



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN INGENIERIA
INGENIERIA CIVIL-HIDRAULICA

APLICACIÓN DE PROCESOS DE DECISION DE MARKOV A LA
CALIBRACION DE MODELOS DE SIMULACIÓN DE REDES
HIDRÁULICAS.

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERIA

PRESENTA

ANGEL ANZURES ORTIZ

TUTOR PRINCIPAL
DR. CARLOS EDUARDO MARIANO ROMERO
FACULTAD DE INGENIERIA UNAM

MEXICO, D.F. JUNIO 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M.I. VICTOR JAVIER BOURGUETT ORTÍZ.

Secretario: DR. ALCOCER YAMANAKA VICTOR HUGO

1er. Vocal: DR. MARIANO ROMERO CARLOS EDUARDO.

2do. Vocal: DR. ARROYO CORREA VICTOR.

3er. Vocal: M.I. RODRIGUEZ VARELA JOSÉ MANUEL.

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

JIUTEPEC, MORELOS. UNAM, CAMPUS MORELOS.

TUTOR DE TESIS:

DR. MARIANO ROMERO CARLOS EDUARDO.

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Nacional de México, por haberme dado la oportunidad de obtener estudios de posgrado, en el Campus, Morelos (Depfi), y a los profesores que imparten clases en la misma: Dr. Ariosto Aguilar, M.I. Carlos Gutiérrez, M.I. Juan Carlos Valencia, Dr. Nahúm Villanueva, M.I. Edmundo Pedroza, Dr. Javier Aparicio, Dr. Hebert Saucedo, Dr. Pedro Guido, Dr. Joselina y M.I. José Verduzco por los conocimientos transmitidos en sus cátedras, me han sido de utilidad para conocer más sobre el área de hidráulica.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por otorgarme una beca de estudio durante la maestría y darme su confianza para llevar a término la misma.

A mis sinodales M.I. Víctor Bourguett, Dr. Víctor Alcocer, Dr. Víctor Arroyo y al M.I. Rodríguez Varela José Manuel, por su valioso tiempo dedicado a este trabajo y sus valiosas aportaciones.

Al Dr. Carlos Eduardo Mariano Romero por su tiempo para dirigir la presente tesis de maestría.

A la Lic. Olga Guzmán, Lic. Omar y M.I. Aracely por su ayuda brindada en tramites administrativos durante mi estancia en la Depfi.

Al Sr. Moisés Salgado por su cordial ayuda en construir el modelo experimental.

DEDICATORIA

A mis padres por inculcarme el deseo de superarse profesionalmente
y ser mejor persona cada día.



“La ciencia sin conciencia es la ruina del hombre”

Francois Rabelais

“La ingeniería es el arte de dirigir las fuentes de poder de la naturaleza para el uso y conveniencia del hombre”

Thomas Tredgold.

“Un problema es la discrepancia entre lo que es y lo que debe ser”

Anónimo.

“No conocer la causa de los problemas es la causa de los problemas”.

Anónimo.

“En cuanto al agua; vale más la experiencia que la razón”

Leonardo da Vinci

“Mide tu pensamiento, se convierte en palabra, tu palabra se convierte en acto, tu acto se convierte en hábito y tu hábito en carácter. Mide tu carácter, se convierte en tu destino”.

Anónimo



APLICACIÓN DE PROCESOS DE DECISIÓN DE MARKOV A LA CALIBRACIÓN DE MODELOS DE SIMULACIÓN DE REDES HIDRÁULICAS.

Resumen

La calibración de modelos de simulación de sistemas de distribución de agua (SDA) que se abordó consiste en ajustar los parámetros de rugosidad y demanda nodal para hacer que el modelo de simulación se aproxime al comportamiento del SDA real. El problema es desde el punto de vista matemático un problema inverso no lineal (i.e. mal planteado e indeterminado), generalmente hay más incógnitas que ecuaciones disponibles para resolver el problema. Además, no hay un criterio estándar para definir cuando el modelo de simulación después de ajustarse tiene un comportamiento aceptable.

Se desarrollaron programas de calibración usando el método de procesos de decisión de Markov (PDM) y el método de diseño de tubería “método de gradiente” para encontrar una solución óptima de los parámetros desconocidos en una tubería simple y una red hidráulica de uno y dos circuitos.

Se logró determinar la solución óptima de parámetros desconocidos en una tubería simple, sin embargo, en la red hidráulica de dos circuitos se obtuvo una solución de calibración aceptable para el gasto en 1 de cada 8 soluciones del programa de calibración. Cuando las válvulas de esfera se cierran a 2/3 en uno y dos circuitos, ya no se pudo estimar los valores reales de coeficientes de rugosidad y demanda nodal.

Palabras clave: Modelos de simulación, Procesos de decisión de Markov, calibración, estimación de parámetros.



APLICACION OF MARKOV DECISION PROCESSES TO CALIBRATION OF SIMULATION MODELS OF HYDRAULIC NETWORKS

SUMMARY

The calibration of hydraulic networks is to adjust unknown parameters of the water distribution system to make the simulation model approximates the behavior of real water mains. The problem is from the overview an ill-posed mathematical indeterminate problem, there are almost always more unknowns than available equations to solve the problem. In addition, there is a standard criterion for defining when the simulation model is already calibrated.

Calibration programs were developed using the method of Markov decision processes and piping design method “gradient method” to find an optimal solution of the unknown parameters in a simple pipe network and hydraulic loops one and two.

It was possible to determine the optimal solution of unknown parameters in a single pipe, however, in the hydraulic system of two loops calibration solution acceptable to spending 1 in 8 calibration solutions program was obtained. When the ball valves are closed 2/3 single and dual loops, it could not estimate the actual values of roughness coefficients and nodal demand.



ESTRUCTURA DEL ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	iii
SUMMARY	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE CUADROS	vi
I. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	xiv
1.1 Objetivo General:	xiv
1.1.1 Objetivos Particulares:.....	xiv
1.2 Hipótesis.....	xiv
II. INTRODUCCIÓN.....	1
III. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE CALIBRACIÓN HIDRÁULICA.....	3
IV. MODELOS DE SIMULACIÓN DE REDES HIDRÁULICAS.....	13
4.1 Modelos Hidráulicos	13
4.2 Ecuaciones fundamentales en las redes de distribución de agua.....	18
4.2.2 Ecuación de la energía.....	20
4.2.3 Ecuaciones de pérdida de carga por fricción.....	21
4.3 Configuración de redes de distribución.....	25
4.4 Métodos para resolver redes de distribución.....	27
4.4.1 Método de Hardy Cross.....	29
4.4.2 Método del Algoritmo de Gradiente.....	31
4.6.1 Estado del arte de la calibración de modelos de simulación de redes hidráulicas.....	41
4.6.1.1 Recolección de datos del sistema de distribución de agua.....	56
4.6.1.2 Criterios para la calibración del modelo de simulación hidráulica.....	66
4.6.1.2.1 Validez del modelo.....	68



4.6.1.3 Alternativas de solución del problema de calibración.....	71
4.7 Conclusiones sobre la bibliografía	84
V. PROCESOS DE DECISIÓN DE MARKOV.....	86
5.1 Teoría de los procesos de decisión de Markov (PDM).	86
VI. MATERIALES Y MÉTODOS	95
VII. RESULTADOS.....	98
7.1 Caso de estudio No. 1. Calibración de modelo de simulación de tramo simple	98
7.1.1 Caso 1: Calibración en tubería simple, con 1 sola lectura de presión y gasto observado.....	98
7.1.2 Caso 2: Resultados de calibración en modelo de simulación de tubería simple.....	104
7.1.2.1. Resultados de combinación uno.	105
7.1.2.2 Resultados de combinación dos.....	112
7.1.2.3 Resultados de Combinación tres.	120
7.1.2.4 Resultados de Combinación cuatro.	126
7.1.2.5 Resultados de combinación cinco.	134
7.1.2 Caso 3: Calibración de tubería simple con 3 coeficientes de rugosidad.	141
7.2 Caso de estudio No.2: Calibración hidráulica de tubería de un circuito	144
7.2.1 Caso No.1: Problema un circuito de literatura con 4 incógnitas.	144
7.2.2 Caso No. 2: Calibración de un circuito con 6 incógnitas.	148
7.2.3 Caso No. 3: Calibración de un circuito con 10 incógnitas.	151
7.2.4 Caso No. 4: Calibración de un circuito en modelo experimental.....	154
7.3 Caso de estudio 3: Calibración de modelo de simulación hidráulica de 2 circuitos	180
7.3.1 Caso No. 1.- Calibración de 2 circuitos de ejemplo de literatura.....	183
7.3.1.1 Calibración de 2 circuitos considerando como parámetros desconocidos los coeficientes de rugosidad.....	185
7.3.1.2 Calibración de coeficientes de rugosidad y demanda de ejemplo de literatura.....	190
7.3.2 Caso No. 2.- Calibración de Modelo simulación de red hidráulica experimental usando dos circuitos.	197





7.3.2.1 Calibración de modelo simulación ajustando los coeficientes de rugosidad de Hazen-Williams y demanda.....	200
7.4 Resumen de resultados	223
VIII. CONCLUSIONES	230
IX. TRABAJO FUTURO	233
X. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	234



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Proceso de abstracción de un sistema físico real a una representación matemática..... 3

Figura 3.2.- Discrepancias entre el modelo de simulación hidráulico y los datos de campo medidos en el punto X, tomados en la fecha Y. 4

Figura 3.3 Formulación de problema de calibración de tubería simple. 9

Figura 3.4.- Pasos en la formulación de un modelo de optimización para calibrar redes hidráulicas..... 10

Figura 4.1. Aplicación de modelos a problemas de diseño 15

Figura 4.2 Configuración de una red abierta o ramificada 26

Figura 4.3 Configuración de redes cerradas 26

Fuente: Elaboración propia..... 26

Figura 4.4 Segunda ley de Kirchoff 28

Figura 4.5 Sistema de distribución de agua en la ciudad de México. Hay miles de parámetros desconocidos. 37

Figura 4.6 Calibraciones de redes de distribución en 7 casos de estudio en los EUA. 47

Figura 5.1 Interacción Agente-Ambiente en aprendizaje por refuerzo. 89

Figura 5.2.-Diagrama de apoyo para Q-learning..... 92

Figura 5.3 Proceso de selección de variables 94

Figura 6.1.- Plano Unifilar de modelo experimental de red de distribución de agua..... 95

Figura 6.2.- Proceso de construcción de modelo experimental..... 97

Figura 6.3 Medidor de Caudal Electromagnético..... 97

Figura 7.1.1 Calibración de modelo de simulación hidráulico (CMSH) de tubería simple. 99

Figura 7.1.2 Modelo de simulación de tubería simple, sin calibrar..... 100

Figura 7.1.3 Gráfica para la calibración hidráulica de coeficiente de rugosidad de tubería simple. 101

Figura 7.1.4 Diagrama de Flujo de Calibración de Tubería simple 102

Figura 7.1.5 Esquema del cierre de las válvulas de esfera. 104

Figura 7.1.7 Tubería simple, en modelo experimental..... 106

Figura 7.1.8 Combinación Uno: Comparación de Velocidad observada (i.e. medida) y en el modelo de simulación de epanet2..... 108

Figura 7.1.9 Comparación, diferencias entre las presiones observadas (PR1 y PR2), las presiones del modelo de simulación (PMS1 y PMS2) y las presiones calibradas (PMC1 y PMC2) después de realizar el ajuste de rugosidad. 110

Figura 7.1.10 Comparación de discrepancias antes (RMS1 y RMS2) y después de la calibración (RMC1 y RMC2). 112

Figura 7.1.11 Combinación Dos: Comparación de Velocidad medida y velocidad en modelo de simulación..... 114

Figura 7.1.12 Combinación Dos: Comparación, diferencias entre las presiones observadas (PR1 y PR2), las presiones del modelo de simulación (PMS1 y PMS2) y las presiones calibradas después de realizar el ajuste de rugosidad (PMC1 y PMC2). 117



Figura 7.1.13 Comparación combinación 2, residuos antes (RMS1 y RMS2) y después de la calibración (RMC1 y RMC2), con respecto a las lecturas observadas de presión el punto 1 y 2 del tramo en estudio.	119
Figura 7.1.14 Combinación Tres: Comparación, velocidades observada y del modelo simulado.	122
Figura 7.1.15 Comparación, diferencias entre las presiones observadas (PR1 y PR2), las presiones del modelo de simulación (PMS1 y PMS2) y las presiones calibradas después de realizar el ajuste de rugosidad (PMC1 y PMC2).	124
Figura 7.1.16 Comparación Combinación 3, residuos antes (RMS1 y RMS2) y después de la calibración (RMC1 y RMC2).	126
Figura 7.1.17 Combinación Cuatro: Comparación, velocidad observada y velocidad en el modelo simulado.	128
Figura 7.1.18 Comparación combinación 4, diferencias entre las presiones observadas (PR1 y PR2), las presiones del modelo de simulación (PMS1 y PMS2) y las presiones calibradas después de realizar el ajuste de rugosidad (PMC1 y PMC2).	131
Figura 7.1.19 Comparación combinación 4, diferencias de errores antes (RMS1 y RMS2) y después de la calibración (RMC1 y RMC2).	133
Figura 7.1.20 Combinación Cinco: Comparación, velocidad observada y velocidad del modelo simulado.	136
Figura 7.1.21 Comparación combinación 5, diferencias entre las presiones observadas (PR1 y PR2), las presiones del modelo de simulación (PMS1 y PMS2) y las presiones calibradas después de realizar el ajuste de rugosidad (PMC1 y PMC2).	138
Figura 7.1.22 Comparación combinación 5, diferencias antes (RMS1 y RMS2) y después de la calibración (RMC1 y RMC2).	140
Figura 7.1.23 Esquema de tramo en el análisis de CMSH.	141
Figura 7.1.24 Espacio de exploración de las soluciones para 3 coeficientes de rugosidad, problema de calibración de tubería simple.	142
Figura 7.2.1 Esquema del problema de calibración de un circuito.	144
Figura 7.2.2.-Un circuito de literatura con 6 incógnitas.	148
Figura 7.2.3. Problema de CMSH, un circuito con 10 incógnitas.	151
Figura 7.2.4 Formulación de problema de calibración de 1 circuito en un modelo de simulación.	155
Figura 7.2.5 Modelo de simulación sin calibrar de un circuito (las tuberías en las que circula agua, están en color azul cielo, marino y amarillo.	156
Figura 7.2.6 Diagrama de flujo para calibración en un circuito.	158
Figura 7.2.7.- Prueba 1: Discrepancias entre demanda medida y demanda de modelo calibrado, en red de un circuito.	161
Figura 7.2.8 Prueba 1: Discrepancias entre gasto medido y gasto del modelo calibrado, red de un circuito.	162
Figura 7.2.9 Prueba 4: Discrepancias entre demanda medida y modelo calibrado, para la red de un circuito.	177



Figura 7.2.10 Prueba 4: Discrepancias entre gasto medido y gasto de modelo simulado calibrado para red de un circuito.	177
Figura 7.3.1 Diagrama de flujo para CSMH de dos circuitos.	182
Figura 7.3.2 Red hidráulica ejemplo para calibración de coeficientes de rugosidad y demanda.	183
Figura 7.3.3 Calibración de los coeficientes de rugosidad para 2 circuitos	185
Figura 7.3.4 Ejemplo de literatura de calibración de dos circuitos considerando como parámetros de ajuste a la rugosidad y la demanda.	190
Figura 7.3.5 Modelo de simulación sin calibrar de 2 circuitos (las tuberías en las que circula agua, están en color azul marino, amarillo y verde.	197
Figura 7.3.6 Formulación de problema de calibración de 2 circuitos en modelo experimental con demandas desconocidas.	198
Figura 7.3.7 Problema con 18 incógnitas y 7 ecuaciones disponibles.	200
Figura 7.3.8 Prueba 1: Discrepancias de la demanda nodal en red de dos circuitos.	203
Figura 7.3.9 Discrepancias de gasto a la entrada de la red de dos circuitos.....	204
Figura 7.3.10.- Discrepancias de demanda nodal de la prueba 4, red de dos circuitos.	220
Figura 7.3.11.-Discrepancias entre el gasto medido y gasto del modelo calibrado y gasto de diseño.....	220



ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 7.1.1 Combinación Uno: Presiones observada o reales, del modelo de simulación antes de calibrar y después de calibrar.	106
Cuadro 7.1.2 Resultados de determinación de valores de rugosidad para tramo de tubería simple.	109
Cuadro 7.1.3.-Diferencias del modelos sin calibrar y calibrado.	111
Cuadro 7.1.4 Combinación dos: Datos de velocidades observadas y presiones medidas. .	113
Cuadro 7.1.5 Resultados de determinar los coeficientes de rugosidad actuales del tramo de tubería simple en estudio.	114
Cuadro 7.1.6 Presiones en el modelo de simulación antes y después de calibrar.	116
Cuadro 7.1.7 Porcentajes de residuos del modelo de simulación antes y después de calibrar.	118
Cuadro 7.1.8 Combinación Tres: Datos de velocidades y presiones observadas, presiones en los modelos de simulación antes y después de calibrar.	120
Cuadro 7.1.9 Resultados de determinar los coeficientes de rugosidad actuales del tramo de tubería simple en estudio.	123
Cuadro 7.1.10 Residuos en los modelos simulados antes y después de calibrar.	125
Cuadro 7.1.11 Combinación Cuatro: Datos de velocidades y presiones observadas.	127
Cuadro 7.1.12 Resultados de determinar los coeficientes de rugosidad actuales del tramo de tubería simple en estudio.	129
Cuadro 7.1.13 Presiones en el modelo de simulación antes y después de calibrar.	130
Cuadro 7.1.14 Residuales de los modelos de simulación antes y después de calibrar.	132
Cuadro 7.1.15 Combinación Cinco: Datos de velocidades y presiones observadas, presiones de los modelos de simulación antes y después de calibrar.	134
Cuadro 7.1.16 Resultados de los coeficientes de rugosidad de Hazen-Williams actuales del tramo de tubería simple en estudio.	137
Cuadro 7.1.17 Residuos entre el modelo experimental y el modelo simulado antes y después de calibrar.	139
Cuadro 7.1.18 Calibración de tubería simple con 3 coeficientes de rugosidad.	143
Cuadro 7.2.1 Resultados de parámetros de coeficiente de rugosidad y gasto en tubería en red hidráulica de un circuito.	147
Cuadro 7.2.2 Resultados de calibración de un circuito con 6 incógnitas.	149
Cuadro 7.2.3 Resultados de calibración de un circuito con 6 incógnitas.	150
Cuadro 7.2.4. Resultados de calibración de un circuito con 10 incógnitas.	152
Cuadro 7.2.5. Resultados de calibración de un circuito con 10 incógnitas.	153
Cuadro 7.2.6.-Solución del problema de diseño.	158
Cuadro 7.2.7 Prueba 1.- Lecturas para calibración de un circuito con válvulas esfera completamente abiertas.	159
Cuadro 7.2.8a.- Carga de presión (m) para prueba 1, de red de un circuito.	160



Cuadro 7.2.9.- Prueba 2: Lecturas de gasto, presión en punto1 y demanda nodal en punto 4.	165
Cuadro 7.2.10a.- Carga de presión (m) para prueba 2, de red de un circuito.....	165
Cuadro 7.2.11.- Prueba 3: Lecturas de gasto, presión en punto1 y demanda nodal en punto 4.	170
Cuadro 7.2.12a.- Carga de presión (m) para prueba 2, de red de un circuito.....	170
Cuadro 7.2.13.- Prueba 4: Lecturas de gasto, presión en punto 1 y demanda nodal en punto 4.	175
Cuadro 7.3.1.-Solución del problema de diseño.....	184
Cuadro 7.3.2 Ejecución 1: Determinación de parámetros de ajuste de Coeficientes de Rugosidad.....	186
Cuadro 7.3.3 Ejecución 2: Determinación de parámetros de ajuste de Coeficientes de Rugosidad.....	187
Cuadro 7.3.4 Ejecución 2: Determinación de parámetros de ajuste de Coeficientes de Rugosidad.....	188
Cuadro 7.3.5 Ejecución 3: Determinación de parámetros de ajuste de Coeficientes de Rugosidad.....	189
Cuadro 7.3.6 Ejecución 1: Determinación de parámetros de ajuste.....	191
Cuadro 7.3.7 Ejecución 1: Determinación de parámetros de ajuste.....	192
Cuadro 7.3.9 Ejecución 3: Determinación de parámetros de ajuste.....	195
Cuadro 7.3.10 Ejecución 3: Determinación de parámetros de ajuste.....	196
Cuadro 7.3.11 Características geométricas de modelo de simulación.	199
Cuadro 7.3.12 Solución del problema de diseño hidráulico.....	199
Cuadro 7.3.13 Prueba 1: Lecturas de gasto y presión en nodo1, y demanda en nodo 4. ...	201
Cuadro 7.3.14a.- Cargas de presión en los nodos de la red de dos circuitos en m.....	201
Cuadro 7.3.15.- Prueba 2: Lecturas de gasto y presión en nodo1, y demanda en nodo 4. .	206
Cuadro 7.3.16a.- Carga de presión (m) en los nodos de la red de dos circuitos.....	206
Cuadro 7.3.17.- Prueba 3: Lecturas de gasto en la entrada del circuito, presiones en 1 y 4 y la demanda nodal en 4.	212
Cuadro 7.3.18a.- Carga de presión (m) en los nodos 2 al 6.....	213
Cuadro 7.3.19 Prueba 4.- Lecturas de gasto en la entrada del circuito, presiones en 1 y 4 y la demanda nodal en 4.	217
Cuadro 7.3.20a.-Carga de presión (m) para los nodos de la red de dos circuitos.	218
Cuadro 7.4.1 Resultados de calibración de tubería simple para modelo de simulación cuyo uso es de planeación a largo plazo.....	223
Cuadro 7.4.2 Solución óptima de problema de calibración de un circuito 4 incógnitas. ...	224
Cuadro 7.4.3 Solución óptima de problema de calibración de un circuito con 6 incógnitas.	225
Cuadro 7.4.4 Solución óptima de problema de calibración de un circuito con 6 incógnitas.	225
Cuadro 7.4.5 Solución óptima de problema de calibración de un circuito con 10 incógnitas.	225





Posgrado en Ingeniería

Cuadro 7.4.6 Solución óptima de problema de calibración de un circuito con 10 incógnitas.	225
Cuadro 7.4.7 Solución óptima de problema de calibración de un circuito con 10 incógnitas.	226
Cuadro 7.4.8 Solución óptima de problema de calibración de un circuito con 10 incógnitas.	226
Cuadro 7.4.9 Solución óptima de problema de calibración de red hidráulica de dos circuitos.	226
Cuadro 7.4.10 Solución óptima de problema de calibración de red hidráulica de dos circuitos.	228



I. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.

1.1 Objetivo General:

Diseñar y aplicar algoritmos basados en procesos de decisión Markovianos (PDM) a problemas de calibración de modelos de simulación de redes de distribución de agua potable.

1.1.1 Objetivos Particulares:

- 1.- Crear un algoritmo original basado en PDM para la búsqueda de solución óptima de parámetros de calibración en redes de distribución de agua potable.
- 2.- Construir un modelo experimental para probar el algoritmo desarrollado.
- 3.- Realizar la calibración del modelo de simulación en flujo permanente.

1.2 Hipótesis

Ho: Se pueden identificar los parámetros a ajustar en la calibración con el método de optimización de PDM para 2 circuitos.

H1: No se pueden identificar los parámetros a ajustar en la calibración con el método de optimización de PDM para 2 circuitos.



II. INTRODUCCIÓN

Invertir en el abastecimiento de agua y saneamiento de las ciudades y comunidades contribuye al crecimiento económico de las mismas y en la salud de las personas.

De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud en promedio de cada dólar invertido en proveer agua limpia y saneamiento se tiene un retorno económico de 3 a 34 dólares dependiendo de la región y de la tecnología disponible, (UNPD (2006) y WHO (2004)).

Los modelos hidráulicos son una herramienta de diagnóstico del funcionamiento de una red de distribución de agua y sirven para: detectar zonas con problemas, modelar hipótesis de cambios de operación y mantenimiento, probar métodos de operación óptima de la presión y caudal (López, López, Martínez y Pérez, 2005).

Walski *et al.* (2003) y Wu & Walski (2005), coinciden en que la precisión de un modelo hidráulico depende de qué tan bien se haya hecho su calibración, por tanto debe realizarse un análisis de calibración antes de que el modelo se utilice para propósitos de toma de decisiones.

En el presente trabajo se desarrolla un algoritmo basado en procesos de decisión de Markov (PDM) para encontrar valores óptimos de los parámetros de las redes hidráulicas, presiones, gastos, coeficientes de rugosidad, de un espacio de solución finito. El algoritmo se emplea para identificar las soluciones que satisfacen el problema de optimización planteado.

Las condiciones de operación de las redes hidráulicas son dinámicas, cambian con el tiempo, y también la tubería se deteriora por su propio uso, los coeficientes de rugosidad de la tubería no son estáticos. Esto ocasiona que el problema sea altamente no lineal y multimodal.



Aunque se hayan tomado algunos atributos del modelo real y se hayan introducido en la simulación hidráulica, el diseñador no puede decir con certeza que el modelo sea una representación matemática precisa del sistema (Walski *et al.*, 2003).

La calidad y cantidad de datos de presiones y caudales son de vital importancia para lograr una buena precisión en la calibración. Desde finales de la década de los 60's se abordado el problema de calibración hidráulica en redes hipotéticas y en redes reales utilizando desde métodos analíticos hasta métodos de optimización, sin embargo, no es un problema que esté resuelto en la actualidad.

Por lo anterior, se construyó un modelo experimental de una red hidráulica para determinar si es posible conocer el valor real de las variables desconocidas o parámetros que causan la discrepancia entre el comportamiento de éste modelo y el modelo de simulación, y cuantificar la cantidad de parámetros ajustados.



III. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE CALIBRACIÓN HIDRÁULICA.

3.1 Representación del Problema

La modelación de un sistema natural consiste en simular la respuesta del sistema a cambios en las fuerzas motrices. Para implementar esas simulaciones, un modelo depende de una abstracción matemática del sistema bajo estudio, con las propiedades internas del sistema implícitas en los parámetros y variables, además las fuerzas motrices son vistas como datos de entrada. Una ilustración de esta estructura se puede ver en la figura 3.1 (Dietrich, 2001).

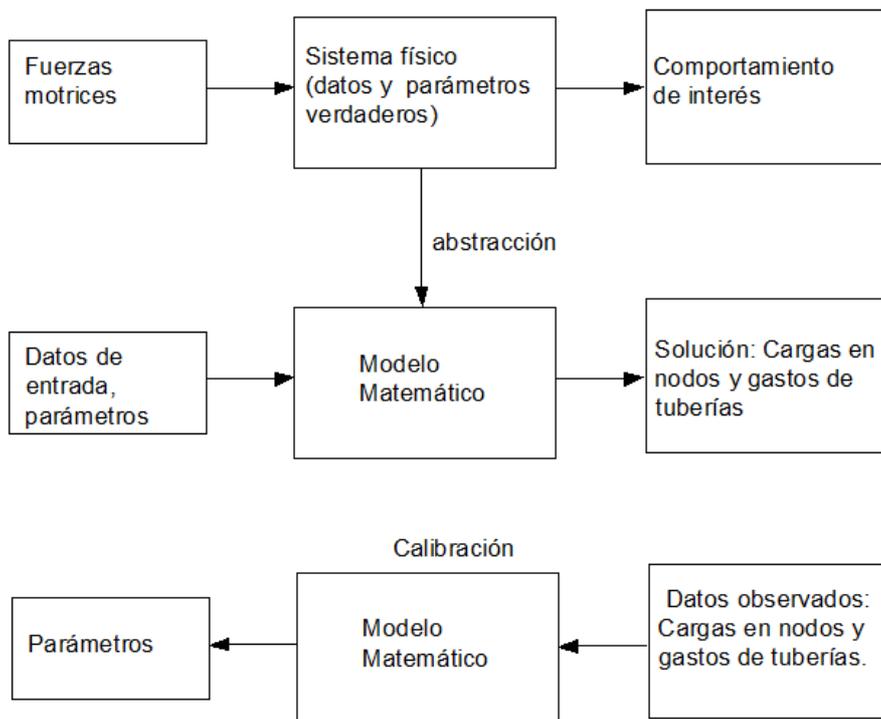


Figura 3.1 Proceso de abstracción de un sistema físico real a una representación matemática.

Fuente: Elaboración propia basado en esquema de Dietrich (2001).



La calibración hidráulica nace de la preocupación de saber si el modelo de simulación hidráulica (MSH) representa la realidad o se aproxima a ella, debido a que con el modelo se toman decisiones de inversión millonarias en la ampliación, operación ó rehabilitación de sistemas de distribución de agua potable, ver figura 3.2.

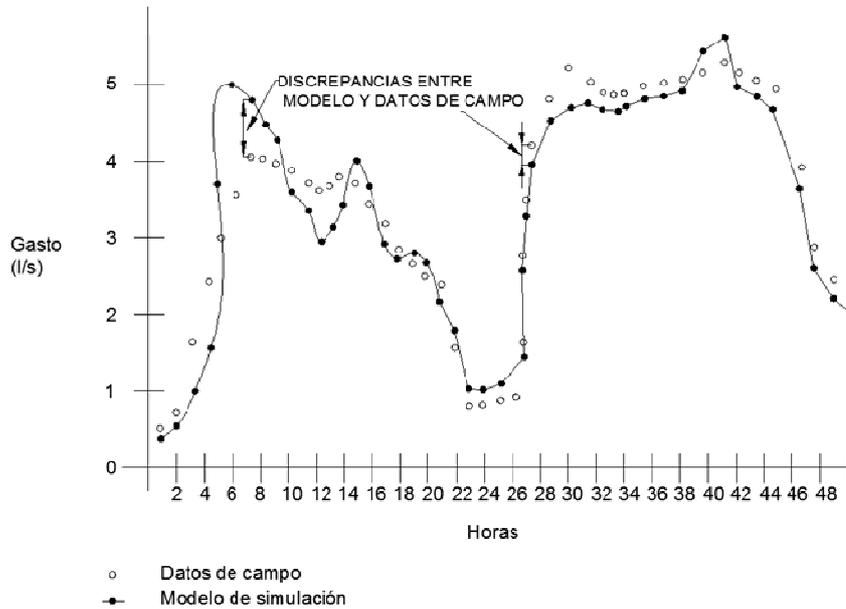


Figura 3.2.-
 Discrepancias

entre el modelo de simulación hidráulico y los datos de campo medidos en el punto X, tomados en la fecha Y.

Fuente: Elaboración propia.

El problema no tiene solución analítica, actualmente es inviable técnica y económicamente la recolección de caudales en todas las tuberías y las presiones en todos los nodos y accesorios de la red. El costo de instalar un medidor de gasto o presión, y recolectar los datos, limita el número de medidores que puede ser usado, Bargiela y Hainsworth (1989).



Hay miles de parámetros desconocidos en un típico sistema de agua urbano y solo un pequeño número de mediciones directas. Esto crea un problema mal planteado e indeterminado el cual lleva a que las soluciones sean muchas o infinitas. Esto puede ser superado agrupando los parámetros desconocidos. La agrupación puede basarse sobre el hecho de asumir que los consumidores de agua en una área dada del sistema tendrá las mismas características y no necesitaran de grandes ajustes para lograr la calibración (Wu *et al.* 2002; Walski *et al.* 2008).

El problema puede clasificarse desde el punto de vista matemático como un problema inverso no lineal (mal planteado, no cumple con los postulados de Hadamard). Entre las técnicas de regularización de problemas mal planteados se encuentra las técnicas de optimización, León (2010).

Tarantola and Valette (1982), expresan que los problemas inversos tienen una dificultad esencial, no tienen soluciones únicas. Las dos principales razones son: En algunos problemas proviene del hecho de que los datos son discretos, en otras de no tener una cantidad suficiente de información que describan el sistema físico.

Tarantola (2005) expresa que los modelos de simulación resuelven el problema hacia delante o problema directo, predicen los valores libres de errores de los datos observados (d) que corresponde a un modelo dado, la predicción teórica se denota:

$$d = G(m)$$

ó



$$\begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ d_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{22} \\ \vdots & \vdots \\ g_{1n} & g_{2n} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \\ \vdots \\ m_n \end{bmatrix}$$

Donde:

G= Operador que describe la relación explícita entre los datos observados (d) y los parámetros del modelo (m), es decir el modelo matemático del sistema físico bajo estudio.

El objetivo del problema inverso es encontrar el mejor modelo (m) tal que:

$$m = G^{-1} * d$$

o

$$\begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \\ \vdots \\ m_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{22} \\ \vdots & \vdots \\ g_{1n} & g_{2n} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ d_n \end{bmatrix}$$

Para resolver los parámetros del modelo debemos de ser capaces de invertir la matriz G para convertir directamente las mediciones en parámetros del modelo.

Sin embargo, G casi nunca es invertible. Esto sucede porque no hay garantía de tener información suficiente para determinar la solución única con las ecuaciones disponibles, a menos que logremos tener mediciones independientes.

De acuerdo a Tarantola (2005), los valores predichos por el modelo de simulación no pueden, en general, ser idénticos a los valores observados por dos razones: las incertidumbres de las mediciones y las imperfecciones en la modelación.



Altman y Boulos (1995) expresan que en el problema hacia delante el comportamiento del sistema hidráulico (i.e. el gasto en cada tubería, la presión en cada nodo y las cargas de operación de las bombas) se determina por especificar las características del sistema de tuberías también como las demandas y las condiciones de operación. En el problema inverso, las características del sistema de tuberías, las demandas nodales, las fugas entre otros son tratadas como variables y son determinados para que coincidan con los valores de flujo ó presión del sistema de distribución de agua real.

En la figura 3.2 se muestra la complejidad que se enfrenta al calibrar una tubería simple en con el supuesto en A, B y C que son de diferente material y edad. En una tubería simple de 3 tramos, se quiere conocer los valores reales de coeficientes de rugosidad, demanda nodal, gasto de las tuberías y la presión en los nodos y tramos. El problema real, tiene 9 incógnitas y 5 ecuaciones, el problema es indeterminado. Si se desea obtener una solución única se tiene que hacer una simplificación del problema hasta D.

En la figura 3.3 se pueden formular los siguientes vectores de variables desconocidas y conocidas en el problema real.

Variables conocidas

Q_{total} = Gasto que entra en la red hidráulica en lps.

