mathbf{L} = & \begin{array}{ccc} 1 & 0 & 0 \\ -1/2 & 1 & 0 \\ 3 & -2/3 & 1 \end{array} & \mathbf{U} = & \begin{array}{cc} 2 & 1 \\ 0 & 9/2 \\ 0 & 0 \end{array}
 \end{array}$$

Para resolver el sistema es importante plantear dos sistemas de ecuaciones. Sea $Ax=b$ entonces $Ly=b$. Una vez se halla “y” se procede a determinar los valores de “x”, $Ux=y$ (Grossman, 2008).

3.2.3 Descomposición de Cholesky

Las matrices simétricas son aquéllas para las cuales se cumple $a_{ij}=a_{ji}$ es decir $[A] = [A]^t$ (Chapra & Canale, 2007). Éstas presentan grandes ventajas ya que requieren la mitad de espacio de almacenamiento y de tiempo de resolución (Chapra & Canale, 2007). La descomposición de Cholesky permite expresar una matriz como el producto de una matriz triangular inferior y su transpuesta. Las ecuaciones son presentadas a continuación.

$$\begin{aligned}
 [A] &= [L][L]^T \\
 l_{ki} &= (a_{ki} - \sum_{j=1}^{i-1} l_{ij} l_{kj}) / (l_{ii}) \text{ para } i = 1, 2, \dots, k - 1
 \end{aligned}$$

Ecuación 18 Ecuación de Cholesky (Chapra & Canale, 2007).

$$l_{kk} = \sqrt{a_{kk} - \sum_{j=1}^{k-1} (l_{kj})^2}$$

Ecuación 19 Ecuación de Cholesky (Chapra & Canale, 2007).

A continuación se desarrolla la descomposición de Cholesky en una matriz, con base los pasos propuestos en la literatura (Chapra & Canale, 2007).

$$A = \begin{matrix} & \mathbf{10.00} & \mathbf{20.00} & \mathbf{67.00} \\ & \mathbf{20.00} & \mathbf{67.00} & \mathbf{245.00} \\ & \mathbf{67.00} & \mathbf{245.00} & \mathbf{979.00} \end{matrix}$$

$$L_{11} = a_{11}^{\frac{1}{2}} = (10.00)^{\frac{1}{2}} = 3.16$$

$$L_{21} = \frac{a_{21}}{L_{11}} = \frac{20.00}{3.16} = 6.32$$

$$L_{22} = (a_{22} - L_{21}^2)^{\frac{1}{2}} = (67.00 - 6.32^2)^{\frac{1}{2}} = 5.20$$

$$L_{31} = \frac{a_{31}}{L_{11}} = \frac{67.00}{3.16} = 21.19$$

$$L_{32} = \frac{a_{32} - L_{21} * L_{31}}{L_{22}} = \frac{245.00 - 6.32 * 21.19}{5.20} = 21.36$$

$$L_{33} = (a_{33} - L_{31}^2 * L_{32}^2)^{\frac{1}{2}} = (979.00 - 21.19^2 * 21.36^2)^{\frac{1}{2}} = 8.59$$

3.16	0.00	0.00
6.32	5.20	0.00
21.19	21.36	8.59

3.16	6.32	21.19
0.00	5.20	21.36
0.00	0.00	8.59

=

10.00	20.00	67.00
20.00	67.00	245.00
67.00	245.00	979.00

3.3 Modelo Hidráulico

Este proyecto de grado retomó el modelo calibrado y validado de la red elevada (Prieto Gamboa, 2011), cuyo autor es César Mauricio Prieto Gamboa. Éste está disponible en REDES y EPANET, los dos *software*s explicados anteriormente. Su realización se basó en el Escenario 5 Inicial. Puesto que se llevaron a cabo levantamientos topológicos y

topográficos, se contaba con las longitudes de los segmentos y sus coordenadas. La información relativa a diámetros, rugosidades, tipo de fluido, altura inicial disponible y demanda de nodos de extracción de caudal, también estaba disponible.

El análisis de sensibilidad de la rugosidad absoluta demostró que variaciones de 1000ks comparadas con 100ks, 10ks, 1ks y 0.1ks no tenían efectos en la presión de entrada (presión A); poseían una ligera influencia sobre la presión B (menos de 0.2 m.c.a) y sobre la presión H (menos de 0.2m.c.a) (Prieto Gamboa, 2011). Esto explica los motivos por los cuales las rugosidades absolutas no fueron consideradas como una variable relevante para ser calibrada en el modelo.

La variable comparativa de calibración fue la presión debido a la alta complejidad del sistema, a las condiciones de campo y objetivos del estudio; dentro de las variables analizadas de la red se incluyeron: asignación de demandas, diámetros reales y coeficientes de pérdidas menores, éstas últimas la incógnita del proceso.

3.3.1 Energía de Entrada

La energía de entrada, o energía inicial corresponde a la altura registrada en el primer sensor de presión antes de que se ramifique la red. Se debe considerar que el modelo inicia en este punto (presión A) y además, se dispone de mediciones en condiciones aproximadamente constantes. El valor que se introduce en el elemento embalse de los diferentes programas es el promedio de los datos recogidos en campo, previa verificación de una dispersión adecuada de datos.

3.3.2 Demandas en Nudos de Extracción de Caudal

Las demandas en los nudos de extracción de caudal cuentan con poca incertidumbre debido a que fueron medidas directamente para cada uno de los escenarios en condiciones hidráulicas aproximadamente estables. Los valores son insertados en los puntos del modelo que los representan. Como se mencionó en la sección dedicada a la medición de demandas, se utilizaron los métodos de recolección de datos de estudios previos para hacer las medidas comparables; adicionalmente, se presentaron indicadores estadísticos que permitieran juzgar la precisión como satisfactoria.

3.3.3 Diámetros Reales

El diámetro en algunos casos es aproximado a los valores reportados por el distribuidor. Esta suposición es inexacta, debido a que los diámetros reales son los que tienen una influencia relevante en las condiciones hidráulicas y sus variaciones. Para cada diámetro comercial se tomó el valor del diámetro real: 4" comprende el rango de diámetros de 101.6mm a 103.42, 3" se relaciona con el rango que va de 76.2mm a 80.42 y 2" abarca de 50.8mm a 54.58mm (Prieto Gamboa, 2011).

3.3.4 Coeficientes de Pérdidas Menores

La red elevada se caracteriza por tener tuberías cortas y una enorme cantidad de accesorios (Prieto Gamboa, 2011) lo cual hizo relevante las pérdidas menores en el proceso de calibración, al punto de ser la variable calibrada para cumplir con una buena representación de los escenarios analizados. Para calificar la representatividad del modelo se utilizaron 2 indicadores de bondad de ajuste: el coeficiente de determinación y el error cuadrático medio aplicados a los promedios de las presiones.

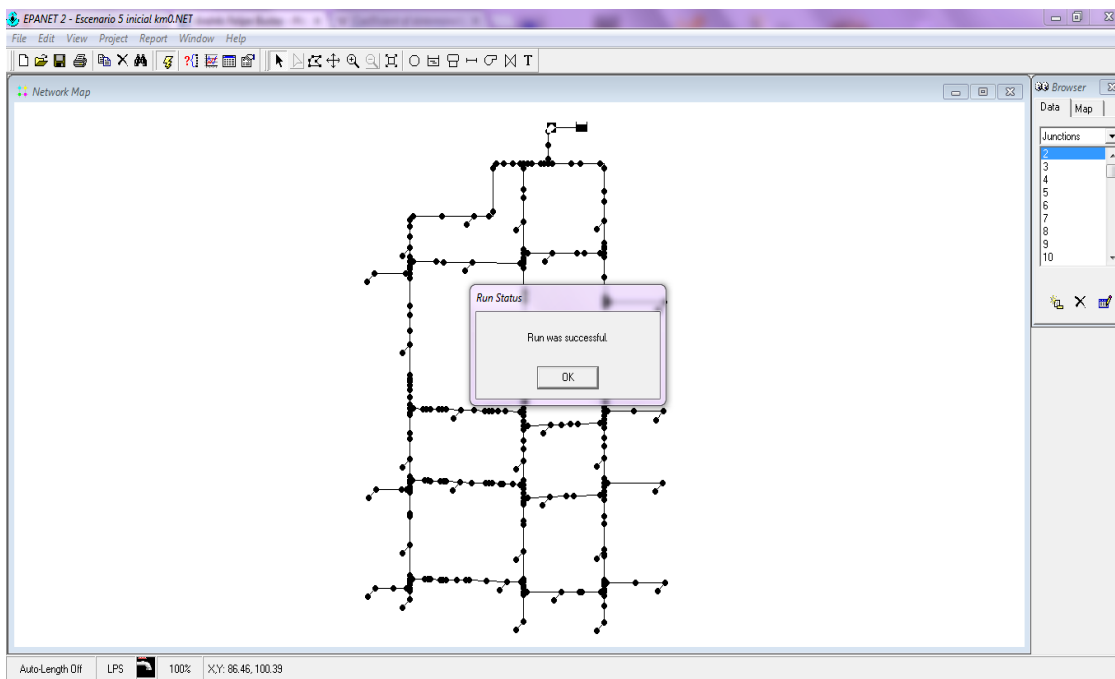


Ilustración 18 Modelo Computacional Epanet.

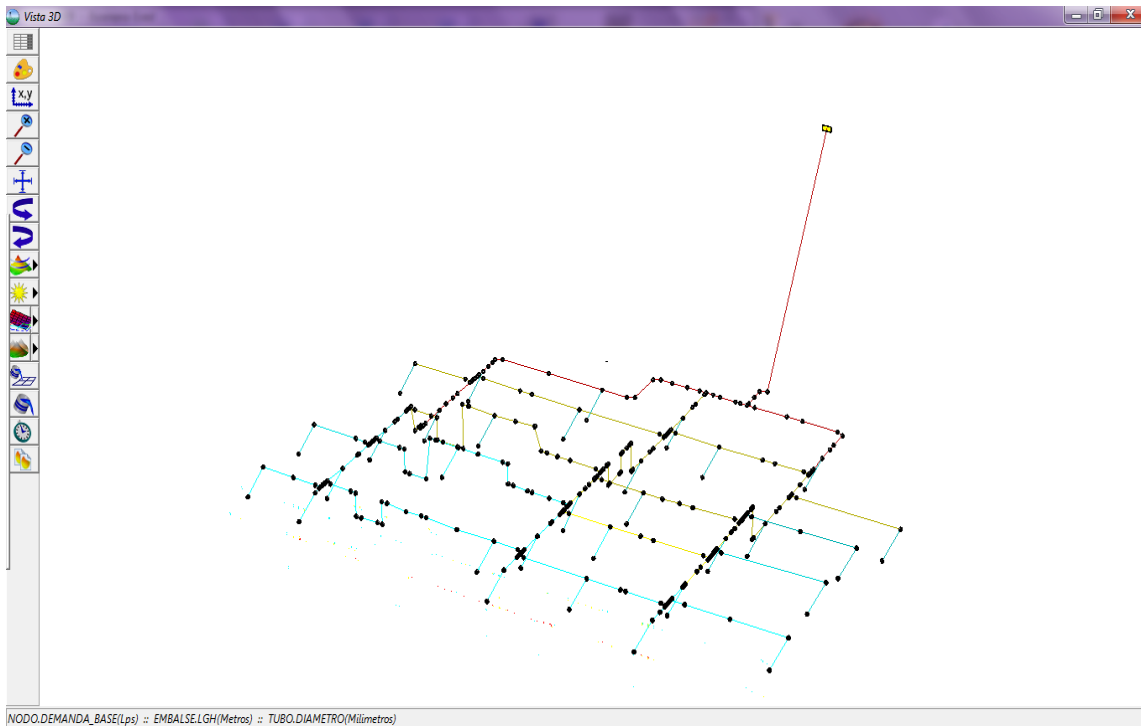


Ilustración 19 Modelo Computacional Redes (vista 3D).

3.3.5 Representatividad del Modelo

Una vez se posee un modelo que simula una situación de la realidad, se debe formular la pregunta acerca de su fidelidad con respecto a los datos recogidos en campo. Dentro de la literatura existe amplia diversidad de indicadores; sin embargo en este proyecto de grado se seleccionaron el coeficiente de determinación (identificado con la notación r^2) y el error cuadrático medio.

3.3.6 Coeficiente de Determinación

El coeficiente de determinación es la proporción de variación de un parámetro medido en campo con respecto a un modelo. Es decir, indica qué tan adecuadamente se representa la variabilidad medida con respecto a la modelada. Sus valores oscilan entre 0 y 1: 0 indica que no hay representatividad y 1 que hay una excelente representatividad de la variación. Retoma los conceptos de suma de cuadrados del error y suma total de cuadrados.

$$R^2 = 1 - \left(\frac{SSE}{SST} \right)$$

Ecuación 20 Coeficiente de Determinación (Devore, 2005).

La suma de cuadrados del error o del residuo, relaciona los datos medidos y los datos obtenidos en el proceso de simulación. Es útil utilizar el cuadrado de éstos, debido a que una dispersión positiva o negativa podría alterar el estimativo. La SSE o suma de cuadrados del error consiste en restar por cada uno de los valores tomados en campo, el valor de la predicción modelada. Esta diferencia se eleva al cuadrado y se realiza una suma con todos los datos reales disponibles. Finalmente se divide por el número de valores.

$$SSE = \frac{\sum (y_i - \hat{y})^2}{n}$$

Ecuación 21 Suma de Cuadrados del Error (Devore, 2005).

La suma total de cuadrados es una suma cuantitativa de la cantidad total de variación de los valores observados: corresponde a la suma de desviaciones cuadradas con respecto a la media de la muestra observada en campo (Devore, 2005).

$$SST = \sum (y_i - \bar{y})^2$$

Ecuación 22 Suma Total de Cuadrados (Devore, 2005).

Para el cálculo de los indicadores de bondad se utilizaron los promedios de las presiones en cada uno de los puntos y fueron comparados con las que reportó el modelo de Epanet y Redes para cada uno de los escenarios. Para garantizar que no hubiera variaciones, se construyeron los escenarios en la red elevada y se concedieron quince minutos para que las condiciones hidráulicas se mantuvieran relativamente constantes. Se tomaron los datos durante diez minutos y con base en éstos se calcularon los indicadores.

3.3.7 Error Cuadrático Medio

El coeficiente de determinación permite al analista concluir acerca de la variación del modelo con respecto a la dispersión de los datos. El error cuadrático medio, como su definición lo indica, es un promedio del cuadrado del error; esto significa que de acuerdo con su magnitud se puede inferir cuánto se puede esperar que un valor varíe con respecto

a una predicción de un modelo. Se debe resaltar que este indicador es siempre positivo por lo cual la magnitud de la variación aplica para valores positivos y negativos.

$$RMS = \sqrt{\left(\left(\frac{1}{n} \right) * \sum_{i=1}^n (modeladoi - observadoi) \right)^2}$$

3.3.8 Indicadores de Representatividad

Los escenarios fueron construidos y a cada uno de ellos se le dieron más de 15 minutos inicialmente para que las condiciones hidráulicas estuvieran relativamente constantes. Posteriormente, se tomaron datos durante 10 minutos y con base en los promedios de presión se reportaron los indicadores explicados anteriormente. La tabla precedente contiene los valores de los coeficientes de correlación y de los errores cuadráticos medios para cada uno de los escenarios.

Indicadores Estadísticos		
[M.C.A]	R2	R.M.S
Escenario 5 Inicial	0.96	0.11
Escenario 5 Final	0.96	0.11
Escenario 6 Inicial	0.97	0.07
Escenario 6 Final	0.94	0.08

Tabla 7 Indicadores Estadísticos.

Los indicadores estadísticos fueron satisfactorios. Si se considera que todos estuvieron por encima de 0.93, se puede concluir que para todos los escenarios sobre los cuales se basaron las mediciones, los datos tenían representada su variabilidad por lo menos en un 90%. El error cuadrático medio presentó valores ligeramente más altos que los reportados por César Prieto. El escenario cuyo coeficiente de correlación era más cercano a 1 fue el 6 Inicial. Por el contrario, el escenario que reportó el menor r^2 fue el 6 Final. Estos resultados eran de esperarse puesto que los escenarios iniciales (5 Inicial y 6 Inicial) habían reportado ajustes satisfactorios en estudios anteriores. El RMS indica que la variabilidad con respecto a la predicción, en promedio no supera los 0.11 m.c.a, lo cual no representa ni siquiera el 3% de la magnitud de algunas de las mediciones.



Se puede afirmar que el modelo computacional planteado en estudios previos se ajusta satisfactoriamente para todos los escenarios de este proyecto de grado.

4 Resultados

4.1 Procedimiento

Inicialmente se cerraron las válvulas y se abrieron los nudos de acuerdo con el escenario que se deseara construir. Se esperaba quince minutos para garantizar que las condiciones hidráulicas fueran relativamente constantes. Los programas computacionales de los sensores de presión y el caudalímetro estaban en sincronía con los relojes de los computadores.

Una vez se hacía la variación se anotaba y reportaba el tiempo exacto en el que sucedía y se permitía en otra ventana de tiempo la estabilización del escenario final.

4.2 Ubicaciones

Los resultados se dividen de acuerdo con las ubicaciones del caudalímetro. Se intentó encontrar lugares de alta variabilidad de caudal; sin embargo existen restricciones importantes relacionadas con la distancia que debe tener el equipo de los diferentes accesorios. No todos los segmentos de la red eran aptos para la medición. Se buscaron espacios donde fuera posible instalar el caudalímetro y apreciar las tendencias en cada uno de los escenarios.

4.2.1 Ubicación 1

El caudalímetro fue instalado en el tubo que conduce el agua a ser descargada en el nodo Q17. En el siguiente esquema (Ilustración 1) puede ser apreciada su localización, representada por un círculo rojo.

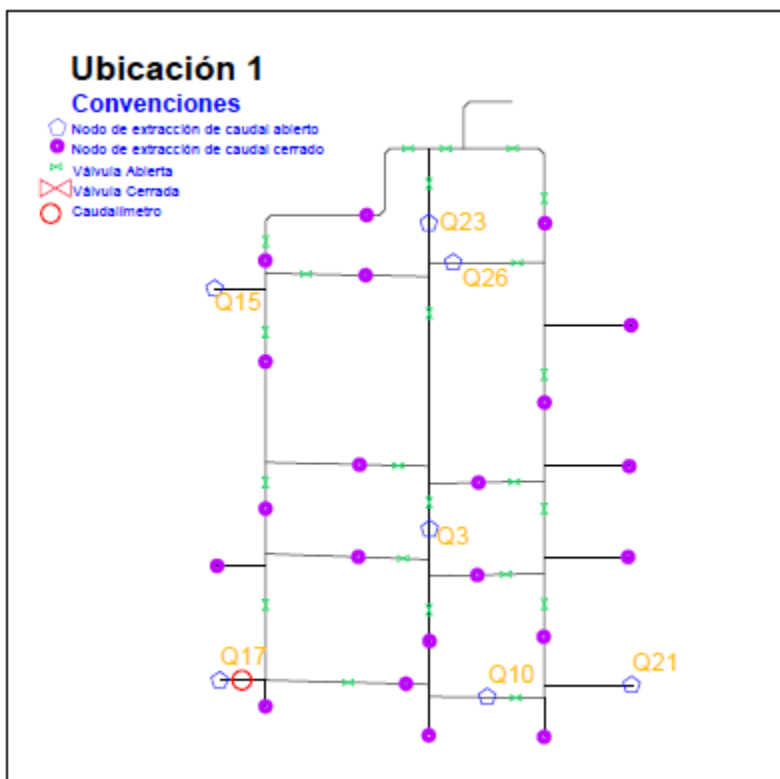
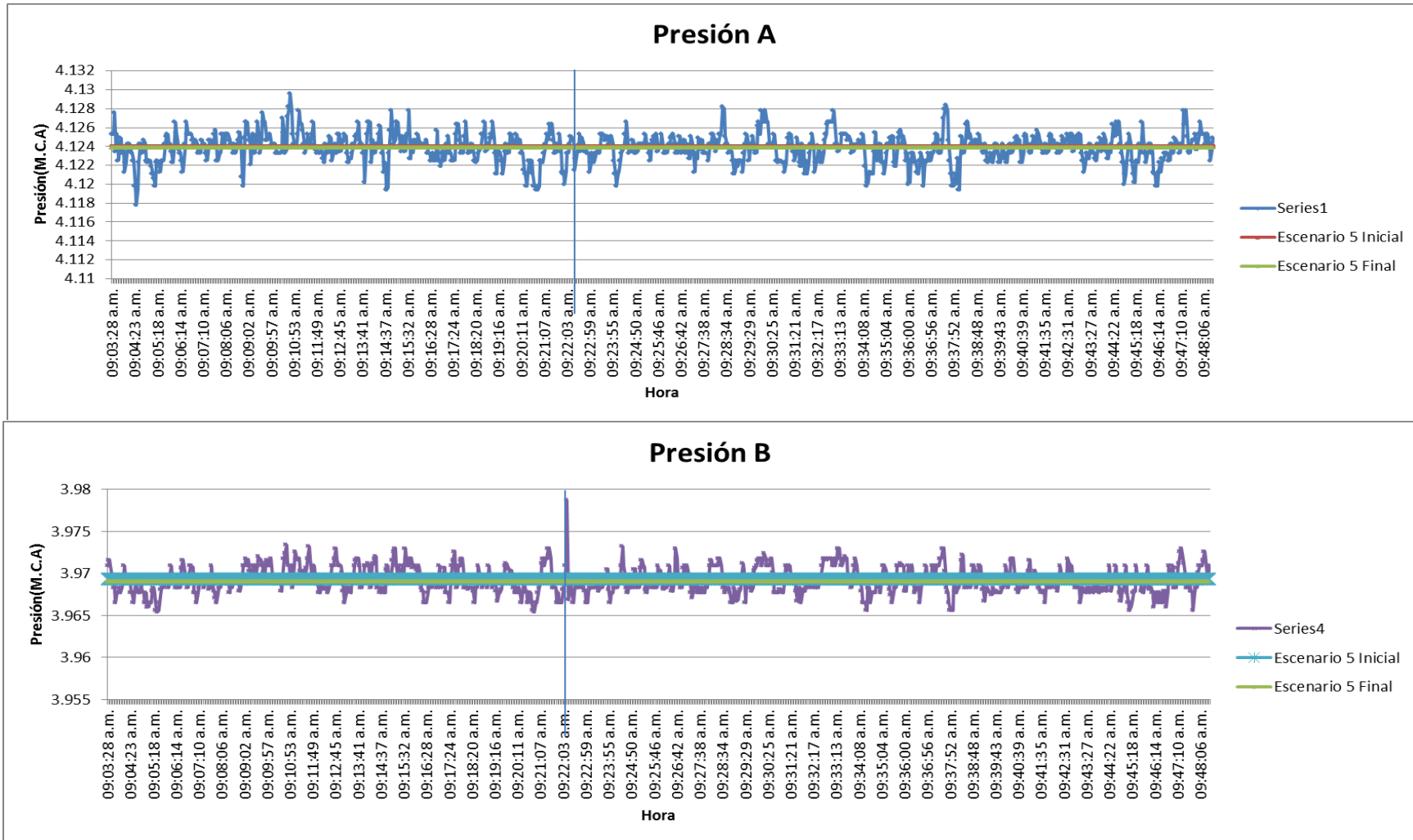
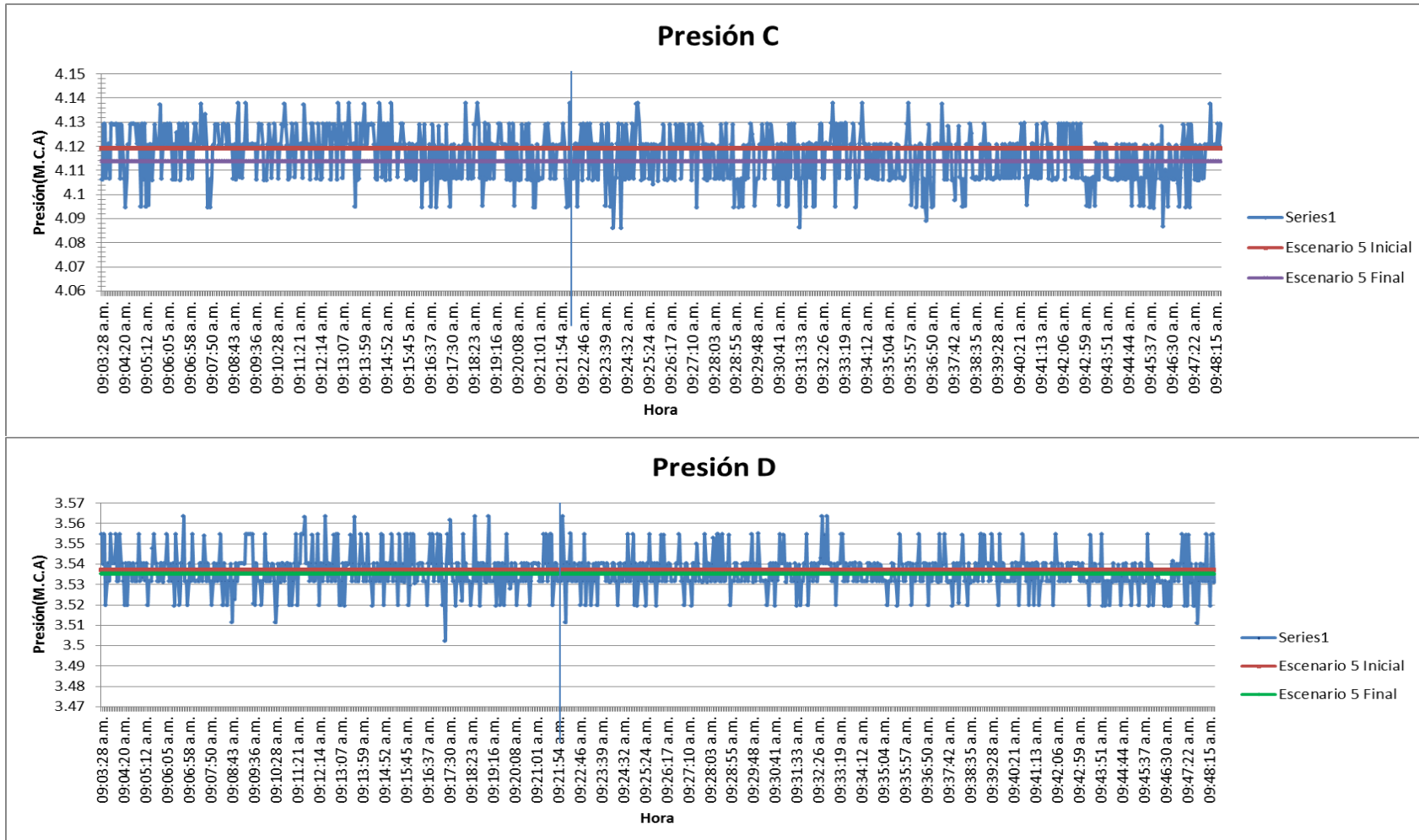


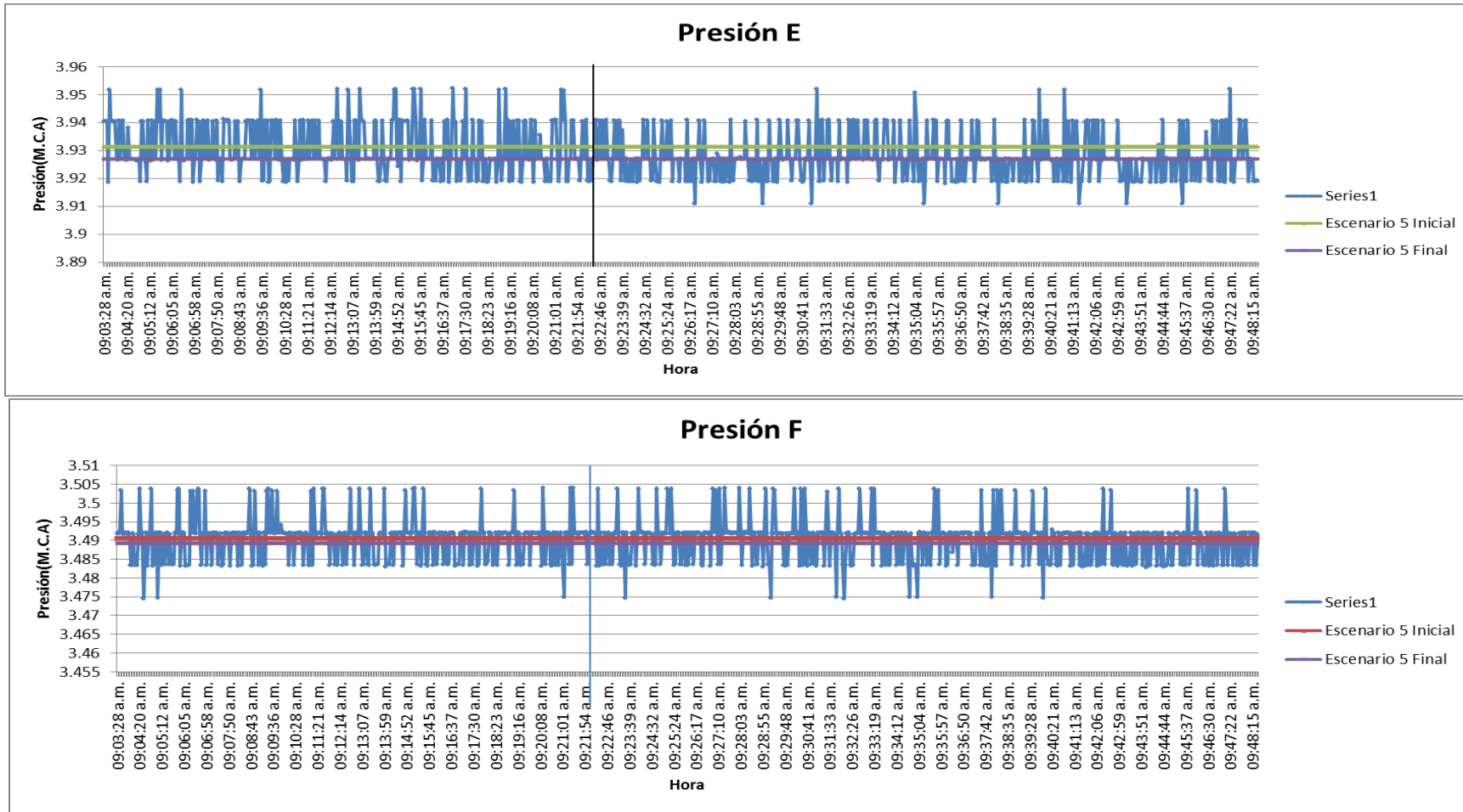
Ilustración 20 Ubicación 1.

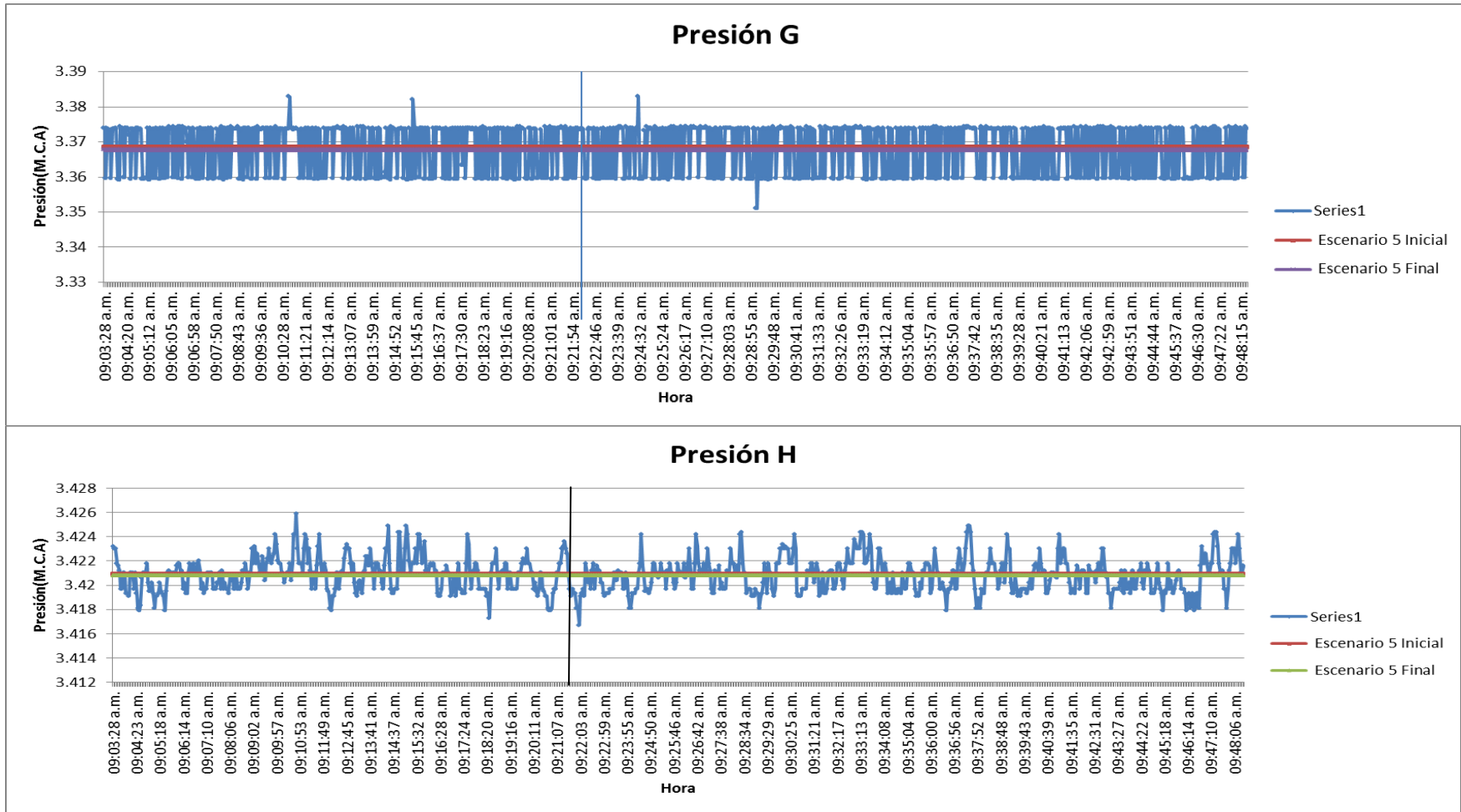
4.2.1.1 Variación del Escenario 5 Inicial al Escenario 5 Final

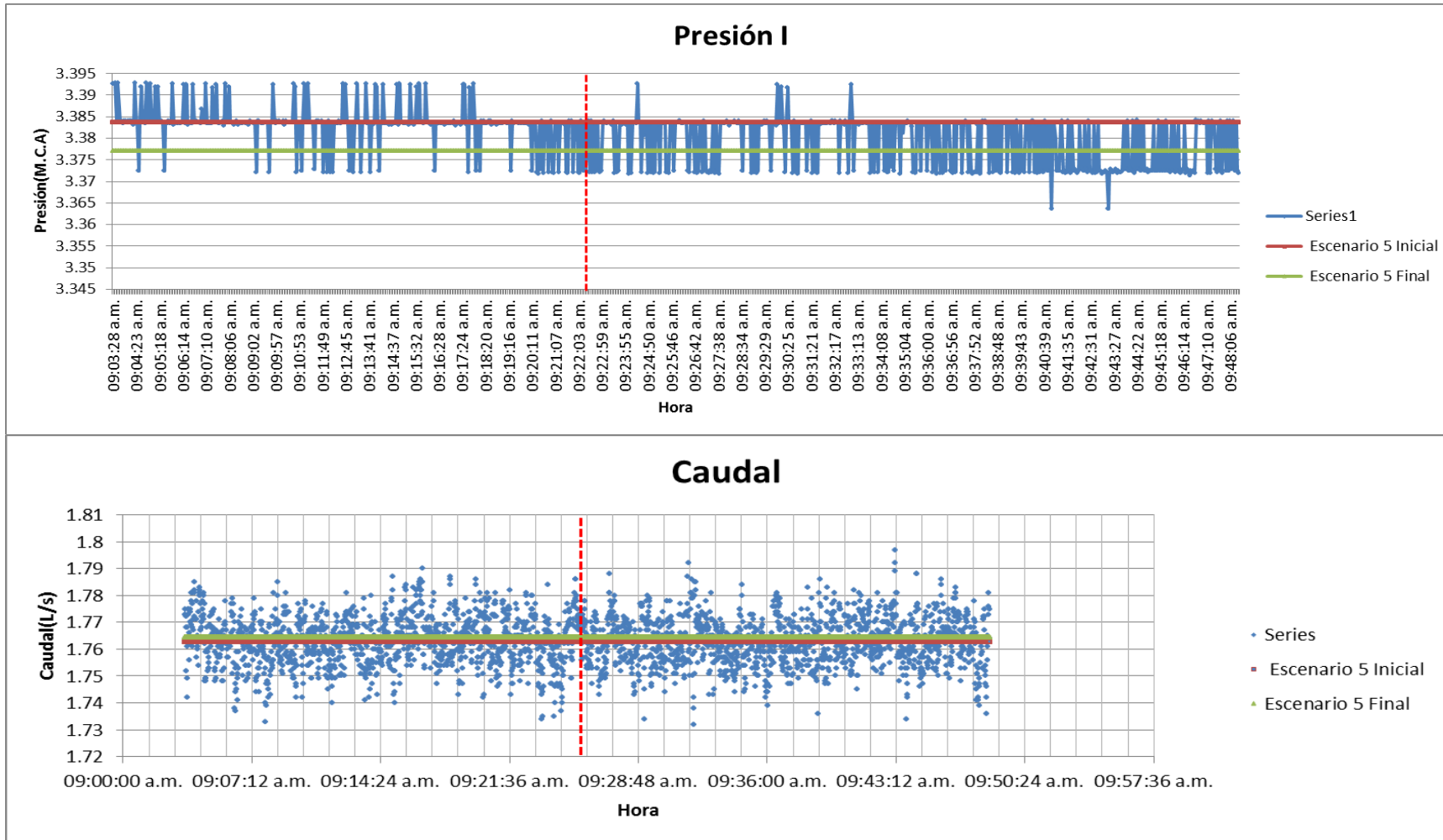
Las mediciones iniciaron a la hora 9:03'28"AM y terminaron a las 9:48'27"AM. El cierre súbito de la válvula se realizó a las 9:22'07". Los gráficos presentan la serie datos, la media del escenario inicial y la media del escenario final, señalizadas con dos asíntotas horizontales. La asíntota vertical representa el momento del cierre súbito de la válvula para generar la transición de un escenario a otro.











4.2.1.1.1 Descripción de Resultados

Se puede apreciar que entre la media del escenario inicial y la media del escenario final la diferencia es poca (del orden de milímetros); esto se puede contemplar entre las asíntotas horizontales de los gráficos. Una vez se realiza el cierre súbito de la válvula, la dispersión de presiones no presente tendencias anómalas a excepción de la presión B, la cual en sincronía con el evento, alcanza un valor máximo en el tiempo 9:22'12".

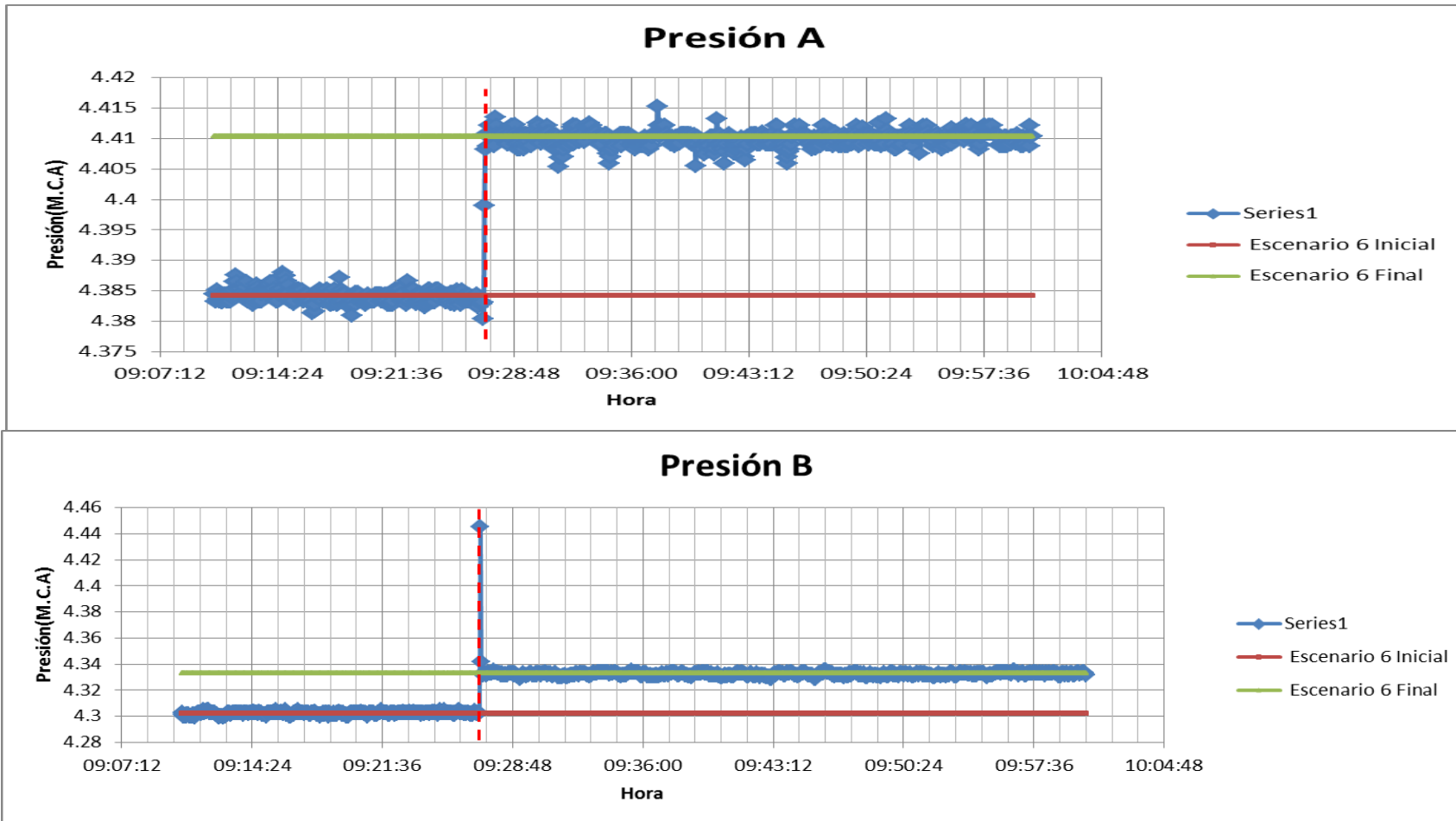
Para los Escenarios 5 Inicial y 5 Final las desviaciones estándares de la presión B son 0.0025 y 0.0022, respectivamente. La diferencia absoluta entre la media del Escenario 5 Final para la presión B y el valor máximo es de 0.0097, lo cual equivale a una variación significativa si se considera que tiene una magnitud mucho mayor a la desviación estándar.

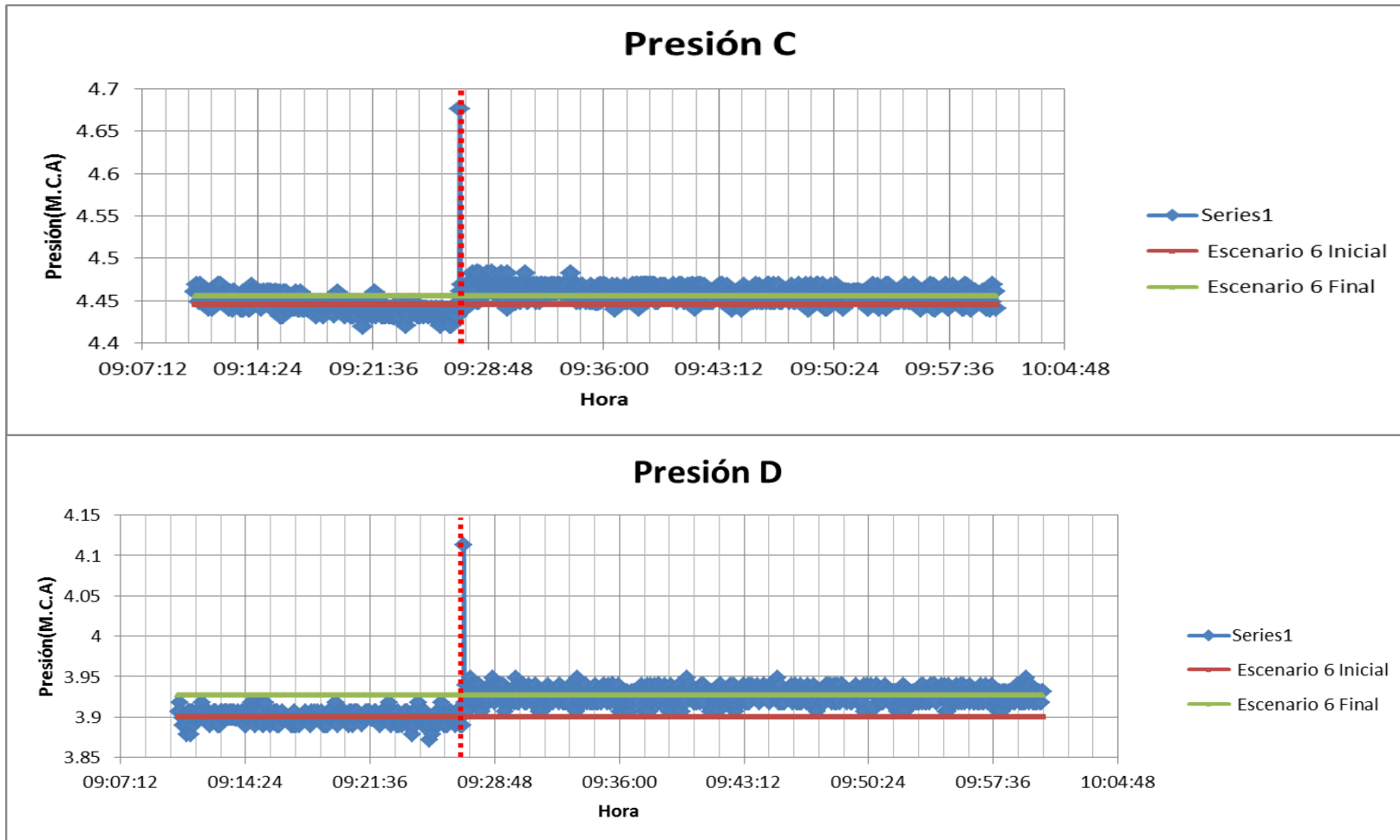
A excepción de la presión B la variación entre las medias del Escenario 5 Final y el Escenario 5 Inicial se encuentran dentro del rango de la varianza, lo cual dificulta ver tendencias significativas posteriores al evento súbito de cambio de escenario.