$P = [p_1, p_4]$ = Presiones en el punto 1 y 4 en kg/cm^2

Variables desconocidas

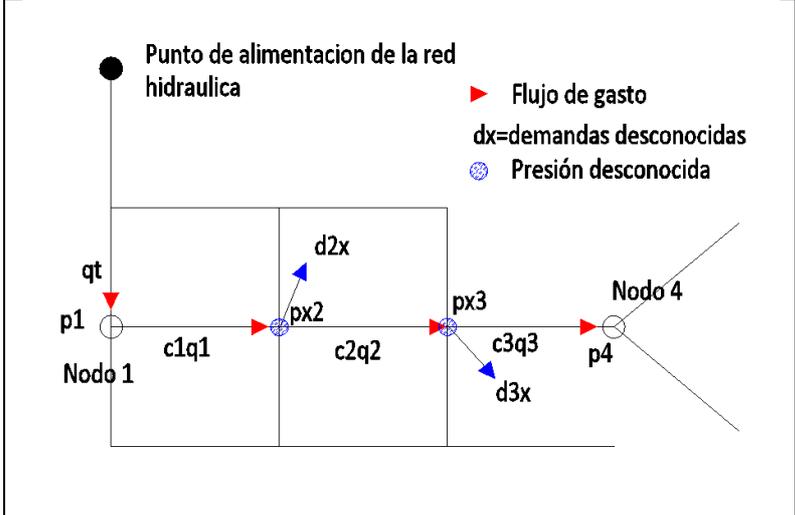
$C_x = [c_{1x}, c_{2x}, c_{3x}]$ = Coeficientes de rugosidad en los tramos 1,2 y 3 (adimensional).

$Q_x = [q_{2x}, q_{3x}]$ = Gastos en las tuberías 1,2 y 3 en lps.

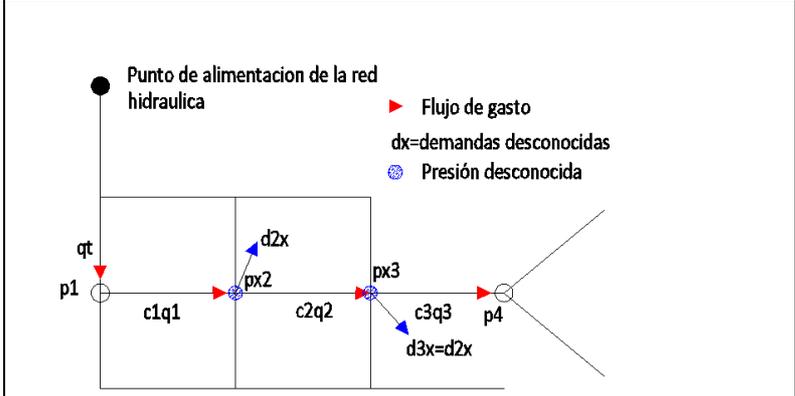
$P_x = [p_{x2}, p_{x3}]$ = Presiones en 2 y 3 en kg/cm^2

$d_x = [d_{2x}, d_{3x}]$ = Demandas en nodos 2 y 3 en lps.





A) Problema Original: 9 **incógnitas** ($c_1, px_2, d_{2x}, c_2, q_2, px_3, c_3, q_3, d_{3x}$)
 Datos medidos: qt, p_1, p_4 .
 No. de ecuaciones: 5 (3 Ecuaciones de la energía y 2 de la masa).



B) Simplificación 1: $d_{2x}=d_{3x}$.
 8 **incógnitas**
 Datos medidos: qt, p_1, p_4 .
 No. de ecuaciones: 5 (3 Ecuación de la energía y 2 de la masa).



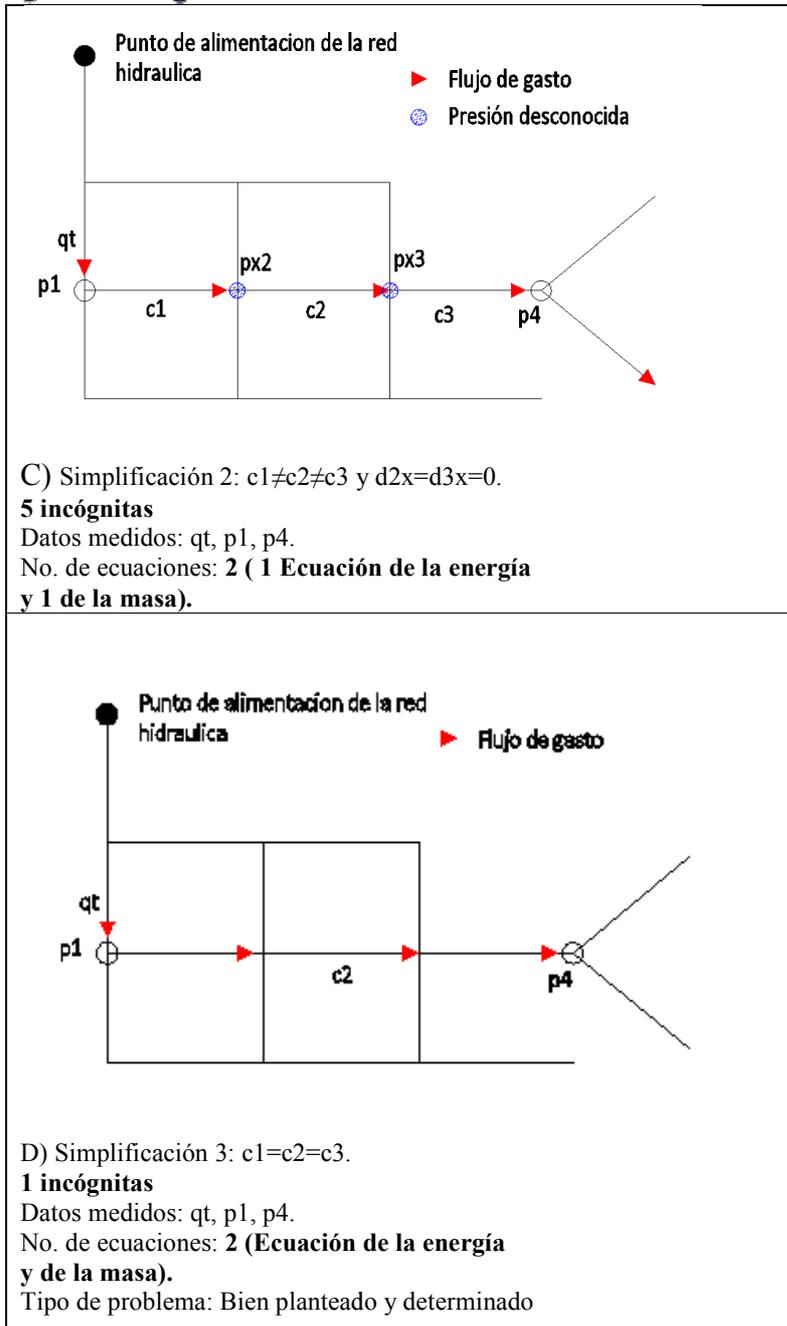


Figura 3.3 Formulación de problema de calibración de tubería simple.
 Fuente: Elaboración propia



El problema lo representamos con un proceso de optimización para la calibración hidráulica del modelo de simulación, debido a que es la técnica para regularizar un problema mal planteado.

Walski *et al.* (2003) comenta que el proceso de optimización involucra 3 pasos:

- 1) Seleccionar un conjunto de variables de decisión para describir las diferentes alternativas.
- 2) Seleccionar un objetivo o varios objetivos, expresados en términos de las variables de decisión, que busquen optimizar, minimizar o maximizar la función objetivo.
- 3) Determinar un conjunto de restricciones, que se satisfagan para cualquier solución aceptable, expresadas en términos de variables de decisión.

En la siguiente figura 3.4 se esquematiza lo anteriormente expresado

Figura 3.4.- Pasos en la formulación de un modelo de optimización para calibrar redes hidráulicas.

Fuente: Elaboración propia basado en esquema de optimización de Walski *et al.* (2003).



3.2 Solución del problema

Para el caso particular de este trabajo de tesis, el problema consiste en lograr que los resultados del modelo de simulación hidráulico se ajusten a los datos de campo o se aproximen, modificando valores de parámetros de entrada del modelo como la demanda nodal y la rugosidad.

Las funciones objetivo para determinar la correspondencia entre los valores de gasto ó presión del modelo de simulación y los valores medidos o reales para el iésimo nodo del sistema se cuantifican a través de:

Función objetivo de error para la presión:

$$\min: f_1 = \sum_{i=1}^N [h_i^{obs}(t) - h_i^{cal}(t)]^2 \quad (3.1)$$

Función objetivo de error para el gasto:

$$\min: f_2 = \sum_{i=1}^N [Q_i^{obs}(t) - Q_i^{cal}(t)]^2 \quad (3.2)$$

Función objetivo de error de demanda nodal y presión:

$$\min: f_3 = \sum_{i=1}^N [h_i^{obs}(t) - h_i^{cal}(t)]^2 + [Q_i^{obs}(t) - Q_i^{cal}(t)]^2 \quad (3.3)$$

Donde:

$h_i^{obs}(t)$ = Carga observada en el tiempo t en el nodo i.

$h_i^{cal}(t)$ =Carga calculada en el tiempo t en el nodo i.

$Q_i^{obs}(t)$ =Gasto observado en el tiempo t en el nodo i.

$Q_i^{cal}(t)$ =Gasto calculado en el tiempo t en la tubería i.



Sujetas a las restricciones:

$C_{xi, t} \leq C, t \leq C_{yi, t}$: Límites superior e inferior de la rugosidad de la tubería i.

$Q_{xi} \leq Q, t \leq Q_{yi, t}$: Límites superior e inferior del gasto de la tubería i.

En la función objetivo No. 3.1, se asume que la fuente de error proviene de los coeficientes de rugosidad o factores de fricción, de acuerdo a la ecuación de pérdida de carga que esté usando. Los valores de los gastos que circulan en la tubería se consideran que están correctos al igual que las demás variables de calibración: fugas, pérdidas menores en accesorios de la tubería, estatus de las válvulas, niveles en los tanques de agua, curvas características de la bomba, longitudes de la tubería y propiedades del fluido.

En la función objetivo No. 3.2, se asume que la fuente de error proviene de las demandas nodales. Los coeficientes de rugosidad, fugas, pérdidas menores, estatus de las válvulas, niveles de tanques de agua, curvas características de la bomba, longitudes y propiedades del fluido se consideran correctos o conocidos.

En la función objetivo No. 3.3, se asume que la fuente de error proviene de las demandas nodales y de los coeficientes de rugosidad. Las variables: fugas, pérdidas menores, estatus de las válvulas, niveles en los tanques de agua, curvas características de la bomba, longitudes y propiedades del fluido se consideran conocidos o correcto



IV. MODELOS DE SIMULACIÓN DE REDES HIDRÁULICAS

4.1 Modelos Hidráulicos

Un modelo es un sistema que simula un objeto real llamado prototipo, mediante la entrada de cierta información que se procesa, y se emplea en el diseño y operación de obras o sistemas hidráulicos. Un modelo físico es una representación a escala del objeto real o prototipo, y cumple con ciertas condiciones matemáticas definidas.

Los modelos matemáticos o modelos de simulación son conjuntos de hipótesis y relaciones de las variables que describen un fenómeno físico, en la mayoría de las ocasiones no se pueden resolver las ecuaciones analíticamente sino por métodos aproximados mediante un proceso de computación (EIA, 2002).

Los modelos de simulación son necesarios cuando no es práctico que el sistema real sea sujeto de experimentación. Las simulaciones pueden ser usadas para predecir las respuestas de eventos bajo un amplio rango de condiciones sin interrumpir el sistema actual (Walski, *et al.*, 2003).

Maddox (1992) citado por Tarantola (1995) define un modelo como una descripción aproximada de la realidad y un buen modelo es aquel que es comprensible en el sentido de proporcionar una imagen de la mente y es calculable.

La demanda de mejoras continuas de la gestión técnica del sistema ha convertido el modelo de simulación en una necesidad para las compañías de agua, donde gracias a la simulación es posible mejorar la planeación y gestión técnica y económica del sistema. La intuición y experiencia del personal encargado de la gestión de la red es todavía fundamental pero no



es suficiente; Es necesario tener herramientas adecuadas que nos permitan no solo llevar a cabo análisis de tipo cualitativo sobre las repercusiones de los planes de acción adoptados, sino también análisis cuantitativos, Cabrera y García-Serra (1999).

De acuerdo a Alcocer y Tzachtkov (2007), las etapas en la elaboración de un modelo de simulación hidráulico para redes de distribución de agua potable (RDAP) son:

1. Identificar el uso del modelo.
2. Caracterizar los componentes de la red de distribución real.
3. Esqueletización de la red.
4. Análisis y asignación de consumos registrados.

Según Trifunovic (2006), el proceso de modelación consiste de los pasos siguientes:

1. Recolección de datos de entrada.
2. Esqueletización de la red.
3. Construcción del modelo.
4. Prueba del modelo.
5. Análisis del problema.

Walski *et al.* (2003), comenta que la simulación de RDAP tienen los siguientes propósitos:

1. Elaboración de plan maestro de largo alcance, incluyendo nuevos desarrollos habitacionales, y la rehabilitación de tuberías.
2. Estudios de protección contra incendios.
3. Investigaciones de calidad del agua.
4. Gestión de la Energía.



5. Diseño de sistemas de distribución.
6. En la toma de decisiones en la operación diaria, y en el entrenamiento de los operadores, hacer planes de emergencia, entre otros.

Walski *et al.* (2003), recomienda seguir el siguiente esquema para la aplicación de modelos de simulación a problemas de diseño y operación de redes hidráulicas, ver figura 4.1:

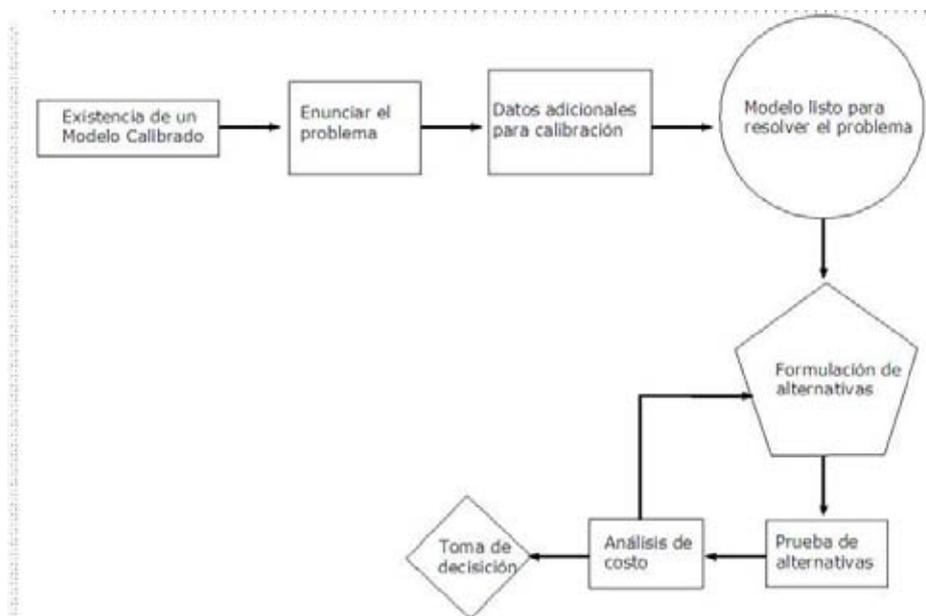


Figura 4.1. Aplicación de modelos a problemas de diseño
 Fuente: Walski *et al.* (2003)

Alcocer, Tzátchkov y García (2004) comentan que la dificultad en el planteamiento de un modelo se presenta en una red en servicio, debido a que los parámetros con los que se proyectó la red se modifican por el propio funcionamiento de la misma. Las circunstancias principales que producen la variación son:

- a) Modificación del diámetro y rugosidad original de las conducciones por depósito de sales, cal y óxidos, aumentando las pérdidas originales.



- b) Desconocimiento de las pérdidas menores producidas en las juntas, codos, tes, reducciones, etc...imposibles de cuantificar.
- c) Pérdidas de carga en las válvulas de cierre que, por condiciones de funcionamiento, no quedan perfectamente cerradas o abiertas durante alguna maniobra, y cuyo estado es difícil de saber.
- d) Desconocimiento de consumos, en un instante determinado, en la red debido a la aleatoriedad en la demanda. Los valores medios se pueden saber con base a facturaciones, pero su comportamiento a lo largo del día es difícil predecir.
- e) Desconocimiento en el valor y localización de las fugas y de los errores de los medidores que añaden incertidumbre a la asignación de cargas a la red.
- f) Las mediciones necesarias para el ajuste del modelo, están afectadas por errores en los aparatos de medida, en la lectura, y en las fluctuaciones de la variable que se mide.
- g) Errores en la determinación de la cota en los nudos de presión desconocidas. Por diferencia con el valor de la cota obtenemos la presión.



4.1.1 Ventajas y desventajas del uso de modelos de simulación

El modelar el comportamiento de un sistema de tuberías tiene las siguientes ventajas:

1. Costo: Construir y experimentar sobre modelos es a menudo mucho más barato que probar el prototipo.
2. Tiempo: La velocidad de respuesta del sistema de tubería del modelo puede ser más rápida y conveniente que el prototipo.
3. Seguridad: Los experimentos sobre un sistema real pueden ser peligrosos o arriesgados, mientras las pruebas sobre un modelo generalmente implican poco o ningún riesgo.
4. Facilidad de modificación: Las mejoras, ajustes o modificaciones en el diseño o en las normas de operación pueden incorporarse más fácilmente a un modelo, normalmente por simple modificación y edición del programa de ordenador.
5. Ayuda a la comunicación: Los modelos pueden facilitar la comunicación entre individuos y grupos identificando puntos de acuerdo, desacuerdo, malentendidos o resultados que requieran ser más claros.

Rossman (1999), señala otras ventajas como:

- La organización sistemática, edición y chequeo de los errores de los datos de entrada.
- Ayuda en la visualización de los resultados del modelo, gráficas de series de tiempo, histogramas, etc.
- Enlace a otro software, a base de datos, a programas de ayuda computacional (CAD), a hojas de cálculo y a sistemas de información geográficas (GIS).



- Habilidad para realizar otro tipo de análisis de redes, como el dimensionamiento óptimo de tuberías, programación óptima de equipos de bombeo, modelación de la calidad del agua, calibración automática.

Entre las desventajas podemos mencionar las siguientes:

1. El modelo no es la realidad.
2. El modelo debe ser suficientemente preciso para su objetivo propuesto.
3. El modelo es inexacto.

Los modelos de simulación de redes hidráulicas en las dos últimas décadas han cobrado mucha importancia, debido a que ayudan en la toma de decisiones en las inversiones de las mismas redes y a la existencia de una correlación entre la salud de las personas y la calidad del servicio de distribución de agua potable.

4.2 Ecuaciones fundamentales en las redes de distribución de agua

Las ecuaciones fundamentales están basadas en dos principios básicos de la mecánica, el principio de conservación de la masa y energía.

Antes de describir las ecuaciones fundamentales es importante conocer las hipótesis básicas que se toman en cuenta en la deducción de estas ecuaciones que modelan matemáticamente los flujos, además se considera que las tuberías tienen características uniformes: material, sección transversal y espesor constante a lo largo de la misma (Cabrera, García-Serra y Martínez, 1996a)



Hipótesis con respecto al flujo:

1. Flujo cuasi-unidimensional en conductos de simetría axial, solo se tiene en cuenta la componente de la velocidad en la dirección del eje de la tubería.
2. Distribución uniforme de la velocidad y de presión en todas las secciones transversales al eje del conducto.
3. Determinación de las pérdidas de carga por fricción y pérdidas localizadas a través de expresiones válidas para el caso de flujo cuasi-estacionario.

Hipótesis con respecto al fluido:

1. Fluido incomprensible.
2. Fluido monofásico y homogéneo (fluido de características uniformes).
3. Fluido Newtoniano (satisface la ley de viscosidad de newton).



4.2.1 Ecuación de conservación de la masa

Ésta ecuación dicta que la masa de fluido que entra a cualquier tubería es igual a la masa que sale, Walski *et al.* (2003).

Cuando se considera la simulación en periodo extendido, se considera que el agua puede ser almacenada y extraída de tanques.

$$\sum_{i=No.tubería} Q_i - U - \frac{dS}{dt} = 0 \quad (4.1)$$

Donde:

Q_i = Caudal de agua entrante al nodo i [L^3/T]

U = Agua usada en el nodo [L^3/T]

$\frac{dS}{dt}$ = Cambio en el almacenamiento [L^3/T]

La ecuación es aplicada a todos los nodos y tanques de la red, y se escribe una ecuación para cada uno de ellos.

4.2.2 Ecuación de la energía

La ecuación 4.2 establece las relaciones entre las diferentes transformaciones de la energía mecánica del líquido, por unidad de peso del mismo [FL/F]. La carga de posición es la energía potencial; La carga de presión es la energía correspondiente al trabajo mecánico ejecutado por las fuerzas debidas a la presión; la carga de velocidad es la energía cinética de toda la vena líquida; la pérdida de carga es la energía transformada en otro tipo de



energía (transferencia de calor) que, en el caso de los líquidos, no es utilizable en el movimiento; y, la carga correspondiente al cambio local de la velocidad es la energía utilizada para efectuar el cambio (Sotelo, 2001).

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + \sum h_p = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + \sum h_F + \sum h_m \quad (4.2)$$

Donde:

Z = Carga de posición, elevación [L].

P =Presión [M/L/T²]

γ = *Peso específico del fluido* [M/L²/T²]

$\frac{P_i}{\gamma}$ = *Carga de presión en la sección i* [L]

V =Velocidad [L/T]

g =Constante de aceleración gravitacional [L/T²]

$\frac{V_i}{2g}$ = *Carga de velocidad en la sección i* [L]

h_p = *Carga agregada por bombas* [L]

h_F = *Pérdida de carga por fricción, en tuberías* [L]

h_m = *Pérdida de carga localizadas* [L].

4.2.3 Ecuaciones de pérdida de carga por fricción

Existen numerosas fórmulas para el cálculo de pérdidas de carga por fricción, a continuación se mencionaran, las que se utilizarán en el presente trabajo.



En el año de 1850, Darcy-Weisbach y otros, dedujeron experimentalmente la fórmula 4.3 para determinar la pérdida por fricción, en donde el factor de fricción es función compleja de la rugosidad relativa ε/D y del número de Reynolds Re en el tubo.

$$h_F = f \frac{LV^2}{D 2g} \quad (4.3)$$

Donde:

f = factor de fricción, sin dimensiones.

$f = f(\varepsilon/D, Re)$.

g = aceleración de la gravedad, en $\frac{m}{s}$.

h_F = pérdida por fricción, en m.

L = Longitud del tubo, en m.

V = Velocidad media, en $\frac{m}{s}$.

El factor de fricción en flujo laminar, lo obtuvo Poiseuille en 1846, la cual es válida para tubos lisos o rugosos, en los cuales el número de Reynolds no rebasa el valor crítico de 2300.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (4.4)$$

Donde

Re =Número de Reynolds, en flujo laminar $Re < 2300$.



Nikuradse trabajó con tubos de rugosidad artificial en laboratorio, utilizando granos uniformes de arena adheridos con diferente distribución sobre la superficie interna del tubo. El investigador obtuvo la siguiente ecuación válida para tubos rugosos en la zona turbulenta:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \frac{3.71 * D}{\epsilon} \quad (4.5)$$

De las investigaciones de Nikuradse y otros se corrobora los siguientes:

1. En el intervalo $Re < 2300$ para flujo laminar, f depende exclusivamente del número de Reynolds y no de la rugosidad del tubo.
2. A partir de $Re=2300$ se inicia la zona de transición de flujo laminar a turbulento, en la cual no hay una ley de variación. Dentro de esta zona f depende, tanto de Re como de $\frac{\epsilon}{D}$.
3. La zona turbulenta se inicia con diferentes valores de Re ; el número de Reynolds, como límite superior para la zona de transición, depende de la rugosidad del tubo.
4. Dentro de la zona turbulenta, f es independiente del número de Reynolds, y depende del cuadrado de la velocidad.

Colebrook y White presentaron una fórmula empírica para la zona de transición de flujo laminar a turbulento en tubos comerciales:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0.86 \ln \left(\frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (4.6)$$



Donde:

f =es el factor de fricción, siendo una función implícita.

La fórmula de Hazen-Williams se presenta a continuación:

$$h_f = \frac{10.7L}{D^{4.87}} \left(\frac{Q}{C}\right)^{1.852} \quad (4.7)$$

donde:

Q=Gasto que circula en la tubería, m³/s.

C=Coefficiente de rugosidad, adimensional.

L=Longitud de la tubería, en m.

Mays (2002), afirma lo siguiente con respecto a las fórmulas de Hazen-Williams (H-W) y Darcy-Weisbach (D-W); la fórmula de Hazen-Williams no es válida para el régimen laminar ni para la transición de laminar a turbulento; a elevadas pérdidas de carga, la fórmula de Hazen-Williams tiende a producir un caudal menor que el producido por la ecuación de Darcy-Weisbach; se justifica a menudo el uso de H-W a causa de sus resultados conservativos, sin embargo escoger un valor adecuado de C en H-W o la rugosidad relativa en D-W es difícil.

Saldarriaga (2007), señala que el coeficiente de Hazen-Williams, es una característica del tubo, del flujo y del fluido. Por ello la ecuación está limitada a ciertas características del fluido y del flujo. Hazen-Williams establecieron los siguientes límites para la ecuación:

1. El fluido debe ser agua a temperaturas normales.
2. El diámetro debe ser superior o igual a 75 mm (3 pulg)



3. La velocidad en las tuberías debe ser inferior a 3 m/s.

Walski *et al.* (2003), señala que la fórmula de Darcy-Weisbach puede ser usada para determinar la pérdida de carga en una tubería con cualquier fluido Newtoniano en cualquier régimen de flujo. La fórmula de Hazen-Williams recomienda aplicarla para el transporte de agua en condiciones de flujo turbulento.

Cabrera (2012), realizó un trabajo sobre la dinámica del coeficiente de rugosidad n de Manning para tuberías de PEAD Corrugado, donde confirma lo importante que es hacer referencia sobre un coeficiente n de Manning dependiente del tiempo, contrario a lo que ocurre en la literatura de hidráulica contemporánea de presentar solo valores máximo, medio y mínimo.

4.3 Configuración de redes de distribución

El propósito de un sistema de distribución de agua es suministrar a los usuarios la cantidad de agua demandada a una presión adecuada a las diversas condiciones de carga. Una condición de carga es un modelo especial de demanda que define los requisitos de caudal de usuario. Un sistema de distribución de agua consta de tres componentes principales: bombas, almacenamiento para distribución, y red de tuberías de distribución. La mayoría de los sistemas requieren bombas para suministrar presión para vencer las diferencias de altura y pérdidas de energía causadas por el rozamiento (Mays, 2000).

Los sistemas de distribución de agua pueden ser redes cerradas o abiertas. En los sistemas cerrados las rutas que el agua puede seguir desde la fuente a un cliente particular puede ser varias. En un sistema de red abierta o ramificada, solo puede haber una sola ruta de la fuente al usuario, ver figura 4.2.



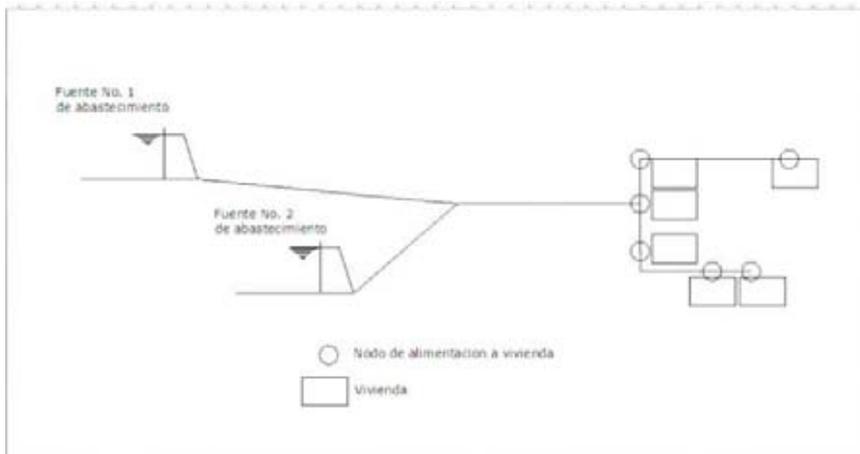


Figura 4.2 Configuración de una red abierta o ramificada
 Fuente: Elaboración propia.

Los sistemas cerrados generalmente son más deseables debido a su nivel de confiabilidad. En estos sistemas la rotura de una tubería puede ser aislada y reparada con poco impacto sobre los clientes fuera del área inmediata. También debido a que hay más rutas a seguir para llegar al usuario, las velocidades son más bajas y la capacidad del sistema es mayor. En general los suministros de agua son una combinación de redes cerradas y abiertas, ver figura 4.2 y 4.3 (Walski *et al.*, 2003).

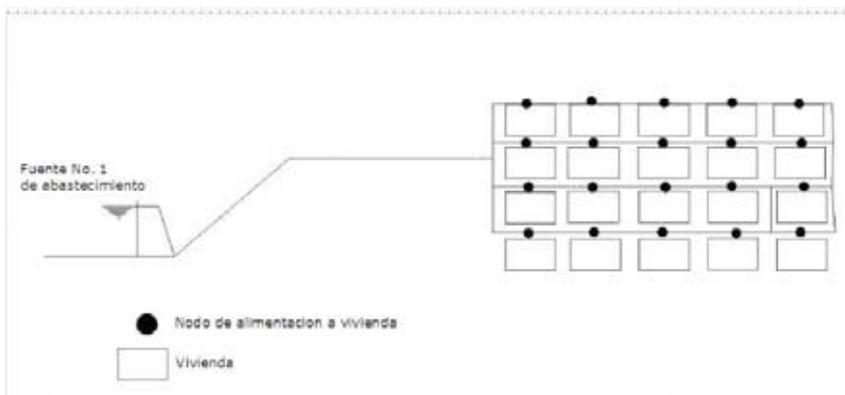


Figura 4.3 Configuración de redes cerradas
 Fuente: Elaboración propia.



Las tuberías forman a menudo enlaces vitales en la cadena de alimentación de agua y pueden conllevar elevadas penalizaciones con costos directos por fallo o rotura (reparación-costos del fluido y pérdidas por daños asociados con la rotura y por interrupción del servicio, (Mays, 2002).

Saldarriaga (2007) comenta que en este tipo de redes cerradas el número de ecuaciones (NE) es igual al número de tramos(NT), como se muestra en la siguiente fórmula:

$$NE = NT = NC + (NU - 1) \quad (4.8)$$

Donde:

NC= Número de circuitos.

NU=Número de uniones o nodos.

NT=Número de tramos que conforman la red cerrada.

4.4 Métodos para resolver redes de distribución

De acuerdo a Trifunovic (2006), para resolver redes cerradas de distribución de agua, se formula un sistema de ecuaciones basados en la analogía eléctrica en leyes conocidas como leyes de Kirchoff:

1. Primera Ley: La suma de todos los caudales que entran y salen de cada nodo es igual a cero.

$$\sum Q_i = 0 \quad (4.9)$$



2. Segunda Ley: La suma de todas las pérdidas de carga a lo largo de las tuberías que componen un circuito completo es igual a cero.

$$\sum \Delta H_i = 0 \tag{4.10}$$

La primera ley es esencialmente la ley de conservación de la masa, resultando en la ecuación de continuidad que debe ser válida para cada nodo en el sistema.

De la segunda ley, se puede ver que la línea de gradiente hidráulico a lo largo de un circuito es también continua, así como el flujo en cualquier nodo.

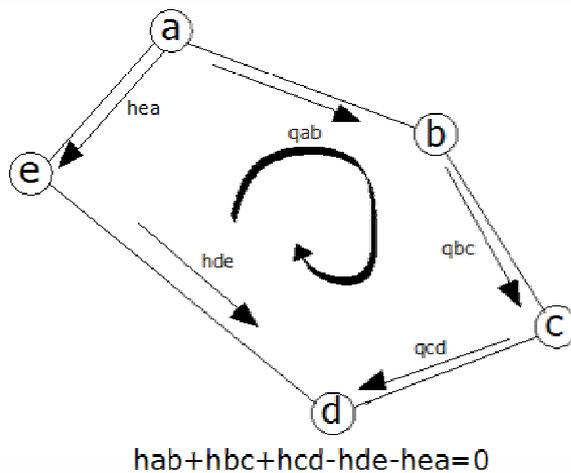


Figura 4.4 Segunda ley de Kirchoff
 Fuente: Cabrera *et al.* (1996b)

De acuerdo al sentido en la figura 4.4, la pérdida de carga se considera positiva cuando el caudal recorre el circuito en el mismo sentido del reloj y negativo en caso contrario.



4.4.1 Método de Hardy Cross

Saldarriaga (2007), comenta que el primer método usado fue el de Cross en 1936, el método es manual. El método original fue desarrollado para el cálculo de estructuras aporticadas de concreto y acero, mediante un método matemático para llevar a cabo análisis de distribución de momentos para estructuras estáticamente determinadas.

Existen dos formas de este método, uno ellos se llama método de Hardy-Cross con corrección de caudales y tiene la característica de que suponen los caudales al inicio del cálculo. La otra forma es el de Hardy-Cross con corrección de alturas piezométricas, propuesto por R.J. Cornish en 1938, se suponen las alturas piezométricas en cada nodo de la red excepto en aquellos en que la altura sea fija. Ver la siguiente comparación:



Hardy-Cross con corrección de caudales

Ventajas

1. Menos iteraciones para llegar al mismo grado de convergencia, si el sistema se encuentra menos desbalanceado por las condiciones iniciales supuestas.
2. Corrección de caudales del circuito en forma simultánea.

Desventajas

1. El algoritmo es engorroso para redes de tuberías grandes.
2. Suponer los caudales en cada tubería y que éstos cumplan con la ecuación de conservación de masa en cada nodo puede ser un proceso complicado y lento.

Hardy-Cross con corrección de alturas piezométricas.

Ventajas

1. Es fácil suponer las alturas piezométricas iniciales.
2. El esfuerzo requerido para la preparación de datos iniciales y su interpretación es pequeño. Es mejor para redes grandes.

Desventajas

1. Convergencia lenta debido a que las correcciones de caudales se hacen en una tubería cada vez.



4.4.2 Método del Algoritmo de Gradiente

El método fue desarrollado por Ezio Todini y E.P.O'Connell en la Universidad de Newcastle Upon Tyne y por R. Salgado, como tesis doctoral en 1982-1983. El método de gradiente linealiza las ecuaciones de energía utilizando una expansión en series de Taylor.