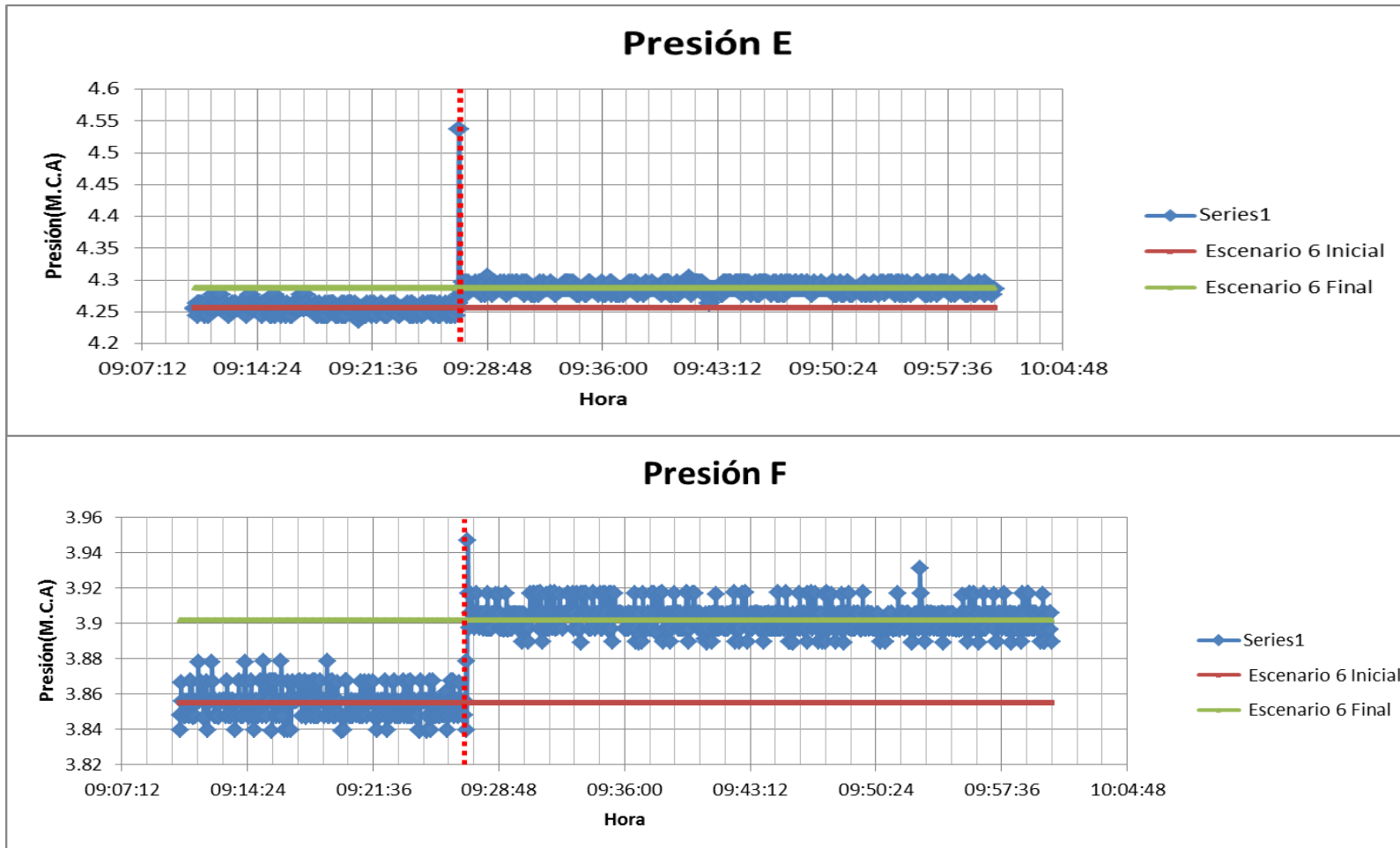
Los datos tienden a centrarse en la media correspondiente a los escenarios estáticos. En un principio, los valores de presión se dispersan en un rango alrededor del Escenario Inicial en estado estable. Una vez se realiza el cierre de la válvula, el rango se centra en la media del Escenario final.

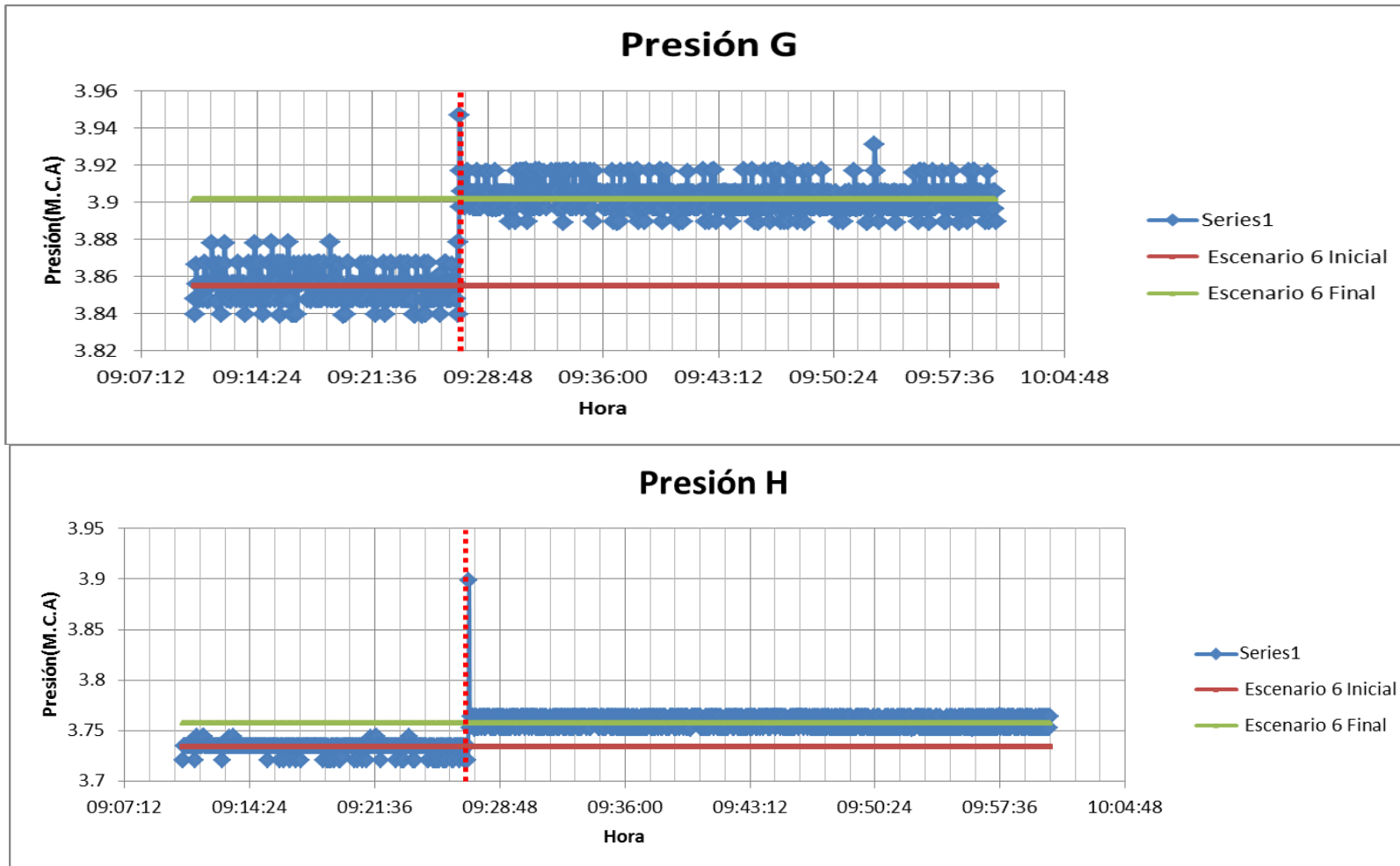
4.2.1.2 Variación del Escenario 6 Inicial al Escenario 6 Final

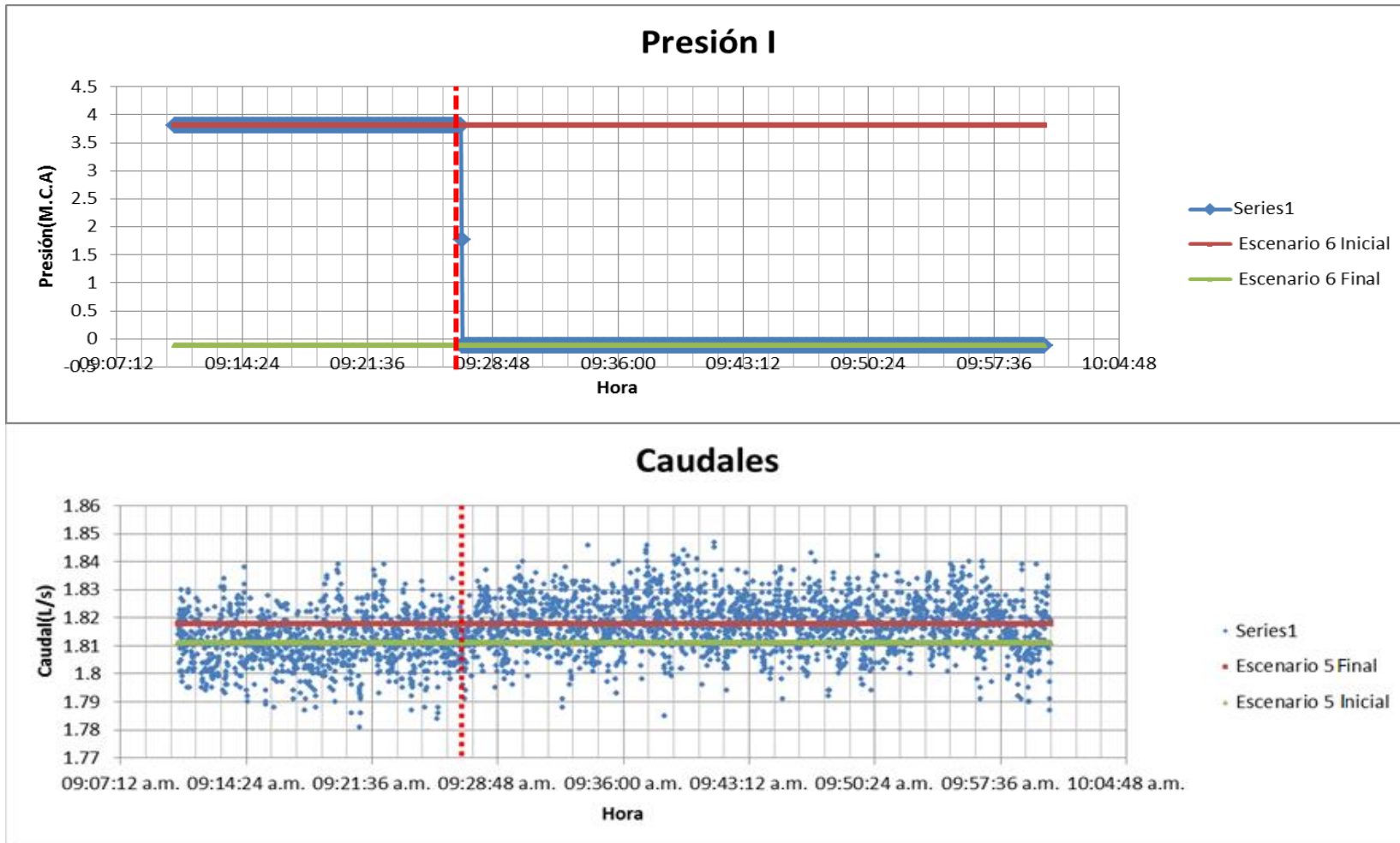
A continuación se presentan los datos de la variación del Escenario 6 Inicial al Escenario 6 Final. Las mediciones iniciaron a las 9:10'31" AM y terminaron a las 10:00'30"AM. El caudalímetro estaba localizado en la Ubicación 1, descrita anteriormente. El cierre súbito de la válvula se hizo a las 9:26'57". Las características relacionadas con representación de datos, promedios y hora de variación se mantienen en las gráficas expuestas.











4.2.1.2.1 Descripción de Resultados

A diferencia del Escenario 5, el Escenario 6 presenta cambios abruptos en todos los puntos donde se midió presión. En todos los sitios, a excepción de A y B, se aprecian variaciones positivas de presión con desviaciones considerables con respecto a la varianza del Escenario 6 Final. Se considera oportuno analizar los valores máximos y mínimos en relación con el tiempo, con el fin de profundizar en las observaciones obtenidas.

	Valores máximos (M.C.A)	Hora	Tiempo después del cambio súbito(s)
Presión A	4.4153	09:37:37 a.m.	636
Presión B	4.4456	09:27:01 a.m.	3
Presión C	4.6761	09:27:01 a.m.	3
Presión D	4.1131	09:27:01 a.m.	3
Presión E	4.5371	09:27:01 a.m.	3
Presión F	3.9468	09:27:01 a.m.	3
Presión G	3.8982	09:27:01 a.m.	3
Presión H	3.8072	09:26:58 a.m.	1
Presión I	3.8184	09:27:01 a.m.	3

Tabla 8 Tabla Valores Máximos de Presión.

Los valores máximos de presión en su mayoría ocurren en un lapso de tiempo menor o igual a tres segundos con excepción de la presión A (presión de entrada a la red), sin importar la distancia. Es posible afirmar con base en las gráficas que los picos que se obtienen posteriores al cambio súbito entre escenarios, están considerablemente por fuera del rango de variación aleatoria de los datos y en relación temporal con el cierre de la válvula.

En lo relativo al caudal, los promedios no tienen una magnitud considerable por ende no es evidente la variación. Sin embargo, se puede ver un leve cambio antes y después de la variación de la válvula. Inclusive se puede identificar una zona de transición la cual permite que los datos se centren en la media correspondiente a cada escenario. El tiempo aproximado de estabilización para el punto medido es de 6 minutos, cuando los datos se concentran en la tendencia del escenario final.

Aun cuando los datos de presión presentan cambios evidentes durante el cierre súbito e la válvula, es claro que antes de dicho suceso se centran en la media del Escenario Inicial. Una vez se ha configurado el Escenario Final, los datos tienden a centrarse en la media del Escenario estático; esto implica un desplazamiento del rango en el cual se dispersan los datos.

4.2.2 Ubicación 2

El caudalímetro fue localizado en la tubería que alimentaba el nudo de extracción de caudal Q21 y se procedió a hacer las variaciones en los diferentes escenarios.

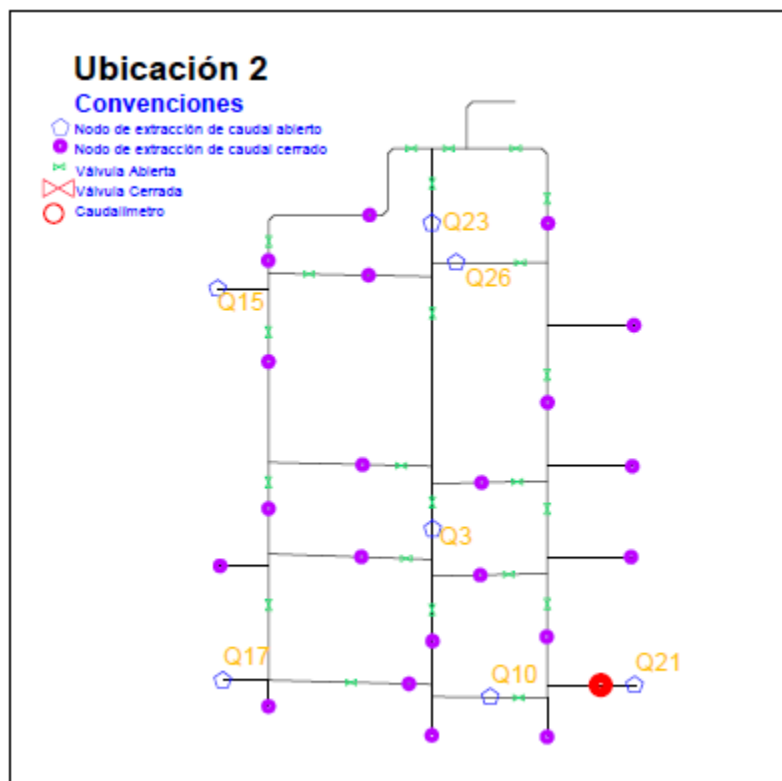
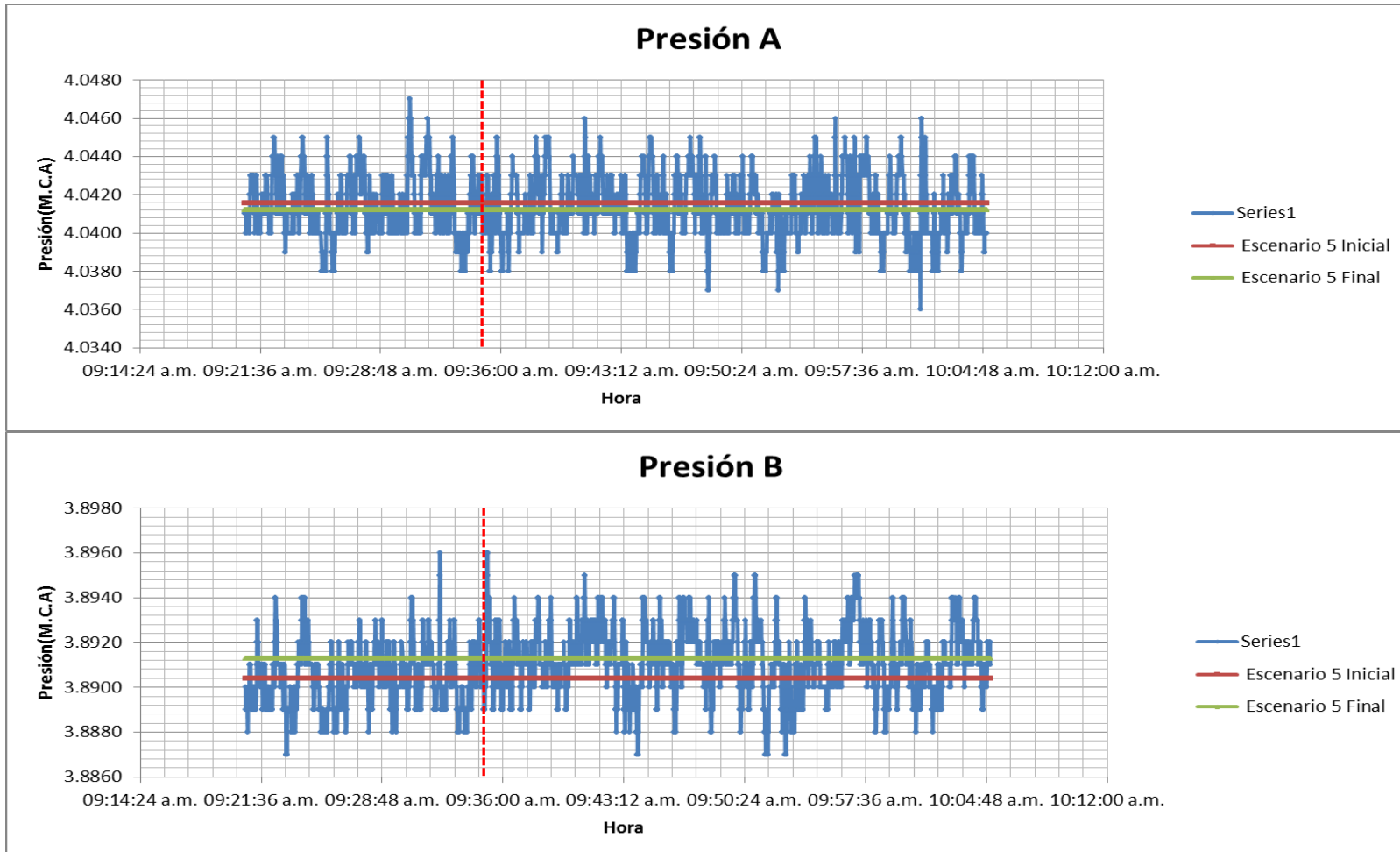
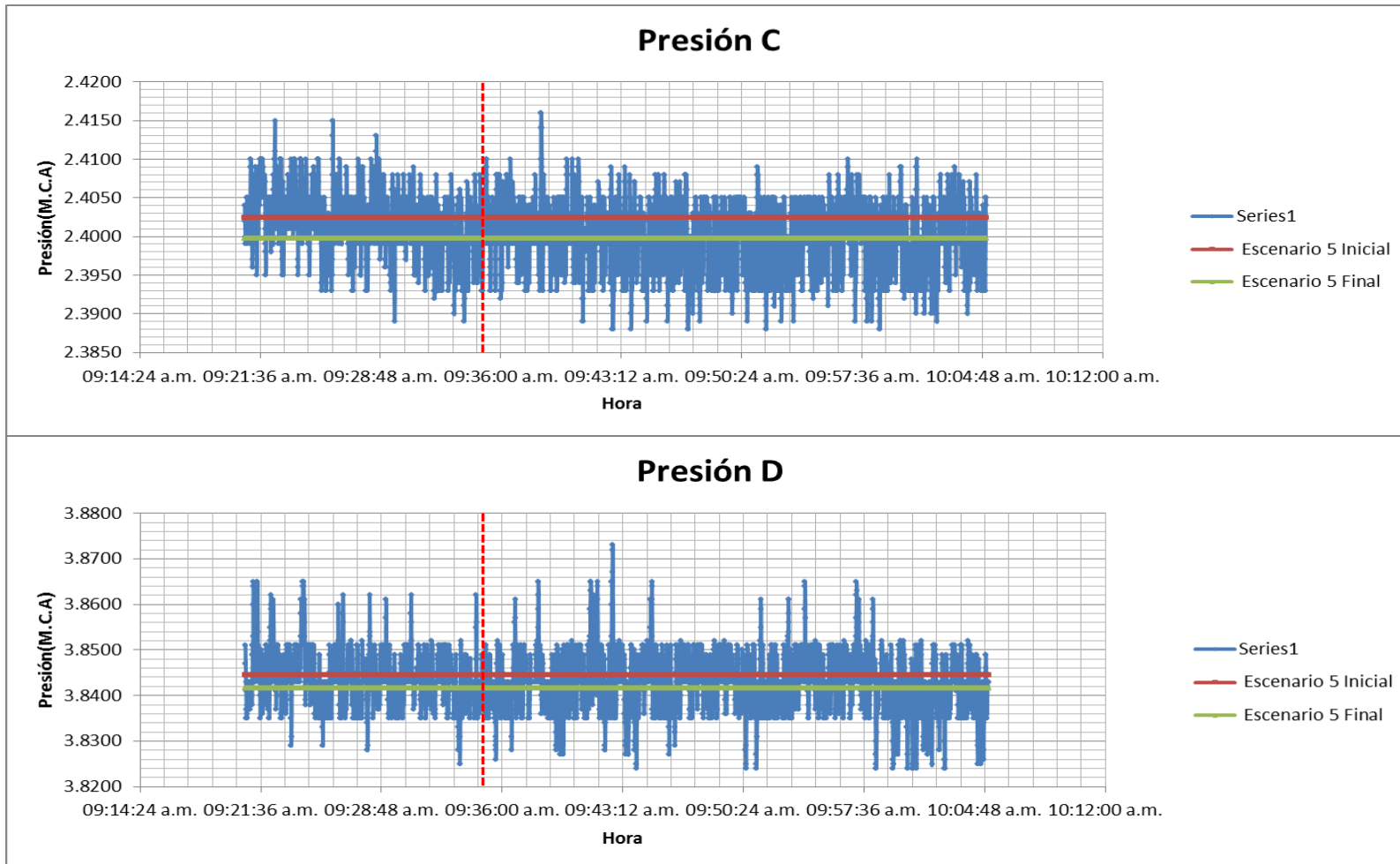


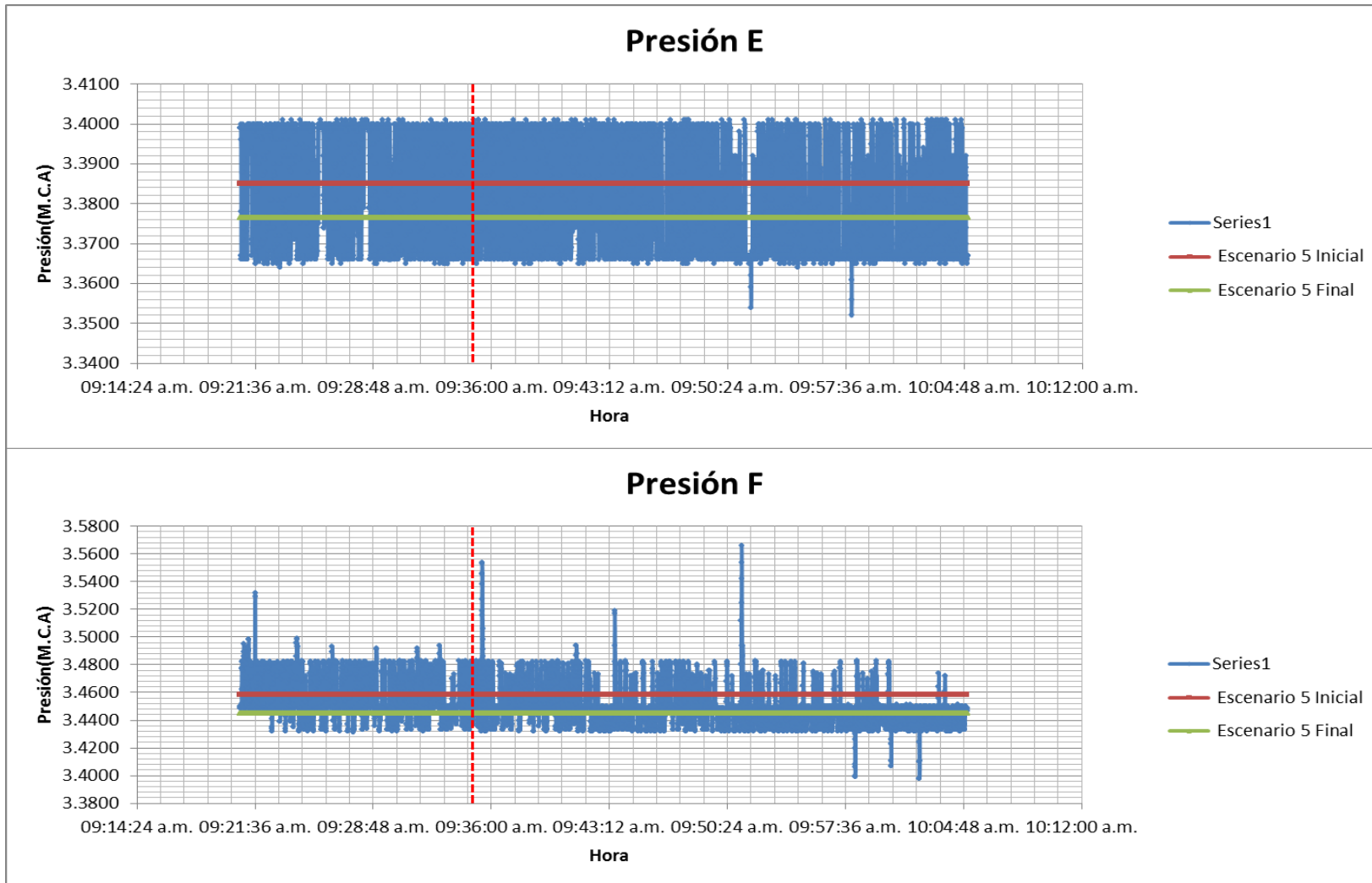
Ilustración 21 Ubicación 2 del Caudalímetro.

4.2.2.1 Variación del Escenario 5 Inicial al Escenario 5 Final

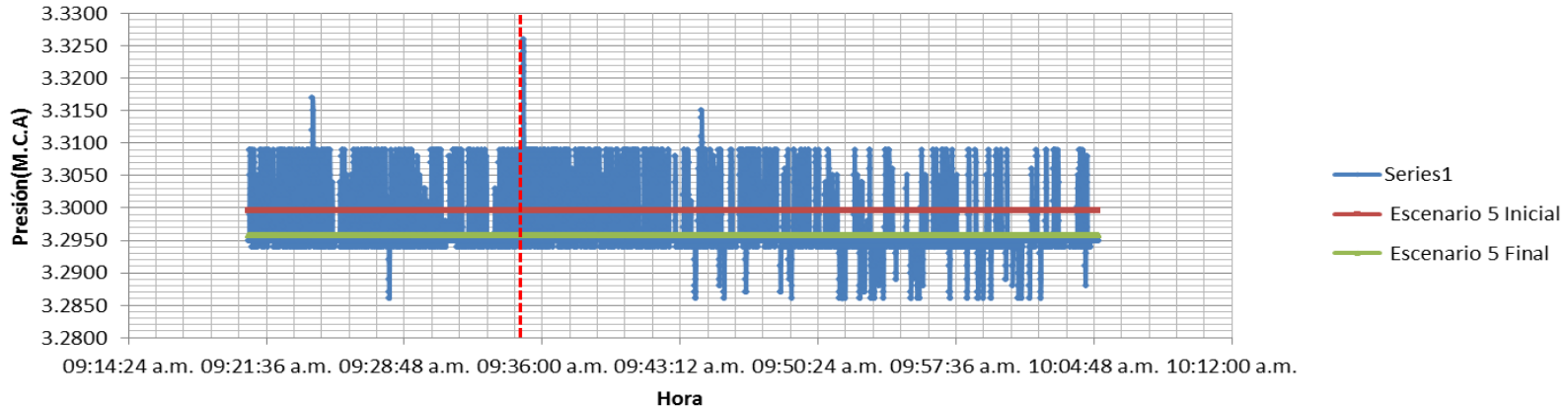
La variación del Escenario 5 Inicial al Escenario 5 Final se realizó a las 9:34'58''29AM, con el cierre de la válvula correspondiente. Los resultados de presión y caudal se presentan a continuación. Los relojes de los diferentes computadores fueron sincronizados al inicio de la medición. Las mediciones iniciaron a las 9:20'41''AM y finalizaron a las 10:05'01'' AM con una duración de 44'14''.



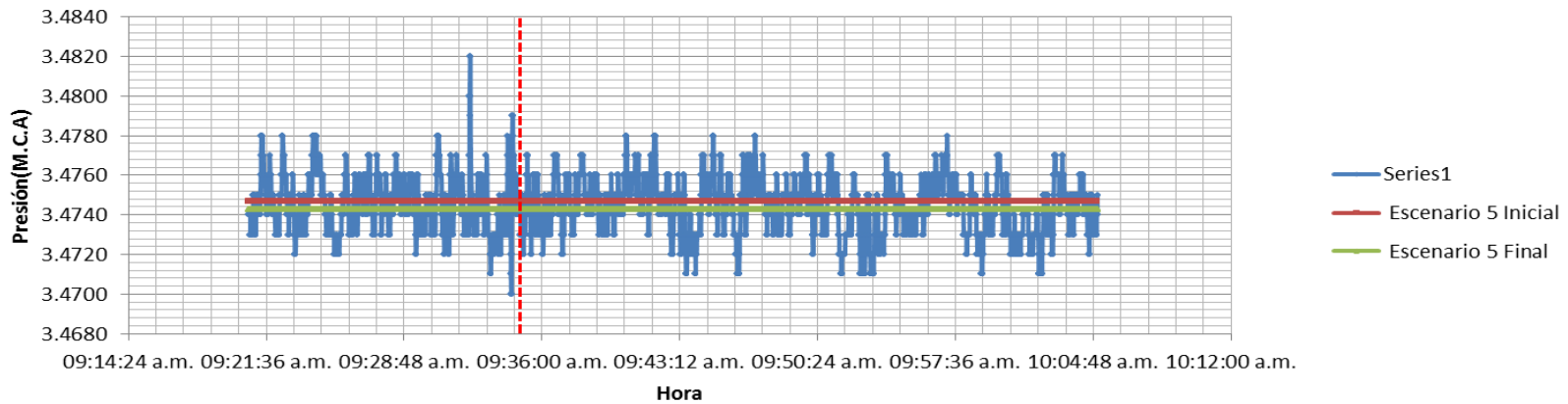


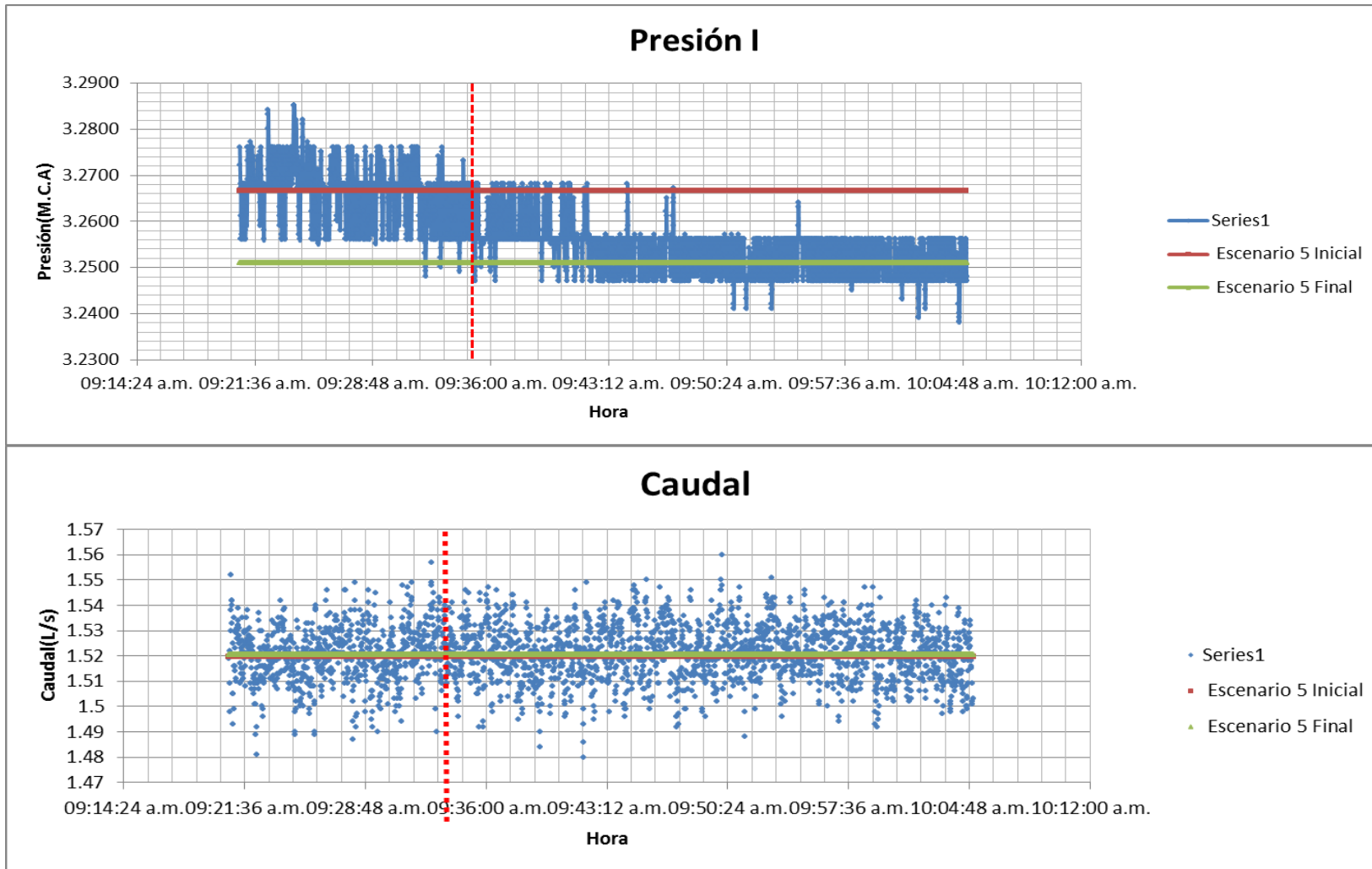


Presión G



Presión H





4.2.2.1.1 Descripción de Resultados

A diferencia de la Ubicación 1, en la Ubicación 2 se pueden apreciar máximos, o tendencias fuera de la desviación aleatoria en respuesta al cierre súbito de la válvula. El perfil de los datos del sensor de presión G se asemeja a las distribuciones de presión a lo largo del tiempo que se evidenciaron en el Escenario 6 en la Ubicación 1. Los datos del sensor de presión B también alcanzan un máximo después del evento de variación, sin embargo su magnitud no permite inferir que se trate de un evento extraordinario si se considera que en lapsos de tiempo previos al cierre de la válvula hubo sucesos similares.

Otra característica de los datos que llama la atención son los valores mínimos: algunos de éstos se desvían considerablemente de la tendencia, inclusive de los rangos de variación que pueden ser apreciados; sin embargo, están distantes temporalmente del cambio súbito del escenario. Por ejemplo, el punto de medición de presiones E reportó dos mínimos considerablemente fuera de la tendencia más de quince minutos después del momento de cambio súbito, algo similar ocurre con el punto de medición de presiones F.

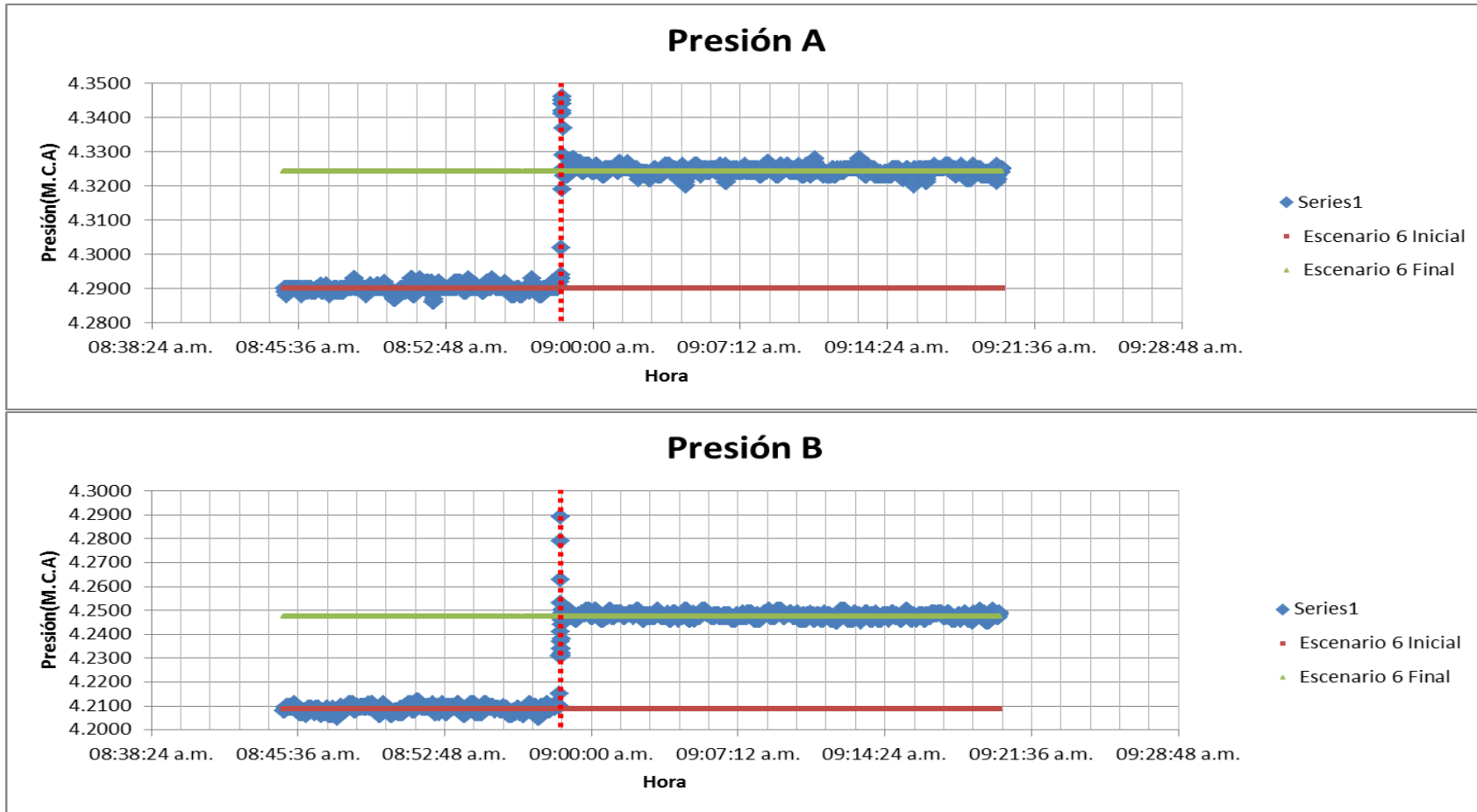
Los datos de presión, a excepción de aquéllos relacionados con los segmentos temporales cercanos al cierre súbito de la válvula, se centran en la media de los Escenarios en estado estático. Si bien existe una dispersión de los registros de presión, éstos en un principio están centrados en el Escenario Inicial. Después del cambio súbito del Escenario Inicial al Escenario Final, se observa una transición que puede durar algunos minutos y finalmente el rango de variación se ubica en el Escenario Final.

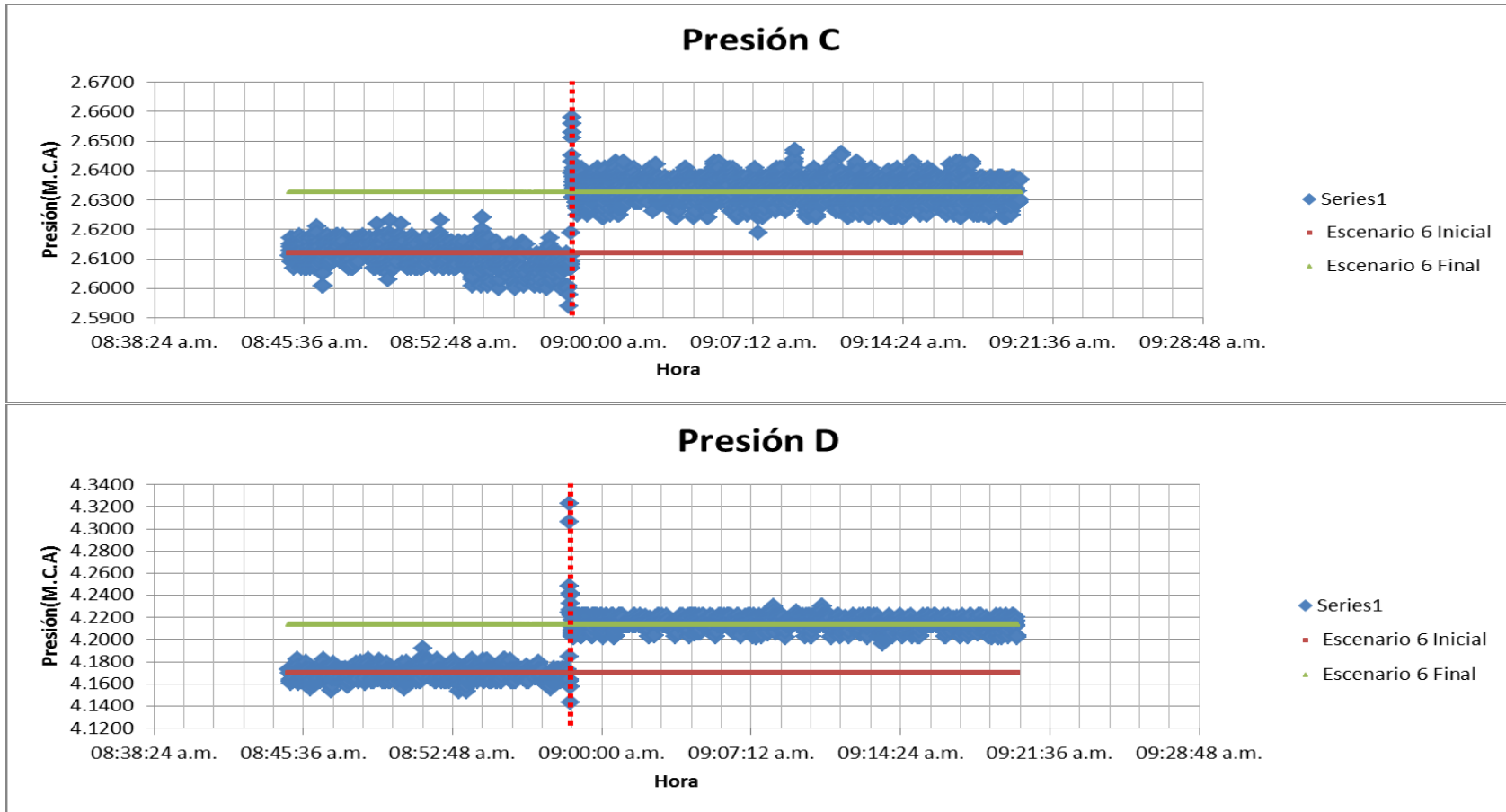
En lo respectivo al punto de medición de caudal, las medias tienen una diferencia bastante pequeña y se encuentran dentro del rango de variación de los datos lo cual dificulta identificar el período de transición y el momento en el cual se alcanza una relativa estabilidad hidráulica. Se puede afirmar que el caudal en el punto de extracción de caudal Q21 en este escenario es menos susceptible a los cambios que fueron propuestos en el presente estudio.

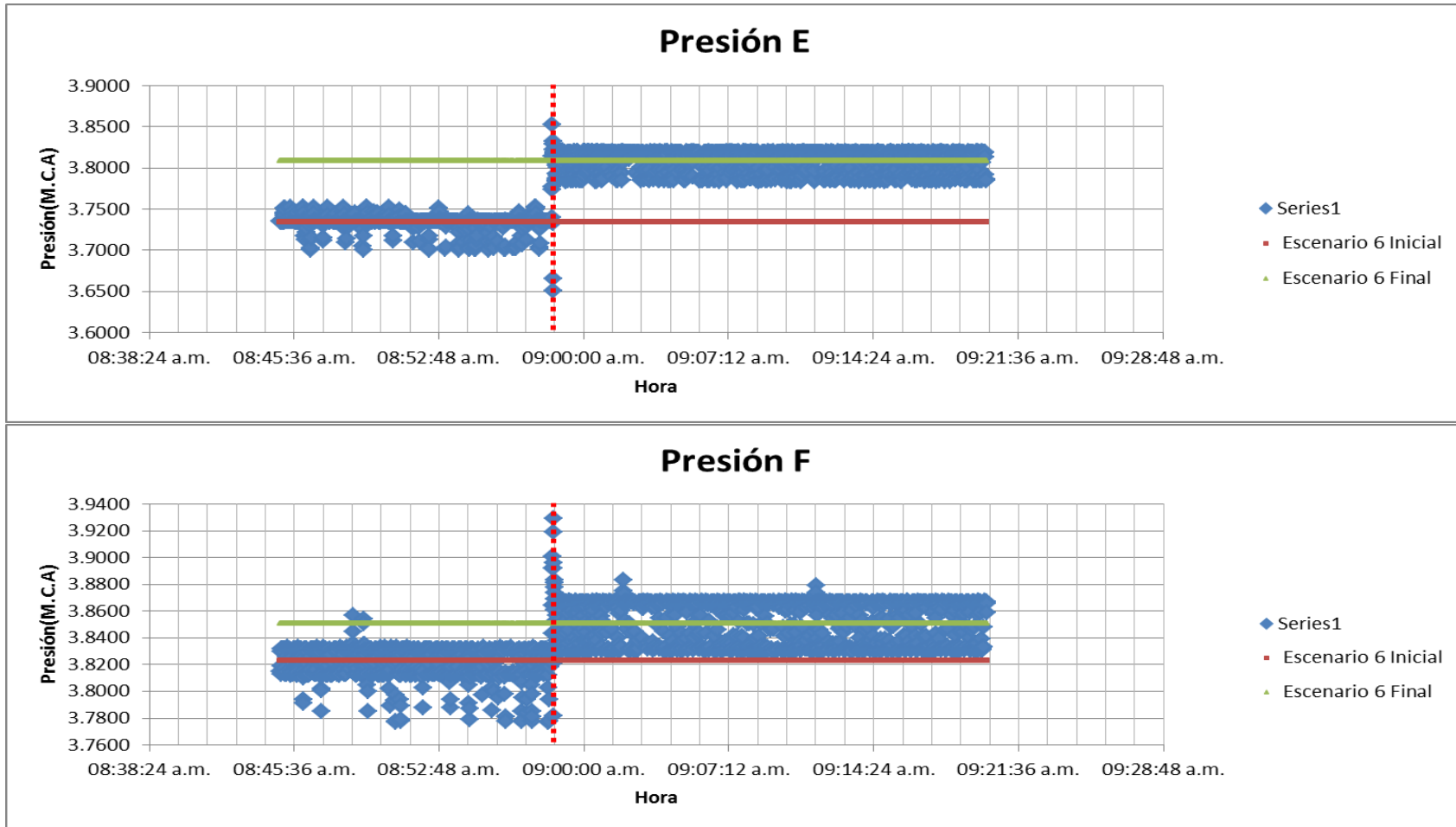
4.2.2.2 Variación del Escenario 6 Inicial al Escenario 6 Final