Saldarriaga (2007) menciona las siguientes ventajas del método comparado con el método lineal y de Hardy-Cross entre otros.

- 1.- Es un método de cálculo eficiente preconditionado con la factorización incompleta de Cholesky y tratamiento de matrices dispersas.
- 2.- Se garantiza la solución en máximo en NN (Número de nodos con altura piezométrica desconocida) iteraciones.
- 3.- La manipulación de matrices dispersas típicas del método, reduce la memoria requerida y el tiempo de cálculo en la computadora.
- 4.-El sistema de ecuaciones que se resuelve puede llegar a ser 50% menor en el caso de redes grandes.
- 5.-Se calcula y ajusta simultáneamente los caudales y las alturas piezométricas, lo que reduce el número de iteraciones.
- 6.-El método del gradiente no requiere la definición de caminos de energía o circuitos, lo que significa que el número de datos que el usuario debe proporcionar al programa es menor.
- 7.-Puede resolver la hidráulica de cualquier tipo de sistemas de tuberías desde una tubería simple hasta la red de distribución más compleja.



4.5 Software para simular redes de distribución de agua.

La modelación matemática con computadora de los sistemas de distribución es un apoyo fundamental de la industria del agua.

EPANET es un software gratuito desarrollado por Lewis Rossman y la Agencia de Protección Ambiental (EPA), realiza simulación en periodo extendido y flujo permanente. Usa el método de gradiente para sus cálculos hidráulicos. Tiene una herramienta adicional EPANET-MSX, para modelar esquemas complejos de reacciones entre especies químicas y biológicas entre el agua y la pared de la tubería. Entre sus desventajas se tiene que no está integrado con el entorno CAD y Sistemas de información Geográfico, no hay asesoría técnica formal para el uso del software, no realiza análisis de fenómenos transitorios, no hay conexión con los sistemas SCADA, Cabrera (2005), EPA (2013), ESRI (2013).

WATERCAD es un programa de simulación desarrollado por la empresa Bentley, que realiza análisis de calidad del agua, análisis de costos de energía, asignación automática de demandas, análisis de costos de operación; que tiene herramientas complementarias como Skelebrator (Esqueletización de las redes), Darwin Scheduler (Optimización energética para programación de ciclos de bombeo), Darwin calibrator (Calibración de redes), Darwin Designer (Optimización de diseño), HAMMER (Planeación para la renovación de redes, e integración con análisis de fenómenos transitorio. Las desventajas que tiene este software son: Se requiere licencia de uso, el costo de adquisición de programa, la asesoría técnica es costosa, información tomada de Bentley (2013).

PIPE2012 es un software desarrollado por Dr. Don J. Wood y Dr. Srinivasa Lingireddy junto con un equipo de expertos, realiza simulaciones en periodo extendido y flujo permanente, entre sus aplicaciones se tiene modelación de transitorio, análisis de calidad





del agua, programación de optimización de bombeo, distribución de la demanda automática. Entre sus módulos adicionales se tiene para la simulación de redes de distribución de gas natural, redes de vapor complejas (Steam), análisis contra incendios (GoFlow), prueba de bombas contra incendios (GoPlot), Calibración de redes con algoritmos genéticos. Entre otras características se puede mencionar lo siguiente: Se puede transferir modelos de epanet a Kypipe, Importar y exportar archivos de Autocad y GIS, Modulo de diseño óptimo, Conexión con SCADA, Asesoría técnica gratuita. Entre sus desventajas está: requiere licencia de uso, costo de adquisición y asesoría. KYPIPE (2013).

El software de INFOWORKS WS permite analizar la calidad del agua, gestionar de manera efectiva la red de abastecimiento durante una sequía, la identificación de los puntos débiles de la red e identificar soluciones a través del desarrollo y mantenimiento continuo del modelo. Simula en estado permanente y en periodo extendido, permite investigar deficiencias de suministro, evaluar la calidad del agua y cloración, optimización de sistemas de bombeo, optimización de sistemas de almacenamiento. Entre otras características se tiene: Intercambio de datos con GIS, Interacción con sistemas SCADA, Intercambio con sistemas de Telemetría y Dataloggers. Entre las desventajas se tienen: el costo de adquisición y costo de asesoría. INNOVYZE (2013).



4.6 Calibración de modelos de simulación de redes hidráulicas

La gestión de los sistemas de distribución de agua involucra un permanente proceso de toma de decisiones a menudo con un alto grado de incertidumbre debido al carácter probabilístico de la demanda de agua dependiente del tiempo, así como la falta de información detallada del propio sistema, Nicolini, Giacomello y Deb (2011).

Si el modelo no ha sido correctamente calibrado y validado en cualesquiera circunstancias posibles de funcionamiento del sistema, no es en realidad una herramienta de gestión, sino un instrumento matemático sin validez alguna, López *et al.* (2005).

Una de las principales tareas de la modelación de sistemas de distribución de agua es desarrollar y mantener un modelo que represente la red hidráulica física con un grado de precisión suficiente para que las compañías de agua o sistemas operadores tengan confianza en él, AWWA (2005).

La ampliación de redes hidráulicas implica la adición de nuevas tuberías, circuitos o reemplazar las tuberías existentes, y la adición o modernización de estaciones de bombeo e instalaciones de almacenamiento, ello requiere cálculos hidráulicos complejos y precisos para ser apropiadamente evaluados; la práctica actual involucra un procedimiento de evaluación tedioso a prueba y error que en ocasiones lleva a la solución efectiva más económica para la modernización de la red hidráulica. El resultado de usar una evaluación a prueba y error tiene un desempeño ineficiente y de gran costo de tiempo y dinero, (Boulos, Altman y Liou, 1993).

La calibración es el proceso de comparar el modelo de simulación y el modelo real, este último se construye a partir de un muestreo en campo, y se dirá que el modelo simulado



está calibrado cuando éste estime dentro de un rango razonable de error el comportamiento del modelo real, Walski *et al.* (2003).

Según Shamir y Howard (1977), la calibración consiste en determinar las características físicas y operacionales de un sistema existente y determinar los datos que cuando se introduzcan al modelo den resultados realistas.

El problema de calibración de modelos de RDAP es altamente complejo debido a la gran cantidad de parámetros a ser examinados y a la no linealidad de las ecuaciones de flujo. Hay investigadores que han dirigido este problema a minimizar la diferencia entre los valores observados y los calculados por el modelo de simulación, Savic y Walters (1995).

Kapelan (2010) comenta que aún en los casos donde el problema de calibración de modelos de sistemas de distribución de agua (SDA) se formule como un problema de optimización, en la práctica de hoy día para resolver éste problema se usa una simplificación, casi un aproximación tipo caja negra. Poco esfuerzo se ha hecho por desarrollar métodos de optimización para modelos de SDA que sean buenos en la exploración y explotación del espacio de búsqueda.

El problema matemático más frecuente relacionado con una red de distribución de agua no es su diseño es la calibración. No se puede resolver el problema con absoluta certeza, solamente se buscan posibles soluciones y entre éstas se elige la mejor con ciertos criterios (Saldarriaga y Salas, 2002).

Ostfeld *et al.* (2012), comenta que el problema de calibración es básicamente un problema mal planteado, hay más variables desconocidas que el número de ecuaciones conocidas.



Walski (2000) señala que debido a la existencia de un gran número de parámetros desconocidos, es imposible calibrar exactamente un modelo a un sistema real.

Un modelo de simulación calibrado es importante para probar escenarios de expansión de las redes de distribución de agua (Arniella y Gianella, 2004).

Fuentes de error del modelo de simulación

1. Incorrecta estimación de la demanda de agua.
2. Incorrecto diámetro interno.
3. Valores incorrectos de presión en bombas, tanques, en válvulas reductoras de presión.
4. Pobre representación del sistema en el modelo (puede que demasiadas tuberías fueron quitadas en la esqueletización del sistema, sobre-esqueletización).
5. Errores en el levantamiento topográfico.
6. Errores en la construcción de planos.
7. Fugas en la red.

¿Cuál parámetro se debe calibrar y cuántos? La clave para seleccionar el parámetro correcto es tener observaciones de campo correspondientes a más de una condición de operación o caudal, mientras se conoce las presiones en las bombas, tanques elevados y grado de cierre de las válvulas correspondientes a ese instante de tiempo.

Hutton, Kapelan, Vamvakieridou-Lyroudia y Savic (2014a) comenta que en la calibración de un modelo de SDA hay que preguntarse: ¿Los estados iniciales del modelo son los estados iniciales verdaderos del sistema real? ¿Las reglas de control del modelo son iguales



a las reglas de control verdaderas del sistema real? ¿Las observaciones (i.e. mediciones de presión, gasto, niveles de agua etc.) están libres de errores?

Las principales variables de incertidumbre en las tuberías son: el diámetro interno, la demanda en los nodos, las fugas, pérdidas menores y demandas desconocidas (problemas de tipo comercial). Estas son las que causan la mayoría de las ocasiones discrepancias entre el comportamiento de una red hidráulica real y el modelo de simulación. El valor de estos parámetros solo se conoce con cierta exactitud en la etapa de diseño, en donde se establecen cantidades por defecto que cada fabricante sugiere o se asigna valores de forma empírica.

Saldarriaga y Jurado (2008), clasifica las variables de calibración en hidráulicas (demandas desconocidas y fugas) y topológicas (diámetro interno, rugosidad y pérdidas menores).

La cantidad de parámetros desconocidos que describen el comportamiento en una red hidráulica aumenta exponencialmente con el tamaño del sistema de distribución de agua, como la ciudad de México, ver figura 4.5, ahí se nota el grado de dificultad para la calibración de un modelo de SDA.

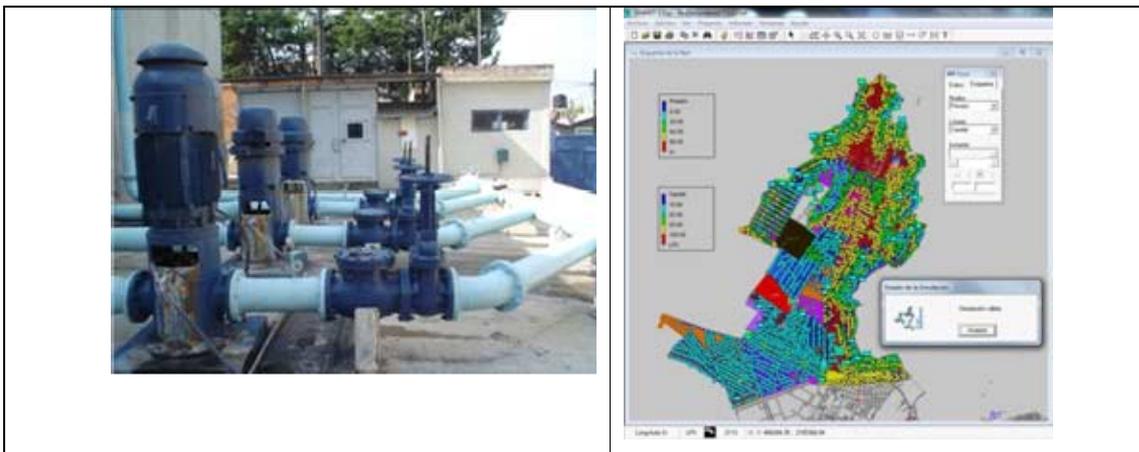


Figura 4.5 Sistema de distribución de agua en la ciudad de México. Hay miles de parámetros desconocidos.

Fuente: IMTA (2012).

Es importante identificar el objetivo de uso del modelo, por ejemplo: dimensionamiento de tubería para plan maestro, estudios operacionales, diseño de proyectos, estudios de rehabilitación y estudios de calidad del agua. También es importante identificar el tipo de análisis hidráulico asociado, en estado permanente o en periodo extendido. Para estudios de operación o de calidad del agua se requiere de un análisis en periodo extendido mientras para estudios de planeación o de diseño puede desempeñarse un análisis en estado permanente (Walski, 1995).

Ormsbee y Lingireddy (1997) y Edwards (2006) identifican para la calibración de un modelo de red hidráulica siete pasos básicos:

1. Identificar el objetivo del uso del modelo.
2. Realizar estimaciones iniciales de los parámetros del modelo.
3. Recolección de datos para calibración.
4. Evaluación de los resultados del modelo.
5. Realizar macro-calibración cuando el error entre el modelo de simulación y la red hidráulica real es mayor del 30%.
6. Desempeñar un análisis de sensibilidad.
7. Realizar micro-calibración.

El nivel de detalle y la importancia del modelo radican en el tipo de inversiones que se quieren hacer y la relevancia del proyecto o del sistema hidráulico en estudio pues de estos factores se define cuan aceptable es el modelo y cuan cercano a la realidad se encuentra, Jaimes (2010).

De acuerdo a Tzátchkov, Izurieta, Fuentes y Franco (2007) la calibración hidráulica puede usarse para diagnóstico de operación del sistema:



1. Corrosión de las tuberías.
2. Falta de capacidad de conducción
3. Fugas
4. Fracturas
5. Pérdidas comerciales.
6. Operación ineficiente de sistemas de bombeo.

Es recomendable contar con un modelo calibrado que pueda predecir el comportamiento bajo condiciones normales y anormales de operación.

Ostfeld *et al.* (2012) expresan que la estructura de la calibración involucra:

- a) Definir las variables del modelo, coeficientes y ecuaciones.
- b) Seleccionar una función objetivo para medir la calidad de la calibración.
- c) Seleccionar un conjunto de datos a ser usados para el proceso de calibración.
- d) Seleccionar un esquema de optimización o manual para alterar los valores de coeficientes en la dirección de reducir la función objetivo.

Hirrel (2008) argumenta que el término reconciliación debe usarse en vez de calibración por las siguientes razones:

1. El ajuste de valores tales como rugosidad y demanda en la ausencia de mediciones directas o cálculos empíricos no es calibración, coherente con la definición común de la palabra.
2. Cuando los resultados del modelo no coinciden con la red actual, a menudo el modelo no necesita corregirse.



3. La calibración implica que un modelo permanecerá preciso mientras este no se modifique.
4. Resolver las anomalías de la red es más preferible que hacer cambios no válidos en los datos de entrada.
5. La comprensión de que datos de entrada son requeridos, como los datos son usados en el modelo, y como los datos de campo pueden ser usados para evaluar los resultados del modelo es un prerrequisito para modificar datos y usar el modelo apropiadamente.

Koppel *et al.* (2008) recomiendan los siguientes 4 pasos mínimos para la calibración de una red hidráulica real:

1. Verificación de datos.
2. Discriminar pérdidas reales y aparentes.
3. Redistribución de las pérdidas reales y aparentes.
4. Calibración.

Además, también comentan que el análisis de la dinámica de errores de presiones del modelo ofrece la posibilidad para localizar áreas con demandas no contabilizadas y fugas.



4.6.1 Estado del arte de la calibración de modelos de simulación de redes hidráulicas

En el proceso de calibración se deben plantear las siguientes preguntas ¿Cuántos puntos de medición deben ser tomados en cuenta para la calibración? ¿Cuántas mediciones son suficientes para elaborar patrones de consumo dentro de la red? ¿Con qué criterios se deben escoger las variables a calibrar? ¿Qué rangos de error en las variables debe presentar el modelo calibrado? ¿Cómo analizar y calibrar el comportamiento de accesorios de la red? Estas deben ser resueltas antes de afirmar que un modelo está calibrado.

A pesar de cuatro décadas de investigación sobre la calibración de redes hidráulicas, hoy día ningún modelador puede garantizar que los parámetros físicos obtenidos después del proceso de calibración se ajustan exactamente a la realidad. El modelo se comporta como la realidad sólo para esos parámetros y condiciones de operación consideradas durante el proceso de calibración, Martínez, Bartolín y Bou *et al.* (2003).

Con la calibración se puede verificar: si la esqueletización del modelo hidráulico fue correcta; revisar el desempeño de los equipos de bombeo; encontrar valores incorrectos causados por mala suposición al construir los datos de demanda, determinar y corregir zonas de baja presión, González y Delahaye (2004).

Takahashi, Saldarriaga, Vega y Hernández (2010), comentan que los factores que alteran la topología de un sistema hidráulico son las siguientes:

1. Intervenciones no reportadas: Instalación de tuberías nuevas o reemplazo de tuberías viejas que no están documentadas por el modelador, es decir falta de actualización del catastro.



2. Deterioro de la tubería: Cambio de diámetro de la tubería por los procesos de corrosión, oxidación, deposición e incrustación.
3. Procedimientos de operación: La operación de válvulas, bombas o hidrantes pueden afectar drásticamente la respuesta del sistema hidráulico.
4. Medición imprecisa del consumo doméstico, a consecuencia de medidores dañados o manipulados intencionalmente.
5. Base de datos de clientes defectuosa y conexiones ilegales; algunos usuarios pudieran tener acceso al servicio de suministro de agua sin el consentimiento de las compañías de agua.
6. Pérdidas de agua: Fallas en la pared de la tubería o fugas en las uniones de las mismas.

Alcocer, Tzatchkov y García (2004), comentan que los modelos hidráulicos y de calidad del agua son difíciles de calibrar en la práctica. Los factores que afectan la actividad pueden ser los siguientes:

- a) Poca factibilidad de medir y calibrar el coeficiente de rugosidad de cada tubería.
- b) En redes de gran tamaño, el catastro no será 100% confiable.
- c) El equipo de medición considera un margen de error.
- d) El flujo y las concentraciones son no permanentes.
- e) Necesidad de presupuesto alto en los trabajos.
- f) Falta de apoyo por parte de autoridades locales.
- g) Equipo de medición insuficiente.
- h) Entre otros.



Fuertes, García-Serra y Iglesias *et al.* (2002), comentan sobre el origen de las discrepancias entre modelo de simulación y el sistema real hidráulico:

1. La causa puede ser modificación del diámetro y rugosidad original de las conducciones por depósito de sales, cal y óxidos, aumentando las pérdidas de carga.
2. Otra causa pudiera originarse del desconocimiento de la correcta distribución de consumos, en la red debido al comportamiento estocástico en la demanda. Los valores medios se pueden saber en base a facturaciones, pero su modulación a lo largo del día es difícil de predecir.
3. Desconocimiento en el valor y localización de las fugas.

Savic, Kapelan y Jonkergouw (2009), expresan las siguientes razones de la falta de uso de las herramientas de calibración existentes:

1. El costo adicional requerido para realizar una reducción de incertidumbre paramétrica.
2. Se necesita una gran cantidad de expertos para aplicar las herramientas de investigación.
3. La percepción de que más datos se necesitan para este tipo de calibración.
4. Los modelos de red construidos por empresas de servicios de agua, llevan a cabo bien muchas tareas de modelación, sobre todo en los países desarrollados.
5. Se carece de criterios prácticos bien definidos de calibración.
6. Falta de experiencia sobre el proceso de recolección de datos, sobre donde medir, que parámetros calibrar y cuantas mediciones hacer.



Ostfeld *et al.* (2012), dan las siguientes observaciones sobre la calibración de MSH:

1. Los modelos de simulación de RDAP siempre deben ser calibrados y validados antes de su uso.
2. Parte del valor de la calibración yace en la compresión adicional adquirida que da este proceso sobre el funcionamiento de la red.
3. La última medida que indica si un modelo está calibrado correctamente corresponde al grado de confianza que dicho modelo le aporte a la operación del sistema.
4. La calibración puede ser útil en identificar anomalías en el sistema.
5. Se necesita de experiencia y conocimiento para la aplicación de la calibración. La clave es identificar los parámetros a ajustar.
6. El personal del sistema de distribución de agua debe involucrarse en el equipo de calibración del modelo.
7. Las RDAP con muchas reglas son difíciles de calibrar y es más difícil reproducir su comportamiento.
8. El análisis de sensibilidad puede ser muy útil en la identificación de los parámetros que tienen el mayor impacto en las predicciones producidas por el modelo.
9. Los rendimientos de un solo día no validan la calibración, deben obtenerse rendimientos de siete días completos.
10. Debe excluirse del patrón de demanda doméstico a los clientes de alto consumo de agua y registrarlos de forma separada.
11. El modelador debe poseer cierto nivel escepticismo de los datos de campo que parezcan inconsistentes y desafíen la precisión de esos datos.
12. Los valores faltantes del sistema SCADA deben ser comprobados antes de realizar análisis de sensibilidad.
13. Deben ser incluidas las fugas en el esfuerzo de calibración.



14. Realizar análisis de observabilidad topológica (reducción del tamaño del modelo hidráulico), para aumentar la velocidad de la simulación en la calibración.
15. Debe tenerse en cuenta que algunas variables de salida del modelo pueden ser afectadas de forma representativa debido a perturbaciones muy pequeñas y/o errores en algunos parámetros específicos.

Solano (2012) en su trabajo de investigación que recopila y analiza las experiencias de calibración en MS de ciudades y comunidades de Colombia (Cd. Bogotá, Cd. Medellín, Candelaria, la cumbre, la Cd. de Bucaramanga y otras), llega a las siguientes conclusiones:

1. Existe gran incertidumbre en los valores de las pérdidas menores es decir en las características de los accesorios instalados en la red.
2. Los factores que afectan el cálculo preciso de las demandas de los nudos y la asignación de los patrones que describen su comportamiento, estos son: principalmente el caudal perdido, aspectos climatológicos, el estrato socioeconómico de los usuarios, la diferenciación de zonas urbana y rural, entre otros.
3. Determinar el patrón de demanda es vital para el proceso de calibración ya que define caudales máximos, mínimos y medios en el sector y rige el comportamiento hidráulico del mismo, logrando con ellos entender el sistema bajo esas condiciones.
4. Es recomendable tener información sobre la tendencia de la curva de consumo (Semanal o quincenal).
5. Es necesario identificar zonas donde el consumo no facturado sea representativo e instalar macromedidores a la entrada para entender el comportamiento del consumo y lograr una distribución del agua no contabilizada congruente con la realidad.
6. Los puntos de monitoreo deben ir: A la entrada de los sectores hidráulicos, aguas arriba y aguas debajo de las válvulas reductoras de presión, en puntos donde existan



cambios representativos de niveles topográficos, en sectores donde se haya identificado que las fugas ó pérdidas son elevadas, en puntos donde la superficie de presiones presente una variación considerable.

7. Se debe analizar la diferencia del comportamiento de las mediciones para los días entresemana y fines de semana.
8. Recomienda emplear métodos estadísticos para el filtrado de las series de medición (varianza, coeficiente de variación, desviación estándar, etc.).

En el trabajo de Edwards y Brandt. (2006) reportan la calibración de 7 casos de redes de distribución de agua que alimentan poblaciones de 80,000-1,500,000 habitantes, calibradas para un periodo de 24 hrs en el día de máxima demanda de agua en verano, con métodos de prueba y error; menciona que la calibración de los modelos en flujo permanente pueden no funcionar para la calibración en periodo extendido.

La guía del ECAC(1999) sugiere que el 100% de los gastos del modelo deben estar dentro del 10% de diferencia con los caudales de campo registrados para el uso de planeación a largo plazo. Ninguno de los casos fue capaz de tener una diferencia menor del 10% de los gastos recolectados. A pesar de ello el personal de operación consideró a los modelos fiables para predecir el desempeño del sistema. Para los 7 modelos, el 70% de las presiones de los modelos están dentro de una diferencia de 4 psi (2.8 m), de las presiones recolectadas. Para el caso de los niveles de agua de tanques que cumplen con un criterio de 3 ft (0.91 m) solo en el caso 5 lo cumple, ver figura 4.6.



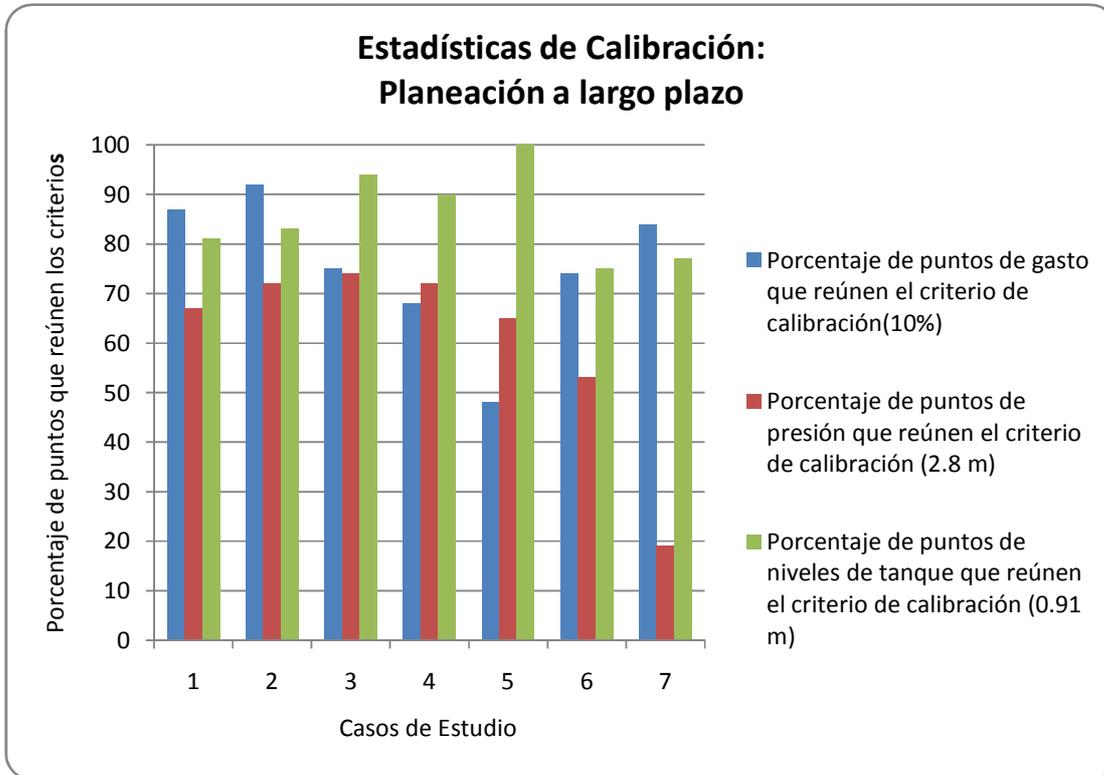


Figura 4.6 Calibraciones de redes de distribución en 7 casos de estudio en los EUA.
 Fuente: Elaboración propia a partir de información de Edwards y Brandt. (2006).

Baggett, Li, Rosario *et al.* (2008) realizaron la calibración de un modelo de distribución de agua de la ciudad de Miami, USA, de 3,218 Kilómetros de tuberías con diámetros de 3/4 - 66” pulgadas, la calibración fue del coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams en el periodo de máxima demanda de agua, formó dos grupos para el ajuste, el primer grupo formado por tuberías menores de 10 pulgadas y el segundo por tuberías mayores a 10 pulgadas; el 79.6% de las presiones del modelo estuvieron dentro ± 1.41 m de las presiones de campo y el 98.6% de las presiones del modelo estuvieron dentro de ± 3.52 m de las presiones de campo.



Edwards y Brandt (2006), comentan que no hay criterios de calibración para niveles de agua o tanques y reservorios incluidos en la guía del ECAC ó la guía del Reino Unido; también señalan que si un análisis de calibración no puede reproducir con precisión el cambio en niveles de agua es un fuerte indicador de significativas anomalías en el sistema de distribución de agua; cualquier enfoque de calibración debe empezar por evaluar la precisión de los niveles de agua.

El primer paso en la microcalibración de un modelo es el ajuste de parámetros en flujo permanente; esto debe incluir comparación de caudales y de líneas de gradiente hidráulico (LGH), ajustar LGH sin revisar caudales no es aceptable. La compensación de errores causa gastos incorrectos que producen presiones correctas y una calibración aparente para cierta condición, pero gastos para otras condiciones producen grandes errores en las presiones, AWWA (2005).

Hill (1998) citado por Solano (2012), da las siguientes recomendaciones para realizar el proceso de calibración y validación del modelo hidráulico.

1. Aplicar el principio de moderación “parsimony”. Lo más importante al iniciarla calibración es establecer un modelo de RDAP lo más sencillo posible, a medida que se avanza en el proceso se le va adicionando complejidad basándose en la información teórica existente para modelación además del análisis de la falta de capacidad del modelo para reproducir, exactamente las observaciones de campo.
2. Mantener el número de variables calibrables limitado desde el inicio de la calibración, a medida que ésta avanza incrementar paulatinamente la complejidad en la parametrización del modelo.
3. Definir y emplear un rango amplio de valores de los parámetros para permitir el desarrollo del problema de la calibración.



4. Formular y mantener un problema de calibración bien planteado, si el problema está mal planteado es necesario:
 - a) Reducir el número o el grupo de variables.
 - b) Obtener información adicional, mediciones de caudales y presiones aún cuando su obtención implique mayores costos.
 - c) Modificar otros aspectos del modelo, por ejemplo apertura de válvulas y aspectos operativos en general.
5. Evaluar el comportamiento del modelo. Emplear análisis estadísticos para determinar las incertidumbres de las variables predichas por el modelo. Analizar el comportamiento de las variables en base al objetivo primordial del modelo calibrado.

Aspectos a considerar al resolver el problema de calibración:

- a) Tener un problema bien planteado; la función objetivo debe tener un dominio definido para la evaluación de los parámetros obtenidos; Estabilidad, es una propiedad importante para la calibración, se le asocia con la convergencia de los datos, (Kapelán, 2010).
- b) Maximizar la precisión de la calibración.
- c) Minimizar el costo de la toma de datos de caudal y presión.
- d) Verificar que el modelo calibrado sea válido para diferentes escenarios (máxima demanda, demanda promedio, demanda mínima).

Giustolisi and Berardi (2011) estudiaron por el método de Algoritmo de Gradiente Global Aumentado, la descomposición de una red hipotética en subsistemas que pueden ser separadamente simulados con una reducción adicional del tamaño del problema de



calibración. Así mismo hicieron un análisis de la observabilidad topológica que puede ser útil para hacer recomendaciones sobre el diseño muestral para la calibración.

Preis, Whittle, Ostfeld (2009) calibraron un sistema de distribución real, la red No. 2 de la batalla de los sensores en redes hidráulicas de Ostfeld *et al.*(2008), comprende 12,523 nodos, 2 fuentes de carga constante, 14,822 tuberías, 4 bombas, 5 válvulas; se agruparon en 10 zonas de demanda los nodos, determinaron los Factores Multiplicadores de demanda e hicieron un análisis estadístico por medio de coeficientes de correlación y análisis de sensibilidad, concluyendo que el agrupar los nodos de demanda en zonas de demanda requiere un alto nivel de juicio basado en un buen conocimiento de la estructura del sistema.

Darvini y Soldini (2014) implementaron y calibraron un modelo de SDA de un pequeño pueblo de Chiaravalle (15 000 habitantes) en Italia, el modelo hidráulico está formado por 274 nodos y 340 tramos de tubería. La campaña de medición fue llevada a cabo durante el periodo de 13 de Noviembre al 28 Noviembre del 2013; las presiones fueron medidas con 6 manómetros instalados a lo largo del sistema. Utilizaron la aproximación propuesta por Greco y del Giudice (1999), el algoritmo toma como variables de decisión a la rugosidad de la tubería; a pesar que la campaña de medición fue para 15 días, la calibración se hizo con datos del 22 de noviembre, asumiendo que la rugosidad absoluta fuera mayor a 0.002 mm y menor a 5 mm. La calibración fue verificada con análisis de decisión multicriterio para seleccionar el mejor criterio de minimización entre las presiones medidas y calculadas en 6 sensores instalados. Los investigadores de éste estudio recomiendan considerar dos aspectos cruciales en el procedimiento de calibración: considerar la condición de demanda pico y posteriormente asignar un coeficiente de peso, a cada sensor con la finalidad de reducir la influencia de instrumentos en malfuncionamiento.



Saldarriaga, Salas y Gómez (s.f.) expresan que los algoritmos genéticos son el método más usado para la calibración de redes hidráulicas no obstante, para resolver una red de distribución de más de 1000 tuberías y modelaciones dinámicas cada 5 minutos durante una semana, el algoritmo es extremadamente lento.

Sanz y Pérez (2014), presentaron un método adaptado por Cheng and He (2011), que resuelve el problema inverso general a través de la descomposición de valores singulares (SVD), probaron el método en dos redes hidráulicas, una académica y otra real en un vecindario llamado Nova Icaria en la ciudad de Barcelona, utilizando en ambas datos sintéticos, concluyeron lo siguiente:

1. En la red académica muestran que la calibración de demandas nodales no es factible cuando se usa un bajo número de sensores de medición. El uso de múltiples muestras con las mismas condiciones de frontera ayuda a reducir la incertidumbre.
2. La reducción del ruido de los sensores puede ser lograda filtrando varias mediciones a lo largo de un periodo de tiempo.
3. Recomiendan usar la información *a priori* (facturación trimestral y tipo de usuario: industrial, doméstico, comercial) para reducir el número de parámetros desconocidos.
4. Comentan que los patrones de demanda con los más altos consumos son mejor calibradas.

Alves, Muranho, Alburquerque y Ferreira (2014), presentaron un trabajo de calibración en dos sectores hidrométricos de la ciudad de Castelo Branco, Portugal determinaron los patrones de consumo de estos sectores, y corrigieron las inconsistencias entre el comportamiento del modelo de simulación y del sistema de distribución real.



Dini y Tabesch (2014), utilizaron el método de Optimización Ant Colony para calibrar simultáneamente los coeficientes de patrón de demanda y coeficientes de rugosidad de Hazen-Williams, lo probaron en una red hidráulica académica de dos circuitos y en una red real, afirman que con este método se puede calibrar el patrón de demanda y los coeficientes de Hazen-Williams con precisión y exactitud.

Koor, Puust y Vassiljev (2014), realizaron una actualización y calibración del modelo hidráulico de la ciudad de Tallin, Estonia, en 11 zonas de presión, cada una de distintos tamaños, usaron 15 sensores de presión distribuidos en las 11 zonas, y también calibraron para fugas, agrupando nodos y tuberías.

Berardi, Laucelli y Giustolisi (2014) realizaron un estudio en el que muestran que la predicción de la capacidad del suministro de una RDA lograda por un modelo, tomando en cuenta el llenado/vaciado de depósitos locales es diferente del clásico análisis basado en la demanda (demanda fija en los nodos) y el análisis basado en la presión (relación dependiente demanda-presión) sobre la relación de demanda-presión de Wagner et al (1988) en cada nodo.

Fiorini *et al.* (2014) presentaron un método para identificar el área donde una fuga podría encontrarse, utilizando un método de calibración bayesiana a la red hidráulica y un índice, probaron el método en una red de literatura o hipotética, mostrando que el método puede localizar una fuga sin alto costo computacional y errores significativos, sin embargo, el resultado depende de la cantidad y calidad de los datos observados.

Hutton, Kapelan, Vamvakeridou-Lyroudia y Savic (2014b) aplicaron dos aproximaciones probabilística Bayesiana (i.e. formal e informal) para calibrar y cuantificar la incertidumbre en los grupos de rugosidad de tuberías de un modelo de epanet, de un SDA real localizado



en el Reino Unido, estudiado previamente en Kapelan (2007) con una población de 4500 habitantes; el modelo consiste de 451 nodos, 497 tuberías y dos válvulas reductoras de presión, los datos para la calibración fueron tomados de una condición de operación normal del sistema en el año de 1994. En éste estudio se formaron 10 grupos de rugosidad, por diámetro y material de la tubería, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- 1.-Los parámetros de rugosidad no producen suficiente variabilidad en la respuesta del modelo para producir incertidumbre en la frontera de las observaciones. La relativa poca variabilidad se debe a que los datos medidos fueron tomados durante condiciones de operación normal.
- 2.-La varianza del error residual es más grande es horas pico de demanda (i.e. en la mañana (7 a.m.) y en la tarde (19 h) es quizá donde los errores en la demanda son los más grandes.
- 3.-Los valores de calibración son similares en ambos métodos.
- 4.-La hipótesis de residuales gaussianos no representa completamente la naturaleza verdadera de los errores residuales del modelo de SDA.
- 5.-El 95% de los intervalos de incertidumbre resultado aplicar la aproximación Bayesiana informal muestran ser más angostos en comparación con las observaciones, no proporcionan cobertura estadística de las observaciones, aunque se use el umbral de comportamiento más grande.
- 6.-El 95% de los intervalos de incertidumbre resultado de aplicar la aproximación Bayesiana forman proporcionan una mejor cobertura de las observaciones

Tabesh, Jamasb y Moeini (2011), calibraron modelos de distribución de agua uno basado en Demand Driven analysis (DDA) (i.e. Software tradicionales como epanet) y el otro en Pressure Driven Analysis (PDA), en las condiciones reales las demandas no son fijas, estas son dependientes de las presiones nodales, llegaron a las siguientes conclusiones:



- 1.- Para obtener mejores resultados recomiendan usar escenarios de máximo consumo de agua.
- 2.- La calibración del modelo de PDA produce errores más bajos en comparación del modelo de DDA debido a su habilidad para simular el desempeño hidráulico más realísticamente.

Pérez *et al* (s.f.) realizaron un estudio de análisis de comportamiento hidráulico de la ciudad de cordoba, tienen 72 puntos de medida de presión en 40 sectores de la ciudad, de todos los nodos medidos, 71 presentan una desviación inferior a 5 m de carga; Obtuvieron una correlación entre valores medios observados y calculados de 0.851. Toman datos de caudal en la red hidráulica de forma automatizada en los 40 sectores, refieren que la calibración en cuanto a caudales no es aceptable. Obtuvieron una correlación entre valores medio medidos y calculados de 0.706.

Kang and Lansey (2011), aplicaron un algoritmo basado en los métodos de estimación de parámetros llamado weighted least-squares (WLS) y en la aproximación secuencial de dos pasos, para la estimación de incertidumbres propagadas desde los errores de medición de campo y errores al agrupar la demanda, se aplicó a dos redes hidráulicas, una red hipotética de 9 nodos y una red hidráulica de geometría real, en ambas usando datos de campo generados sintéticamente bajo múltiples condiciones de carga, introduce errores de medición, el ruido aleatorio lo genera para tener conjuntos de datos verdaderos de gastos de tubería, cargas de presión, concluyen lo siguiente:

- 1.-El método de aproximación secuencia puede ser aplicado a redes reales complejas.
- 2.-El número y distribución de grupos de nodos de demanda y tuberías afectan la calidad de los valores de los parámetros estimados del modelo.



3.-La aplicación a una red pequeña muestra que el método secuencial es estable y da mejores estimaciones comparadas con la aproximación de estimación conjunta, en el cual las estimaciones son pobres y a menudo sus soluciones salen del rango aceptable del coeficiente de rugosidad que conducen a resultados irreales.

Sumer y Lansey (2009), examinaron el impacto del propósito del modelo sobre el proceso de calibración, un sistema real se modela para dos objetivos: operación diaria y diseño de un SDA para su ampliación. Mientras que hay incertidumbre en todos los parámetros de un modelo sólo se considera en este estudio la incertidumbre de los coeficientes de rugosidad. Los resultados que obtuvieron sugieren que construir un modelo para propósitos de operación requiere de pocos datos de campo, donde las pérdidas de carga en el sistema son pequeñas y el cambio en el costo objetivo del modelo no es sensible a la estimación de los valores de los parámetros; sin embargo, para propósitos de diseño el cambio en los valores medios de los parámetros estimados y su reducción de su incertidumbre afecta en el diseño de la ampliación del SDA.



4.6.1.1 Recolección de datos del sistema de distribución de agua

El problema de calibración se podría resolver analíticamente si fuera técnica y económicamente viable, el hacer mediciones de presión en todos los nodos y mediciones de caudal en todos los tubos de la red, y mediciones de las pérdidas menores en todos los accesorios del sistema de distribución de agua.

Cheng, Yu y Xu (2014) comentan que la instrumentación en RDAP es altamente dispersa y a menudo consiste de mediciones de presión y gasto en estaciones de bombeo, fuentes de abastecimiento, tanques de almacenamiento y en puntos clave esto es menos 1/10 de los nodos totales en el sistema.

El problema es hacer una buena calibración con un número limitado de mediciones sin asignar valores irreales a los parámetros que tienen un significado físico (Greco y Del Giudice, 1999).

Hay parámetros del modelo que no pueden ser directamente medidos y deben ser inferidos a partir de observaciones limitadas de las respuestas del sistema. Por ello se requiere de un procedimiento eficiente de recolección de datos para los SDA, esto ha motivado a los investigadores a considerar el problema de diseño experimental, a través de recolectar la información más valiosa que reduzca la incertidumbre de los parámetros y mejore la capacidad predictiva del modelo (Lansey, El-shorbagy, Ahmed *et al.* 2001).

Kapelan *et al.* (2003) fueron los primeros en abordar el problema de diseño muestral como un problema de optimización multiobjetivo utilizando algoritmos genéticos.



Kapelan *et al.* (2005a). citado por Behzadian, Ardeshir, Kapelan y Savic (2008), expresan que la precisión de la calibración depende de la calidad y cantidad de datos colectados en campo, y selección de sitios apropiados para el diseño muestral, esto ha sido un desafío entre los investigadores e ingenieros de campo en años recientes; la determinación de sitios para el diseño muestral óptimo se hace evaluando la compensación entre la precisión del modelo calibrado y el costo del diseño muestral.

Muchas veces los datos de pérdida de carga son tan pequeños en un sistema de distribución de agua que solo sirven para revisar las cargas en la frontera y las elevaciones del terreno pero no para ajustar la rugosidad de la tubería porque en bajos gastos, la pérdida de carga no puede ser medida con precisión. La pérdida de carga es máxima al tomar mediciones durante la demanda pico, AWWA (2005).

Alcocer, Tzátchkov y García (2004) recomiendan puntos de medida de presión (aguas arriba y aguas abajo) en todos los elementos de regulación del sistema y se realizan mediciones por sector, midiendo por sectores, se reduce el número de puntos y se obtendrá calibrado adecuado del modelo, asimismo sugieren se mida en válvulas reductoras de presión.

Walski *et al.* (2003), señala que los dos tipos de datos útiles para calibrar y validar un modelo de simulación en periodo extendido son:

1. Mediciones de caudal, presión y niveles de tanques de agua por varios días en el sistema de distribución.
2. Concentraciones de trazadores conservativos por varios días en el sistema.
3. Presión monitoreada en sitios de alta demanda.



4. Realizar mediciones sobre el perímetro de la red esqueletizada, lejos de la fuente de agua. Tales criterios ayudan a reducir la propagación de errores de las observaciones a los parámetros de calibración.

Fuertes, García-Serra e Iglesias *et al.* (2002), hace las siguientes sugerencias sobre donde localizar o realizar mediciones de presión:

- a) Localizar siempre un punto de medida de presión aguas arriba o aguas abajo en todos los elementos de regulación del sistema.
- b) Realizar tandas de mediciones por sectores. Midiendo por sectores se reduce el número de puntos de medida al reducir el tamaño de la red a controlar. La calibración de la red se realizará por sectores.
- c) Es difícil que la ubicación de los medidores de presión coincida exactamente con un nudo del modelo. Se buscará instalarlo en un punto próximo al nudo, donde exista constancia que la presión no es diferente de la de éste.
- d) No se pueden utilizar los ramales a las viviendas porque la circulación de caudales a través de ellos distorsiona la medida de presión.
- e) Lo ideal es colocar nudos de medida ubicándolos en conducciones en las que el caudal circulante se mantenga constante para el estado de la red considerado.
- f) Si se realiza una simulación dinámica a intervalos de una hora, los puntos de medida se deberán instalar en nudos en los que durante ese intervalo de tiempo no se prevea variaciones significativas de la presión, es decir, no se instalarán en conductos de distribución.
- g) La instalación de caudalímetros electromagnéticos y volumétricos implica aislar el tramo de tubería en que van montados. Ello supone realizar costosas excavaciones, y dejar sin servicio zonas de la red.



- h) Como mínimo es necesario conocer el caudal que se inyecta desde cada uno de los puntos de producción (presas, pozos y plantas potabilizadoras) y el balance de caudal en los sectores de la red.
- i) En el caso extremo en el que sólo se conocen los caudales de inyección al sistema en su conjunto toda la red es un sector. El número de puntos de medida es entonces bastante elevado.

Alcocer, Tzátchkov y Martin (2005) en un estudio de modelación de calidad del agua, da las siguientes recomendaciones para la medición de caudal:

1. Identificar el tipo de fuente de abastecimiento.
2. Tipo de tubería donde se colocará el equipo, diámetro, espesor.
3. Establecer la distancia donde se ubicará el equipo de medición, cuando la tubería sea enterrada, construir una caja de válvulas, fuente de energía eléctrica cercana, garantizar la seguridad de la tapa de la caja de válvulas.

La discrepancia entre el valor medido y los correspondientes valores del modelo del sistema de distribución de agua (SDA), se le llama residuo o error. Los residuos tienen dos partes básicas: 1) error de modelación: la discrepancia entre el valor verdadero (conocido por la madre naturaleza) y el valor predicho por el modelo; 2) error de medición: la discrepancia entre el valor medido y el valor verdadero, además en el caso general ambos el modelo y la medición pueden tener errores con componentes sistemáticos y aleatorios, Kapelan (2010).

Hall (2003) citado por Hutton *et al.* (2014a), y Uusitalo *et al.* (2015) coinciden en que la incertidumbre en un modelo de simulación puede ser dividido en dos categorías: 1) La incertidumbre aleatoria, tal como la irreducible variabilidad espacial y temporal de la



demanda de agua; 2) La incertidumbre epistémica, el cual es resultado de un conocimiento incompleto del sistema. Los modelos numéricos tienen una incertidumbre epistémica conocida, la cual puede ser reducida o tolerada (e.g. la esqueletización), pero nunca eliminada.

Haghighi y Zahdei (2014), desarrollaron una aproximación para tomar en cuenta la incertidumbre de coeficientes de rugosidad y demandas nodales, en análisis de SDA. Las incertidumbres son representadas por números difusos (fuzzy numbers) e incorporadas a las ecuaciones de masa y energía de la red. Las incertidumbres de entrada son propagadas en la red e influyen sobre las respuestas hidráulicas. Para estimar las incertidumbre en las variables de respuesta (i.e. presiones y velocidades), las variables difusas de entrada son discretizadas en algunos niveles de la función de pertenencia, posteriormente, un problema de optimización multiobjetivo es desarrollado para cada nivel para encontrar los valores extremos de las presiones nodales y las velocidades de la tubería. Los investigadores llegaron a las siguientes conclusiones:

- 1.-Pequeñas incertidumbre en las variables de entrada de la red pueden resultar en grandes incertidumbre en la respuesta hidráulica y significativa influencia sobre la fiabilidad de desempeño del sistema.
- 2.-El caudal en la red y consecuentemente las velocidades de las tuberías fueron más dramáticamente afectadas por las incertidumbres de entradas más que en las presiones nodales.
- 3.-Con respecto a la presión mínima requerida y la velocidad de la tubería, resultó que 33.3% de las presiones nodales y 31% de las velocidades de la tubería puede fallar durante la operación debido a las incertidumbres que se presentan.



Pasha y Lansey (2012) investigaron el efecto de la incertidumbre de las mediciones de campo sobre modelos de calidad del agua en SDA, comentan que cuantificar la incertidumbre de la demanda sobre el desempeño del modelo es posible con simplificaciones.

Hirrel (2008) comenta que antes de realizar modificaciones a los parámetros de entrada del modelo es necesario determinar si la discrepancia entre los resultados del modelo y los datos de campo se deben a anomalías de la red o a datos de entrada del modelo imprecisos. Asimismo, un modelo ajustado para que coincida con una anomalía se vuelve instantáneamente inválido cuando la anomalía se encuentra y es arreglada.

Kapelan (2010), comenta que los costos del diseño muestral consisten de:

1. Costos de capital
 - a) Costo de inversión en el nuevo equipo de medición o partes de equipos (computadora etc.)
 - b) Costos de instalación del aparato de medición.
2. Costos de operación
 - a) Costos asociados con la mano de obra que involucra en ejecutar pruebas de campo.
 - b) Costos asociados con el mantenimiento del equipo (mano de obra y parte de equipo).
 - c) Costos de seguro de equipo.
 - d) Costos de electricidad y similares.

Apaydin (2013) da las siguientes recomendaciones para obtener datos buenos para calibrar:



- 1.- Utilizar instrumentos calibrado oficialmente.
- 2.- Los datos de elevación deben ser revisados.
- 3.- Un equipo experimentado debe ser incorporado dentro de los trabajos de campo.
- 4.- La autoridad del agua debe ser consciente de la utilidad de un modelo hidráulico bien calibrado.

En Araya (2012) se presenta criterios para la selección de puntos de muestreo para la calibración del modelo hidráulico de diferentes autores (e.g. Alcocer y Tzátchkov, 2007, Alvisi y Franchini, 2010 y Sánchez *et al.*, 2010 entre otros); para la presión, el criterio es medir en puntos distribuidos a lo largo de toda la red, donde fuera apreciable la caída de presión; para el caudal, se recomienda medir en tuberías principales con más del 10% del caudal en el sistema; para el caudal y presión, se sugiere medir en puntos de entrada al sistema.

Morosini, Costanzo, Veltri y Savic (2014) propusieron un método basado en la optimalidad-D y en análisis de sensibilidad para resolver el problema de diseño muestral, es decir, la elección de puntos de medición para la calibración de la rugosidad o la demanda, de acuerdo a diferentes condiciones de operación del sistema a un costo computacional relativamente bajo. Se aplicó a una red de literatura (i.e. hipotética) y una real (ciudad de San Mango de Aquino, Italia) para determinar los nodos y tuberías que afectan el comportamiento del sistema entero, afirma que los resultados son buenos para caracterizar puntos de medición, sin un alto costo computacional.

Sumer y Lansey (2009) presentan una metodología para evaluar el impacto de la incertidumbre de los coeficientes de rugosidad (se asume que las demandas son conocidas con certeza) sobre las decisiones que se hacen usando el modelo para una ampliación del



sistema de distribución. La incertidumbre de los parámetros son evaluadas usando el método de primer orden segundo momento (FOSM). Un modelo de predicción de incertidumbre es integrado a un modelo de diseño óptimo para evaluar el efecto de las incertidumbres sobre las decisiones basadas en el modelo. La metodología se aplica a una pequeña red de literatura. Sus conclusiones del estudio son las siguientes:

- a) Durante el proceso de recolección de recolección de datos, los cambios en la incertidumbre de los parámetros, la incertidumbre predictiva del modelo y el costo del diseño no siguen siempre el mismo patrón.
- b) El diseño muestral usando el juicio ingenieril es la práctica común, sin embargo, los resultados sugieren que un sistema de distribución es muy complejo y el mejor sitio de muestreo no siempre es intuitivamente obvio.
- c) Identificar las tuberías que son más importantes puede no ser claro, tanto en el diseño como en la calibración y las decisiones de muestreo óptimo está fuertemente afectada por la distribución de gasto en la red.
- d) Si la incertidumbre de los parámetros o la incertidumbre predictiva se usa como criterio de calibración mejoras en éste criterio a través de una mayor recolección de datos no necesariamente resulta en un beneficio económico.

Kang y Lansey (2010) realizaron un estudio para la colocación óptima de medidores en la estimación del estado de un SDA, se formula como un problema de optimización multiobjetivo, por medio de tres funciones objetivo: 1) Minimizar la incertidumbre en la estimación de la demanda nodal; 2) Minimización de la incertidumbre en la predicción de la presión nodal; 3) Minimizar el error absoluto entre la estimación de la demanda y sus valores esperados. El método se aplica a una red hipotética simple y a una red real de tamaño medio. En el caso de estudio de la red simple, el método MOGA (algoritmos genéticos multiobjetivo) proporciona soluciones óptimas idénticas a aquellas encontradas a



través de una completa enumeración con menos esfuerzo computacional. Para el caso de una red real las soluciones obtenidas de MOGA puede ser subóptimas pero son probablemente mejor que los resultados obtenidos con métodos robustos o la experiencia y el juicio ingenieril. Una estimación del estado del SDA precisa no necesariamente garantiza una estimación exacta y viceversa, por ello recomiendan incluir ambos objetivos en el problema de colocación de medidores en la estimación de estado del sistema, además se debe considerar la variabilidad temporal de las variables.

La mayoría de las metodologías actuales usadas para el diseño muestral en el problema de calibración de modelo hidráulicos están basadas en matrices de sensibilidad $\frac{\partial y(a)_i}{\partial a_k}$, donde $y(a)$ es el vector de variables de respuesta en el modelo, a es un vector de parámetros de las variables desconocidas; éstas derivadas son evaluadas en función de los valores verdaderos de los parámetros \hat{a}_k . La paradoja de estos métodos es que los valores verdaderos no se conocen de antemano, y además no se pueden conocer con certeza en la realidad (Xionfei, Bo y Mahmood, 2013).

Fontana, Giugni, Gliozzi y Vitaletti (2015) proponen para el problema de colocar puntos de monitoreo el uso de una aproximación llamada “Criterio de la ruta más corta”, estos puntos se identifican minimizando la suma de las distancias nodales a partir del nodo-sensor más cercano. Las distancias de nodos es la suma relativa adimensional entre la longitud de arco y la pérdida de carga absoluta a lo largo del arco. Los investigadores hacen las siguientes observaciones finales del estudio:

1.-Los métodos que realizan análisis de sensibilidad para el diseño muestral puede dar resultados no satisfactorios, ya que los puntos de monitoreo pueden estar muy cerca uno del



otro. Los métodos basados en la topología tienen ventaja sobre los métodos de sensibilidad ya que no necesitan estimaciones preliminares de coeficientes de rugosidad y ni de simulaciones hidráulicas.

2.-A diferencia de los métodos tradicionales el método propuesto supone que la influencia mutua entre dos nodos de una malla es más grande cuando la distancia entre ellos es pequeña. Este principio se tradujo en un procedimiento práctico para proporcionar una apropiada definición de distancia entre los nodos.

3.-El método fue también aplicado a un SDA real, resultado en ser eficaz en tiempo computacional y una efectiva localización de los nodos-sensor.



4.6.1.2 Criterios para la calibración del modelo de simulación hidráulica

Walski (1983) y Walski *et al.* (2003), comentan que un modelo de simulación está calibrado cuando hay un rango razonable de error entre el comportamiento del modelo y los datos de campo, sin embargo, cuantificar el significado de rango razonable o acuerdo razonable es difícil donde esto depende de: a) La calidad y cantidad de los datos de campo. b) La cantidad de esfuerzo que el usuario del modelo está dispuesto a gastar para ajustar el modelo.

Varias propuestas se han realizado para usar como criterios para saber cuando un modelo de red de distribución se encuentra calibrado como el AWWA Engineering and Computer Applications Committee (ECAC) establecido en 1999, mencionados por Edwards y Brandt, (2006) y (Alcocer y Tzatchkov 2007); Walski *et al.* (2003); el United Kingdom(WRc) Guidelines, establecido en 1989, mencionado por Edwards y Brandt, (2006) y Solano (2012); En Walski (1983), propuso un criterio de calibración para las presiones en redes con datos que el modelo puede estar calibrado con una precisión de $\pm 3.5-7$ m.

En un reporte del AWWA (2001) citado por AWWA (2005), hicieron una encuesta a 989 compañías de agua de USA y Canadá de las cuales solo contestaron 174, el 18% de las encuestas fueron respondidas, de estas el 86.2% realiza alguna forma de modelación, el 48% consideró que su modelo hidráulico esta calibrado, y afirmaron que lo calibran cada 2 o 5 años o según se necesite.

Consideraciones generales y criterios de calibración sugeridos por Bush *et al.* (2010):

1. Recolección de datos en verano con verificación en invierno.
2. Recolección de datos de campo por una semana.



3. Realizar ajuste al consumo actual.
4. Tendencias importantes: gastos, presiones, niveles de tanques.
5. Realizar ajuste a los valores de coeficiente de rugosidad menores al 50%.
6. El 75% de los gastos del modelo están dentro del 10% de los gastos medidos, es decir, la diferencia entre los gastos medidos (Q_{me}) y los gastos en el modelo de simulación (Q_{mo}) debe estar entre $\pm 10\% Q_{me}$ para el 75% de puntos de monitoreo.
7. El 90% de los gastos del modelo están dentro del 20% de los gastos medidos, es decir, la discrepancia entre Q_{me} y Q_{mo} debe ser de $\pm 20\% Q_{me}$ para el 90% de puntos de monitoreo.
8. El 75% de las presiones del modelo están dentro de 3.5 m de las presiones medidas, es decir, la diferencia entre las presiones medidas (P_{me}) y las presiones del modelo de simulación (P_{mo}) debe estar entre ± 3.5 m de P_{me} para el 75% de puntos de monitoreo.
9. El 90% de las presiones del modelo están dentro de 7 m de las presiones medidas, es decir, la discrepancia entre P_{me} y P_{mo} debe estar en un rango de ± 7 m de P_{me} para el 90% de los puntos de monitoreo.
10. El 90% de los niveles de tanques del modelo están dentro de 0.91 m de los niveles medidos, es decir, la diferencia entre los niveles medidos en los tanques de almacenamiento y los niveles de tanques en el modelo debe estar dentro del rango de ± 0.91 m para el 90% de los puntos de monitoreo.

Speight *et al.* (2008) citado por Speight (2009), proponen una matriz de planeación del modelo, como una estructura para evaluar cualitativamente la disponibilidad, calidad y cantidad de datos disponibles para la entrada del modelo y calibración.

Alcocer, Tzátchkov y García (2004) sugieren considerar válido un ajuste en la calibración hidráulica, cuando las presiones medidas y simuladas, en los nudos difieran



menos de ± 1.5 mca, con respecto a las medidas, o bien, una discrepancia que oscile el 3%.

4.6.1.2.1 Validez del modelo

La exactitud final del modelo de simulación que se obtenga estará íntimamente relacionada con la precisión de los datos que se disponga. Para decir que un modelo de simulación es válido para un cierto tipo de problema debe responderse afirmativamente la siguiente pregunta: ¿Pueden, los que van a tomar decisiones confiar en los resultados del modelo?, Walski *et. al.* (2003); Fuertes, García-Serra e Iglesias *et. al.* (2002).

Un modelo de SDA se considera validado cuando éste es capaz de reproducir con suficiente precisión el comportamiento real del SDA con un conjunto de parámetros de entrada diferentes de aquellos que se usaron inicialmente para calibrar el modelo. En la práctica las mediciones disponibles son usualmente tan escasas que no es posible permitirse el lujo de realizar la validación, Kapelan (2010).

El uso frecuente de un modelo, junto con un alto grado de familiaridad con la red y el desempeño actual de la misma, es el mejor método para establecer la validez del modelo, Hirrel (2008).



Sargent (2013) expresa que hay tres aproximaciones básicas usadas para comparar la exactitud de las salidas del modelo de simulación con las salidas del sistema real.

1) El uso de pruebas de hipótesis para tomar una decisión objetiva.

H_0 : El modelo de simulación es válido para el rango aceptable de exactitud y precisión bajo un conjunto de condiciones experimentales.

H_1 = El modelo de simulación no es válido para el rango aceptable de exactitud y precisión bajo un conjunto de condiciones experimentales.

El error tipo I, es rechazar la validez de un modelo válido y el error tipo II, es aceptar la validez de un modelo no válido.

2) El uso de intervalos de confianza para tomar una decisión objetiva.

3) El uso de gráficas para tomar una decisión subjetiva.

Además de lo anterior es demasiado costoso y consumidor de tiempo determinar que un modelo es absolutamente válido sobre el completo dominio de su intención de uso.

Las incertidumbres inherentes de un modelo han sido ampliamente reconocidas y es ahora comúnmente conocido que el término ‘validación’ es desafortunado, debido a que su raíz ‘valido’ implica una legitimación que no se justifica en su afirmación (Tsang 1991, 1992; Anderson and Woessner 1992; Konikow and Bredehoeft 1992 entre otros citados por Oreskes y Belitz, 2001), pero los viejos hábitos tardan en morir y el término persiste. Por ello Oreskes y Belitz sugieren se abandoné su uso a favor de términos más neutrales como ‘evaluación’ o ‘valoración’ del desempeño del modelo. Asimismo comentan que todo conocimiento científico es provisional; para que la ciencia avance





debemos ser críticos del conocimiento existente, por ello todo conocimiento científico es, en algún sentido incierto.



4.6.1.3 Alternativas de solución del problema de calibración.

Hasta el día de hoy el problema de calibración no puede considerarse un problema resuelto, Savic, Kapelan y Jonkergouw (2009). Debido a ello es importante continuar investigando el tema, probando algoritmos de optimización.

Kerem (2011) aplicó los métodos de Walski (1983) y Bhave (1988) en una zona de presión de la ciudad de Ankara, Turquía. Los parámetros de calibración que ajustó fue el factor de fricción de Hazen-Williams y pérdidas menores que fueron agrupados dentro de los factores de fricción; el modelo hidráulico es usado para operación diaria. Concluyó que el método de Bhave (1988) es el más apropiado a pesar de que se asume correcto el valor de las demandas en los nodos, debido a que el método de Bhave (1988) se puede modificar de acuerdo a los datos disponibles, al tamaño y la geometría de la red. Incrementos dramáticos en los factores de Hazen-Williams fueron evaluados como evidencia de la existencia de fugas.

Las redes neuronales pueden usarse para obtener precalibraciones o guías para una calibración manual, pero son insuficientes como única herramienta de calibración (Gómez, Saldarriaga y Salas, 2003). Entre los trabajos sobre redes neuronales en calibración de redes hidráulicas están (Fayeh, 1993; Gómez, Saldarriaga y Salas, 2003).

Entre los investigadores que han usado algoritmos genéticos para la calibración de modelos RDAP en orden cronológico son: Savic (1995); Vitkovsky, Simpson y Lambert. (2000); Wu *et al.* (2002), Martínez, Bartolín y Ayllón (2003); Soares, Reis y Carrijo. (2003); Borzi *et al.* (2005); Rodríguez, Fuentes y Palma (2011) y Nicolini, Giacomello y Deb. (2011). De los autores antes mencionados Martínez, Bartolín y Ayllón (2003) lo aplicó a una red hidráulica real en la ciudad de Valencia, España; Borzi *et al.* (2005) aplicó algoritmos



genéticos en la calibración del sistema de distribución de agua de la ciudad de Parma, Italia; Koor, Puust and Vassiljev (2014) uso Darwin calibrator en la ciudad de Tallin, Estonia.

Nunca debe olvidarse que la calibración es altamente dependiente de la experiencia y buen juicio del ingeniero, para modificar parámetros o para determinar los puntos de monitoreo óptimos, hasta el punto que algunos consideran la calibración como un arte.

En Estados Unidos de América la información de gastos y presiones las obtienen de pruebas en hidrantes contra incendio y en la infraestructura de medición con que cuentan en cada red de distribución; en México prácticamente no hay hidrantes contra incendio, solo se puede tomar en los dispositivos de medición existentes o en aparatos que se coloquen ad hoc para el trabajo de calibración.

Machell, Mounce y Boxall (2010), realizó una investigación sobre la modelación en línea de sistemas de distribución de agua en la ciudad de Shetfield, Reino Unido, destacando la importancia de esta práctica en la operación de la redes de distribución y en la calibración.

Saldarriaga y Rodríguez (2009) demostraron que cuando se tiene un modelo con un error importante en el catastro, la única forma de calibrar el sistema es permitiendo aumentos en los diámetros, ya que estos compensarán las pérdidas de energía generadas por el error. Estos investigadores utilizaron el índice de resiliencia como factor para determinar cómo afecta los errores de catastro sobre el comportamiento hidráulico del sistema de distribución de agua, el estudio lo llevaron a cabo en comunidades de Colombia: la Cumbre, Andalucía Alta y Candelaria y llegaron a las siguientes conclusiones:

1. Los modelos con errores en el catastro que producen Índices de resiliencia altos generan errores muy importantes en el comportamiento hidráulico de los nodos de



presión en toda la red, ya que la eliminación de la tubería hace que el flujo tenga que recorrer mayores distancias para suministrar las demandas perdiendo más energía que en la condición de modelos sin errores en el catastro.

2. En el caso del comportamiento hidráulico de la masa, índice de resiliencia muy altos no afectan de manera importante el flujo en las tuberías en redes donde predominan las demandas desconocidas, sin embargo, pueden generar mayores errores en redes con mucha presencia de fugas.
3. Los escenarios que generan un alto índice de resiliencia no son capaces de representar el comportamiento del sistema, afectando principalmente la presión.
4. Errores en el catastro que generan índices de resiliencia muy bajos no afectan el comportamiento hidráulico del sistema y se logra modelar adecuadamente la red de distribución.

Martínez, Bartolín y Ayllon (2003) realizaron calibración en la red hidráulica de la ciudad de Valencia, España, que tiene cerca de 400, 000 habitantes, tiene alrededor de 1200 km de tuberías y es alimentada por gravedad desde dos plantas potabilizadoras, localizadas a 15 km hacia el oeste de la ciudad. Tiene una demanda promedio de $3.7 \text{ m}^3/\text{s}$ con un gasto pico de $4.9 \text{ m}^3/\text{s}$. El sistema es controlado por válvulas lo cual hace que la calibración sea compleja. Tiene 40 válvulas que operan remotamente de las cuales 36 son cruciales para la operación normal de la red de la ciudad. Calibraron los valores de k de las válvulas para después recalibrar los valores de los coeficientes de rugosidad de las tuberías.

Walski (1983) da las siguientes recomendaciones sobre cuál parámetro calibrar en una red hidráulica:

1. Ajustar C si hay error similar en alto y bajo gasto.



2. Ajustar C y Q en cantidades similares si el modelo es preciso en bajo gasto pero impreciso en alto gasto.
3. Ajustar Q si el modelo es preciso en alto gasto pero impreciso en bajo gasto.

Las presiones deben ser medidas tan lejos de las condiciones de frontera como sea posible, para maximizar la pérdida de carga medida, AWWA (2005).

Savic, Kapelan y Jonkergouw (2009) recomiendan se realice la calibración hidráulica en conjunto con la calibración del modelo de calidad del agua.

Herrin (1997) sugiere respecto a realizar ajustes a los modelos lo siguiente:

1. Si la línea de gradiente hidráulico del modelo es más alta que los valores registrados en campo, entonces el modelo no predice suficiente pérdida de carga. Para producir mayores pérdidas de carga, se debe reducir el factor de fricción de Hazen-Williams ó incrementar las demandas de los nodos en el área de medición o hacer ambas cosas.
2. Si la línea de gradiente hidráulico del modelo es más baja que los valores registrados en campo, entonces el modelo está prediciendo mucha pérdida de carga. Para producir menor pérdida de carga, se debe aumentar el coeficiente de Hazen-Williams ó disminuir las demandas de los nodos en el área de medición o hacer ambas cosas.

La calibración de un modelo de simulación en periodo extendido esencialmente involucra redefinir la caracterización de las curvas diurnas del uso del agua para varios tipos de usuario y conocer la demanda base de los mismos, identificar el agua no contabilizada, identificar fugas en el sistema, AWWA (2005).



Kool *et al.* (1987) citado por Kapelan (2010) menciona que un problema mal planteado tiene las siguientes características: 1) no hay solución 2) la solución no es única 3) la solución es inestable. Si es posible, será valioso conocer bajo qué condiciones la solución del problema de calibración de SDA es identificable, único y estable.

Kapelan (2010), estudio la calibración en distintos casos de estudios en redes artificiales y reales, llego a las siguientes conclusiones:

1. Para obtener resultados válidos de un SDA, los modelos hidráulicos deben ser calibrados para un número limitado de parámetros de calibración, para el número de parámetros cuyos valores puedan ser estimados con fiabilidad a partir de la información disponible observada.
2. Cuando el número de parámetros de calibración se incrementa, su fiabilidad disminuye (se incrementa la incertidumbre sobre los parámetros).
3. El uso de información previa (IP) sobre los parámetros del SDA, puede llevar o no a determinar valores que son cercanos a sus valores verdaderos. El resultado depende de la calidad y cantidad de la IP. No hay garantía de que un problema mal planteado se vuelva en un problema bien planteado.
4. Para el caso particular del caso de estudio CAL2, para la red de una población inglesa llamada Guiseley (West Yorkshire, UK) con una población de 4500 habitantes, calibró para los coeficientes de rugosidad, formo inicialmente 159 parámetros, de ellos solo logró calibrar 10, por lo tanto podemos concluir que calibró el 6% de los parámetros.
5. Cualquier información disponible sea directa o indirectamente relacionada a un particular SDA, debe ser recolectada, aun si esta parece no ser importante inicialmente.



6. El problema mal planteado típicamente se manifiesta como un problema que no tiene solución única y esto es consecuencia de la inadecuada cantidad y calidad de la información observada.
7. La determinación de los valores de los parámetros es considerada solo el primer paso en el análisis de los resultados de calibración. También se debe determinar si la solución obtenida es identificable, única y estable; determinar la aptitud del modelo usando estadísticas; determinar qué tan fiables son los resultados de calibración.
8. El autor realizó un diseño muestral para la calibración hidráulica de la red del poblado Guiseley, por medio de algoritmos genéticos con una función objetivo, logrando que esta sea 20% mejor que el diseño muestral de un experto, midiendo este porcentaje en términos de la incertidumbre del modelo calibrado.