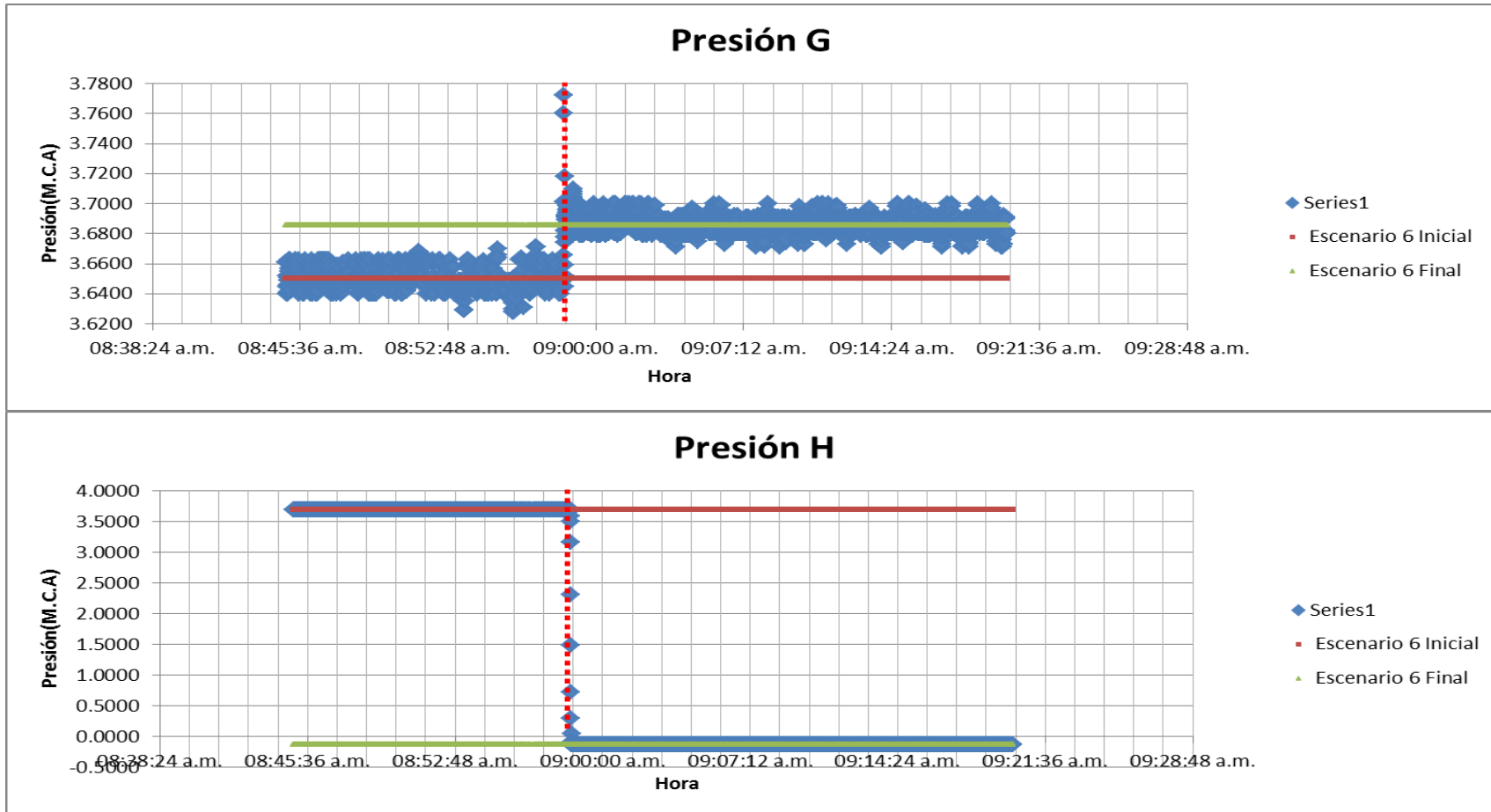


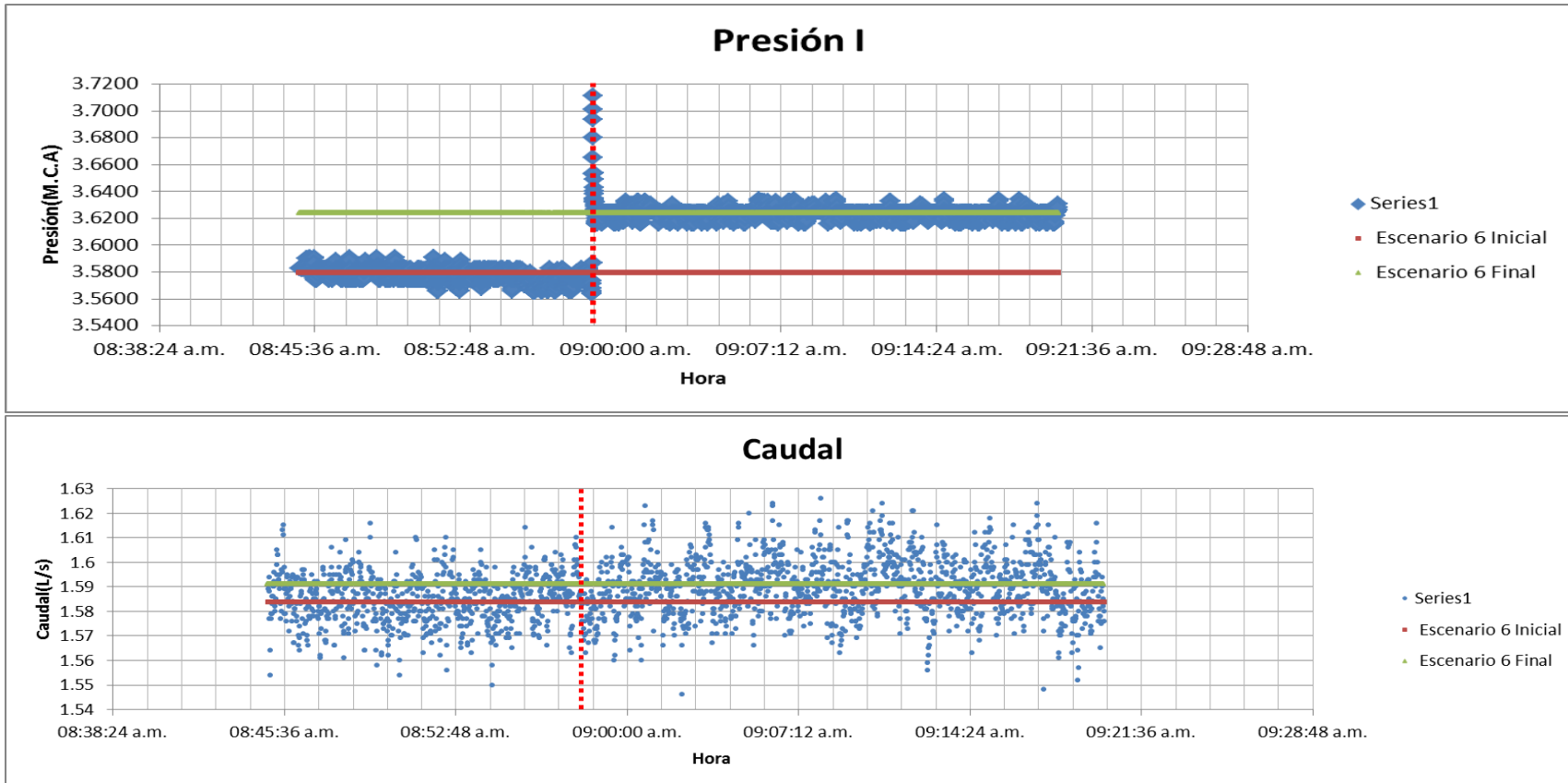
Las mediciones iniciaron a las 8:44'55"AM y terminaron a las 9:20'03"AM. El cierre súbito de la válvula se realizó a las 8:58'24"25 AM. Los programas para la obtención de los datos se encontraban sincronizados con los relojes de los respectivos computadores.











4.2.2.2.1 Descripción de Resultados

Una vez se realizó la variación de la válvula, dado que los datos de presión de los escenarios en estado estático se concentraron en grupos distantes, la diferencia entre el estado inicial y el estado final fue evidente. Justo después del cierre súbito de la válvula en la mayoría de los casos hay aumentos significativos de presión que superan la varianza de los escenarios iniciales y finales. Se considera conveniente analizar los valores máximos y mínimos con el fin de determinar si existe una relación significativa entre el evento de variación y la ocurrencia de los datos extremos.

	Valor Máximo(M.C.A)	Hora	Diferencia absoluta con el tiempo de variación (s)
Presión A	4.346	08:58:28 a.m.	4
Presión B	4.289	08:58:28 a.m.	4
Presión C	2.658	08:58:28 a.m.	4
Presión D	4.323	08:58:27 a.m.	3
Presión E	3.853	08:58:27 a.m.	3
Presión F	3.929	08:58:30 a.m.	6
Presión G	3.772	08:58:28 a.m.	4
Presión H	3.700	08:51:08 a.m.	412
		08:51:28 a.m.	392
		08:51:29 a.m.	391
		08:52:02 a.m.	358
Presión I	3.711	08:58:29 a.m.	5

Tabla 9 Valores Máximos del Escenario 6 Ubicación 2.

La tabla presenta los valores máximos para cada una de las presiones con los momentos en los que éstos ocurrieron. También se puede leer la diferencia “absoluta” con respecto al evento de variación: independientemente si el máximo ocurrió antes o después el valor se reporta positivo. Similar a la tabla anterior, los máximos ocurren de 3, 4, 5 y 6 segundos posteriores al cierre súbito de válvula.

¿Qué hace al punto H singular con respecto a los demás? Éste se localiza en una zona en la cual el flujo es cero después de la variación, lo cual explica por qué tanto en las gráficas como en el análisis de datos sus valores pueden estar por fuera de la tendencia. Sin

embargo, todos los demás sensores reportaron un valor máximo unos segundos después de la variación súbita, lo cual permite interrelacionarlos por lo menos un nivel temporal.

	Valor Mínimo(M.C.A)	Hora	Diferencia absoluta con el tiempo de variación (s)
Presión A	4.29	08:52:10 a.m.	374
		08:52:11 a.m.	373
Presión B	4.21	08:47:30 a.m.	54
		08:47:31 a.m.	53
		08:57:24 a.m.	60
		08:57:25 a.m.	59
		08:57:26 a.m.	58
Presión C	4.14	08:58:19 a.m.	5
Presión D	2.59	08:58:28 a.m.	4
Presión E	3.65	08:58:28 a.m.	4
Presión F	3.65	08:50:37 a.m.	467
		08:58:15 a.m.	9
Presión G	3.78	08:56:00 a.m.	180
Presión H	3.63	1513 registros	1513 registros
Presión I	-0.13	08:58:27 a.m.	3
		08:58:28 a.m.	4

Tabla 10 Valores Mínimos del Escenario 6 Ubicación 2.

En los puntos A, C, F y G los valores mínimos ocurrieron inclusive antes de la variación, con distancias temporales del orden de minutos. En aquellas zonas donde se reportaron dichos mínimos después del cierre de la válvula (D, E e I), tales eventos ocurrieron unos cuantos segundos después de la variación.

El punto H debe ser analizado desde sus condiciones dado que queda desabastecido, el valor mínimo corresponde al valor mínimo del equipo.

Es evidente la presencia de valores extremos de presión asociados al cambio súbito de Escenario; sin embargo, se debe destacar las tendencias antes y después de éste. El rango de dispersión de los datos de presión se ubica en el promedio de los Escenarios estáticos. Inicialmente el rango se encuentra centrado en la media del Escenario Inicial. Una vez ocurre el cambio súbito, se presentan datos extremos en la mayoría de los casos.

Finalmente, tras un período de normalización, el rango de dispersión se centra en la media del Escenario Final.

En el nudo de extracción de caudal Q21, la diferencia entre las tendencias del escenario inicial y final puede verse claramente, lo cual no significa que las medias no se encuentren aún dentro del rango de dispersión. El período de estabilización aún es difuso. Los valores máximo y mínimo, ocurren minutos después de la variación: el caudal máximo sucede diez minutos después de la variación de escenarios y posee una magnitud de 1.629 L/s mientras que el caudal mínimo se presenta 4 minutos después del cierre de la válvula y reporta un valor de 1.546L/s. El tiempo de estabilización es de aproximadamente 6 minutos.

4.2.3 Ubicación 3

El caudalímetro fue instalado en uno de los tubos de alimentación del nodo Q10.

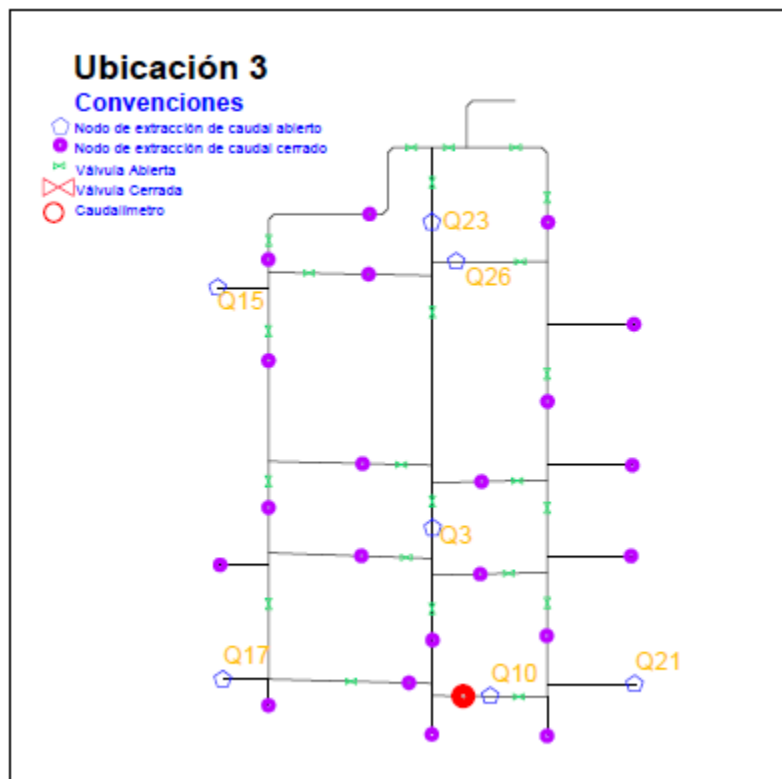
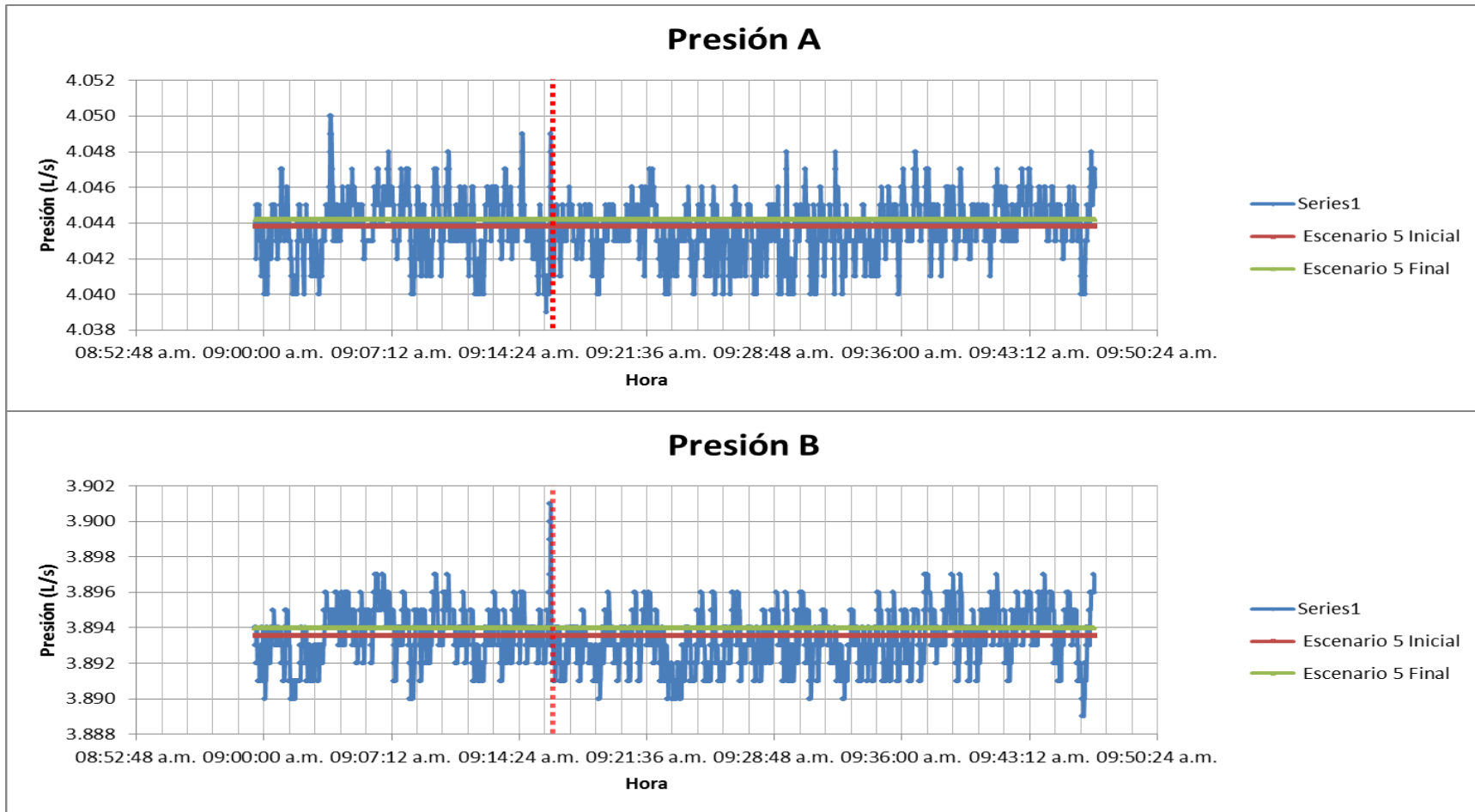
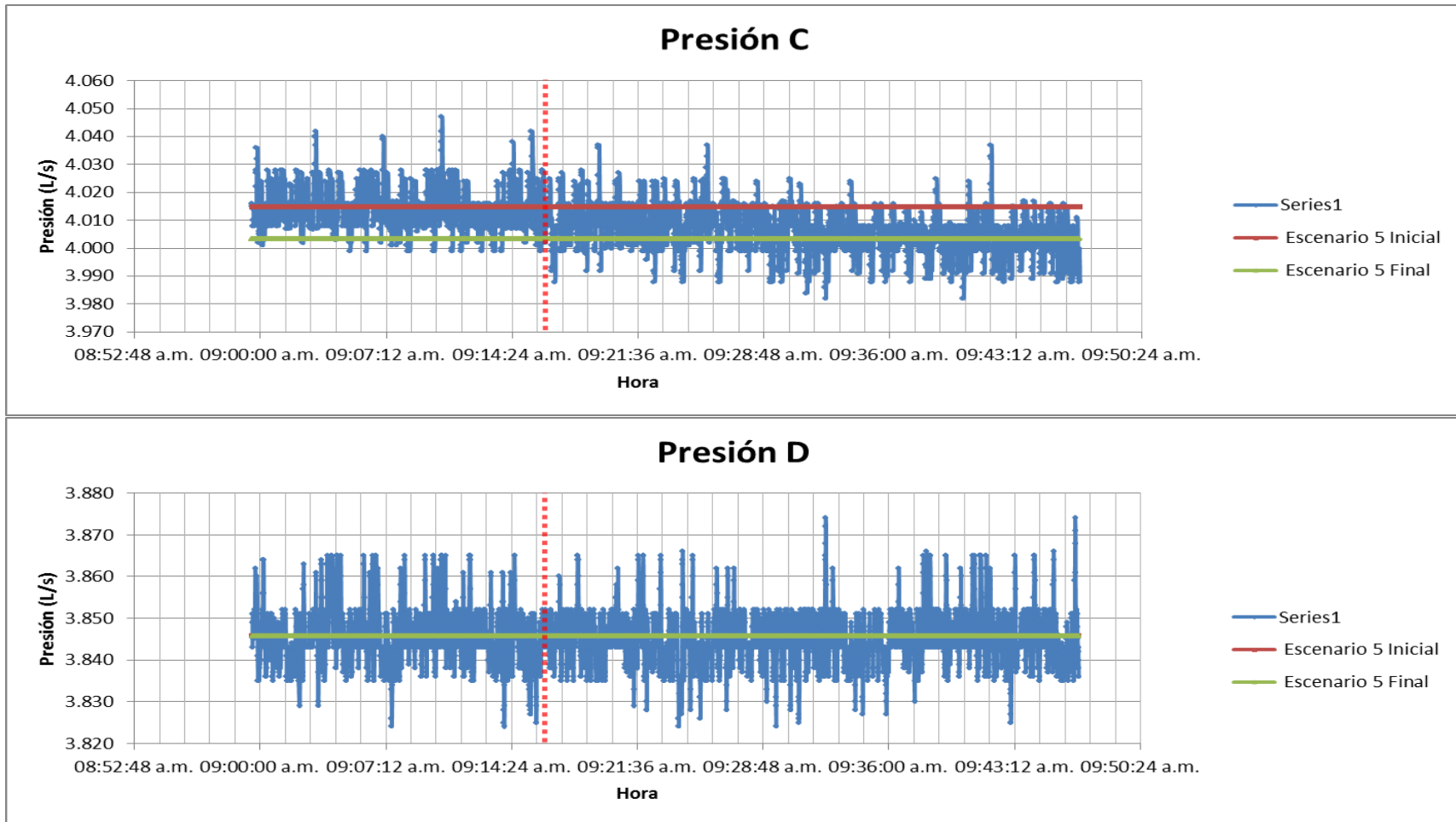


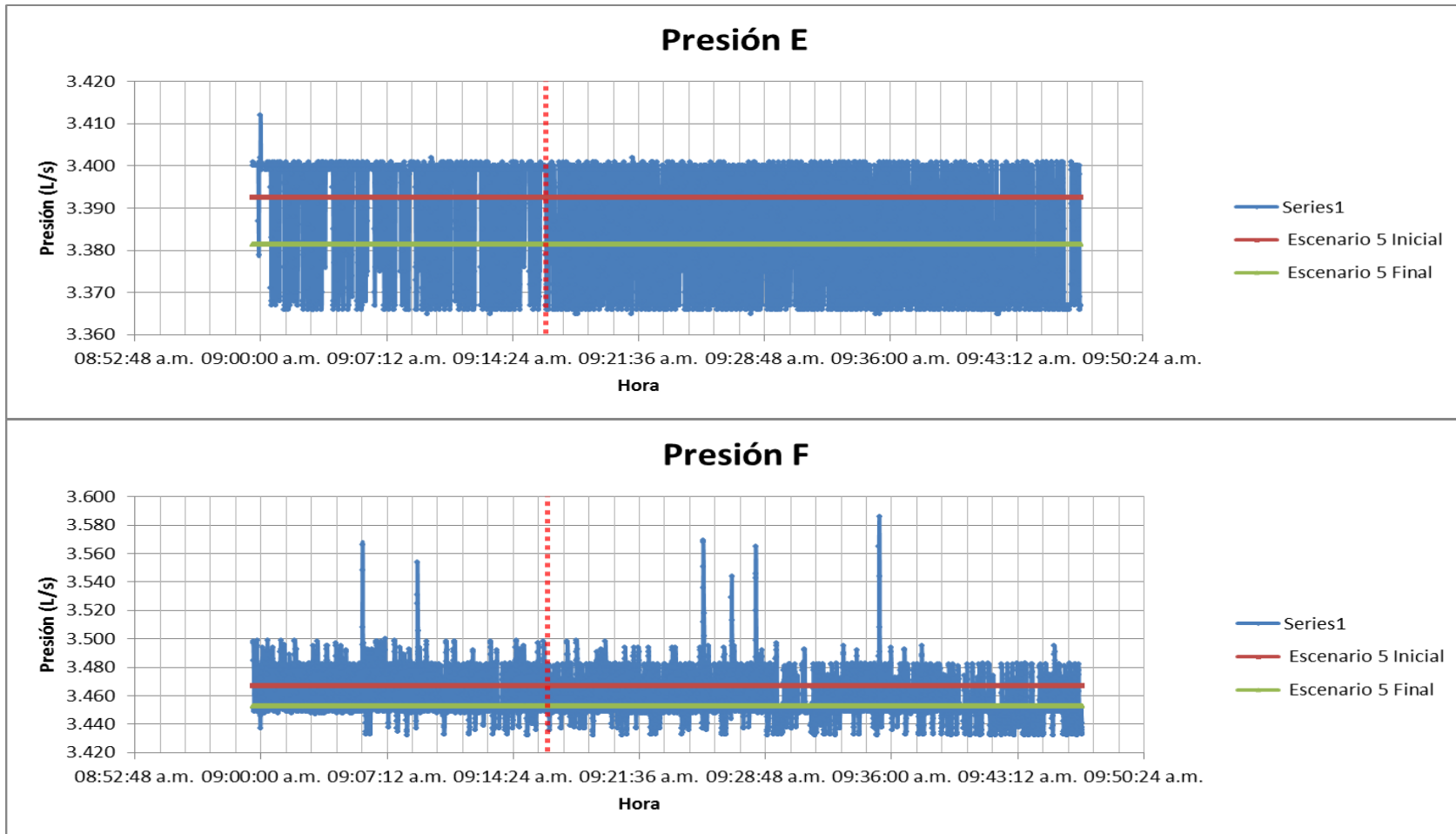
Ilustración 22 Ubicación 3.