Araya (2012) presenta la calibración para el sistema de distribución del acueducto la sirena en cali, colombia; utilizo un programa de optimización llamado PPEST el cual usa el método Gauss-Marquardt-Levenberg (GML), para ajustar los siguientes parámetros: patrones de comportamiento de la demanda, demandas nodales, coeficientes de pérdidas secundarias, coeficientes de pérdidas de las válvulas tipo flotador y el coeficiente de pérdidas por fricción (C), estudio dos escenarios uno sin restricciones (*i.e.* con 723 parámetros) y con restricciones (*i.e.* 24 parámetros), teniendo las siguientes conclusiones:

- 1) En el escenario sin restricciones: el PPEST es capaz de producir una solución numérica correcta pero sin sentido físico (*i.e.* el espacio de soluciones es demasiado grande), donde al haber un excesivo número de parámetros ajustables junto con una cantidad insuficiente de datos bajo ese espacio de soluciones, es probable que coincidan las observaciones sin lograr encontrar los valores óptimos de cada uno de los parámetros declarados. Hay una compensación en los errores en las demandas



nodales por los errores en los patrones de comportamiento de la demanda, los coeficientes de pérdidas menores y cualquier otro parámetro ajustable.

- 2) En el escenario con restricciones: La compensación de errores es más baja comparado con el escenario sin restricciones. Esta solución sugiere ser físicamente más correcta dado que PPEST tenía una mayor probabilidad de encontrar el conjunto óptimo de valores.
- 3) Las demandas nodales constituyen el parámetro con mayor sensibilidad del modelo y los coeficientes de pérdida de las válvulas tipo flotador son el segundo grupo con mayor sensibilidad.

Cheng, Yu y Xu (2014) presentan un estudio sobre la modelación en tiempo real de un SDA de la ciudad de Guanzhou, China, en el cual hacen una estimación de estado del sistema (*i.e.* combinar el modelo hidráulico en tiempo real con mediciones de campo proporcionadas por sistemas SCADA) para tener una mejor comprensión del comportamiento del SDA y calcular las variables de estado que no pueden ser directamente medidas. El sistema SCADA tiene 169 puntos de medición de presión y 69 de medición de caudal, concluyeron lo siguiente:

- 1.-El 90% de los puntos de medición se tiene una diferencia en la estimación de la carga de presión de menos de 1.5 m, y el 95% de los puntos de medición se tiene una diferencia de menos de 2 m.
- 2.-Los autores comentan que la demanda nodal se corrige cada 15 minutos, y que la precisión del modelo llega a ser suficientemente buena para que las personas que controlan el SDA tomen decisiones.
- 3.-La experiencia en Guanzhou muestra que una discrepancia entre los resultados del modelo de simulación y los valores observados de 2 m es aceptable. Estos



investigadores opinan que nadie puede prometer que el modelo de simulación tenga errores de menos de 2 m, en cualquier tiempo.

Alvisi y Franchini (2010) propusieron el uso de números grey para determinar el valor real de la rugosidad de una tubería tomando en cuenta la incertidumbre del mismo parámetro en el contexto de la calibración un modelo de simulación de SDA; la incertidumbre se representa por la amplitud del número grey (o intervalo). El procedimiento es de carácter general y puede ser aplicado para la calibración (con incertidumbre) de otros parámetros o cantidades, tales como la demanda. Los investigadores llegaron a las siguientes conclusiones:

- 1.-Los dos casos hipotéticos muestran que el procedimiento de calibración puede resolver correctamente el problema inverso, cuando el problema está sobredeterminado (over-determined).
- 2.-Cuando el número de nodos medidos es menor que el número de rugosidades grey a ser calibradas, la solución del problema de calibración (como se esperaba), es decir, los valores de los número de rugosidad grey no reflejan los valores verdaderos en la red (*i.e.* problema indeterminado).
- 3.-El ejemplo numérico para el caso real permite la identificación de los números grey relativos a los diferentes de materiales usados en la red.
- 4.-Cuando los escenarios de la demanda no son seleccionados apropiadamente, no hay soluciones razonables en el sentido de no habrá números grey de coeficiente de rugosidad que permitan el cálculo de números grey de la carga de presión que contengan los valores observados.

Davidson y Bouchart (2006), estudiaron el método de demanda proporcional (PDM) y el método de demanda objetivo (TDM), dos técnicas para ajustar las demandas estimadas en



modelos hidráulicos de SDA para producir soluciones consistentes con el software Supervisión, Control y Adquisición de datos (SCADA); las dos técnicas asumen que las resistencias de las tuberías y los datos de SCADA son exactos, y que la combinación de datos SCADA y las demandas estimadas producen problemas sobredeterminados. Los métodos son para la intención de uso de modelación en tiempo real, solo que están limitados a flujo cuasi-permanente. Los investigadores llegaron a las siguientes conclusiones:

- 1.-Las soluciones obtenidas por el método de demanda proporcional y el método de la demanda objetivo no garantizan que sea el estado actual de la red. Si el problema es indeterminado no hay técnica que pueda dar esa información.
- 2.-Lo mejor que las técnicas puede proporcionar es un escenario más probable del estado actual de la red, en vez de un número infinito de soluciones factibles.

Kozelj, Kapelan, Novak y Steinman (2014) realizaron un estudio para el análisis de incertidumbre del parámetro de rugosidad de las tuberías, se llevó a cabo en un modelo hipotético y en un modelo de un SDA real. La identificabilidad de los parámetros de la rugosidad de la tubería es difícil debido a la información limitada, es decir, hay pocos datos observados. Los autores formularon el problema de modelación inversa (*i.e.* calibración) como una aproximación probabilística bayesiana y la resolvieron con el método de cadenas de Markov Monte Carlo (MCMC) muestra la capacidad de estimar parámetros y la incertidumbre asociada (*i.e.* la incertidumbre de los parámetros) a los mismos en una ejecución del procedimiento de optimización. Los investigadores hicieron las siguientes observaciones finales del estudio:



- 1.-La identificación de parámetros con poca sensibilidad es difícil donde los datos observados no proporcionan suficiente información para hacer una razonable estimación de los parámetros.
- 2.-En el caso de estudio de la red hipotética, formó 6 grupos de rugosidad, generó un ruido aleatorio con distribución normal y media cero, los grupos de parámetros PG3 Y PG4, tienen un alto coeficiente de correlación -0.882.
- 3.-En el caso de estudio del SDA real tiene una población de 34,000 habitantes y su demanda total promedio estimada es de 93.87 l/s, formó 25 grupos de rugosidad (PG). El modelo del SDA se ajusta coincide bien con los datos observados con una raíz cuadrada del error (RMSE=0.458 m). Todas las observaciones caen dentro del 95% de la incertidumbre predictiva.
- 4.-Los resultados de este estudio, demuestra que la información previa sobre los coeficientes de rugosidad de la tubería y la correcta representación de los residuales mejora significativamente la identificabilidad de los parámetros y reduce la incertidumbre predictiva de los mismos.

Speight y Khanal (2009) en su estudio “Calibración de modelos y actual uso en la práctica”, discuten el tipo de calibración que se está llevando a cabo en USA, el tipo de datos que son comúnmente usados, las técnicas para la calibración y los medios necesarios para lograr una calibración suficientemente exacta para cumplir los objetivos de la modelación, entre otros. Las conclusiones de los autores son:

- 1.-A pesar del progreso en el campo de investigación, la mayoría de las compañías de agua en USA, no está actualmente usando herramientas avanzadas de calibración y su aplicación queda en gran parte en el plano académico.
- 2.-Además de las limitaciones de personal para la modelación y calibración, las compañías se enfocan principalmente a la recolección de datos para apoyar las aplicaciones de la



modelación. La exactitud de un modelo es altamente dependiente de la calidad de sus datos de entrada así que las compañías están enfocadas a la implementación de sistemas GIS y SCADA, antes de proceder a las aplicaciones de la modelación.

3.-El procedimiento de calibración es a menudo visto como una manera de encontrar y corregir errores en los datos de entrada, más que el ajuste fino de los parámetros de calibración.

4.-El criterio de calibración reportado por las compañías en ese estudio permite un relativo buen ajuste entre el modelo de simulación y los datos observados en el sistema real sin requerir de una calibración precisa.

5.-Hay empresas de la industria del agua, que no son capaces de justificar la recolección de datos de campo y el esfuerzo necesario para aplicar las técnicas avanzadas de calibración. No obstante, están creando planes a largo plazo para una completa integración entre diferentes bases de datos, tal como GIS, con sus modelos, y están trabajando en pos de aplicar modelos más sofisticados en el futuro.

Jacobsen Laura B. y Kamojjala Sri (2009) presenta un trabajo llamado “Herramientas y procesos para la calibración de un modelo ‘large all-pipes’, del Distrito de agua del valle de ‘Las Vegas’, el cual está compuesto de 157, 000 tuberías (*i.e.* 6400 kilómetros de tuberías), 24 zonas de presión, 32 tanques de almacenamiento, 43 estaciones de bombeo con más de 220 unidades de bombeo. Las tuberías modeladas no incluyen los servicios laterales, que no proporcionan beneficio en la modelación; se usaron 265 puntos de muestreo (*i.e.* el 0.2% del recomendado por AWWA (1999)). La presión promedio de campo fue comparada con las presiones del modelo de simulación. Las conclusiones de los investigadores son:

1.-Debido a que la calibración del modelo del Distrito se ha llevado a cabo anualmente por 20 años, los principales problemas de calibración fueron cuestiones de campo (*i.e.* ajuste de



válvulas, mal funcionamiento de medidores de flujo, cambios en el sistema no reflejados en el modelo).

2.-El uso de herramientas automáticas de integración de datos proporciona más tiempo para el análisis de datos de calibración, y hacer ajustes necesarios al modelo hidráulico.

3.-El monitoreo de niveles de agua es de primordial importancia para mantener un modelo que pueda predecir con exactitud el comportamiento del sistema.

3.-El muestreo de presiones del 2% puede ser impráctico para modelos grandes 'all-pipes'.

4.-Una integración con datos GIS, la calibración diaria del modelo, un continuo examen de las estaciones de bombeo, tanques de almacenamiento, tuberías, ajustes de válvulas, desarrollo/aplicación de herramientas automáticas y procesos han sido la clave para generar modelos con una gran exactitud en el Distrito.



Cuadro 4.1 Breve resumen de métodos para resolver el problema de CMSH revisados

Autor	Tipo de red	Método	Ventajas y desventajas	No. de parámetros calibrados
Tabesh (2011)	1 Red hipotética	Algoritmos Genéticos en modelos DDA y PDA	La calibración de modelos PDA tiene errores más bajos en comparación con DDA, debido a su habilidad para simular el desempeño hidráulico más realista.	Análisis 4 escenarios de calibración c/u con: 16,12,28 y 16 (i.e. rugosidad, demanda, rugosidad-demanda y diámetros).
Kang y Lansey (2011)	Caso 1: Red hipotética: 13 tuberías y 8 nodos de demanda. Caso 2: Red real: 50 nodos de demandas, 60.34 km de tuberías.	Estimación secuencial de dos pasos.	La aplicación en una red pequeña demuestra que el método es estable para converger. El método puede ser aplicado a redes reales complejas.	Caso 1: 7 parámetros: 4 de rugosidad y 3 de demanda. Caso 2: 22 parámetros: 14 grupos de demanda y 8 grupos de rugosidad.
Cheng y He (2011)	2 casos analizados: 1 Red hipotética. 1 red real.	Descomposición de valores singulares (SVD)	El SVD identifica los parámetros desconocidos, cuando las ecuaciones están sobredeterminadas, igualmente determinadas e indeterminadas.	Caso hipotético: No específica. Caso real: No específica.
Kapelan (2010)	4 Casos de estudio: 3 redes hipotéticas. 1 Red real (CAL2), Guiseley (UK).	Híbrido: Algoritmos Genéticos (AG) y Levenberg-Maquardt	El método supera a AG en eficiencia y efectividad. Éste prueba ser estable, más exacto y más rápido que AG. Como desventaja tiene que uno o más parámetros adicionales necesitan ser ajustados.	Caso CAL1: 6 parámetros; 4 fricción, 2 fugas. Caso CAL2: 10 parámetros de fricción. Caso CAL3: 4 parámetros de fricción. Caso CAL4: 17 parámetros; 11 fricción, 6 fugas.
Darvini y Soldini (2014)	Red Real (15 000 habitantes); Chiaravalle, Italia.	Análisis de Decisión multicriterio	Selecciona el mejor criterio de minimización de los valores calculados y medidos de presión en 6 sensores instalados.	5 parámetros de rugosidad.



4.7 Conclusiones sobre la bibliografía

Los principales elementos técnicos y sociales que dificultan la aplicación de calibración hidráulica en los modelos de simulación de sistemas de distribución de agua generalmente son: falta de actualización de catastro, falta de personal calificado en la medición, falta de dinero en los sistemas operadores de agua. La calibración será importante para aquellos sistemas operadores que valoren la importancia de ofrecer un buen servicio de agua potable en cantidad de agua y en calidad de la misma y cuenten con un modelo de simulación de su red hidráulica.

En México los trabajos recientes que abordan el problema de calibración en modelos de simulación hidráulico (CMSH) están Alcocer, Tzatchkov y Martín (2005), Alcocer y Tzatchkov (2004) y Rodríguez, Fuentes y Palma (2011). La documentación es escasa, debido probablemente a que no es una actividad que se lleve a cabo con frecuencia en los sistemas operadores de agua o en las asociaciones de usuarios, es costoso realizarla y hay lugares donde no cuentan con un modelo de simulación; en otras ocasiones es información confidencial de empresas o instituciones.

Los investigadores que han abordado el problema de calibración solo han llegado a resultados parciales llegando a determinar solo del 4-12% del total de variables desconocidas en las redes hidráulicas.

De acuerdo con la información consultada, en Latinoamérica, Colombia es el país que está realizando mayores esfuerzos por calibrar y validar hidráulicamente sus redes de simulación.

Dado que las pérdidas comerciales y técnicas están presentes en todas las redes de distribución de agua en países desarrollados y en vías de desarrollo como los países de



Latinoamérica, se coincide con el procedimiento de CIAGUA Colombia, es preciso calibrar primero la masa del sistema de distribución y posteriormente la energía.

Es más práctico utilizar para la calibración, los patrones de consumo de agua y patrones de presiones, recolectados en las tuberías primarias que construir la línea de gradiente hidráulico de la red hidráulica.

El flujo real en un SDA es un flujo transitorio, el modelo simulación que más se acerca al comportamiento real son los modelos de flujo transitorio y estos solo se hacen para simular golpe de ariete normalmente y no el comportamiento de una red hidráulica. No obstante lo anterior, cualquier esfuerzo que se haga por conocer el comportamiento de un SDA siempre será bueno para los Organismos Operadores de agua.

Debido a las aristas que tiene el problema de calibración de modelos de simulación hidráulicos (PCMSH) es recomendable que se aborde por profesionales de distintas disciplinas (matemáticos, hidráulicos, ingenieros computacionales, estadísticos).

Al abordar el PCMSH, el punto de partida es el tener más incógnitas que variables conocidas, problema mal planteado.



V. PROCESOS DE DECISIÓN DE MARKOV.

5.1 Teoría de los procesos de decisión de Markov (PDM).

El proceso de Markov es un proceso estocástico que satisface una propiedad, la propiedad de Markov. Un proceso satisface esta propiedad si puede hacer predicciones para el futuro del proceso basado solo en su estado presente también como si se conociera la historia completa del proceso [112].

Los procesos de decisión de Markov son una extensión de las cadenas de Markov que se le adiciona las recompensas inmediatas y las funciones de valor estado-acción; si solo una acción existe en cada estado y todas las recompensas son las mismas (*e.g.* cero), los PDM se reducen a una Cadena de Markov.

Los procesos de decisión de Markov, también son programas dinámicos estocásticos o problemas de control estocástico, son modelos para la toma de decisiones secuenciales cuando los resultados son inciertos. Los PDM consisten de 5 elementos: episodios de decisión, estados, acciones, recompensas y probabilidades de transición. Elegir una acción en un estado genera una recompensa y determina el estado del siguiente episodio de decisión a través de una función de transición de probabilidad. Los tomadores de decisión buscan las políticas óptimas (Puterman, 1994).

Los PDM son un caso particular de modelos de decisión secuencial (MDS), los ingredientes clave son:

- 1.-Un conjunto de episodios de decisión.
- 2.-Un conjunto de estados del sistema.
- 3.-Un conjunto de acciones disponibles.



- 4.-Un conjunto de estados y acciones que dependen de las recompensas inmediatas o costos.
- 5.-Un conjunto de estados y acciones que dependen de probabilidades de transición.

Un MDS se puede describir como: en cada episodio de decisión, el estado del sistema ó ambiente proporciona a los tomadores de decisión toda la información necesaria para elegir una acción a partir de un conjunto de acciones disponibles en ese estado. Como resultado de elegir una acción en un estado, dos cosas suceden: el tomador de decisión recibe una recompensa y el sistema se traslada a un posible diferente estado en el siguiente episodio de decisión. Tanto las recompensas como las probabilidades de transición dependen del estado y la acción elegida. Conforme el proceso evoluciona a través del tiempo, el tomador de decisiones recibe una secuencia de recompensas.

Una política da al tomador de decisiones una receta con la cual elegir una acción en cualquier posible estado futuro. Implementar una política genera una secuencia de recompensas.

En cada episodio de decisión el sistema ocupa un estado. El conjunto de posibles estados se denota como S . Si, en algún episodio de decisión, el tomador de decisión observa el sistema en el estado $s \in S$, el puede elegir una acción a del conjunto de acciones disponibles en el estado s , As .

Como resultado de elegir la acción $a \in As$ en el estado s en el episodio de decisión t ,

- 1.-El tomador de decisión recibe una recompensa, $r_t(s, a)$ y
- 2.-El estado del sistema en el siguiente episodio de decisión es determinado por la distribución de probabilidad $p_t(s_{t+1}|s, a)$.



Sea la función de real $r_t(s, a)$ definida por $s \in S$ y $a \in A_s$, que representa el valor en el tiempo t de la recompensa recibida en el periodo t (Puterman, 1994). Una función de recompensa define que eventos son buenos o malos para el agente o tomador de decisión.

Mientras una función de recompensa indica que es bueno en un sentido inmediato, una función de valor (*e.g.* ecuación 5.4) especifica que es bueno a largo del episodio de decisión. En otras palabras, la recompensa determina la deseabilidad inmediata de los estados del ambiente ó sistema, la función de valor indica la deseabilidad a largo plazo de los estados después de tomar en cuenta los estados que es probable se seleccionen después de él, y las recompensas disponibles en aquellos estados (*e.g.* un estado puede tener una baja recompensa inmediata, no obstante, tener un alto valor debido a que regularmente ése estado conduce a otros estados que rindan altas recompensas, o la inversa).

El propósito de estimar una función de valor es lograr más recompensas. Las acciones son elegidas basadas en juicios de valor. Se busca acciones que conduzcan a estados con el más alto valor no a las recompensas más altas, debido a que esas decisiones obtienen la más grande cantidad de recompensas para nosotros a largo plazo.

El aprendiz ó tomador de decisiones se llama agente. Lo que interactúa con él, todo lo exterior al agente se llama ambiente. En esta interacción continua, el agente selecciona acciones y el ambiente responde a aquellas acciones, presentando nuevas situaciones al agente.

Un agente recibirá luego de algún intervalo de tiempo t una secuencia de recompensas del tipo $r_{t+1}, r_{t+2}, r_{t+3} \dots$, que nos permite definir el modelo de comportamiento óptimo u optimalidad, o función R_t que el agente busca maximizar, ésta función se define de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$R_t = r_{t+1} + r_{t+2} + r_{t+3} + \dots + r_T = \sum_{t=0}^T r_t \quad (5.1)$$



donde t son intervalos discretos de tiempo y T el tiempo final. Al modelo se le conoce como modelo de horizonte finito, es aplicable cuando se tiene noción de la localización del estado final, es decir, cuando la interacción agente-ambiente se compone de episodios.

En el modelo de horizonte finito toda la información necesaria para tomar decisiones en un intervalo de tiempo t , está contenida en $r_t(s_t, a)$ y $p_t(s_{t+1}|s_t, a)$.

El agente y el ambiente interactúan en cada secuencia de pasos discretos en el tiempo, $t=0,1,2,3\dots N$, donde $N<\infty$. En cada paso de tiempo t , el agente recibe alguna representación del estado del ambiente, $s \in S$, donde S es el conjunto de posibles estados, sobre la base de esto selecciona una acción, $a \in AS_t$, donde AS_t , es el conjunto de acciones disponibles en el estado s_t . Un paso de tiempo después, en parte como consecuencia de su acción elegida, el agente recibe una recompensa numérica, $r_{t+1} \in R$, y se traslada así en un nuevo estado s_{t+1} , ver Figura 5.1

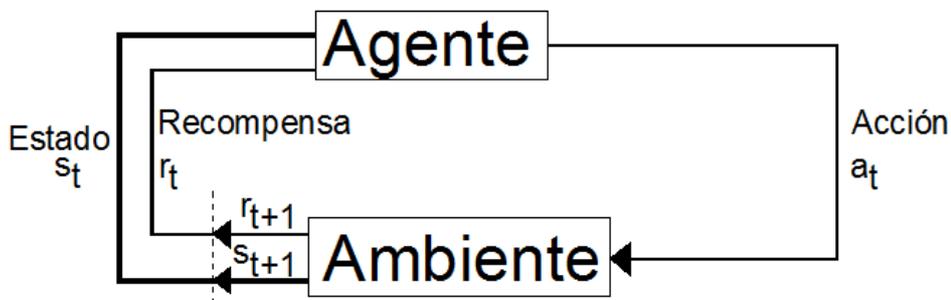


Figura 5.1 Interacción Agente-Ambiente en aprendizaje por refuerzo.
 Fuente: Sutton y Barto (1998).

Un agente en un tiempo t localizado en un estado $s_t \in S$ elige de las posibles acciones, $a_t \in AS_t$ en el estado de acuerdo a una política de selección (ϵ -greedy u otra). La regla 5.4,



actualiza la función de evaluación para ese par estado-acción considerando el valor de recompensa obtenido, r_t , y la función de evaluación máxima para todas las posibles acciones en el estado futuro s' , (Sutton y Barto, 1998).

En cada paso de tiempo, el agente hace un mapeo de los estados a las probabilidades de seleccionar cada posible acción. Este mapeo se define como la política del agente π_t , donde $\pi_t(s, a)$, es la probabilidad de que $a_t = a$ dado que $s_t = s$. Esta política determina el comportamiento del agente conduciéndolo a seleccionar acciones que le permitan incrementar la suma de valores de refuerzo en el largo plazo. El agente aprende la política óptima aplicando prueba y error, guiado por el algoritmo.

Elegir una acción en un estado genera una recompensa y determina el estado en el siguiente episodio de decisión a través de una función de probabilidad de transición, ver ecuación 5.2.

En el presente trabajo se asume la siguiente condición, necesaria para establecer la probabilidad de los estados:

$$\sum_{s_{t+1} \in S} p_t(s_{t+1} | s_t, a) = 1$$

de forma que la colección $\{T, S, A(s), p_t(\cdot | s_t, a), r_t(s_t, a)\}$ se conoce como un PDM. El apelativo “Markov” se usa debido a que la única liga de la probabilidad de transición y la función de recompensa con el pasado es a través del estado actual y de la acción seleccionada por el agente en ese estado.



Un proceso de decisión de Markov finito se define por sus estados y acciones y por un paso dinámico del ambiente. Dado cualquier estado y acción s y a , la probabilidad de cada posible estado, s' , es:

$$p_{ss'}^a = Pr\{s_{t+1} = s' | s_t = s, a_t = a\} \quad (5.2)$$

Estas cantidades son llamadas probabilidades de transición. De igual forma, dado un estado actual y acción, s y a , juntos con cualquier siguiente estado, s' , el valor esperado de la siguiente recompensa es:

$$R_{ss'}^a = E\{r_{t+1} | s_t = s, a_t = a, s_{t+1} = s'\} \quad (5.3)$$

Estas cantidades especifican los más importantes aspectos de la dinámica de los procesos de decisión de Markov finitos (solo la información acerca de la distribución de la recompensas alrededor del valor esperado se pierde).

La programación dinámica se refiere a un conjunto de algoritmos que pueden ser usados para calcular las políticas óptimas dado un modelo perfecto del ambiente como un proceso de decisión de Markov (PDM). El Método de Monte Carlo no asume un completo conocimiento del ambiente; requiere solo de experiencia, muestras secuenciales de estados, acciones y recompensas de una interacción simulada con un ambiente (Sutton y Barto, 1998).

El método que se usará en la presente tesis para la calibración es Q -learning y es parte del método de aprendizaje de diferencias temporales (DT).



Q-learning es un algoritmo que permite aprender funciones de valor para los pares estado-acción, mismo que reúne las ventajas de la programación dinámica y de los métodos de Monte Carlo (Mariano, 2001).

El aprendizaje de DT es una combinación de ideas de Monte Carlo y Programación dinámica (Sutton y Barto, 1998).

Q-learning es un algoritmo que realiza *bootstrap*, que no requiere un modelo del ambiente y estima las funciones de valor incrementalmente, no necesita esperar hasta que un episodio finalice. El método converge con probabilidad 1 a la política óptima si se considera una estrategia de selección de acciones en los estados, ϵ -greedy, y la actualización se realiza de forma greedy respecto a la acción a' , en el estado futuro, s' , véase figura 5.2 y ecuación 5.4.

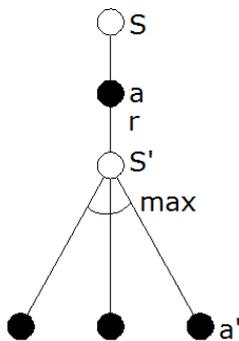


Figura 5.2.-Diagrama de apoyo para Q-learning.
 Fuente: Sutton y Barto (1998).

(Sutton y Barto, 1998) presentan la siguiente regla de actualización para la función de valor:

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow Q(s_t, a_t) + \alpha[r_{t+1} + \gamma \max_{a'} Q(s_{t+1}, a) - Q(s_t, a_t)] \quad (5.4)$$

Donde:



$Q(s, a)$: Función de valor para la acción seleccionada en el estado donde se selecciona.

γ : Factor de descuento que toma valores cercanos a 1, determina el impacto de las recompensas futuras.

α : -Factor de aprendizaje. Si es 0, implicaría que no aprende de la experiencia adquirida a lo largo del proceso.

r : Valor de la recompensa que se recibe tras aplicar la acción a en el estado s .

$\max Q(s', a')$: Valor de la función de valor mejor evaluada para la acción s' , es decir, el estado resultante de la transición de s luego de aplicar a .

La función de valor-acción aprendida Q , se aproxima a Q^* , la función de valor optima, independientemente de la política que se siga. La política tiene un efecto en determinar cuáles pares estado-acción son visitados y actualizados. Sin embargo, todo lo que se requiere para la correcta convergencia es que todos los pares continúen siendo actualizados.

Algoritmo Q -Learning

Inicializa $Q(s, a)=1$ ó de forma arbitraria

Repite para n episodios de decisión

Inicializa s

Repite para m pasos en el episodio

Selecciona a en s usando una política derivada de Q , ϵ -greedy

Aplica a , y observa r, s'

$$Q(s, a) \leftarrow Q(s, a) + \alpha \left[r + \gamma \max_{a'} Q(s', a') - Q(s, a) \right]$$

$s \leftarrow s'$



Hasta que s sea terminal.

El agente inicia en el estado s_0 , en el episodio 1, selecciona una acción a_2 con política ϵ -greedy, el ambiente le asigna una recompensa $r_2(s,a)$, se actualiza la función de valor de ése par estado-acción con la ecuación 5.4, y pasa al siguiente estado x_2 , inicia el episodio 2, se actualiza la probabilidad de transición $p(s,a)$, selecciona una acción a_3 , recibe una recompensa $r_3(s,a)$, se actualiza su función de valor del par estado-acción con ecuación 5.4, y pasa al estado y_3 , inicia el episodio 3, se actualiza la probabilidad de transición $p(s,a)$, selecciona una acción a_2 , recibe una recompensa $r_2(s,a)$, se actualiza su función de valor del par estado-acción con ecuación 5.4, y pasa al estado z_3 , ver figura 5.3.

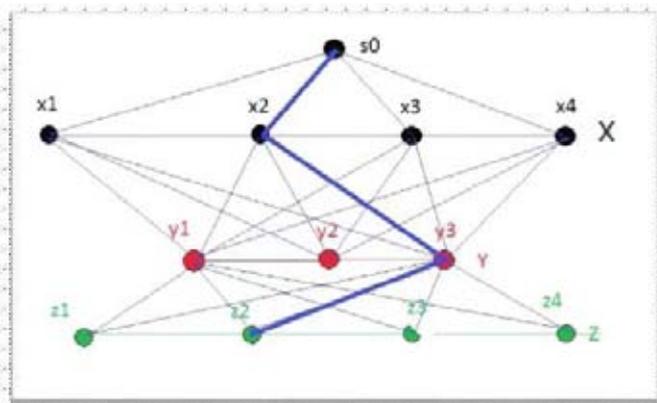


Figura 5.3 Proceso de selección de variables

Se realizaron programas de cómputo, para simular la interacción agente-ambiente, siendo el ambiente el SDA real (i.e. el modelo experimental), las acciones: los coeficientes de rugosidad y las demandas nodales.



VI. MATERIALES Y MÉTODOS

El modelo experimental se construyó en el Laboratorio de Hidráulica de la División de estudios de posgrado de la facultad de ingeniería, en el campus Jiutepec, Morelos, se encuentra dentro de las instalaciones del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

En la figura 6.1 se puede ver el esquema de este modelo, está compuesto por 4 circuitos, dos ramales, 4 tomas domiciliarias para simulación de diferentes patrones de demanda, y 10 puntos de muestreo de presión; también se colocaron 10 válvulas de esferas para simular la reducción del diámetro interno por incrustaciones en la tubería.

Se colocaron manómetros de glicerina de 2 kg/cm^2 , para medir las pérdidas de carga entre tramos de la red.

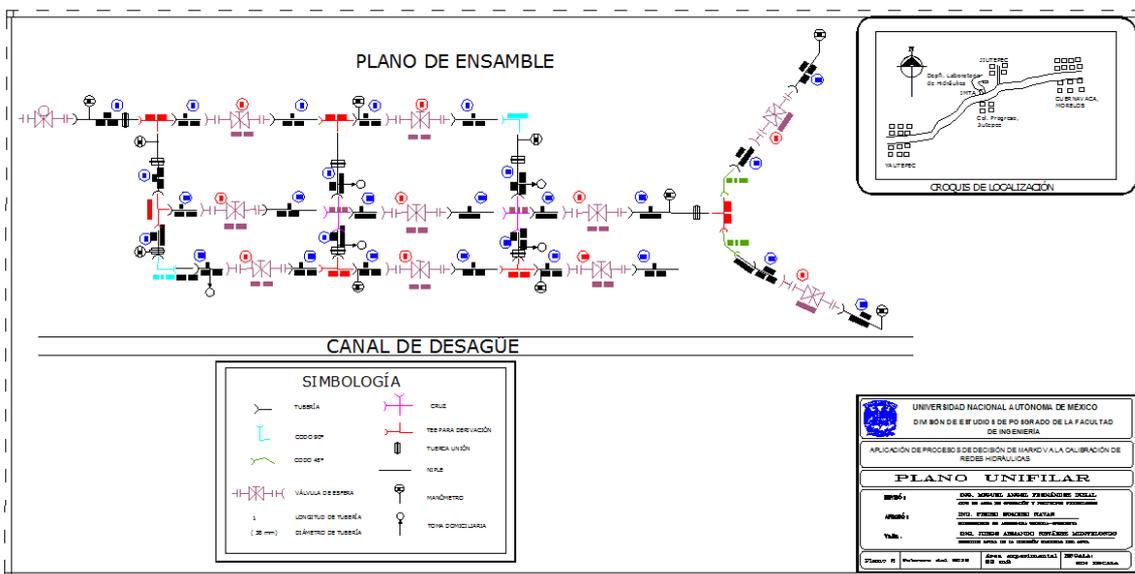


Figura 6.1.- Plano Unifilar de modelo experimental de red de distribución de agua.

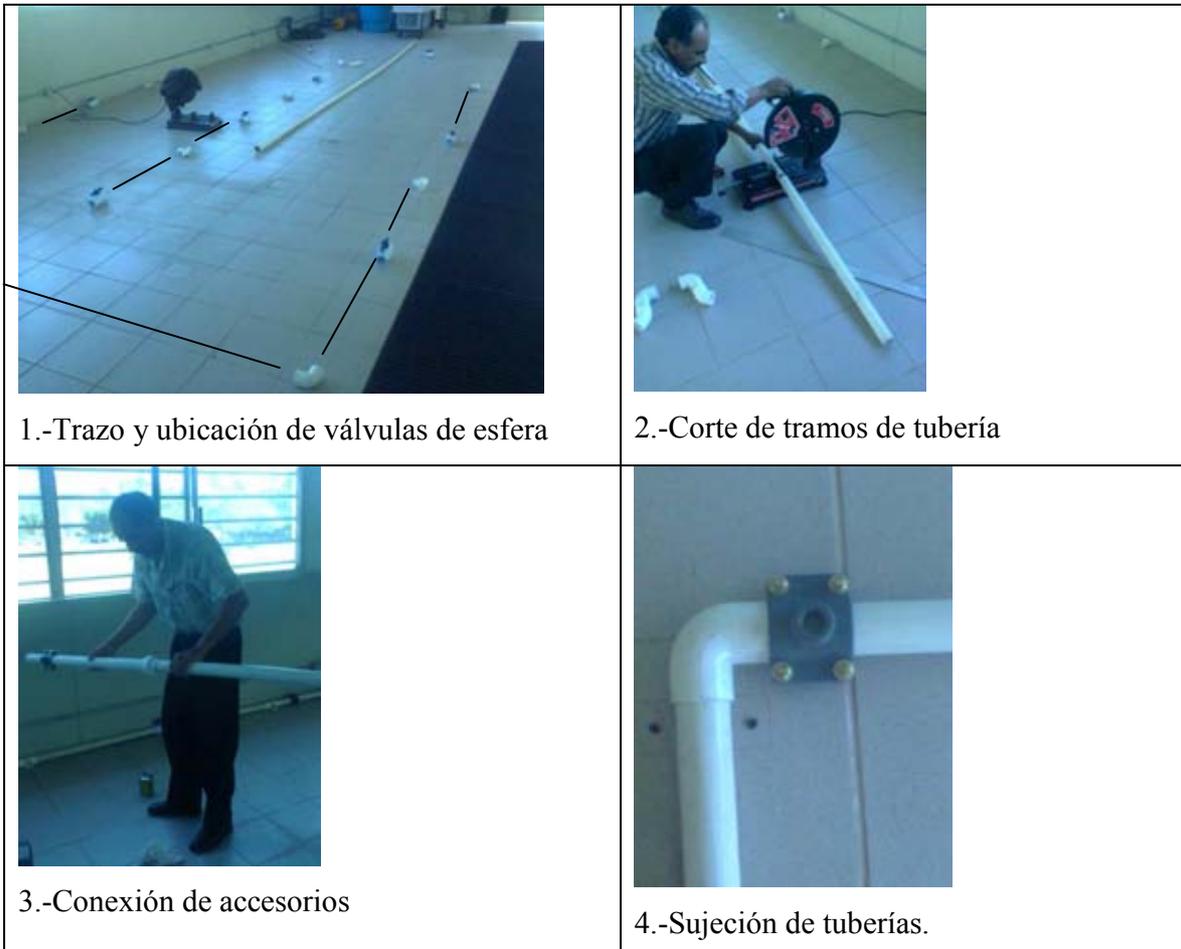
La red hidráulica se construyó con tubería de PVC de 1.5” pulgadas, con una resistencia de 11 kg/cm^2 . Las válvulas son de PVC.

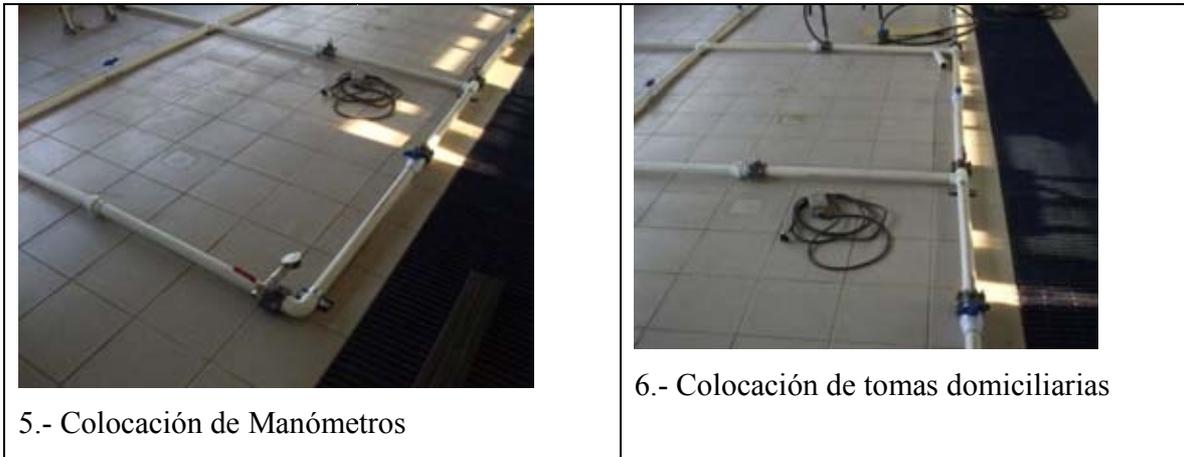


El material que se utilizó para la construcción del experimento es:

- Cortadora
- Taladro
- Pegamento para PVC.
- Flexómetro
- Abrazaderas Omega, calzas de hule, taquetes y pijas para la sujeción de la tubería al piso.

El proceso de construcción del experimento se puede ver en la figura 6.2, el cual abarco un área de 32 m² (8x4).





5.- Colocación de Manómetros

6.- Colocación de tomas domiciliarias

Figura 6.2.- Proceso de construcción de modelo experimental.

Se usó abrazaderas para tomas domiciliarias de ½”, colocando tubería de polietileno para descargar el agua en el canal de desagüe.

Se utilizó tuercas unión para dividir el modelo experimental y fuera más rápida la construcción del experimento y para desarmarlo en caso necesario.

Se utilizó un medidor electromagnético de 2” de diámetro, se cumplió con el requisito de distancia mínima entre una zona con flujo inestable y el medidor, siendo está de 10 x Ø (50.8 cm), y distancia mínima hacia aguas abajo 5xØ(25.4 cm), veáse figura 6.3.



Figura 6.3 Medidor de Caudal Electromagnético.

VII. RESULTADOS

El coeficiente de rugosidad ó factor de fricción no es un parámetro constante es función del número de Reynolds y la rugosidad relativa, para números de Reynolds mayores a 2300. En el diseño de una red hidráulica normalmente se le asume un valor constante sin embargo esto no ocurre así como lo señala Cabrera (2012).

No se consideraron en el análisis de la calibración de los modelos de simulación, la incertidumbre en la medición, por ello las presiones y flujos medidos se asumen ser los reales.

Se estudiaron 3 casos de estudio y casos los que se indiquen: Caso de estudio No. 1 (Tubería simple); caso de estudio No. 2 (1 circuito); caso de estudio No. 3 (2 circuitos).

7.1 Caso de estudio No. 1. Calibración de modelo de simulación de tramo simple

En el análisis de este estudio se uso para el problema de diseño hidráulico el programa de Epanet2, para obtener los valores de las variables presión y flujo (*i.e.* valores simulados).

7.1.1 Caso 1: Calibración en tubería simple, con 1 sola lectura de presión y gasto observado.

Se realizó un programa para la calibración de un modelo de simulación de una tubería simple de PVC (*i.e.* coeficiente de rugosidad) de diámetro nominal de 1.5", con diámetro interno de 4.1 cm (d), diámetro externo de 4.6 cm, para un tramo recto de 6.02 m de longitud (L), se usaron válvulas de esfera para simular las incrustaciones en la tubería, realizando cierres parciales en las válvulas, se midió el gastó a la entrada de la red hidráulica y las presiones a la entrada y salida del tramo, con manómetros de 4-2 kg/cm².



Lo anterior se puede entender mejor en la figura 7.1.1, supóngase que el motivo de las discrepancia entre la línea de gradiente hidráulico del modelo de simulación y la línea de gradiente hidráulico real (*i.e.* medido) se debe a que el coeficiente de rugosidad ó factor de fricción de la tubería ha cambiado desde que la misma se instaló en campo; es decir se desea estimar el valor real del coeficiente de rugosidad del tramo.

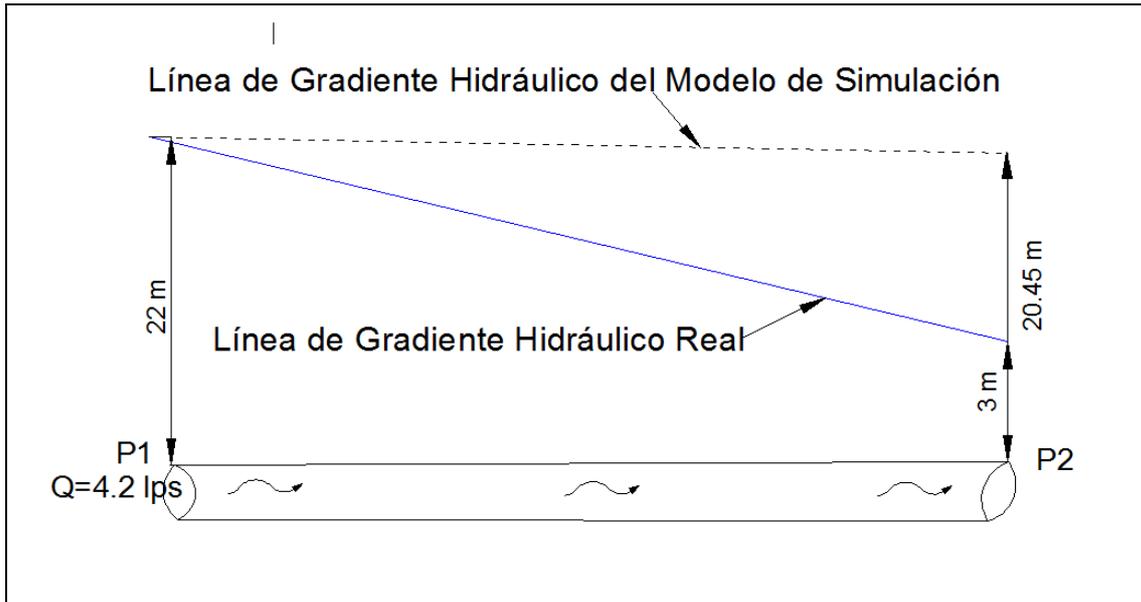


Figura 7.1.1 Calibración de modelo de simulación hidráulico (CMSH) de tubería simple.

El modelo de simulación subestima las pérdidas de carga en la tubería, comparado con el comportamiento real de la tubería en campo (*i.e.* tramo en modelo experimental).

Datos tomados en laboratorio para el ejemplo:

- $Q = 4.2145 \text{ lps}$
- $P1 = 2.2 \text{ kg/cm}^2$
- $P2 = 0.3 \text{ kg/cm}^2$



En el modelo de simulación, la altura del reservorio es de 22 m, la pérdida de carga para los 6.02 m de longitud de prueba es 1.55 m, es decir la P2 en el modelo de simulación sin calibrar es de 20.45 m, con coeficiente de rugosidad H-W de 140, ver figura 7.1.2.

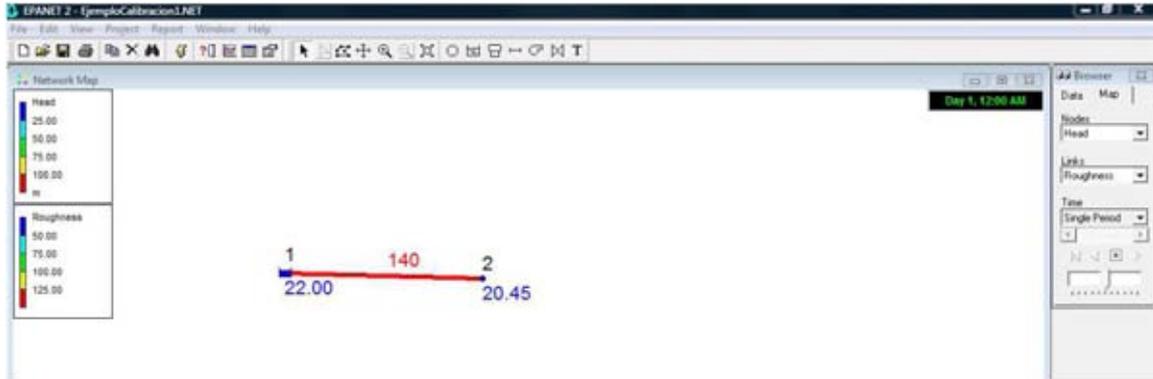


Figura 7.1.2 Modelo de simulación de tubería simple, sin calibrar.

Sin embargo, la presión real en P2 es de 3 m, por lo tanto el coeficiente de rugosidad H-W real no es 140.

En la figura 7.1.3, se muestra en círculo los valores que evaluó el programa de calibración, antes de encontrar el óptimo ($C=36$), el valor que minimiza la función objetivo No. 3.1, y corresponde a la máxima función de valor $\max Q(s,a)$ [1813] en el programa de PDM, ver su diagrama de flujo figura 7.1.4.



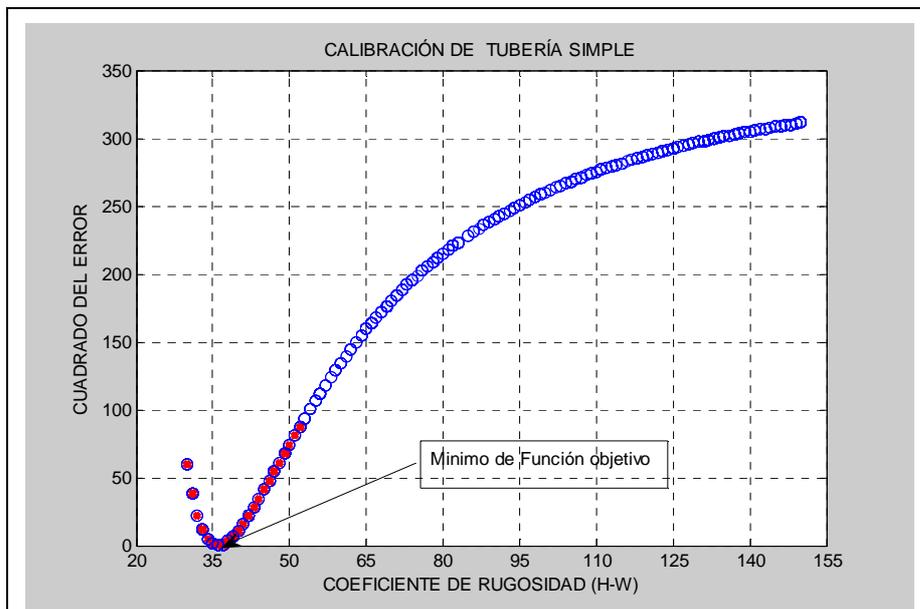
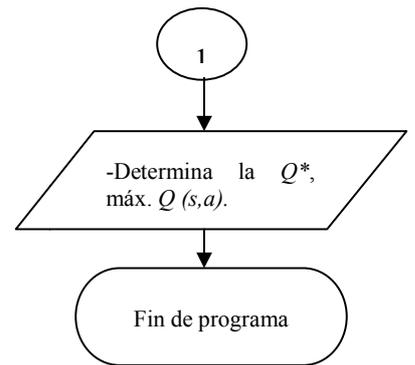
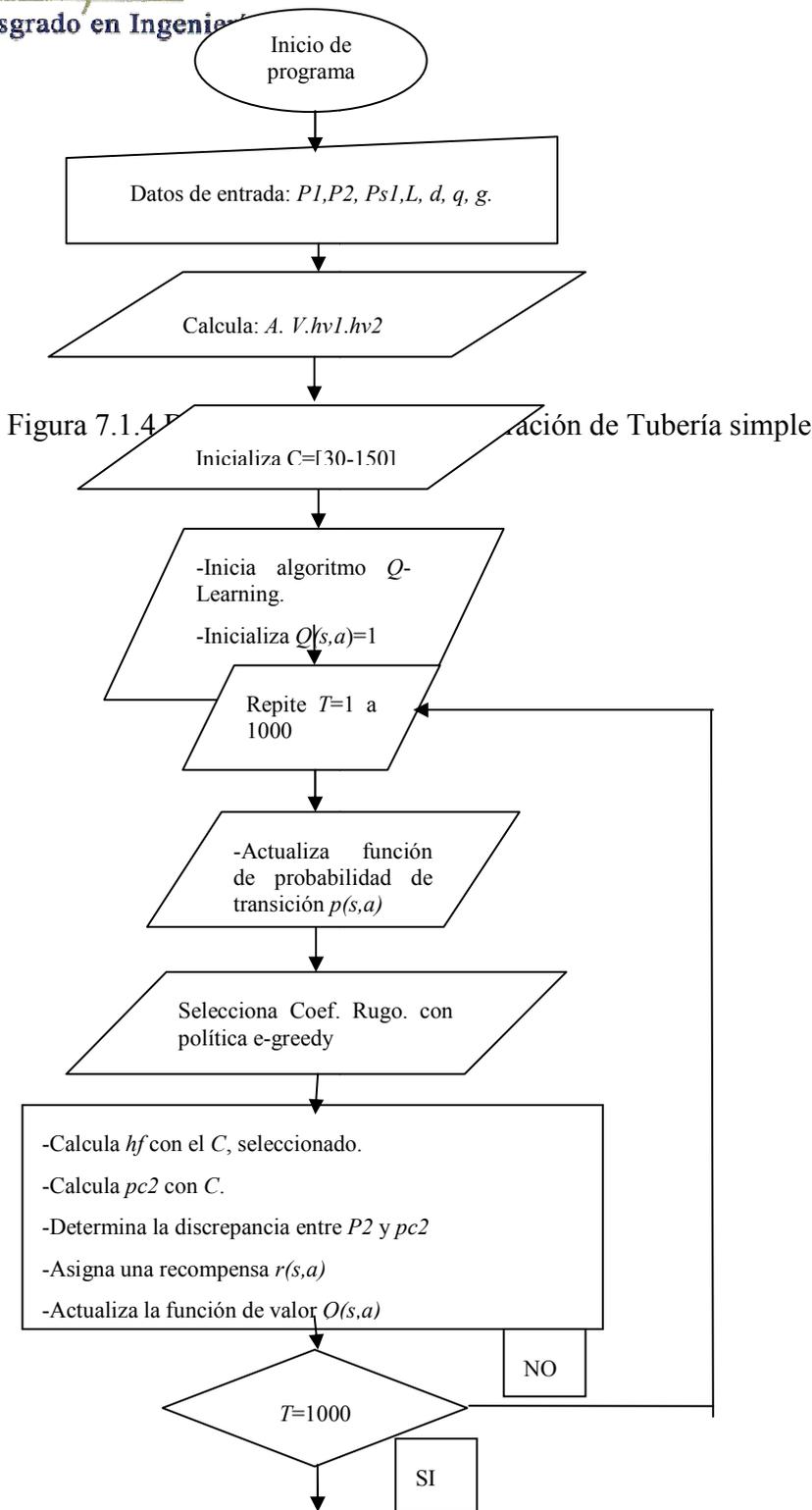


Figura 7.1.3 Gráfica para la calibración hidráulica de coeficiente de rugosidad de tubería simple.

En la figura 7.1.4 se puede ver el diagrama de flujo del programa de calibración de tubería simple.





El programa tiene la siguiente estructura interna a partir de la figura 7.1.4.

1.- Inicio del programa. Datos de entrada:

P1= Presión medida en el punto 1 del tramo de la tubería simple, en m.

P2= Presión medida en el punto 2 del tramo de la tubería simple, en m.

d= Diámetro interno de la tubería, en m.

q= Gasto medido que circula en la tubería, en m³/s.

Va= Velocidad en el tramo en m/s.

g= Constante de gravedad

2.- Calcular:

A: Área de la tubería, en m².

hv1: Carga de velocidad en el punto 1, (m).

hv2: Carga de velocidad en el punto 2, (m).

V: Velocidad observada en m/s.

3.-Inicializa C: Vector de coeficientes de Rugosidad Hazen-Williams a [30 a 150], el rango de coeficientes que algoritmo va a evaluar, para buscar el valor óptimo, y minimizar la función objetivo, 3.1. Se evalúa en un rango discreto, con n=121 coeficientes.

4.-Inicializa algoritmo Q-learning; Inicializa el vector de funciones de valor $Q(s,a)=1$, para todos los par estado-acción, es decir, todos los coeficientes C, (parámetro desconocido)

5.-Para episodios de decisión T=1 a 1000, repite pasos de 6-10.

6.-Actualiza función de probabilidad de transición. Se usa las ecuaciones $p(s,a) =$

$$\frac{Q(s,a)}{\sum_1^n Q(s,a)}; \text{ y } p(s,a) = p(s,a) + \frac{Q(s,a)}{\sum_1^n Q(s,a)}$$

7.-Selecciona C, con la política ϵ -greedy: La selección del coeficiente de rugosidad a evaluar, generalmente se hace de forma aleatoria, en lugar de solo seleccionar la acción con la máxima función de valor, en un episodio de decisión.

8.-Calcula: La pérdida de carga por fricción en la tubería simple con el C, seleccionado; Determina la presión en el punto 2 ($pc2$) con C; calcula la diferencia entre la presión medida (P2) y $pc2$, (i.e. $dif = (P2 - pc2)^2$); el ambiente asigna una recompensa en función de la diferencia, $r(s,a) = \frac{P2}{dif}$; Actualiza función de valor con la ecuación 5.4.

9.-¿Es T=1000?. Si: continúa a paso 10; No: Regresa al paso 6.

10.-Encuentra la política óptima Q*: busca cual acción tiene la máxima función de valor aprendida por el agente.

11.-Solución: El valor del parámetro desconocido C, es el que tenga la máxima función de valor (i.e. Q*)

12.-Fin del programa.

Usando el programa de calibración con procesos de decisión de Markov da C=34, se acerca a obtener el valor óptimo C=36, y no necesita explorar el espacio completo de soluciones, sino de forma aleatoria seleccionó coeficientes (explora y explota la información) y determinó el coeficiente C con la función de valor máxima, (Algoritmo Q-Learning), ver figura 7.1.3 y 7.1.4.



7.1.2 Caso 2: Resultados de calibración en modelo de simulación de tubería simple.

En estos casos solo hay una incógnita el coeficiente de rugosidad (*i.e.* los coeficientes de rugosidad de cada tubería se agrupa en uno solo), ver Figura 7.1.6 y 7.1.7.

El presente caso No. 2, se probaron 5 estados de ajuste de válvulas de esfera (ver figura 7.1.5), las siguientes:

Una válvula 1/3 cerrada, son 30° de cierre, 2/3 son 60° de cierre, el sentido de cierre es el que se muestra en la Figura 7.1.5.

- 1.- Válvulas completamente abiertas
- 2.-Valvula 5 cerrada 1/3.
- 3.-Válvula 5 cerrada 2/3.
- 4.-Valvula 5 y 8 cerradas 1/3 cada una.
- 5.- Válvula 5 cerrada 2/3 y válvula 8 cerrada 1/3.

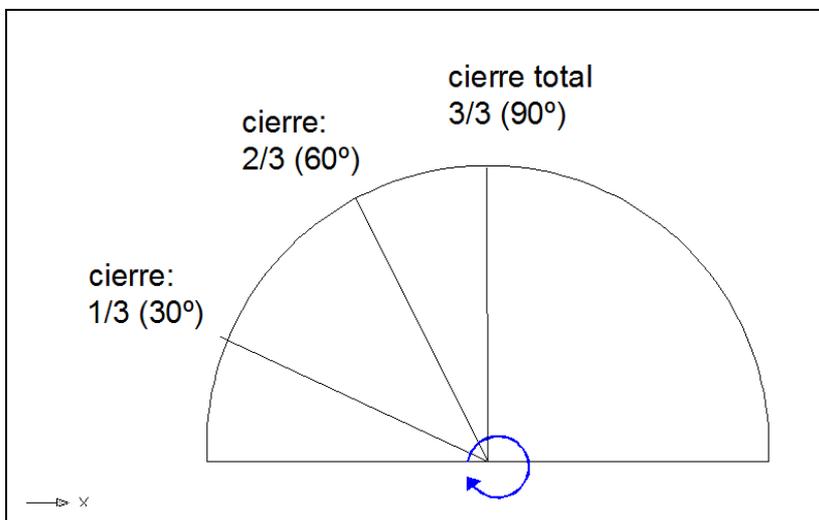


Figura 7.1.5 Esquema del cierre de las válvulas de esfera.



7.1.2.1. Resultados de combinación uno.

Se dejaron las válvulas del tramo simple, completamente abiertas, y se midió la presión y el gasto que entra al modelo experimental, se tomaron 17 lecturas de cada variable, como se muestra en el cuadro 7.1

Al abordar el problema de calibración debemos plantearnos la siguiente pregunta:

¿El comportamiento hidráulico de la tubería simple en el MSH es igual o aproximado al comportamiento de la tubería simple en el modelo experimental?, ver figura 7.1.6 y 7.1.7.

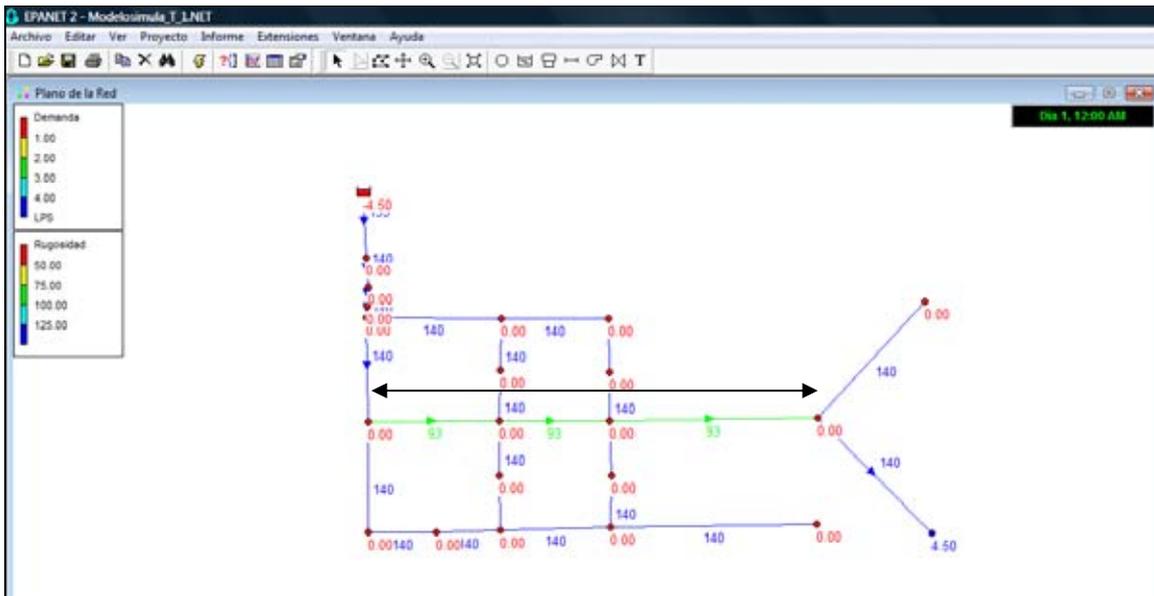


Figura 7.1.6.-Tramo simulado en epanet.





Figura 7.1.7 Tubería simple, en modelo experimental.

En el cuadro 7.1.1, se muestran los datos que se obtuvieron de los puntos 1 y 2 de la combinación 1, válvulas de esfera completamente abiertas, de presiones observadas (PR1 y PR2), presiones del modelo de simulación antes de calibrar (PMS1 y PMS2) y después de calibrar (PMC1 y PMC2).

Para calibrar la tubería simple con 1 coeficiente de rugosidad como incógnita se usó el programa realizado en el lenguaje de programación de Matlab, *Calibra1_Mar.m*. Se obtienen 20 valores de rugosidad y se selecciona el promedio.

Cuadro 7.1.1 Combinación uno: Gasto, presiones observadas o reales, del modelo de simulación antes de calibrar y después de calibrar.

Lectura No.	Gasto (lps)	Red Hidráulica Real		Modelo Simulado		Modelo Calibrado	
		PR1 (kg/cm ²)	PR2 (kg/cm ²)	PMS1 (kg/cm ²)	PMS2 (kg/cm ²)	PMC1 (kg/cm ²)	PMC2 (kg/cm ²)
1	4.504	0.95	0.65	0.972	0.735	0.972	0.578
2	4.529	0.9	0.75	0.95	0.71	0.95	0.687
3	4.327	0.95	0.6	1.12	0.90	1.12	0.54



Lectura No.	Gasto (lps)	Red Hidráulica Real		Modelo Simulado		Modelo Calibrado	
		PR1 (kg/cm ²)	PR2 (kg/cm ²)	PMS1 (kg/cm ²)	PMS2 (kg/cm ²)	PMC1 (kg/cm ²)	PMC2 (kg/cm ²)
4	4.806	1	0.7	0.701	0.433	0.701	0.452
5	4.791	0.95	0.65	0.716	0.449	0.716	0.468
6	4.768	1	0.6	0.736	0.472	0.736	0.49
7	4.218	0.9	0.7	1.21	1.00	1.21	0.63
8	4.819	0.9	0.7	0.689	0.42	0.689	0.439
9	4.289	0.9	0.7	1.15	0.94	1.15	0.65
10	4.352	1	0.6	1.10	0.88	1.10	0.54
11	4.421	1	0.7	1.04	0.81	1.04	0.63
12	4.477	0.9	0.6	0.995	0.761	0.995	0.529
13	4.151	0.9	0.65	1.27	1.06	1.27	0.59
14	4.764	1	0.65	0.74	0.476	0.74	0.495
15	4.760	0.9	0.7	0.743	0.48	0.743	0.498
16	4.752	0.95	0.65	0.751	0.488	0.751	0.506
17	4.748	0.95	0.6	0.75	0.49	0.75	0.51

En la figura 7.1.8 se puede ver graficados las velocidades observadas en el medidor electromagnético colocado en el modelo experimental, y las velocidades obtenidas en el modelo de simulación, con coeficientes de rugosidad de las tuberías antes del punto de medición de gasto y velocidad, sin calibrar. Los coeficientes de rugosidad para el tramo de tubería de cobre fue de 135 y de 140 para la tubería de PVC de 2 y 1.5”.



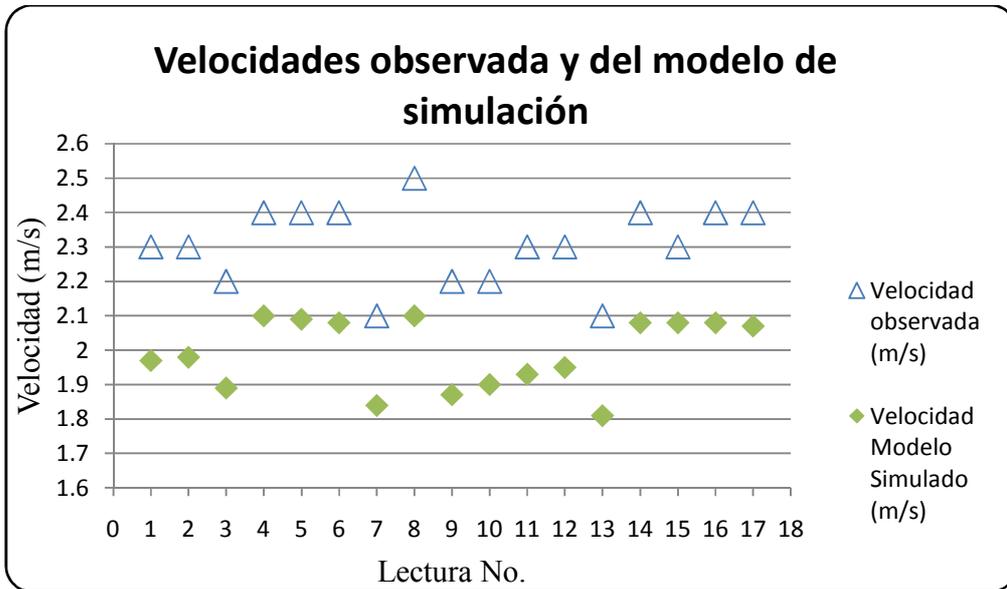


Figura 7.1.8 Combinación Uno: Comparación de Velocidad observada (i.e. medida) y en el modelo de simulación de epanet2.

Las lecturas 8, 9, 11 y 12 rebasan las diferencias entre las velocidades de modelo simulación y las velocidades observadas de 15%. El resto es menor al 15%.

En el programa de calibración de tubería simple de un parámetro de calibración, se define un rango del coeficiente de rugosidad de 30-150, dentro del cual se busca el valor real de este parámetro.

En el cuadro 7.1.2 se muestran los resultados de la determinación de valores de rugosidad Hazen-Williams para el tramo de tubería simple, que fueron usados para disminuir las discrepancias entre el modelo experimental (red hidráulica real) y el modelo de simulación de epanet2. El valor que se usa en el modelo de simulación es el promedio de las 20 ejecuciones o valores óptimos que arroja el programa de calibración para la tubería simple.



Cuadro 7.1.2 Resultados de determinación de valores de rugosidad para tramo de tubería simple.

Repetición	Lectura 1.	Lectura 2.	Lectura 3.	Lectura 4.	Lectura 5.	Lectura 6.	Lectura 7.	Lectura 8.	Lectura 9.	Lectura 10.	Lectura 11.	Lectura 12.	Lectura 13.	Lectura 14.	Lectura 15.	Lectura 16.	Lectura 17.
1	93	130	66	149	150	149	68	150	71	70	92	81	60	150	150	150	149
2	93	130	66	149	150	150	68	150	74	70	90	81	60	150	150	150	149
3	93	130	66	149	150	150	68	150	74	70	88	81	60	150	150	150	149
4	93	130	67	150	150	150	66	150	74	70	88	81	60	150	150	150	149
5	93	130	68	150	150	150	66	150	74	70	88	81	59	150	150	150	149
6	93	130	68	150	150	150	66	150	74	70	88	81	59	150	150	150	149
7	93	130	68	150	150	150	66	150	74	70	88	81	59	150	150	150	149
8	93	130	68	150	150	150	66	150	74	70	88	81	59	150	150	150	149
9	93	130	68	150	150	150	66	150	74	70	88	81	59	150	150	150	149
10	93	130	68	150	150	150	66	150	74	70	88	82	59	150	150	150	149
11	93	130	68	150	150	150	66	150	74	70	88	82	59	150	150	150	149
12	93	130	68	150	150	150	66	150	74	70	88	82	59	150	150	150	149
13	93	127	68	150	150	150	66	150	74	70	88	82	59	150	150	150	149
14	93	127	68	150	150	150	66	150	74	70	88	82	59	150	150	150	149
15	93	127	68	150	150	150	66	150	74	70	88	82	59	150	150	150	149
16	93	127	68	150	150	150	66	150	74	70	88	82	59	150	150	150	149
17	93	127	68	150	150	150	66	150	74	70	88	82	59	150	150	150	149
18	93	127	68	150	150	150	66	150	74	70	88	82	59	150	150	150	149
19	93	127	68	150	150	150	66	150	74	70	88	82	59	150	150	150	149
20	93	127	68	150	150	150	66	150	74	70	88	82	59	150	150	150	149
Promedio	<u>93</u>	<u>129</u>	<u>68</u>	<u>150</u>	<u>150</u>	<u>150.0</u>	<u>66</u>	<u>150</u>	<u>74</u>	<u>70</u>	<u>88</u>	<u>82</u>	<u>59</u>	<u>150</u>	<u>150</u>	<u>150</u>	<u>149</u>

Para cada lectura de las presiones observadas (ver figura 7.1.9) en el punto 1 y 2 del tramo en estudio se realizó 20 corridas del programa de calibración que aplica procesos de decisión de Markov para obtener valores óptimos y de las 20 soluciones, se seleccionó el valor promedio de las mismas, para calibrar el tramo simple en el modelo de simulación de epanet2, este mismo procedimiento se siguió para los 5 combinaciones de cierre de válvulas que se presentan de calibración de la tubería simple.