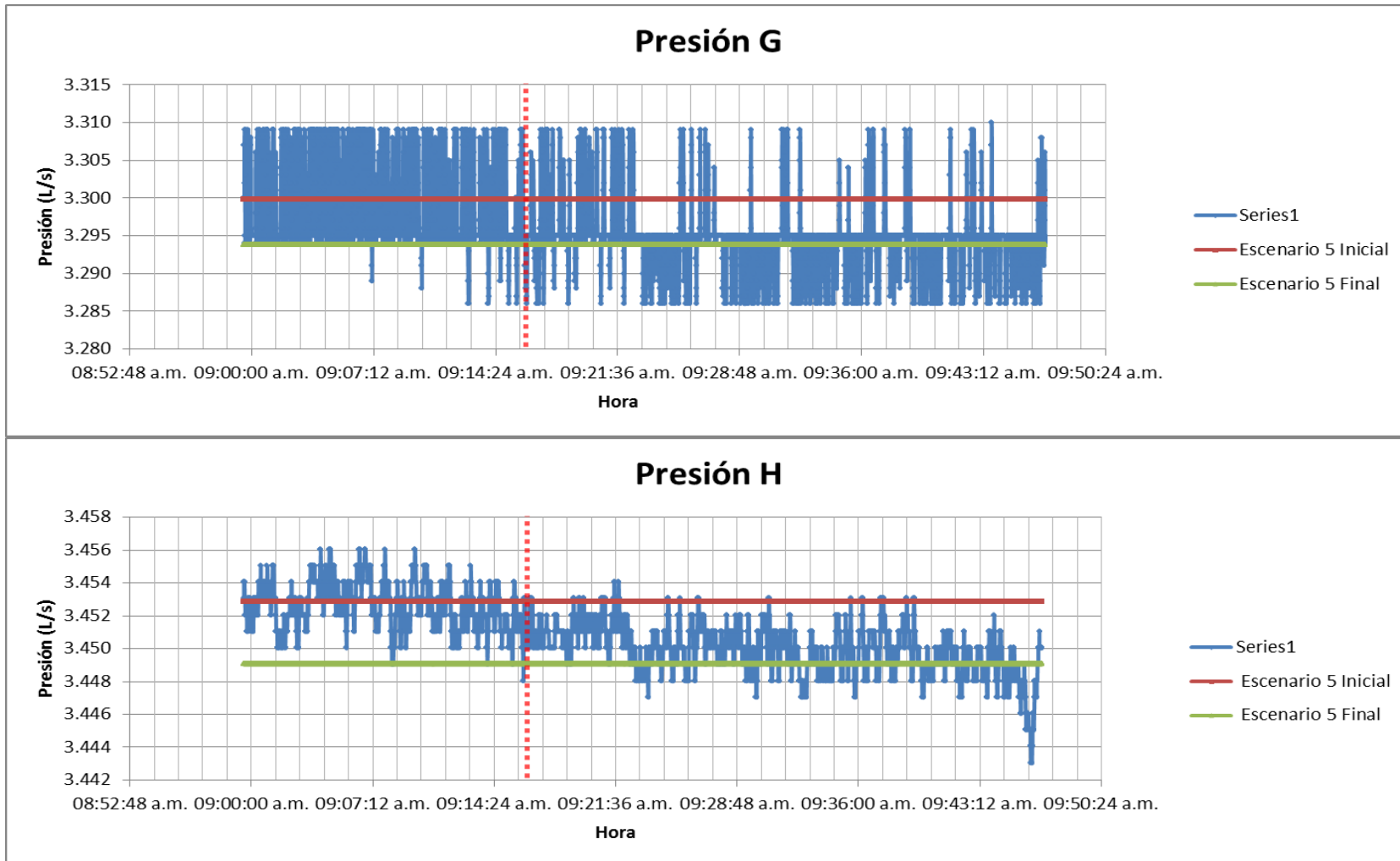
4.2.3.1 Variación del Escenario 5 Inicial al Escenario 5 Final

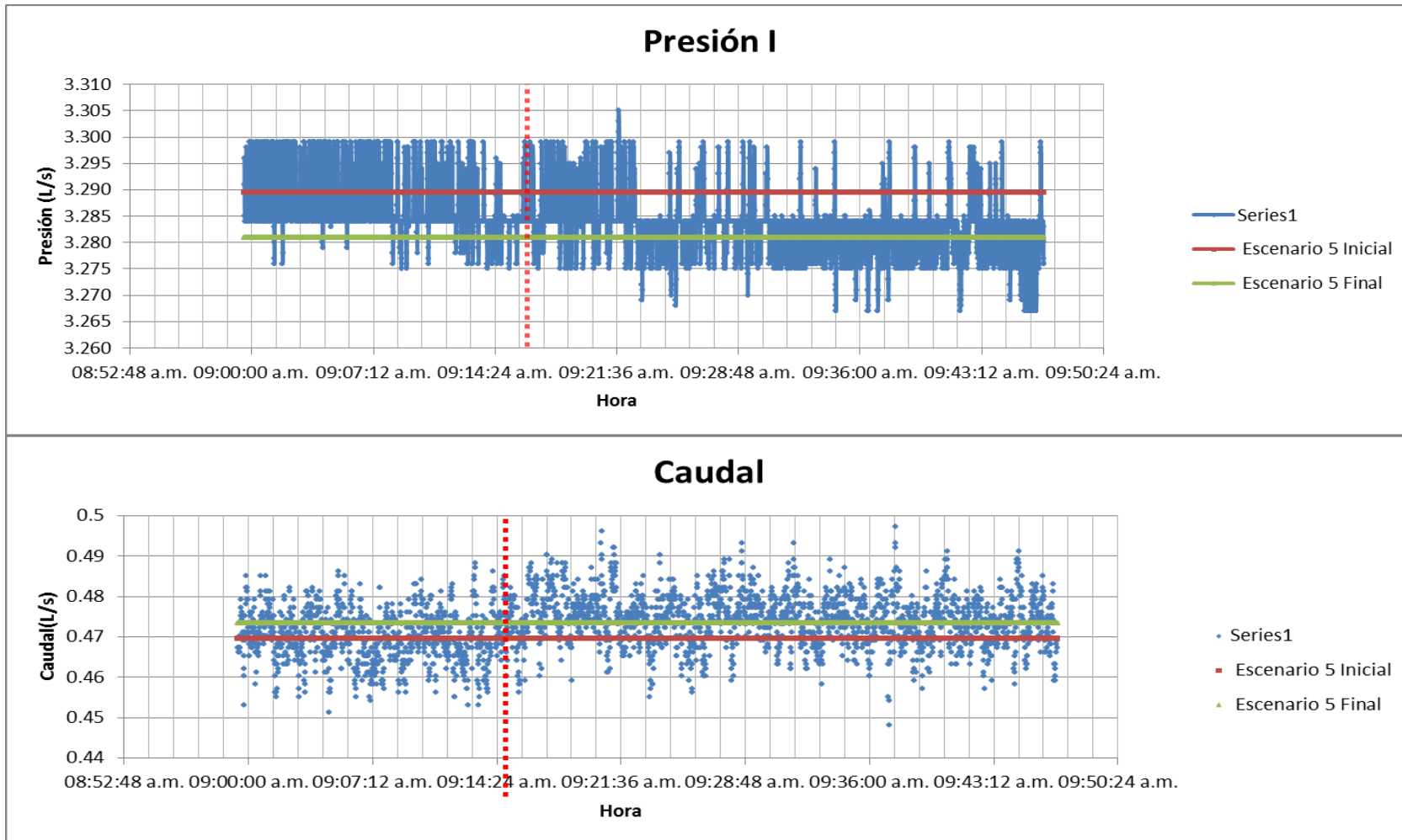
La medición del Escenario 5 en el punto 3, inició a las 8:59'24"AM y finalizó a las 9:46'53"AM. El cierre súbito de la válvula fue llevado a cabo a las 9:16'07"43AM. Los relojes de los computadores se encontraban sincronizados.











4.2.3.1.1 Descripción de Resultados

En concordancia con los reportes anteriores las presiones no muestran cambios significativos después de la variación de escenario, salvo una rápida transición de los datos para centrarse en la nueva media. Sin embargo, en el punto B se alcanza a apreciar un máximo atípico el cual con una magnitud de 3.901 M.C.A ocurre en el segundo 9:16:11, tan sólo 4 segundos después de la variación de escenario. Este punto requiere atención, puesto que es el único que en las tres sesiones de laboratorio permitió apreciar reacciones inmediatamente después del cierre súbito de la válvula.

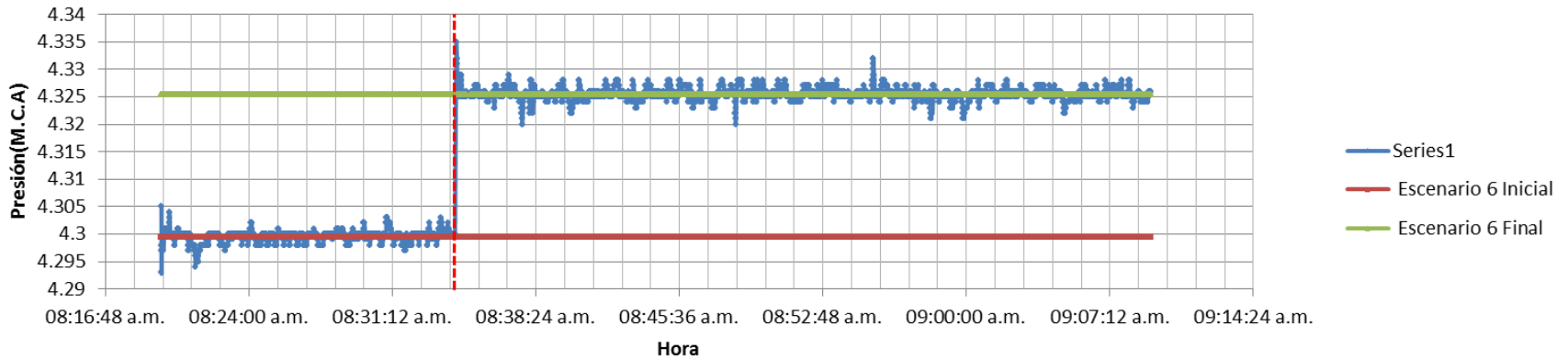
Los datos de presión, en la mayoría de los casos, no presentan variaciones significativas tras el cierre súbito de la válvula; sin embargo, el rango dispersión se centra en la media de los Escenarios estáticos. El rango de dispersión en un principio se ubica alrededor de la media de los datos de presión del Escenario Inicial. Tras un período de transición el cual dura alrededor de 4 minutos, el rango se centra en el Escenario Final.

Los datos de caudal también concuerdan con las observaciones pasadas: las medias antes y después del escenario tienen poca diferencia, inclusive menor que la dispersión aleatoria. El proceso de estabilización de unas condiciones a otras, requiere por lo menos de algunos minutos.

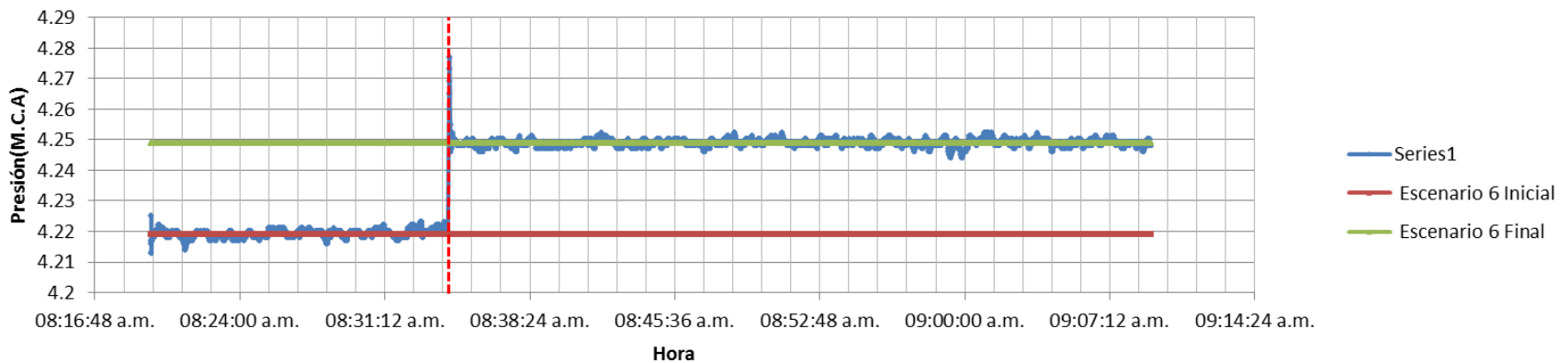
4.2.3.2 Variación del Escenario 6 Inicial al Escenario 6 Final

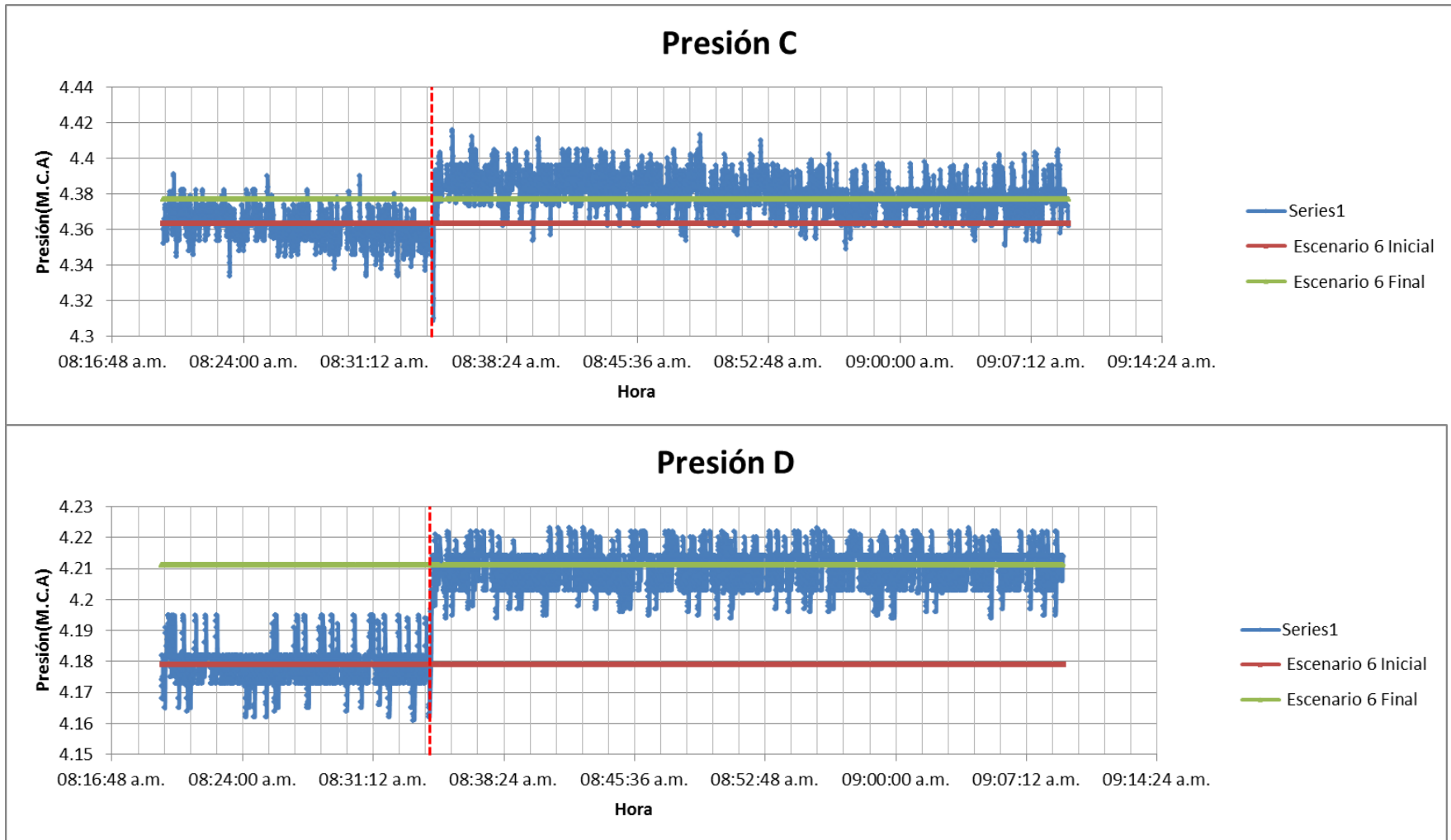
Las mediciones iniciaron a las 8:19'35" AM y finalizaron a las 9:09'16" AM. El cierre súbito de la válvula se realizó a las 8:34'19"69 AM. Los relojes de los diferentes computadores se encontraban sincronizados.

Presión A

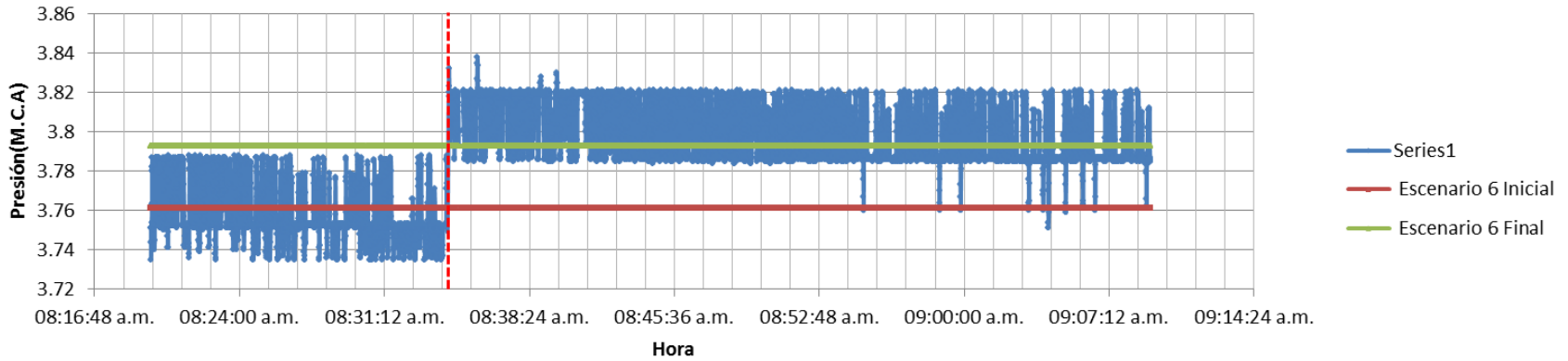


Presión B

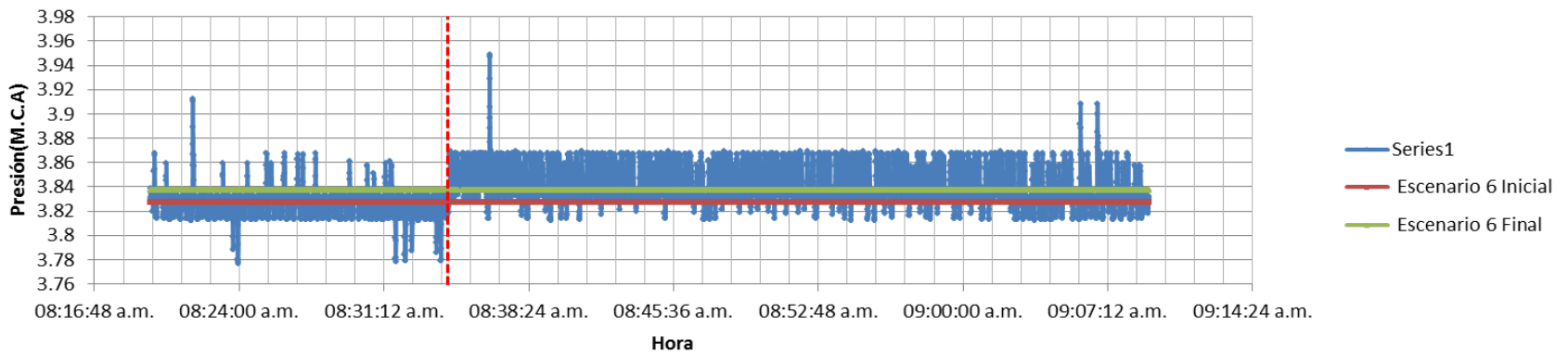




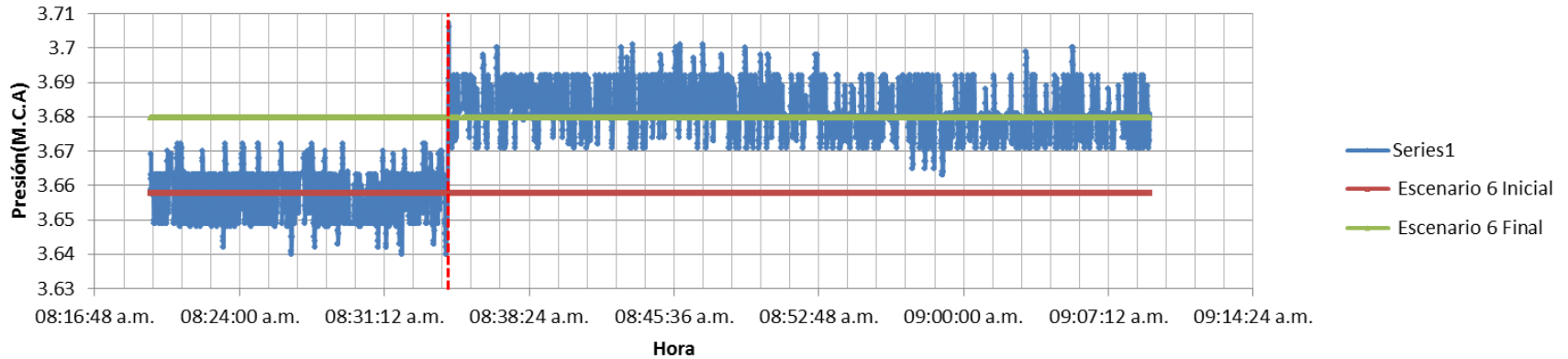
Presión E



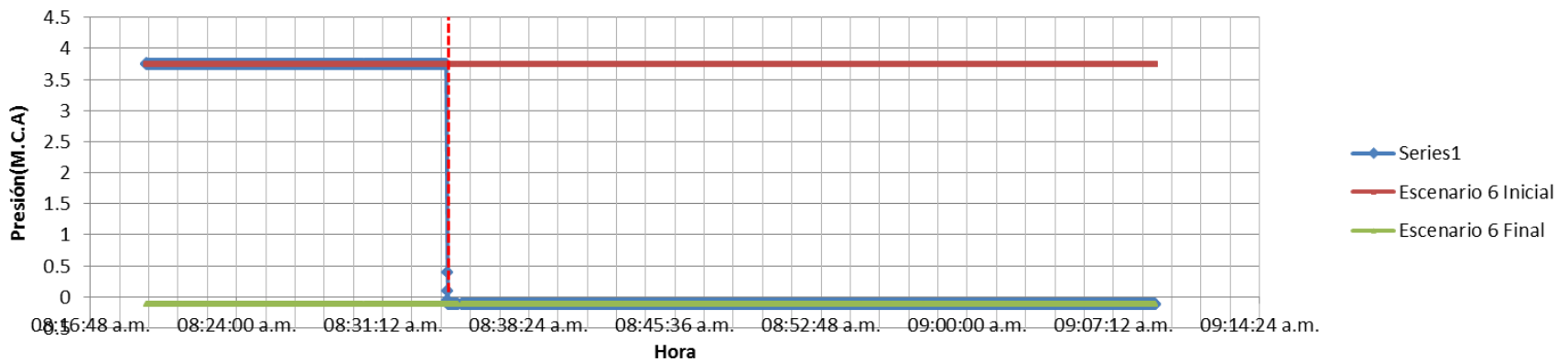
Presión F

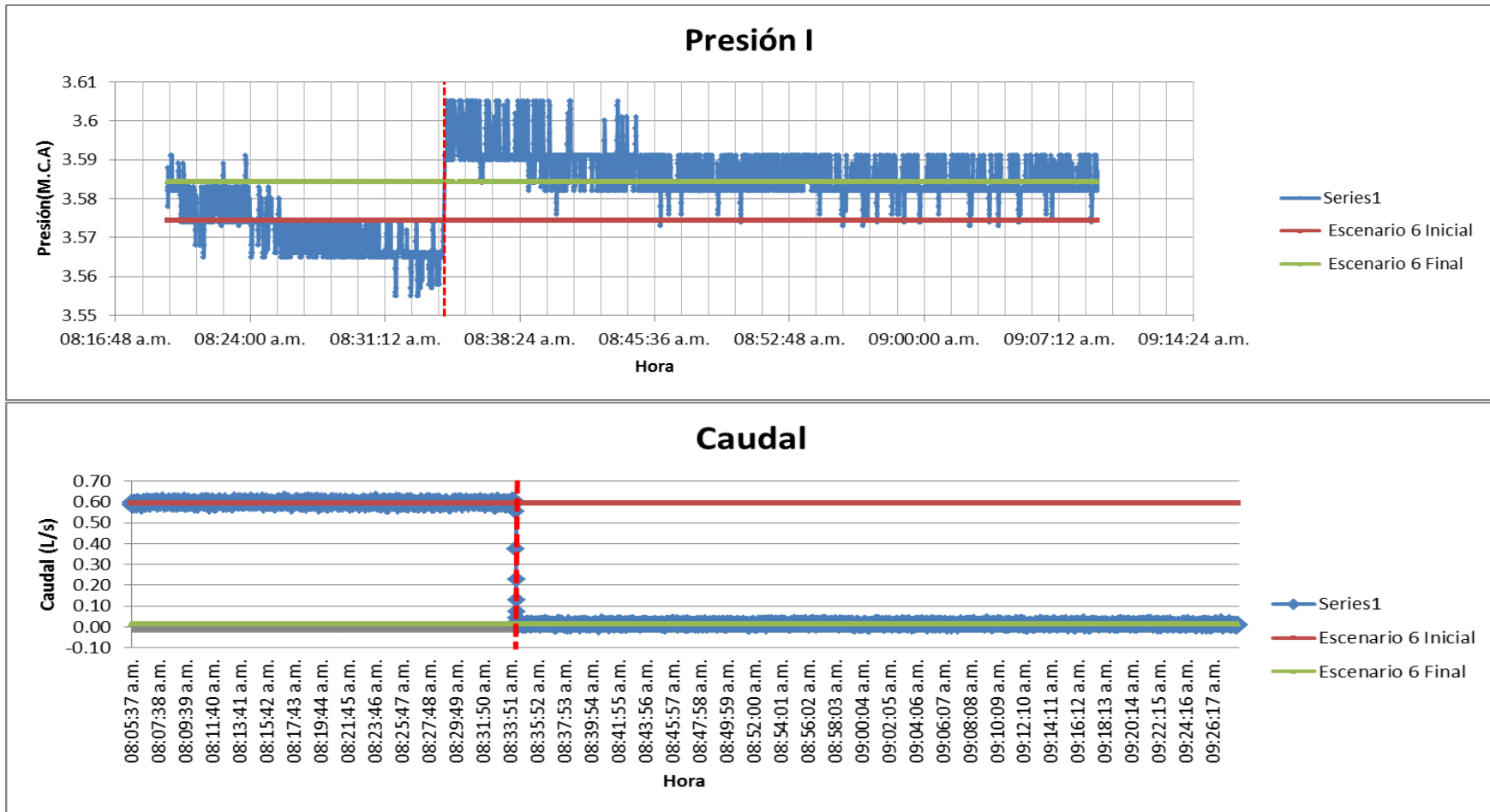


Presión G



Presión H





4.2.3.2.1 Descripción de Resultados

La tendencia en los perfiles de presión a reportar máximos, o por lo menos máximos locales después de una variación se mantienen. Dado que la media de los escenarios inicial y final es distante, es factible el análisis del período de transición entre un escenario y otro. Dado que el cierre fue manual en todos los casos, existe una incertidumbre asociada con los tiempos y métodos de cierre de válvula. Cada una de las transiciones es diferente, lo cual conlleva a obtener resultados diferentes.

Los datos de presión presentan valores extremos en segmentos de tiempo relacionados con el cambio súbito de los Escenarios; sin embargo, antes y después del cierre de la válvula se puede afirmar que los rangos de dispersión se centran en la media de los Escenarios en estado estático. Inicialmente el rango de dispersión se localiza en el Escenario Inicial, después del cambio de Escenario hay un período de transición. Finalmente, el rango de dispersión de los datos se centra en la media del Escenario Final.

	Valores Máximos (M.C.A)	Hora	Diferencia Absoluta con el Tiempo de Variación (s)
Presión A	4.335	08:34:24 a.m.	5
Presión B	4.277	08:34:24 a.m.	5
Presión C	4.416	08:35:27 a.m.	68
Presión D	4.223	08:40:58 a.m.	399
		08:41:26 a.m.	427
		08:42:05 a.m.	456
		08:42:49 a.m.	500
		08:42:50 a.m.	501
		08:55:44 a.m.	1275
		09:04:03 a.m.	1774
Presión E	3.838	08:35:49 a.m.	90
Presión F	3.949	08:36:28 a.m.	129
Presión G	3.706	08:34:24 a.m.	5
Presión H	3.749	08:19:36 a.m.	883
Presión I	3.605	>40 registros	-

Tabla 11 Valores Máximos del Escenario 6 en la Ubicación 3.

A diferencia de las otras ubicaciones, la cercanía temporal de los máximos de presión y el cierre súbito de la válvula, sólo es evidente en los puntos A, B y G. En los demás puntos de medición los máximos de presión se alcanzaron en lapsos de tiempo de más de un minuto. En el caso de la presión I, se obtuvieron más de 40 registros; sin embargo el primero ocurrió a las 8:34:31 AM, es decir 12 segundos después del cambio de escenario.

	Valores Mínimos (M.C.A)	Hora	Diferencia Absoluta con el Tiempo de Variación (s)
Presión A	4.293	08:19:36 a.m.	883
Presión B	4.213	08:19:36 a.m.	883
Presión C	4.310	08:34:24 a.m.	5
Presión D	4.161	08:33:28 a.m.	51
Presión E		08:34:41 a.m.	22
		08:35:11 a.m.	52
		08:35:12 a.m.	53
		08:38:49 a.m.	270
		08:38:50 a.m.	271
		08:39:09 a.m.	290
		08:39:38 a.m.	319
Presión F	0.350	08:23:56 a.m.	623
Presión G	3.640	08:26:35 a.m.	464
		08:32:05 a.m.	134
		08:34:16 a.m.	3
Presión H	-0.125	08:39:29 a.m.	310
		08:41:05 a.m.	466
		08:41:06 a.m.	467
		08:43:38 a.m.	619
Presión I	3.555	08:31:46 a.m.	213
		08:31:47 a.m.	212
		08:32:35 a.m.	164
		08:32:56 a.m.	143
		08:32:57 a.m.	142
		08:32:58 a.m.	141

Tabla 12 Valores Mínimos de Presión del Escenario 6 en la Ubicación 3.

En general los mínimos valores de presión no presentan cercanía temporal con respecto al momento del cierre súbito de la válvula. Algunos inclusive ocurren antes de la variación del escenario. Para que éstos ocurran en algunos puntos toma algo más de diez minutos.

4.3 Comparación con Magnitudes de la Ecuación de Joukowsky

La Ecuación 1 propuesta por Joukowsky en 1900 es una herramienta útil para describir las variaciones de magnitud en un transiente. Como se ha explicado al inicio del documento, factores como el material o la presencia de gases pueden alterar esta predicción.

A continuación se presentan unas tablas con las variaciones de presión en cada uno de los escenarios. La variación de presión es la diferencia entre el promedio del escenario inicial y el valor máximo. Se debe aclarar que no todos los máximos están relacionados temporalmente con el cierre súbito de la válvula, motivo por el cual la variación de laboratorio puede estar relacionada con diferencias en las condiciones hidráulicas.

Variación de laboratorio n

$$= |\text{Promedio de Presión } n \text{ Escenario inicial} - \text{Máximo de Presión } n|$$

Ecuación 23 Variación de Laboratorio.

Para el cálculo de la variación de presión de la ecuación de Joukowsky, se aplicó la Ecuación 1. La diferencia de velocidad es la diferencia entre el promedio de velocidades del escenario inicial y el promedio de velocidades del escenario final en la ubicación correspondiente.

ΔV ubicación n

$$= |\text{Promedio de velocidades escenario inicial} \\ - \text{Promedio de velocidades escenario final}|$$

Ecuación 24 Diferencia de Velocidades.

La diferencia entre las variaciones es con la finalidad de establecer la distancia entre los valores de variación pronosticados y los valores recogidos en laboratorio.

Diferencia = |Variación en Laboratorio – Variación de Ecuación de Joukowsky|

Ecuación 25 Diferencia Entre Variaciones.

Ubicación 1

Escenario 5			
	Variación en Laboratorio (M.C.A)	Variación de Ecuación de Joukowsky (M.C.A)	Diferencia
Presión A	0.0057	0.0004	0.0053
Presión B	0.0094		0.0090
Presión C	0.0191		0.0187
Presión D	0.0264		0.0259
Presión E	0.0210		0.0206
Presión F	0.0135		0.0131
Presión G	0.0142		0.0138
Presión H	0.0050		0.0046
Presión I	0.0091		0.0087

Escenario 6			
	Variación en Laboratorio (M.C.A)	Variación de Ecuación de Joukowsky (M.C.A)	Diferencia
Presión A	0.0312	0.0025	0.0286
Presión B	0.1434		0.1409
Presión C	0.2309		0.2284
Presión D	0.2135		0.2109
Presión E	0.2808		0.2783
Presión F	0.0917		0.0892
Presión G	0.1647		0.1621
Presión H	0.0046		0.0020
Presión I	0.1614		0.1589

Ubicación 2

Escenario 5			
	Variación en Laboratorio (M.C.A)	Variación de Ecuación de Joukowsky (M.C.A)	Diferencia
Presión A	0.0054	0.0017	0.0037
Presión B	0.0056		0.0039
Presión C	0.0136		0.0119
Presión D	0.0286		0.0269
Presión E	0.0159		0.0142
Presión F	0.1075		0.1057
Presión G	0.0265		0.0248
Presión H	0.0073		0.0056
Presión I	0.0183		0.0166

Escenario 6			
	Variación en Laboratorio (M.C.A)	Variación de Ecuación de Joukowsky (M.C.A)	Diferencia
Presión A	0.0560	0.0031	0.0529
Presión B	0.0803		0.0771
Presión C	0.0460		0.0428
Presión D	0.1528		0.1497
Presión E	0.1186		0.1155
Presión F	0.1059		0.1028
Presión G	0.1218		0.1187
Presión H	0.0034		0.0003
Presión I	0.1316		0.1285

Ubicación 3

Escenario 5			
	Variación en Laboratorio (M.C.A)	Variación de Ecuación de Joukowsky (M.C.A)	Diferencia
Presión A	0.0062	0.0015	0.0047
Presión B	0.0074		0.0059
Presión C	0.0322		0.0307
Presión D	0.0282		0.0267
Presión E	0.0195		0.0179
Presión F	0.1190		0.1175
Presión G	0.0102		0.0087
Presión H	0.0032		0.0016
Presión I	0.0156		0.0141

Escenario 6			
	Variación en Laboratorio (M.C.A)	Variación de Ecuación de Joukowsky (M.C.A)	Diferencia
Presión A	0.0356	0.2509	0.2152
Presión B	0.0581		0.1928
Presión C	0.0527		0.1981
Presión D	0.0441		0.2068
Presión E	0.0770		0.1739
Presión F	0.1219		0.1290
Presión G	0.0483		0.2026
Presión H	0.0049		0.2460
Presión I	0.0306		0.2203

En todos los casos las variaciones fueron superiores a las pronosticadas por la ecuación de Joukowski. Si bien no todos los máximos estaban temporalmente relacionados con el cambio súbito y esta variación pudo obedecer a condiciones hidráulicas, inclusive en aquellos casos donde era clara la relación entre el cambio súbito y el pico de presión, la magnitud del transiente superó el valor pronosticado.

Llama la atención que en las tres ubicaciones del caudalímetros las diferencias para cada una de las presiones tienen aproximadamente el mismo orden de magnitud en cada uno de las 3 mediciones.

4.4 Comparación entre Escenarios en Estado Estable y Escenarios Sometidos a Variaciones Súbitas

El presente proyecto de grado ha presentado Escenarios en estado estable y Escenarios sometidos a una variación súbita ¿Los Escenarios sometidos al cierre de la válvula vuelven a las condiciones del estado estable? Lo más apropiado es analizar las presiones antes y después del cierre de válvula, en conjunto con los Escenarios Iniciales y Finales.

Los promedios de presión de los Escenarios Iniciales en estado estable son comparados con los promedios de los primeros diez minutos de medición en los Escenarios sometidos a variaciones súbitas. Los promedios de presión de los Escenarios Finales son comparados con los promedios de los últimos diez minutos de los Escenarios sometidos al cierre de la válvula.

En la Tabla 13 la mayor diferencia porcentual relativa la presenta la ubicación (40.4044%), en la presión C. A excepción del punto mencionado, los valores oscilan entre variaciones del 2% al 3% y en algunos casos del 12%. En contraste con la Tabla 13, la Tabla 14 presenta una diferencia porcentual relativa máximo de 0.4041 en la Ubicación 2, Presión C.

En la Tabla 14 la Ubicación 2, en la Presión C nuevamente se reporta la mayor diferencia porcentual relativa (41.0037%); si se ignora ese punto, los datos resultan cercanos al Escenario en estado estable con valores entre 0.0186% y 11.5716%. En la Tabla 16 las mayores variaciones se presentan en todas las Ubicaciones, en el Punto H. La presión C, en la Ubicación 2 también reporta gran variación.

En general, se puede afirmar que la mayoría de los puntos de los Escenarios sometidos a variaciones logran alcanzar las condiciones del estado estable; sin embargo, la Presión C en la Ubicación 2 presente una gran variación. Por otro lado, el punto H, en el Escenario 6 Final la distancia entre el estado estable y el Escenario sometido a una variación súbita, es significativa.

[M.C.A]	Escenario en Estado Estable Promedios de Presión Escenario 5 Inicial	Escenario Sometido a Variación Promedios de Presión Antes del Cierre Súbito		
		Ubicación 1	Ubicación 2	Ubicación 3
Presión A	4.0455	4.1239	4.0416	4.0438
Presión B	3.8905	3.9693	3.8904	3.8936
Presión C	4.0312	4.1189	2.4024	4.0148
Presión D	3.4626	3.5371	3.8444	3.8458
Presión E	3.8555	3.9314	3.3851	3.3925
Presión F	3.4133	3.4904	3.4585	3.4670
Presión G	3.2986	3.3686	3.2995	3.2998
Presión H	3.3488	3.4209	3.4747	3.4528
Presión I	3.2807	3.3837	3.2667	3.2894

Tabla 13 Escenario 5 Inicial Estable y Escenario 5 Sometido a Variación

[M.C.A]	Escenario en Estado Estable Promedios de Presión Escenario 5 Final	Escenario Sometido a Variación Promedios de Presión Después del Cierre Súbito		
		Ubicación 1	Ubicación 2	Ubicación 3
Presión A	4.0460	4.1239	4.0412	4.0442
Presión B	3.8913	3.9690	3.8913	3.8940
Presión C	4.0270	4.1136	2.3997	4.0033
Presión D	3.4619	3.5351	3.8416	3.8457
Presión E	3.8543	3.9270	3.3765	3.3813
Presión F	3.4125	3.4892	3.4450	3.4525
Presión G	3.2964	3.3675	3.2958	3.2937
Presión H	3.3493	3.4208	3.4743	3.4490
Presión I	3.2770	3.3770	3.2509	3.2809

Tabla 14 Escenario 5 Final Estable y Escenario 5 Sometido a Variación

[M.C.A]	Escenario en Estado Estable	Escenario Sometido a Variación		
	Promedios de Presión	Promedios de Presión Antes del Cierre Súbito		
	Escenario 6 Inicial	Ubicación 1	Ubicación 2	Ubicación 3
Presión A	4.3844	4.3841	4.2900	4.2994
Presión B	4.3021	4.3022	4.2087	4.2189
Presión C	4.4275	4.4452	2.6120	4.3633
Presión D	3.9169	3.8996	4.1702	4.1789
Presión E	4.2527	4.2563	3.7344	3.7610
Presión F	3.8541	3.8551	3.8231	3.8271
Presión G	3.7434	3.7335	3.6502	3.6577
Presión H	3.8084	3.8026	3.6966	3.7441
Presión I	3.6483	3.6570	3.5794	3.5744

Tabla 15 Escenario 6 Inicial Estable y Escenario 6 Sometido a Variación

[M.C.A]	Escenario en Estado Estable	Escenario Sometido a Variación		
	Promedios de Presión	Promedios de Presión Después del Cierre Súbito		
	Escenario 6 Final	Ubicación 1	Ubicación 2	Ubicación 3
Presión A	4.4110	4.4102	4.3242	4.3253
Presión B	4.3316	4.3326	4.2475	4.2489
Presión C	4.4782	4.4557	2.6328	4.3767
Presión D	3.9517	3.9264	4.2138	4.2111
Presión E	4.2893	4.2862	3.8085	3.7929
Presión F	3.9093	3.9015	3.8511	3.8371
Presión G	3.7801	3.7574	3.6855	3.6797
Presión H	3.8873	-0.1270	-0.1250	-0.1250
Presión I	3.6980	3.6556	3.6234	3.5842

Tabla 16 Escenario 6 Final Estable y Escenario 6 Sometido a Variación

5 Modelación en Período Extendido

“La modelación en período extendido es esencialmente una secuencia de simulaciones en estado estable cuyas condiciones de frontera son cargadas para reflejar cambios en las demandas de los nodos, los niveles de los tanques y las operaciones de las bombas” (Giustolizi, Kapelan, & Savic, 2008).

La modelación en período extendido, a diferencia de la modelación en condiciones constantes puede incluir variaciones en la altura del nivel de tanques, embalses, entre otros. En los nodos también es factible incluir cambios de la demanda en función del tiempo. El resultado del modelo permite analizar las diferentes condiciones hidráulicas a lo largo del tiempo.

5.1 Características del Modelo

En lo relacionado a diámetros, coeficientes de pérdidas menores, rugosidad, coordenadas de nodos y tuberías, la información es exactamente igual al modelo calibrado y validado en condiciones hidráulicas estables.

5.2 Energía de Entrada

La energía de entrada, inicialmente (en los modelos sin variación) usó la presión A como base. Dado que de las 3 variaciones la que más se asemeja a lo reportado en la literatura fue la de la Ubicación 1, se considera la más adecuada para la formación de un patrón de variación.

5.3 Demandas

Se cuenta con información de calidad acerca de la variación de las demandas en tres nudos. Sin embargo, dado que se cuenta con valores de variación los nudos Q23, Q26 y Q15, éstos conservan su demanda base pero adoptan alguno de los tres patrones. Los puntos de extracción de caudal Q17, Q10 y Q21, además de modificar su demanda base de acuerdo con los promedios obtenidos en las mediciones, adoptan alguno de los patrones de demanda.

5.4 Patrones de Altura de Presión y de Demanda de Caudal

En secciones anteriores se expuso de manera detallada las mediciones de cada uno de los escenarios, en alguna de las 3 ubicaciones del caudalímetro. Eso significa que para cada variación se pueden determinar 3 patrones de altura de presión (energía de entrada), sin embargo se seleccionó el de la Ubicación 1 debido a su similaridad a los casos prácticos y teóricos expuestos en la literatura científica.

El procedimiento consiste en tomar un promedio el cual es introducido en los programas como altura o demanda base. La división entre los valores calculados (numerador) y el promedio (denominador) resulta en los factores de multiplicación (patrones de altura de presión) los cuales varían en el tiempo. El intervalo temporal de los programas es de minutos, por este motivo se calculan los promedios minuto a minuto y con base en esto se establece un patrón de variación temporal.

$$\text{Factor de Multiplicación } i = \frac{\text{Valor } i}{\text{promedio de valores}}$$

Ecuación 26 Factores de Multiplicación.

Como resultado de las mediciones que se hicieron en los tres escenarios, hay tres nudos de extracción de caudal que tienen poca incertidumbre. Se puede calcular la media y con la división mencionada determinar los factores de multiplicación en el tiempo. Por otro lado, hay nudos de extracción de caudal que no fueron medidos; por lo tanto es necesario hacer suposiciones.

Debido a que hubo tres mediciones por cada uno de los escenarios, hay disponibles tres patrones los cuales incluyen demandas y alturas de presión A. Lo único que varía de uno a otros es la extensión de tiempo y la presión A. Dado que las mediciones de presión más adecuadas debido a su ausencia de datos sospechosos y consistencia, son las de la primera ubicación; en consecuencia, estas presiones son tomadas para la generación de patrones de energía de entrada y evaluación del modelo.

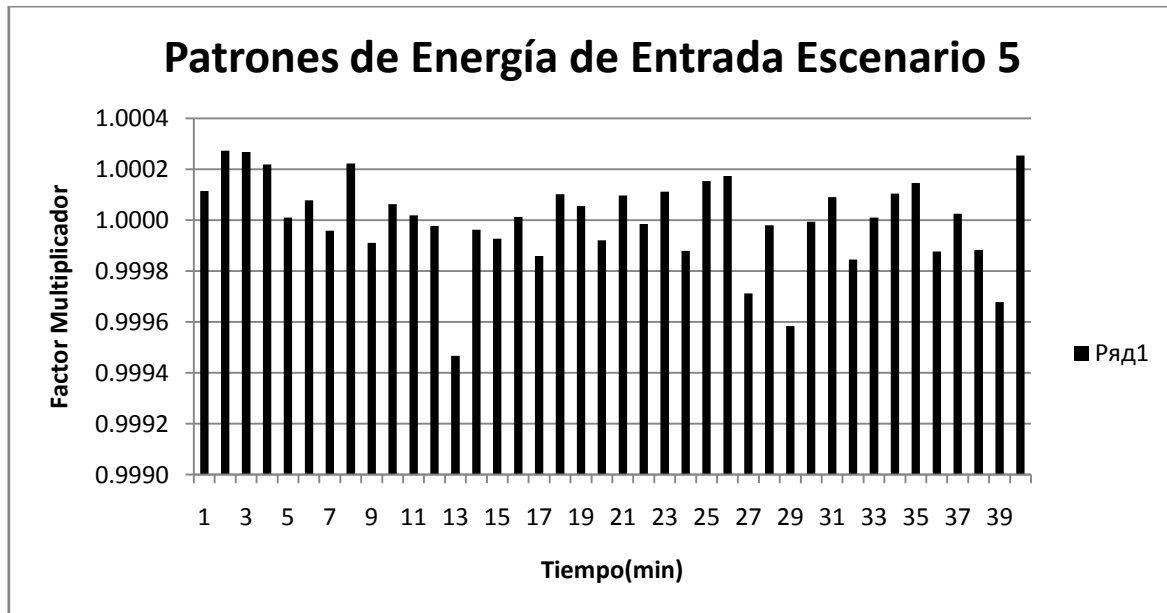
La suposiciones hechas para la modelación computacional se listan a continuación:

1. Los patrones de demanda relacionados con las mediciones en el nudo Q17 (ubicación 1), se aplican a Q15 y Q23.

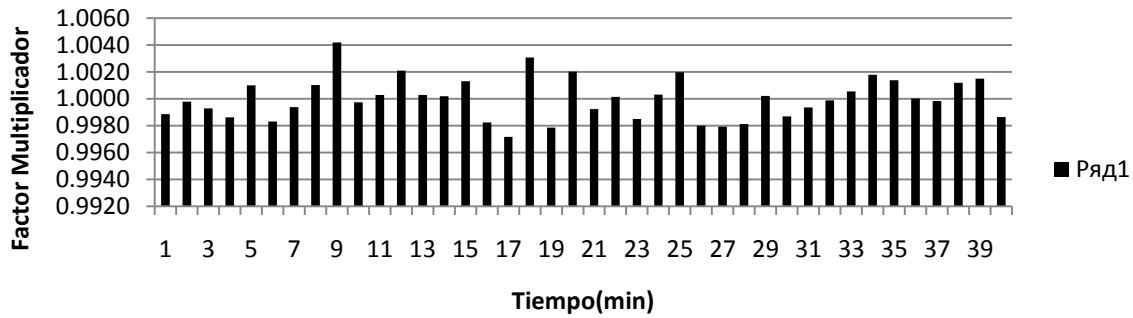
2. Los patrones de demanda relacionados con las mediciones del nudo Q21 (ubicación 2), se aplican a Q3 y a Q26.
3. El patrón de demanda calculado para Q10, únicamente aplica para este nudo puesto que tiene la particularidad de quedar completamente desabastecido después de la variación.
4. Los patrones de energía de entrada o altura del embalse son extraídos de las presiones registradas en el punto A en la primera ubicación.