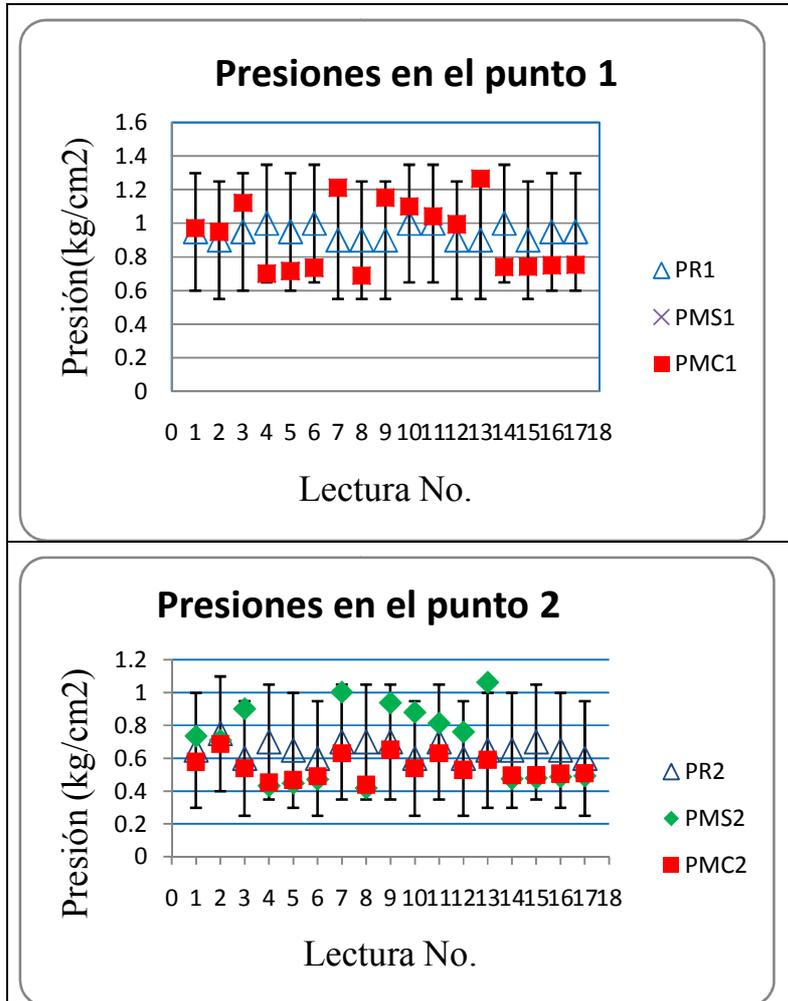


Figura 7.1.9 Comparación, diferencias entre las presiones observadas (PR1 y PR2), las presiones del modelo de simulación (PMS1 y PMS2) y las presiones calibradas (PMC1 y PMC2) después de realizar el ajuste de rugosidad.

La lectura 13, presiones en el punto 1, está fuera del rango ± 3.5 m de diferencia con respecto a la presión observada, rango recomendado por la guía del ECAC (1999) para modelos de simulación para propósitos de planeación. La lecturas 13, presiones en el punto 2, está fuera del rango ± 3.5 m de diferencia respecto a la presión real u observada. El 94.1% de las lecturas en el punto 1, están dentro del rango recomendado. El 94.1% de las lecturas en el modelo de simulación sin calibrar están dentro del rango recomendado en el punto 2.



Una vez que es calibrado el modelo de simulación, la lectura 13, presiones en el punto 1 está fuera del rango recomendado por el ECAC; El 94.1% de las lecturas en el punto 1, están dentro del rango recomendado. El 100% de las lecturas de presión en el modelo de simulación calibrado están dentro del rango recomendado en el punto 2.

En el cuadro 7.1.3, se pueden ver la magnitud de la discrepancia entre el modelo de simulación sin calibrar y después de calibrar no disminuyen en el punto 1, debido a que no se calibran los coeficientes de rugosidad antes del tramo en estudio.

Cuadro 7.1.3.-Diferencias del modelos sin calibrar y calibrado.

Lectura No.	Residuos Modelo Sin Calibrar		Residuos Modelo Calibrado	
	RMS1 (%)	RMS2 (%)	RMC1(%)	RMC2(%)
1	-2.32	-13.08	-2.32	11.08
2	-5.56	5.33	-5.56	8.40
3	-18.11	-50.33	-18.11	10.00
4	29.90	38.14	29.90	35.43
5	24.63	30.92	24.63	28.00
6	26.40	21.33	26.40	18.33
7	-34.67	-43.29	-34.67	9.86
8	23.44	40.00	23.44	37.29
9	-28.22	-34.00	-28.22	6.86
10	-10.10	-46.67	-10.10	10.17
11	-4.20	-16.29	-4.20	9.86
12	-10.56	-26.83	-10.56	11.83
13	-40.67	-63.54	-40.67	9.08
14	26.00	26.77	26.00	23.85
15	17.44	31.43	17.44	28.86
16	20.95	24.92	20.95	22.15
17	20.63	18.00	20.63	15.17
Max	29.90	40.00	29.90	37.29
Min	-40.67	-63.54	-40.67	6.86



Los residuos en el modelo de simulación sin calibrar van de -40 a 30%, en el punto 1, - 63 a 38% en el punto 2. En el punto 2, del mismo modelo, las diferencias van de -63.5 al 40% , ver figura 7.1.10

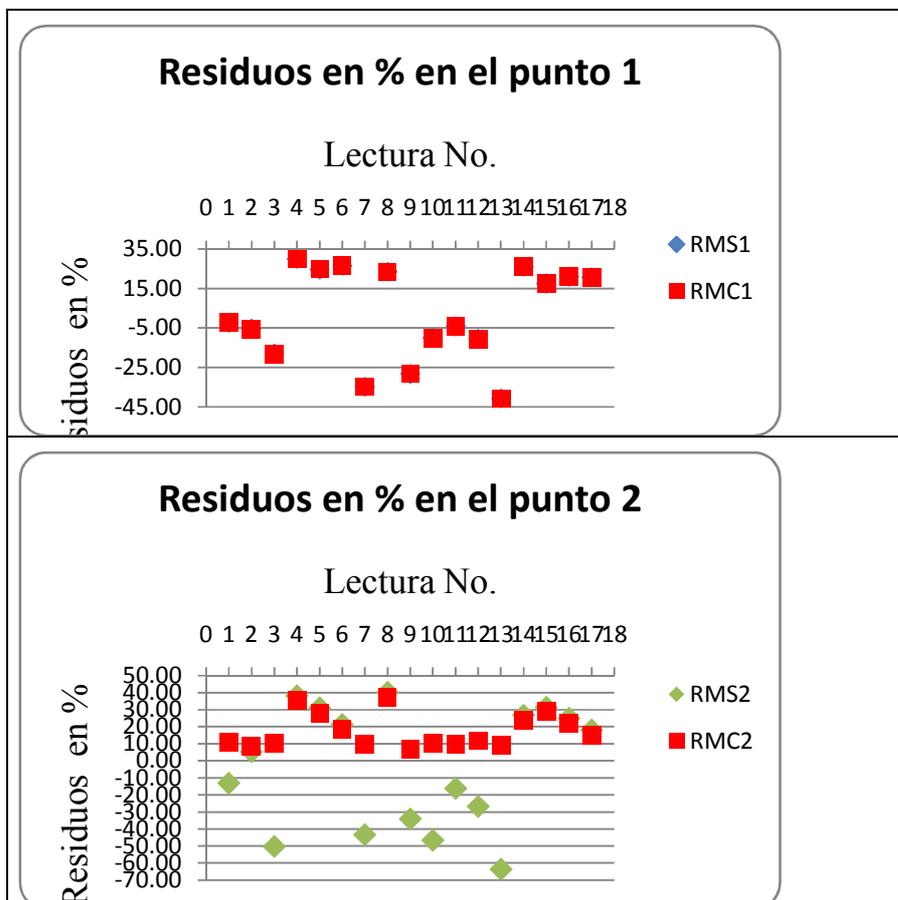


Figura 7.1.10 Comparación de discrepancias antes (RMS1 y RMS2) y después de la calibración (RMC1 y RMC2).

En el modelo de simulación calibrado van de -40 a 30% en el punto 1 y de 6.8 a 37.3% en el punto 2.

7.1.2.2 Resultados de combinación dos.



En el cuadro 7.1.4, se puede ver las velocidades observadas en el modelo experimental para el combinación 2: válvula 5 parcialmente cerrada 1/3, asimismo en el mismo cuadro, se encuentran las velocidades en el modelo de simulación, los porcentajes de diferencia entre las velocidad observada y del modelo. En la penúltima columna se enlistan las presiones observadas (PR1) en el punto 1 y en el punto 2 (PR2).

Cuadro 7.1.4 Combinación dos: Datos de velocidades observadas y presiones medidas.

Lectura No.	Tramo simple de modelo experimental					
	Gasto (lps)	Velocidad Observada (m/s)	Velocidad Modelo Simulado (m/s)	Diferencia de Velocidad (%)	PR1 (kg/cm2)	PR2 (kg/cm2)
1	4.5813	2.3	2.0	13.04	0.9	0.6
2	4.6183	2.4	2.02	15.83	1	0.6
3	4.5862	2.3	2.0	13.04	0.85	0.7
4	4.5875	2.3	2.0	13.04	1	0.6
5	4.5972	2.3	2.01	12.61	1	0.7
6	4.6153	2.4	2.02	15.83	1	0.7
7	4.6237	2.4	2.02	15.83	0.95	0.75
8	4.6422	2.4	2.03	15.42	0.9	0.7
9	4.6558	2.4	2.03	15.42	0.9	0.75
10	4.6699	2.4	2.04	15.00	1	0.7
11	4.685	2.4	2.05	14.58	0.9	0.65
12	4.6811	2.4	2.04	15.00	1	0.7
13	4.6836	2.4	2.05	14.58	1	0.7
14	4.6823	2.4	2.04	15.00	0.9	0.6

Las lecturas 2,6,7,8,9, rebasan un 15% de diferencia entre la velocidad en el modelo de simulación y la velocidad observada, el resto es menor a ése porcentaje, ver figura 7.1.11.



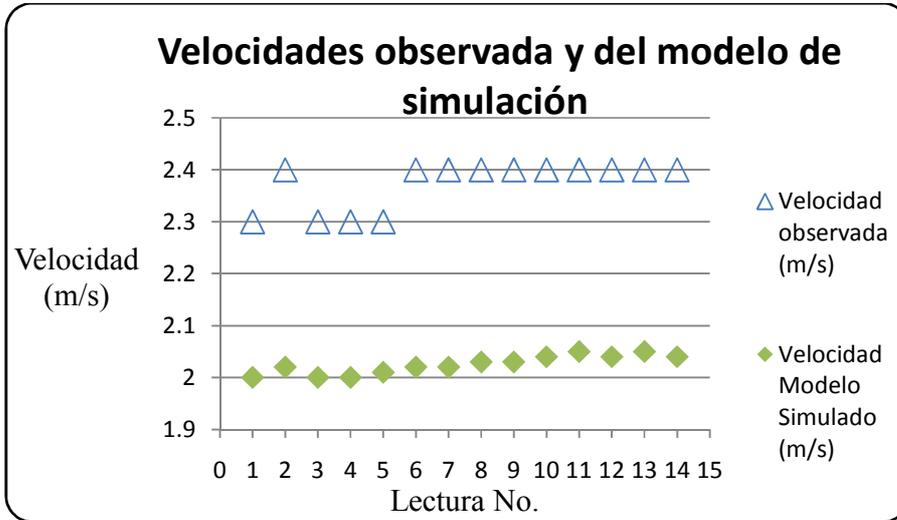


Figura 7.1.11 Combinación Dos: Comparación de Velocidad medida y velocidad en modelo de simulación.

En el cuadro 7.1.5 se muestran los resultados obtenidos al ajustar los coeficientes rugosidad de la tubería simple para las 14 lecturas de presión en los puntos 1 y 2 del tramo en estudio.

Cuadro 7.1.5 Resultados de determinar los coeficientes de rugosidad actuales del tramo de tubería simple en estudio.

Repeticiones No.	Lectura 1.	Lectura 2.	Lectura 3.	Lectura 4.	Lectura 5.	Lectura 6.	Lectura 7.	Lectura 8.	Lectura 9.	Lectura 10.	Lectura 11.	Lectura 12.	Lectura 13.	Lectura 14.
1	99	109	129	104	129	141	150	149	149	149	150	147	149	133
2	99	109	129	104	129	141	150	150	149	149	150	147	149	127
3	99	109	129	100	129	141	150	150	149	149	150	147	150	127
4	99	109	129	100	129	141	150	150	149	149	150	149	150	127
5	99	109	129	100	129	141	150	150	149	149	150	149	150	127
6	99	109	129	100	129	141	150	150	149	149	150	149	150	127
7	99	109	129	100	129	141	150	150	150	150	150	150	150	127
8	99	109	129	100	129	141	150	150	150	150	150	150	150	127
9	99	109	129	100	129	141	150	150	150	150	150	150	150	127
10	99	109	129	100	129	141	150	150	150	150	150	150	150	127



Repeticiones No.	Lectura 1.	Lectura 2.	Lectura 3.	Lectura 4.	Lectura 5.	Lectura 6.	Lectura 7.	Lectura 8.	Lectura 9.	Lectura 10.	Lectura 11.	Lectura 12.	Lectura 13.	Lectura 14.
11	99	109	129	100	129	141	150	150	150	150	150	150	150	127
12	99	109	129	100	129	141	150	150	150	150	150	150	150	127
13	99	109	129	100	129	141	150	150	150	150	150	150	150	127
14	99	109	129	100	129	141	150	150	150	150	150	150	150	127
15	99	109	129	100	129	141	150	150	150	150	150	150	150	127
16	99	109	129	100	133	141	150	150	150	150	150	150	150	127
17	99	109	129	100	133	141	150	150	150	150	150	150	150	127
18	99	109	129	100	133	141	150	150	150	150	150	150	150	127
19	99	109	129	100	133	141	150	150	150	150	150	150	150	127
20	99	109	129	100	133	141	150	150	150	150	150	150	150	127
Promedio	99	109	129	100	130	141	150	150	150	150	150	149	150	127

En el cuadro 7.1.6 se observa las presiones en el modelo de simulación antes (PMS1 y PMS2) y después de calibrar (PMC1 y PMC2) para cada lectura realizada, al inicio y final del tramo de tubería en estudio.



Cuadro 7.1.6 Presiones en el modelo de simulación antes y después de calibrar.

Lectura No.	Modelo Simulado Sin Calibrar		Modelo Simulado Calibrado	
	PMS1 (kg/cm2)	PMS2 (kg/cm2)	PMC1 (kg/cm2)	PMC2 (kg/cm2)
1	0.904	0.659	0.904	0.53
2	0.871	0.623	0.871	0.537
3	0.90	0.65	0.90	0.63
4	0.90	0.63	0.90	0.51
5	0.89	0.644	0.89	0.622
6	0.87	0.63	0.87	0.63
7	0.87	0.62	0.87	0.64
8	0.85	0.599	0.85	0.617
9	0.838	0.586	0.838	0.603
10	0.826	0.572	0.826	0.589
11	0.812	0.557	0.812	0.574
12	0.815	0.56	0.815	0.577
13	0.813	0.558	0.813	0.576
14	0.814	0.559	0.814	0.53

En la figura 7.1.12 se puede ver que el 100% de las lecturas en el punto 1, en el modelo de simulación sin calibrar cumplen con el rango de ± 3.5 m de diferencia con la presión observada. El 100% de las lecturas en el punto 2, están dentro de ese rango, recomendado por ECAC (1999).



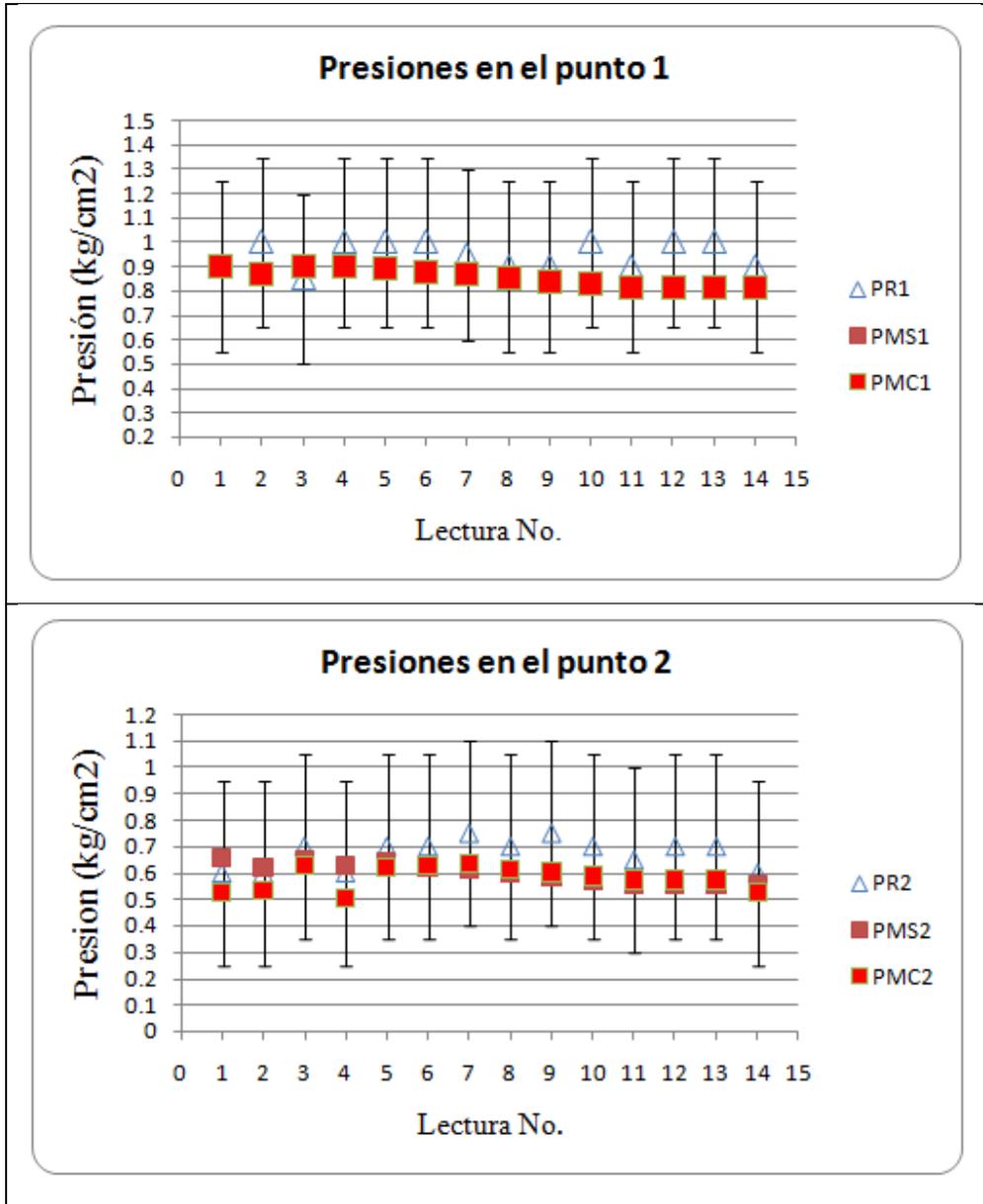


Figura 7.1.12 Combinación Dos: Comparación, diferencias entre las presiones observadas (PR1 y PR2), las presiones del modelo de simulación (PMS1 y PMS2) y las presiones calibradas después de realizar el ajuste de rugosidad (PMC1 y PMC2).

El 100% de las lecturas en el punto 1, en el modelo de simulación de simulación calibrado cumple con el rango recomendado. El 100% de las lecturas en el punto 2, están dentro del



rango recomendado de ± 3.5 m de diferencia con la presión observada con la del modelo de simulación, ver cuadro 7.1.7

Cuadro 7.1.7 Porcentajes de residuos del modelo de simulación antes y después de calibrar.

Lectura No.	Residuos Modelo Sin Calibrar en %		Residuos Modelo Simulado Calibrado en %	
	RMS1	RMS2	RMC1	RMC2
1	-0.44	-9.83	-0.44	11.67
2	12.90	-3.83	12.90	10.50
3	-5.76	6.57	-5.76	9.86
4	10.20	-5.50	10.20	15.17
5	11.00	8.00	11.00	11.14
6	12.60	10.57	12.60	10.29
7	8.74	17.60	8.74	15.33
8	5.56	14.43	5.56	11.86
9	6.89	21.87	6.89	19.60
10	17.40	18.29	17.40	15.86
11	9.78	14.31	9.78	11.69
12	18.50	20.00	18.50	17.57
13	18.70	20.29	18.70	17.71
14	9.56	6.83	9.56	11.67
Max	18.70	21.87	18.70	19.60
Min	-5.76	-9.83	-5.76	9.86

En la figura 7.1.13 se puede ver que las diferencias en el modelo de simulación sin calibrar van desde -5.7 a 18.7% en el punto 1. Las discrepancias en el punto 2, en el modelo sin calibrar van desde -9.8 a 21.9%.



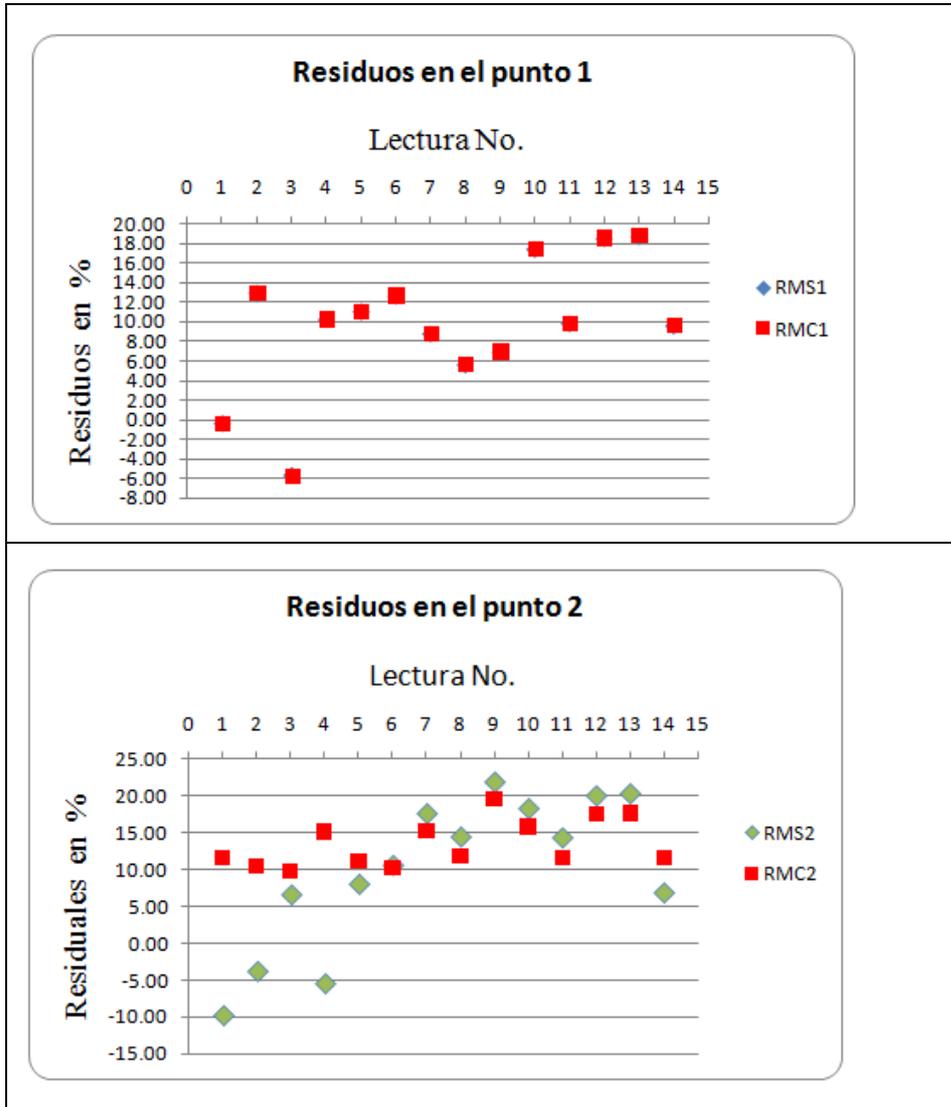


Figura 7.1.13 Comparación combinación 2, residuos antes (RMS1 y RMS2) y después de la calibración (RMC1 y RMC2), con respecto a las lecturas observadas de presión el punto 1 y 2 del tramo en estudio.



7.1.2.3 Resultados de Combinación tres.

En el cuadro 7.1.8a se pueden ver las velocidades y presiones observadas en el modelo experimental, del tramo en estudio de tubería simple. Estos resultados son obtenidos teniendo la válvula 5 parcialmente cerrada 2/3, Caso 3.

Cuadro 7.1.8a Combinación Tres: Datos de velocidades y presiones observadas, presiones en los modelos de simulación antes y después de calibrar.

Lectura No.	Velocidades			Presiones Red Hidráulica Real		Presiones Modelo Simulado sin calibrar		Presiones Modelo Simulado Calibrado	
	Vel. Real (m/s)	Vel. Modelo Simulado (m/s)	Error Vel. (%)	PR1 (kg/cm ²)	PR2 (kg/cm ²)	PMS1 (kg/cm ²)	PMS2 (kg/cm ²)	PMC1 (kg/cm ²)	PMC2 (kg/cm ²)
1	2.3	2.01	12.61	1.00	0.60	0.88	0.63	0.88	0.53
2	2.4	2.04	15.00	0.90	0.70	0.83	0.58	0.83	0.59
3	2.4	2.05	14.58	1.00	0.65	0.80	0.54	0.80	0.56
4	2.2	1.91	13.18	1.00	0.55	1.07	0.85	1.07	0.48
5	2.1	1.84	12.38	0.90	0.60	1.21	1.00	1.21	0.54
6	2.1	1.84	12.38	0.85	0.60	1.22	1.01	1.22	0.55
7	2.2	1.85	15.91	0.90	0.70	1.19	0.98	1.19	0.65
8	2.2	1.87	15.00	0.90	0.60	1.15	0.94	1.15	0.52
9	2.2	1.9	13.64	0.95	0.55	1.09	0.87	1.09	0.49
10	2.3	1.93	16.09	0.90	0.60	1.04	0.81	1.04	0.55
11	2.3	1.98	13.91	0.80	0.60	0.95	0.71	0.95	0.53
12	2.4	2.01	16.25	1.00	0.60	0.88	0.63	0.88	0.53
13	2.4	2.04	15.00	0.85	0.65	0.82	0.57	0.82	0.58
14	2.4	2.05	14.58	0.90	0.70	0.81	0.55	0.81	0.57
15	2.4	2.05	14.58	1.25	0.70	0.80	0.54	0.80	0.56
16	2.4	2.06	14.17	0.95	0.60	0.78	0.52	0.78	0.53



En el cuadro 7.18b se muestran los datos medidos de gasto en el medidor electromagnético.

7.1.8b Datos de gasto en lps.

Lectura No.	Gasto (lps)
1	4.6085
2	4.6655
3	4.6972
4	4.3832
5	4.2185
6	4.2091
7	4.2419
8	4.2909
9	4.3593
10	4.4229
11	4.533
12	4.6141
13	4.6739
14	4.6924
15	4.7041
16	4.7206

En la figura 7.1.14 se puede ver que las lecturas 7,10,12 rebasan una diferencia 15% entre la velocidad observada y la del modelo de simulación.



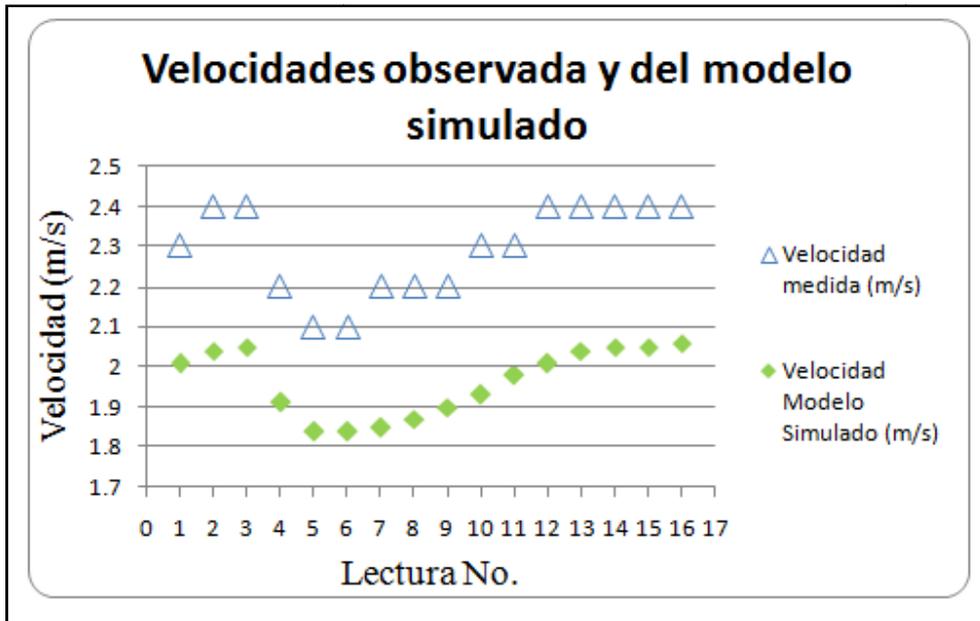


Figura 7.1.14 Combinación Tres: Comparación, velocidades observada y del modelo simulado.

En esta combinación, se realizaron 14 lecturas de presión en el punto 1 y 2, del tramo en estudio que tiene una longitud de 6.02 m.

En el cuadro 7.1.9 se muestran los resultados de ajustar el comportamiento del modelo de simulación a los datos de campo u observados, utilizando el método de optimización de procesos de decisión de Markov.

En la figura 7.1.15 se pueden ver las lecturas 6,15, presiones en el punto 1, en el modelo de simulación sin calibrar no cumple con el rango de ± 3.5 m de diferencia de presión observada con la presión en el modelo de simulación. Las lecturas 5,6, presiones en el punto 2, no están en el rango recomendado por el ECAC(1999). El 87.5% de las lecturas en el punto 1, del modelo simulado sin calibrar están en el rango recomendado. El 87.5% de las lecturas de presión en el punto 2, se encuentran en el rango recomendado.



Cuadro 7.1.9 Resultados de determinar los coeficientes de rugosidad actuales del tramo de tubería simple en estudio.

Repeticiones No.	Lectura 1.	Lectura 2.	Lectura 3.	Lectura 4.	Lectura 5.	Lectura 6.	Lectura 7.	Lectura 8.	Lectura 9.	Lectura 10.	Lectura 11.	Lectura 12.	Lectura 13.	Lectura 14.	Lectura 15.	Lectura 16.
1	104	150	150	68	60	61	70	64	67	78	90	109	145	150	150	146
2	104	150	150	68	60	61	70	64	67	78	90	105	145	150	150	146
3	104	150	150	68	60	61	70	64	67	78	90	105	145	150	150	146
4	104	150	150	68	60	61	70	64	67	78	90	105	145	150	150	146
5	104	150	150	68	60	61	70	64	67	78	90	105	145	150	150	146
6	104	150	150	68	60	61	69	64	67	78	90	105	145	150	150	146
7	104	150	150	68	60	61	69	64	67	78	90	105	145	150	150	144
8	104	150	150	68	60	59	69	64	67	78	90	105	145	150	150	144
9	104	150	150	68	60	59	69	64	67	78	90	105	145	150	150	144
10	104	150	150	68	60	59	69	64	67	78	90	105	145	150	150	144
11	104	150	150	68	60	59	69	64	67	78	90	105	145	150	150	144
12	104	150	150	68	60	59	69	64	67	77	90	105	145	150	150	144
13	104	150	150	68	60	59	69	64	67	77	90	105	145	150	150	144
14	104	150	150	68	60	59	69	65	67	77	90	105	145	150	150	144
15	104	150	150	68	60	59	69	65	67	77	90	105	145	150	150	144
16	104	150	150	68	60	59	69	65	67	77	90	105	145	150	150	144
17	104	150	150	68	60	59	69	65	67	77	90	105	145	150	150	144
18	104	150	150	68	60	59	69	65	67	77	90	105	145	150	150	144
19	104	150	150	68	60	59	69	65	67	77	90	105	145	150	150	144
20	104	150	150	68	60	59	69	65	67	77	90	105	145	150	150	141
Promedio	104	150	150	68	60	60	69	64	67	78	90	105	145	150	150	144



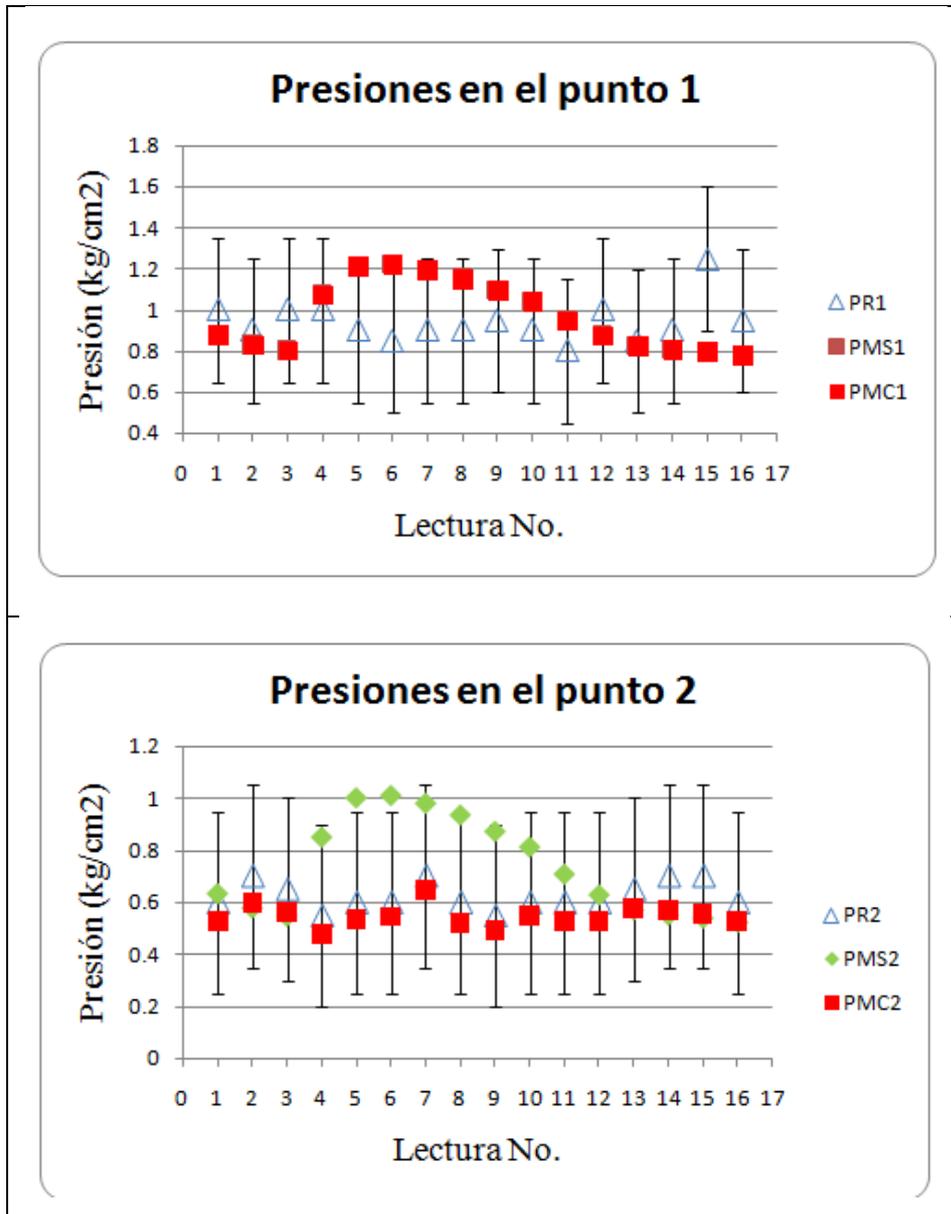


Figura 7.1.15 Comparación, diferencias entre las presiones observadas (PR1 y PR2), las presiones del modelo de simulación (PMS1 y PMS2) y las presiones calibradas después de realizar el ajuste de rugosidad (PMC1 y PMC2).