Patrones de la Variación del Escenario 5

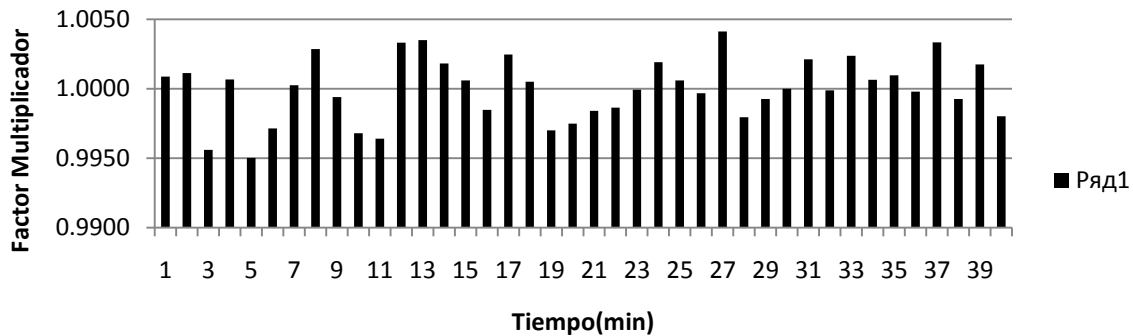
Los valores de los factores multiplicadores concuerdan con los análisis alrededor de los resultados de las mediciones. Si se considera que los factores oscilan entre 0.96 y 1.02, la variación a lo largo del tiempo no presenta cambios bruscos, ni tendencias determinadas por el cambio súbito del Escenario 5 Inicial al Escenario 5 Final. Los factores multiplicadores y los valores base se encuentran en la sección de anexos.



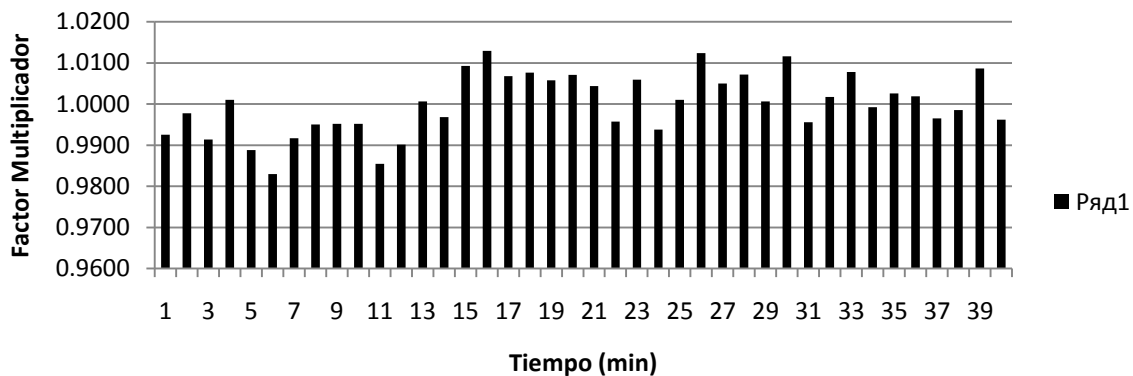
Patrón de Variación de Demanda (Q15-Q17-Q23)



Patrón de Variación de Demanda (Q21-Q3-Q26)

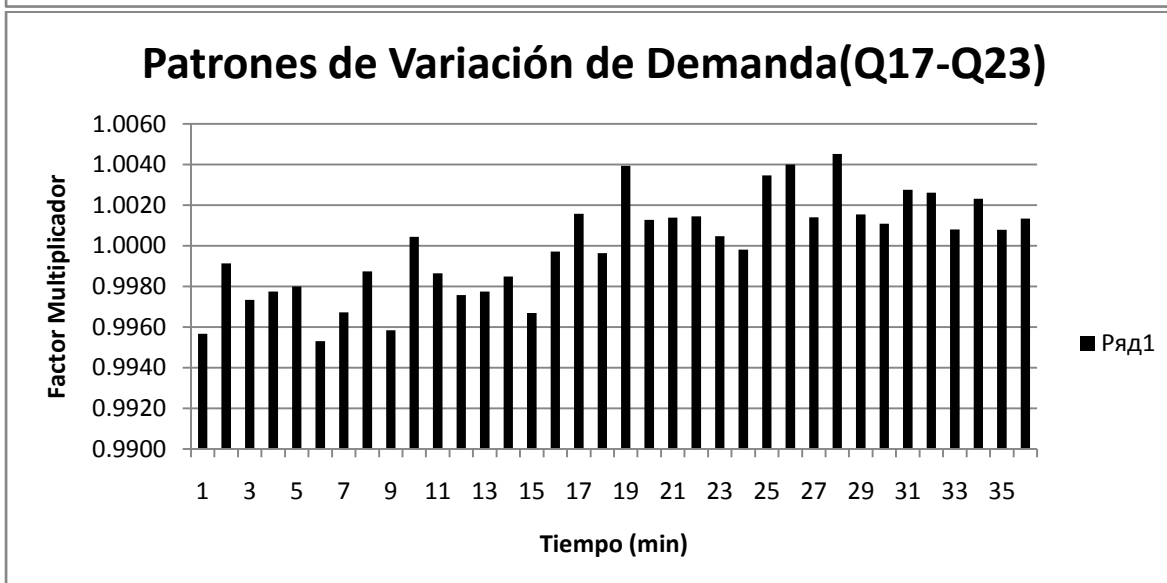
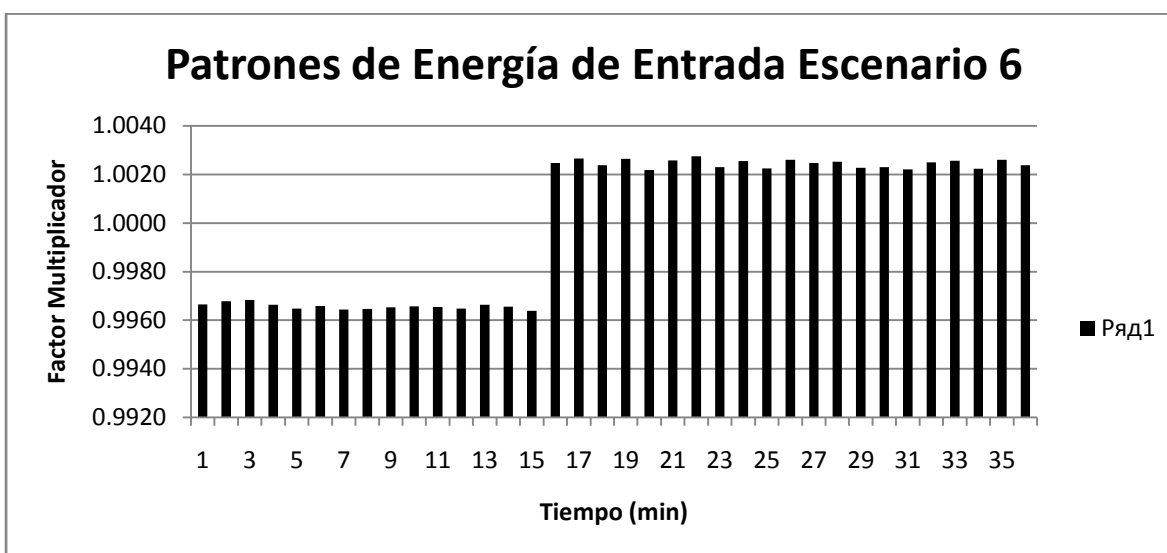


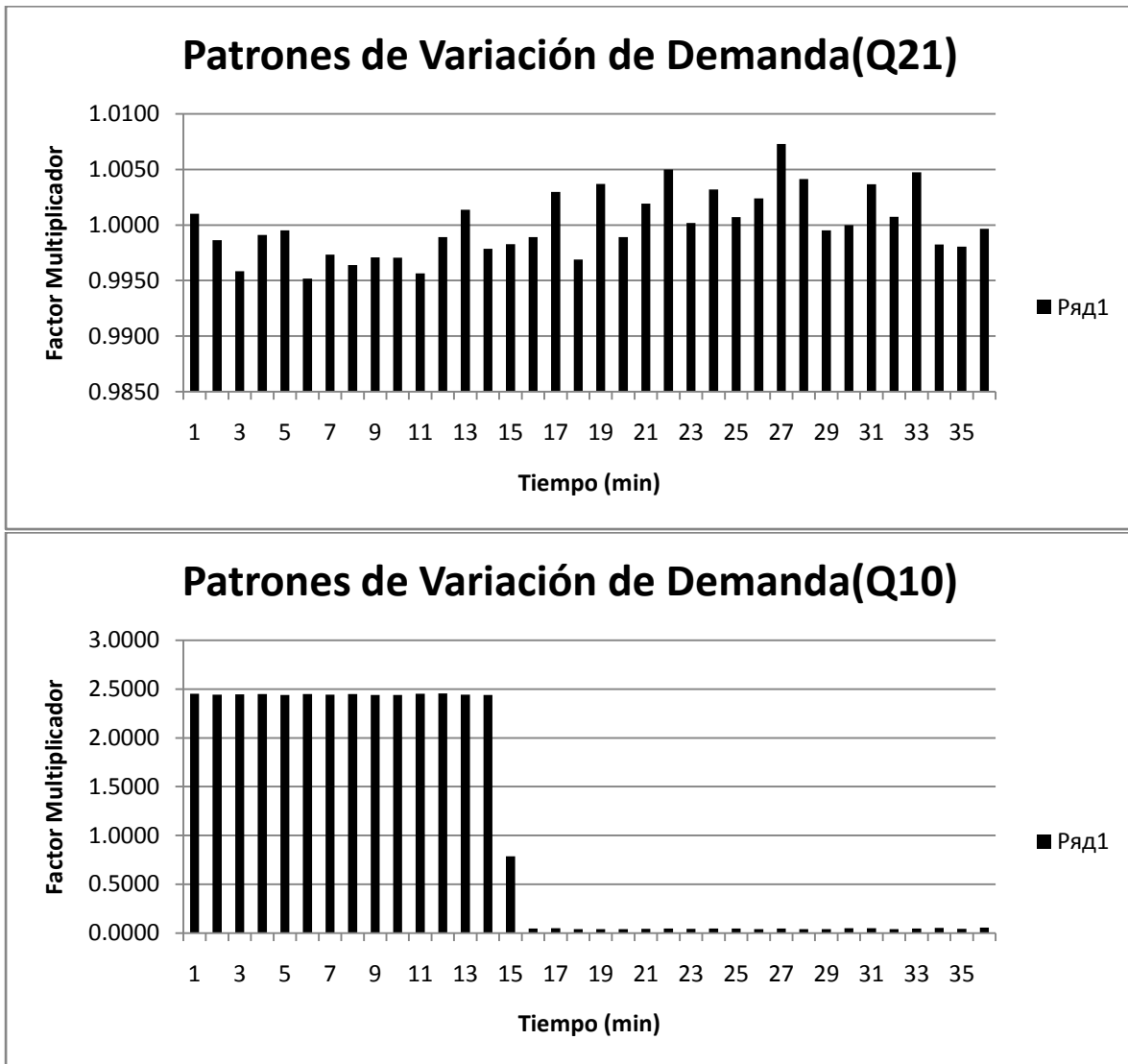
Patrón de Variación de Demanda (Q10)



5.4.1 Patrones de Variación del Escenario 6

En la sección Anexos están disponibles los valores numéricos de los patrones de variación del Escenario 6. En los patrones se refleja la alta variabilidad del escenario durante los cambios bruscos. La presión A, o energía de entrada tiene dos tendencias segmentadas por el cierre súbito de la válvula. Los patrones Q17-Q23 y Q21 reflejan un ligero aumento de caudal una vez se ha cambiado de escenario. El nodo de extracción de caudal que se ve afectado por el desabastecimiento producto del cambio súbito, tiene un perfil de factores multiplicadores coherentes con esta situación.





5.5 Resultados y Representatividad del Modelo

Una vez los valores base de demanda y de energía de entrada, así como los patrones de variación fueron introducidos al programa computacional, éste calculó las variables hidráulicas para la red minuto a minuto.

5.5.1 Representatividad

La representatividad de los modelos en estado estable fue evaluada por medio del error

cuadrático medio y el coeficiente de representatividad, éstos fueron retomados de la modelación de los escenarios propuestos en estado estable.

	R^2	RMS
Escenario 5	0.95	0.07
Escenario 6	0.15	1.09
Escenario 6¹	0.95	0.08

Tabla 17 Representatividad de Modelación en Período Extendido.

El Escenario 5 presenta un índices satisfactorios de representatividad, es factible afirmar que su variabilidad ($R^2=0.95$) y exactitud ($RMS=0.07$) son fieles a los datos recogidos en campo. En el caso del Escenario 6, a pesar de que la mayoría de los perfiles se asemejan bastante los índices de representatividad son poco satisfactorios. Inicialmente se puede afirmar que el modelo no representa la variabilidad ($R^2=0.15$) y se desvía significativamente ($RMS=1.09$) de los datos de campo. Sin embargo, se debe tener en cuenta que las mediciones de presión del punto H estaban sometidas a un proceso de desabastecimiento súbito (aislamiento) por lo cual se decidió analizar el modelo sin la influencia de este segmento de datos.

Una vez se elimina la influencia de los valores del punto H, el modelo del Escenario 6 cobra una significancia similar a la del Escenario 5. Sin los datos de la presión H en el tiempo, se puede afirmar que hay alta representatividad de la variabilidad ($R^2=0.95$) y una desviación del orden de centímetros ($RMS=0.08$) con respecto a los datos tomados en el laboratorio.

Un análisis en retrospectiva permite concluir que el Escenario 5 y el Escenario 6 (a excepción del punto H) en período extendido, bajo las especificaciones y suposiciones asumidas, representan de manera satisfactoria la variabilidad y cuentan con un grado aceptable de exactitud si se toma como referencia el grupo de valores medidos directamente.

¹ Éstos indicadores fueron calculados sin tener en cuenta el efecto de la presión H

6 Conclusiones

En los perfiles de presión del Escenario 5 (del Inicial al Final) no fue factible apreciar máximos o mínimos después de la transición de corta duración. Por otro lado, el Escenario 6 (del Inicial al Final) presentó en sus registros de presión, en la mayoría de los puntos y ensayos, máximos considerablemente fuera de la tendencia y temporalmente relacionados con el cambio súbito (cierre de válvula). **En futuros proyectos de investigación podría evaluarse la relación entre ramificación, cantidad de nudos afectados por el cambio súbito, aislamiento de segmentos de la red y magnitud del transiente de presión.**

Los rangos de dispersión de los datos de presión se localizaron en los Escenarios estáticos. Al inicio, el rango de dispersión se centró en la media del Escenario Inicial. Durante el cambio súbito, en algunos casos era factible observar datos extremos. Posteriormente, los perfiles de presión tenían un período de normalización hacia la media del Escenario Final el cual duraba algunos minutos. Una vez las condiciones del Escenario Final se estabilizaban, los datos se dispersaban alrededor del promedio de presión del Escenario Final.

Los cambios notorios estaban relacionados con aumentos súbitos de la presión; no hubo una tendencia considerable de presiones bajas como se ha reportado en estudios relacionados con suspensión del funcionamiento de alguna bomba. En todos los casos, la diferencia entre el promedio de presiones del escenario inicial y el máximo valor, reportaron magnitudes superiores a las pronosticadas en la ecuación de Joukowski.

Los perfiles de caudal no presentaron máximos o mínimos, o eventos atípicos durante el cambio de escenario. Sin embargo es factible analizar transiciones que duran algunos minutos. En las zonas aisladas en las cuales hay desabastecimiento después del cambio de escenario, las variaciones están temporalmente relacionadas con la transición del estado inicial al estado final.

Los Escenarios 5 Inicial, 5 Final, 6 Inicial y 6 Final en los modelos estáticos de EPANET y REDES cuentan con una satisfactoria representación de la variabilidad y desviación, con respecto a los datos de laboratorio.

En la modelación en período extendido los valores simulados del Escenario 5 representan la variabilidad y magnitud de manera satisfactoria con respecto a los datos de laboratorio producto de un cierre súbito de una válvula.

En el caso del Escenario 6 los indicadores estadísticos (coeficiente de determinación y error cuadrático medio) son poco satisfactorios. “Si se considera que una región de la red elevada es aislada”, al ignorar los valores del punto de presión localizado en la zona en estado de desabastecimiento (presión H), la variabilidad y la magnitud de los datos modelados alcanzan niveles de fidelidad casi iguales a los del Escenario 5.

7 Agradecimientos

Agradezco a John Calvo, miembro del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Los Andes, quién colaboró intensivamente en el proceso de medición e instalación de equipos. A Juan Saldarriaga, asesor de tesis por el tiempo dedicado y el apoyo brindado en el proyecto. A aquellos miembros del CIACUA que estuvieron dispuestos a ayudarme con los posibles contratiempos en el proceso.

8 Bibliografía

- Bergant, A., Simpsom, A., & Tijsseling, A. (2006). Water hammer with column separation: A historical review. *Journal of Fluids and Structures*, 135-171.
- Bosserman II, B., & Hunt, W. (2006). *Pumping Station Design*. (G. Jones, Ed.) Estados Unidos de América: Elsevier Inc.
- Chapra, S., & Canale, R. (2007). *Métodos Numéricos para Ingenieros*. México D.F: McGrawHill.
- Devore, J. L. (2005). *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias*. México: International Thomson Editores S.A.
- Giustolizi, O., Kapelan, Z., & Savic, D. (2008). Extended Period Simulation Analysis Considering Valve Shutdowns. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 527-537.
- Grossman, S. (2008). *Álgebra Lineal*. México: McGrawHill.
- Joukowsky, N. (1900). Über den hydraulischen Stoss in Wasserleitungsröhren. *Mémoires de l'Académie Impériale des Sciences de St.-Petersbourg*, 9(5).
- Kirmeyer, G. J., Friedman, M., Martel, K., Howie, D., LeChevallier, M., Abbaszadegan, M., y otros. (2001). *Pathogen Intrusion into the Distribution System*. Estados Unidos de América: AWWA Research Foundation and American Water Works Association.
- Korteweg, D. (1878). Ueber die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in elastischen Röhren. *Annalen der Physik und Chemie*, 525–542.
- LeChevallier, M. W., Gullick, R. W., Karim, M. R., Friedman, M., & Funk, J. E. (2003). The Potential Risk from Intrusion of Contaminants into the Distribution System from Pressure Transients. *Journal of Water Health*, 3-14.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2012). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico*. Recuperado el 7 de Junio de 2013, de http://www.minvivienda.gov.co/Agua/Temas%20de%20inter%20C3%A9s/Documents/240512_sistemas_acueducto_b-.pdf

-
- National Instruments. (Abril de 2003). *National Instruments*. Recuperado el 8 de Junio de 2013, de FieldPoint FP-1601 User Manual:
<http://www.ni.com/pdf/manuals/370707a.pdf>
- Prieto Gamboa, C. M. (2011). *Modelación física y calibración de sustancias en redes de distribución de agua potable*. Bogotá: Universidad de Los Andes.
- Saldarriaga, J. (2007). *Hidráulica de Tuberías*. (L. J. Buitrago, Ed.) Colombia: Alfaomega-Uniandes.
- Simpson, A., & Wylie, B. (1991). Large Water-Hammer Pressure for Column Separation in Pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1310-1316.
- Stone, G. (2006). Contractual and physical risks from waterhammer. *World Pumps*, 34, 37.38.
- Thorley, A. (1991). *Fluid Transients in Pipeline Systems*. Inglaterra: D. & L. George.
- United States Environmental Protection Agency. (28 de Enero de 2013). EPA. Recuperado el 6 de Febrero de 2013, de <http://www.epa.gov/NRMRL/wswrd/dw/epanet.html>
- Universidad de Harvard. (Enero de 2013). *Harvard University The Graduate School of Arts and Science*. Recuperado el 8 de Junio de 2013, de Dissertation Guidelines:
<http://www.gsas.harvard.edu/images/stories/pdfs/form%20of%20dissertation.pdf>
- Wood, D. (2005). Waterhammer Analysis—Essential and Easy (and Efficient). *Journal of Environmental Engineering*, 1123–1131.

9 Anexos

9.1 Escenario 5

Escenario 5				
	Q15-Q17-Q23	Q21-Q3-Q26	Q10	Presión A
	Demanda base(L/s)	Demanda base(L/s)	Demanda base(L/s)	Altura Base(m) 1
	1.763044583	1.521305	0.472922917	4.123879947
Minuto	Factores Multiplicadores			
1	0.9989	1.0009	0.9925	1.0001
2	0.9998	1.0011	0.9978	1.0003
3	0.9993	0.9956	0.9914	1.0003
4	0.9986	1.0007	1.0010	1.0002
5	1.0010	0.9950	0.9888	1.0000
6	0.9983	0.9971	0.9829	1.0001
7	0.9994	1.0002	0.9916	1.0000
8	1.0010	1.0029	0.9950	1.0002
9	1.0042	0.9994	0.9952	0.9999
10	0.9997	0.9968	0.9952	1.0001
11	1.0003	0.9964	0.9855	1.0000
12	1.0021	1.0033	0.9902	1.0000
13	1.0003	1.0035	1.0006	0.9995
14	1.0002	1.0018	0.9968	1.0000
15	1.0013	1.0006	1.0093	0.9999
16	0.9982	0.9985	1.0130	1.0000
17	0.9972	1.0025	1.0068	0.9999
18	1.0031	1.0005	1.0076	1.0001
19	0.9978	0.9970	1.0058	1.0001
20	1.0020	0.9975	1.0071	0.9999
21	0.9992	0.9984	1.0044	1.0001
22	1.0002	0.9986	0.9957	1.0000
23	0.9985	0.9999	1.0059	1.0001
24	1.0003	1.0019	0.9938	0.9999
25	1.0020	1.0006	1.0010	1.0002
26	0.9980	0.9997	1.0124	1.0002
27	0.9979	1.0041	1.0050	0.9997
28	0.9981	0.9979	1.0072	1.0000
29	1.0002	0.9993	1.0006	0.9996
30	0.9987	1.0000	1.0116	1.0000

31	0.9994	1.0021	0.9955	1.0001
32	0.9999	0.9999	1.0017	0.9998
33	1.0006	1.0024	1.0078	1.0000
34	1.0018	1.0006	0.9992	1.0001
35	1.0014	1.0010	1.0026	1.0001
36	1.0000	0.9998	1.0019	0.9999
37	0.9998	1.0033	0.9965	1.0000
38	1.0012	0.9993	0.9985	0.9999
39	1.0015	1.0018	1.0087	0.9997
40	0.9987	0.9980	0.9962	1.0003

9.2 Escenario 6

Escenario 6				
	Q17-Q23	Q21	Q10	Presión A
	Demanda base(L/s)	Demanda base(L/s)	Demanda base(L/s)	Altura Base(m)
	1.8155	1.5881	0.2427	4.3991
Minuto	Factores Multiplicadores			
1	0.9957	1.0010	2.4535	0.9966
2	0.9991	0.9986	2.4428	0.9968
3	0.9973	0.9958	2.4465	0.9968
4	0.9977	0.9991	2.4506	0.9966
5	0.9980	0.9995	2.4393	0.9965
6	0.9953	0.9952	2.4504	0.9966
7	0.9967	0.9973	2.4417	0.9964
8	0.9987	0.9964	2.4488	0.9965
9	0.9959	0.9971	2.4412	0.9965
10	1.0004	0.9971	2.4388	0.9966
11	0.9987	0.9956	2.4535	0.9965
12	0.9976	0.9989	2.4547	0.9965
13	0.9978	1.0014	2.4437	0.9966
14	0.9985	0.9979	2.4408	0.9966
15	0.9967	0.9983	0.7882	0.9964
16	0.9997	0.9989	0.0475	1.0025
17	1.0016	1.0030	0.0507	1.0027
18	0.9996	0.9969	0.0424	1.0024
19	1.0039	1.0037	0.0394	1.0026
20	1.0013	0.9989	0.0406	1.0022

21	1.0014	1.0019	0.0456	1.0026
22	1.0015	1.0050	0.0466	1.0028
23	1.0005	1.0002	0.0453	1.0023
24	0.9998	1.0032	0.0468	1.0026
25	1.0035	1.0007	0.0460	1.0022
26	1.0040	1.0024	0.0423	1.0026
27	1.0014	1.0073	0.0474	1.0025
28	1.0045	1.0041	0.0424	1.0025
29	1.0016	0.9995	0.0419	1.0023
30	1.0011	1.0000	0.0503	1.0023
31	1.0028	1.0037	0.0488	1.0022
32	1.0026	1.0007	0.0411	1.0025
33	1.0008	1.0047	0.0460	1.0026
34	1.0023	0.9982	0.0523	1.0022
35	1.0008	0.9981	0.0440	1.0026
36	1.0013	0.9996	0.0580	1.0024