El 87.5% de las lecturas en el punto 1, del modelo simulado calibrado están en el rango recomendado. El 100% de las lecturas de presiones en el punto 2, se encuentran en el rango de ± 3.5 m de diferencia de presión real y la presión en el modelo simulado calibrado.



En el cuadro 7.1.10 se pueden ver los porcentajes de residuos entre el modelo experimental y los modelos de simulación antes y después de calibrar.

Cuadro 7.1.10 Residuos en los modelos simulados antes y después de calibrar.

Lectura No.	Residuos Modelo Simulado Sin Calibrar en %		Residuos Modelo Simulado Calibrado en %	
	RMS1	RMS2	RMC1	RMC2
1	12.00	-5.33	12.00	12.33
2	7.89	17.71	7.89	15.14
3	19.90	16.31	19.90	13.54
4	-7.40	-54.55	-7.40	12.91
5	-34.56	-67.00	-34.56	10.83
6	-43.41	-68.50	-43.41	9.17
7	-32.44	-40.14	-32.44	7.86
8	-28.00	-56.00	-28.00	13.00
9	-15.16	-58.55	-15.16	10.73
10	-15.67	-35.33	-15.67	8.33
11	-18.25	-17.83	-18.25	12.00
12	12.50	-4.50	12.50	12.50
13	3.29	12.62	3.29	11.23
14	10.56	21.57	10.56	19.14
15	36.40	23.29	36.40	20.71
16	17.89	13.17	17.89	12.00
Max	36.40	23.29	36.40	20.71
Min	-43.41	-68.50	-43.41	7.86

Las diferencias van desde -43.4 a 36.4% en el punto 1, en el modelo de simulación sin calibrar. En el punto 2, las diferencias tienen un rango desde -68.5 a 23.3%, ver figura 7.1.16.



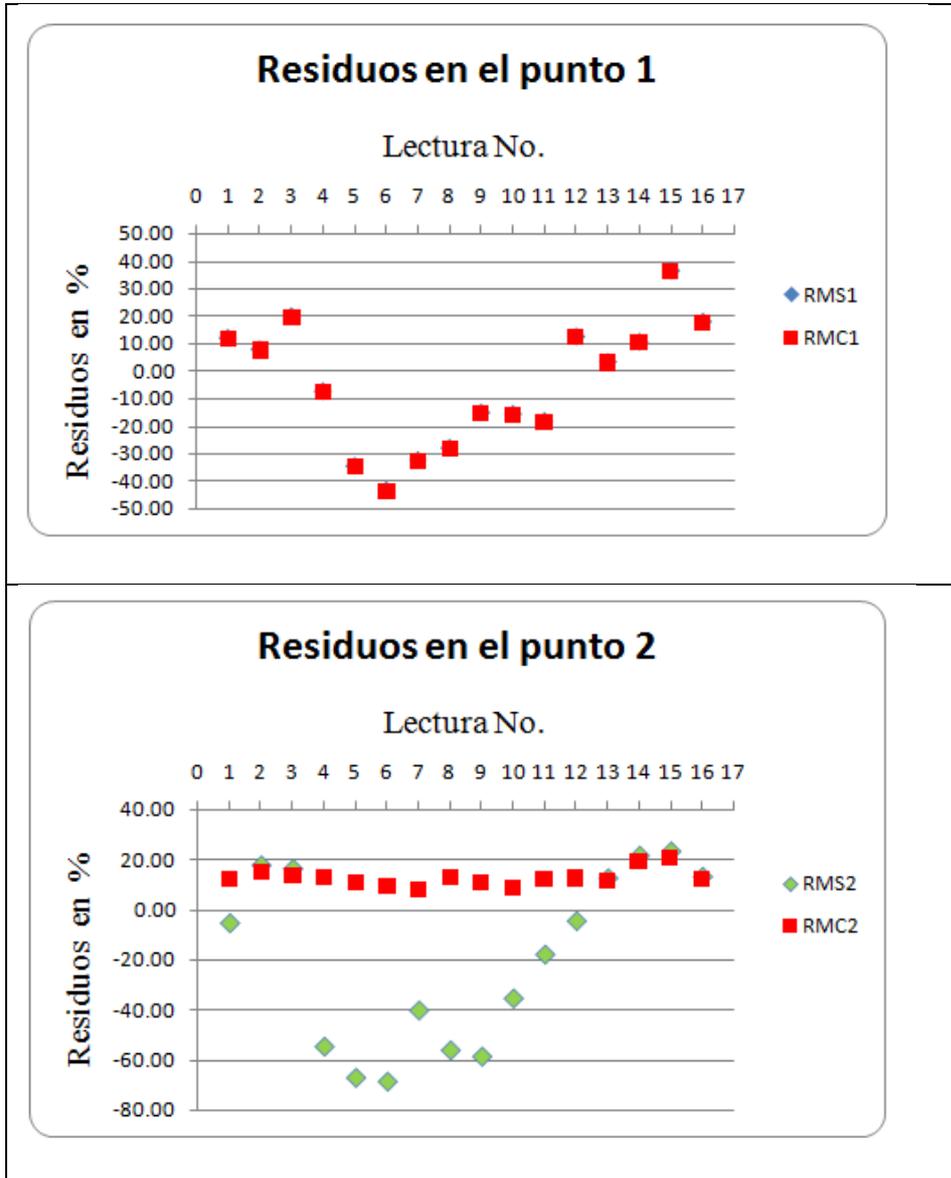


Figura 7.1.16 Comparación Combinación 3, residuos antes (RMS1 y RMS2) y después de la calibración (RMC1 y RMC2).

En el modelo de simulación calibrado las diferencias de error en el punto 1, van de -43.4 a 36.4%. En el punto 2, las diferencias de error tienen un rango de 7.86 a 20.7%.

7.1.2.4 Resultados de Combinación cuatro.



En el cuadro 7.1.11 se muestran los datos de las velocidades y presiones observadas en el modelo experimental, y la discrepancia en la estimación de la velocidad real en el modelo de simulación de epanet2. En la combinación 4, las válvulas 5 y 8 están parcialmente cerradas 1/3 de la apertura total.

Cuadro 7.1.11 Combinación Cuatro: Datos de velocidades y presiones observadas.

Lectura No.	Red Hidráulica Real o de Modelo experimental					
	Gasto (lps)	Velocidad Real (m/s)	Velocidad Modelo Simulado (m/s)	Error Velocidad (%)	PR1 (kg/cm2)	PR2 (kg/cm2)
1	2.9439	1.5	1.29	14.00	2.55	0.45
2	2.9956	1.5	1.31	12.67	2.55	0.45
3	3.0628	1.6	1.34	16.25	2.55	0.45
4	3.0854	1.6	1.35	15.63	2.6	0.45
5	3.0825	1.6	1.35	15.63	2.55	0.5
6	3.084	1.6	1.35	15.63	2.5	0.3
7	3.0923	1.6	1.35	15.63	2.5	0.3
8	3.1039	1.6	1.36	15.00	2.5	0.35
9	3.1111	1.6	1.36	15.00	2.5	0.3
10	3.1186	1.6	1.36	15.00	2.5	0.35
11	3.134	1.6	1.37	14.38	2.5	0.3
12	3.1337	1.6	1.37	14.38	2.5	0.3
13	3.136	1.6	1.37	14.38	2.5	0.3
14	3.1363	1.6	1.37	14.38	2.5	0.3

En la figura 7.17, las lecturas 4 a 10, se rebasa hay una diferencia de velocidades medidas y en el modelo simulado mayor al 15%.



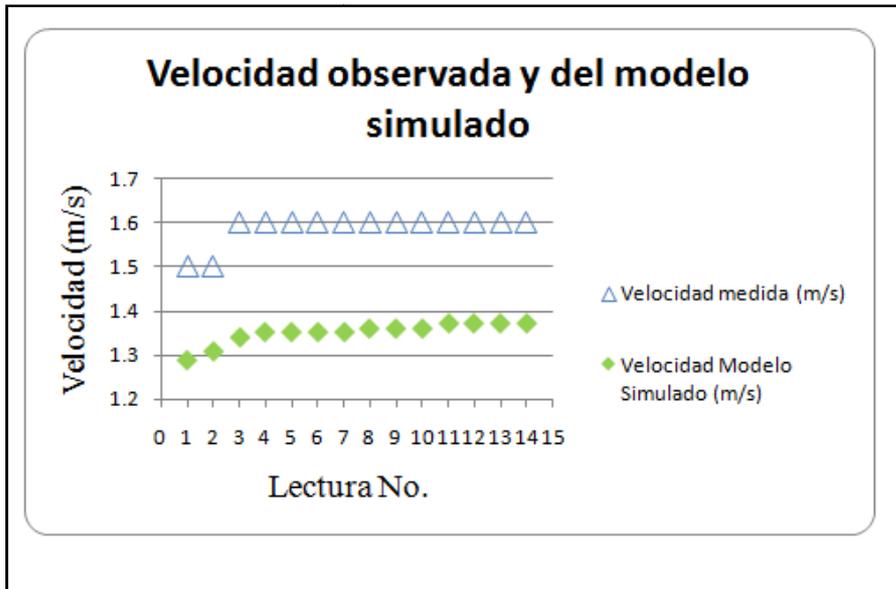


Figura 7.1.17 Combinación Cuatro: Comparación, velocidad observada y velocidad en el modelo simulado.

En el cuadro 7.1.12 se puede ver los resultados al calibrar el modelo de simulación de tubería simple, la mayoría de los valores promedio de los coeficientes de rugosidad de Hazen-Williams fue de 30.



Cuadro 7.1.12 Resultados de determinar los coeficientes de rugosidad actuales del tramo de tubería simple en estudio.

Repeticiones No.	Lectura 1.	Lectura 2.	Lectura 3.	Lectura 4.	Lectura 5.	Lectura 6.	Lectura 7.	Lectura 8.	Lectura 9.	Lectura 10.	Lectura 11.	Lectura 12.	Lectura 13.	Lectura 14.
1	30	30	30	30	30	61	47	30	30	30	30	35	30	33
2	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
3	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
4	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
5	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
6	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
7	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
8	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
9	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
10	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
11	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
12	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
13	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
14	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
15	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
16	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
17	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
18	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
19	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
20	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Promedio	30	30	30	30	30	32	31	30	30	30	30	30	30	30

En el cuadro 7.1.13 se encuentran las presiones en el modelo de simulación sin y con calibración, dados en kg/cm2.



Cuadro 7.1.13 Presiones en el modelo de simulación antes y después de calibrar.

Lectura No.	Modelo Simulado Sin calibrar		Modelo Simulado Calibrado	
	PMS1 (kg/cm2)	PMS2 (kg/cm2)	PMC1 (kg/cm2)	PMC2 (kg/cm2)
1	2.104	1.999	2.104	0.967
2	2.07	1.97	2.07	0.90
3	2.03	1.92	2.03	0.81
4	2.02	1.90	2.02	0.78
5	2.021	1.906	2.021	0.783
6	2.02	1.905	2.02	0.915
7	2.015	1.9	2.015	0.84
8	2.01	1.89	2.01	0.75
9	2.0	1.9	2.0	0.7
10	2.0	1.9	2.0	0.7
11	1.99	1.87	1.99	0.71
12	1.99	1.871	1.99	0.713
13	1.988	1.869	1.988	0.71
14	1.988	1.869	1.988	0.709

Ninguna lectura del modelo de simulación sin calibrar en el punto 1, se encuentra en el rango de ± 3.5 m de diferencia entre la presión real y la presión en el modelo simulado. Lo mismo ocurre en el punto 2, ver figura 7.1.18



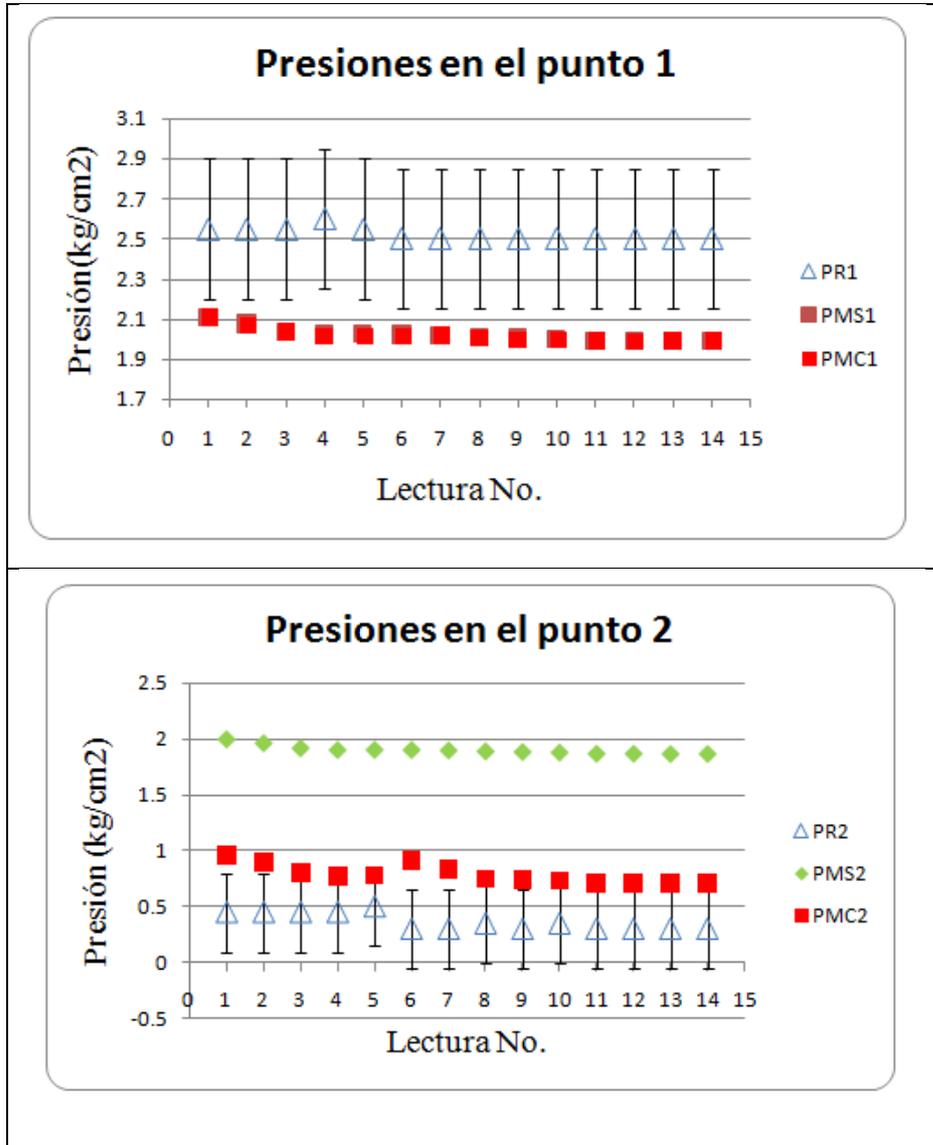


Figura 7.1.18 Comparación combinación 4, diferencias entre las presiones observadas (PR1 y PR2), las presiones del modelo de simulación (PMS1 y PMS2) y las presiones calibradas después de realizar el ajuste de rugosidad (PMC1 y PMC2).

Ninguna lectura del modelo de simulación calibrado en el punto 1, se encuentra en el rango de ± 3.5 m de diferencia entre la presión real y la presión en el modelo simulado. Las lecturas 1-3 y 6-14, en el punto de presión 2, no se encuentran en el intervalo de presión



recomendado. El 14% de las lecturas del modelo calibrado se encuentra en el rango recomendado por el ECAC(1999).

En el cuadro 7.1.14 se muestran los residuos porcentuales entre el modelo experimental y los modelos de simulación antes y después de calibrar.

Cuadro 7.1.14 Residuales de los modelos de simulación antes y después de calibrar.

Lectura No.	Residuos Modelo Sin Calibrar en %		Residuos Modelo Calibrar en %	
	RMS1	RMS2	RMC1	RMC2
1	17.49	-344.22	17.49	-114.89
2	18.71	-336.67	18.71	-99.78
3	20.27	-326.67	20.27	-79.78
4	22.35	-323.11	22.35	-73.11
5	20.75	-281.20	20.75	-56.60
6	19.20	-535.00	19.20	-205.00
7	19.40	-533.33	19.40	-180.00
8	19.68	-440.57	19.68	-115.43
9	19.84	-529.00	19.84	-148.00
10	20.04	-437.71	20.04	-109.71
11	20.44	-523.67	20.44	-137.33
12	20.40	-523.67	20.40	-137.67
13	20.48	-523.00	20.48	-136.67
14	20.48	-523.00	20.48	-136.33
Valor Max	22.35	-281.20	22.35	-56.60
Valor Mi	17.49	-535.00	17.49	-205.00

Los residuales en el punto 1, van desde 17.5 a 22.35% en el modelo de simulación sin calibrar. Los residuales en el punto 2, están en el rango de -535 a -281% en el modelo de simulación sin calibrar.



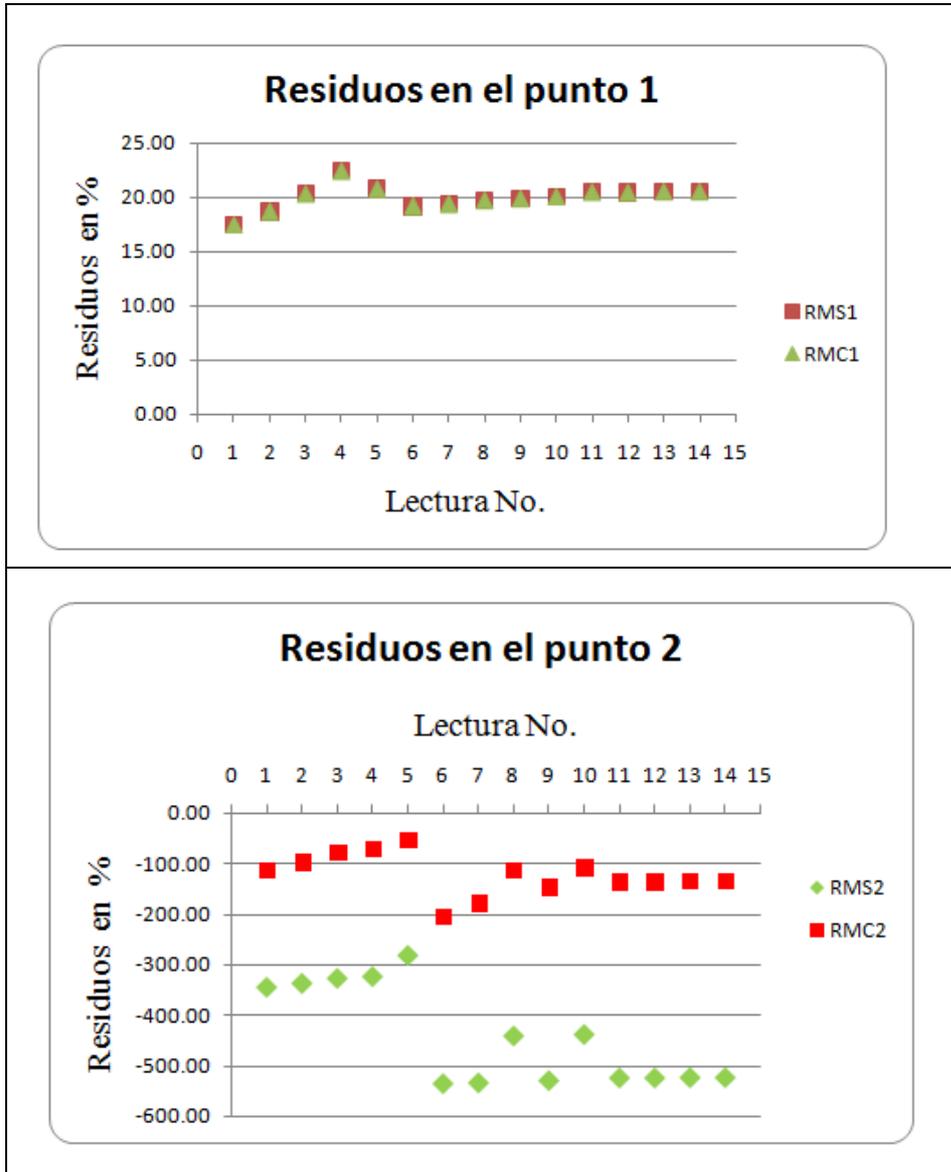


Figura 7.1.19 Comparación combinación 4, diferencias de errores antes (RMS1 y RMS2) y después de la calibración (RMC1 y RMC2).

Los residuos en el punto 1, en el modelo de simulación calibrado, están en el rango de 17.5 a 22.35% . En el punto 2, las diferencias son del rango de -205 a -56.6%.



7.1.2.5 Resultados de combinación cinco.

En el cuadro 7.1.15a se pueden ver los datos de velocidades y presiones observadas en el modelo experimental, y las presiones de los modelos de simulación antes y después de calibrar epanet2.

Cuadro 7.1.15a Combinación Cinco: Datos de velocidades y presiones observadas, presiones de los modelos de simulación antes y después de calibrar.

Lectura No.	Velocidades			Presiones Red Hidráulica Real		Presiones Modelo Simulado sin calibrar		Presiones Modelo simulado Calibrado	
	Vel. Real (m/s)	Vel. Modelo Simulado (m/s)	Diferencia Vel. (%)	PR1 (kg/cm ²)	PR2 (kg/cm ²)	PMS1 (kg/cm ²)	PMS2 (kg/cm ²)	PMC1 (kg/cm ²)	PMC2 (kg/cm ²)
1	1.9	1.6	15.79	2.25	0.25	1.638	1.479	1.638	0.199
2	1.6	1.57	1.88	2.3	0.45	1.679	1.524	1.679	0.42
3	1	1.56	-56.00	2.3	0.4	1.701	1.549	1.701	0.326
4	1	1.55	-55.00	2.25	0.7	1.721	1.571	1.721	0.663
5	1	1.53	-53.00	2.35	0.4	1.75	1.60	1.75	0.35
6	1	1.51	-51.00	2.3	0.35	1.78	1.63	1.78	0.33
7	1.7	1.49	12.35	2.25	0.4	1.80	1.66	1.80	0.39
8	1.7	1.49	12.35	2.3	0.45	1.80	1.66	1.80	0.39
9	1.7	1.49	12.35	2.3	0.6	1.81	1.67	1.81	0.54
10	1.7	1.49	12.35	2.3	0.45	1.805	1.665	1.805	0.388
11	1.7	1.49	12.35	2.25	0.35	1.81	1.67	1.81	0.314
12	1.7	1.49	12.35	2.3	0.55	1.803	1.663	1.803	0.533
13	1.7	1.5	11.76	2.25	0.25	1.802	1.662	1.802	0.296
14	1.7	1.5	11.76	2.3	0.6	1.80	1.66	1.80	0.59



En el cuadro 7.1.15b se muestran los gastos en lps, para cada lectura realizada en el tramo simple.

Cuadro 7.1.15b Gasto medidos en modelo experimental.

Lectura No.	Gasto (lps)
1	3.6606
2	3.6028
3	3.5721
4	3.544
5	3.5055
6	3.4618
7	3.422
8	3.4217
9	3.4162
10	3.4202
11	3.4129
12	3.4231
13	3.4245
14	3.4285



En la figura 7.1.20, la lectura 1, 3 a 6, se tiene una discrepancia entre la velocidad medida y la simulada mayor a 15%. El resto de las lecturas es menor al 15%.

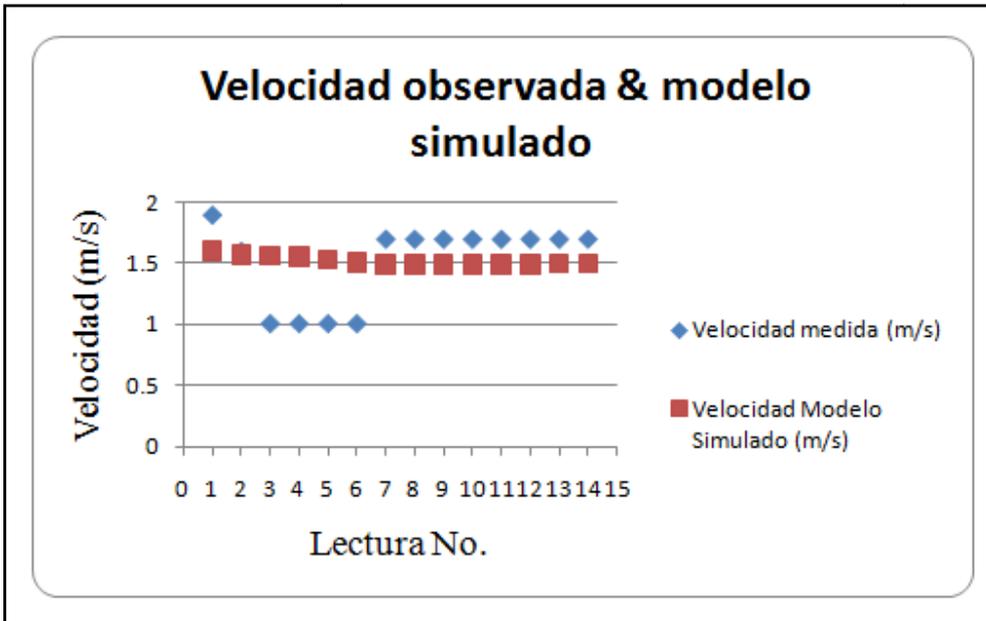


Figura 7.1.20 Combinación Cinco: Comparación, velocidad observada y velocidad del modelo simulado.

En el cuadro 7.1.16 se muestran los resultados al ejecutar el programa de calibración simple del tramo de tubería en el modelo experimental, dicho programa utiliza el método de procesos de decisión de Markov para encontrar valor óptimos, para ajustar el modelo de simulación al comportamiento del modelo experimental, ver figura 7.1.21.



Cuadro 7.1.16 Resultados de los coeficientes de rugosidad de Hazen-Williams actuales del tramo de tubería simple en estudio.

Repeticiones No.	Lectura 1.	Lectura 2.	Lectura 3.	Lectura 4.	Lectura 5.	Lectura 6.	Lectura 7.	Lectura 8.	Lectura 9.	Lectura 10.	Lectura 11.	Lectura 12.	Lectura 13.	Lectura 14.
1	33	35	33	38	32	31	30	31	33	31	30	33	30	34
2	33	35	33	38	32	31	30	31	33	31	30	33	30	34
3	33	35	33	38	32	31	31	31	33	31	30	33	30	34
4	33	35	33	38	32	31	31	31	33	31	30	33	30	34
5	33	35	33	38	32	31	31	31	33	31	30	33	30	34
6	33	35	33	38	32	31	31	31	33	31	30	33	30	34
7	33	35	33	38	32	31	31	31	33	31	30	33	30	34
8	33	35	33	38	32	31	31	31	33	31	30	33	30	34
9	33	35	33	38	32	31	31	31	33	31	30	33	30	34
10	33	35	33	38	32	31	31	31	33	31	30	33	30	34
11	33	35	33	38	32	31	31	31	33	31	30	33	30	34
12	33	35	33	38	32	31	31	31	33	31	30	33	30	34
13	33	35	33	38	32	31	31	31	33	31	30	33	30	34
14	33	35	33	38	32	31	31	31	33	31	30	33	30	34
15	33	35	33	38	32	31	31	31	33	31	30	33	30	34
16	33	35	33	38	32	31	31	31	33	31	30	33	30	34
17	33	35	33	38	32	31	31	31	33	31	30	33	30	34
18	33	35	33	38	32	31	31	31	33	31	30	33	30	34
19	33	35	33	38	32	31	31	31	33	31	30	33	30	34
20	33	35	33	38	32	31	31	31	33	31	30	33	30	34
Promedio	33	35	33	38	32	31	31	31	33	31	30	33	30	34

Ninguna lectura de las presiones en el punto 1, del modelo de simulación sin calibrar está dentro del rango ± 3.5 m de las presiones observadas. Asimismo ocurre para las presiones en el punto 2, ver Figura 7.1.21.



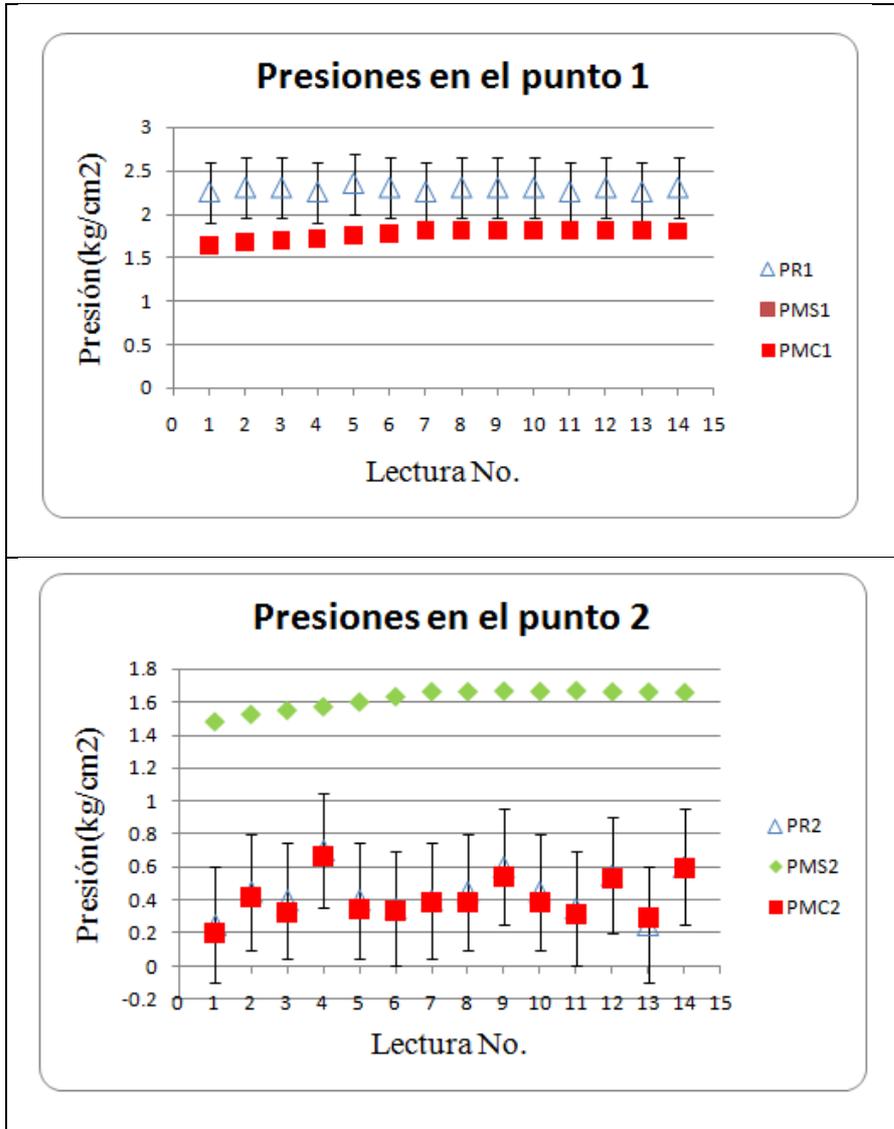


Figura 7.1.21 Comparación combinación 5, diferencias entre las presiones observadas (PR1 y PR2), las presiones del modelo de simulación (PMS1 y PMS2) y las presiones calibradas después de realizar el ajuste de rugosidad (PMC1 y PMC2).

Ninguna lectura de las presiones en el punto 1, del modelo de simulación calibrado está dentro del rango ± 3.5 m de las presiones medidas. El 100% de las lecturas de modelo de simulación calibrado en el punto 2 están dentro del rango de error ± 3.5 m de las presiones reales de acuerdo a lo recomendado por el ECAC(1999).



En el cuadro 7.1.17 se puede ver la magnitud de los residuos entre modelo experimental y en el modelo de simulación antes y después de ajustar el valor de la rugosidad en el tramo de tubería en estudio.

Cuadro 7.1.17 Residuos entre el modelo experimental y el modelo simulado antes y después de calibrar.

Lectura No.	Residuos Modelo Sin Calibrar en %		Residuos Modelo Calibrado en %	
	RMS1	RMS2	RMC1	RMC2
1	27.20	-491.60	27.20	20.40
2	27.00	-238.67	27.00	6.67
3	26.04	-287.25	26.04	18.50
4	23.51	-124.43	23.51	5.29
5	25.66	-300.00	25.66	13.75
6	22.78	-366.57	22.78	6.29
7	19.82	-316.00	19.82	3.75
8	21.57	-269.78	21.57	14.22
9	21.43	-178.00	21.43	9.67
10	21.52	-270.00	21.52	13.78
11	19.56	-377.14	19.56	10.29
12	21.61	-202.36	21.61	3.09
13	19.91	-564.80	19.91	-18.40
14	21.78	-176.50	21.78	1.50
Valor Max	27.20	-124.43	27.20	20.40
Valor Min	19.56	-564.80	19.56	-18.40

Los residuos en el punto 1, en el modelo de simulación sin calibrar son de 19.5 a 27.2%. Las discrepancias en el punto 2, están en el orden de -564.8 a -124.43%, con respecto a las variable medida, ver Figura 7.1.22



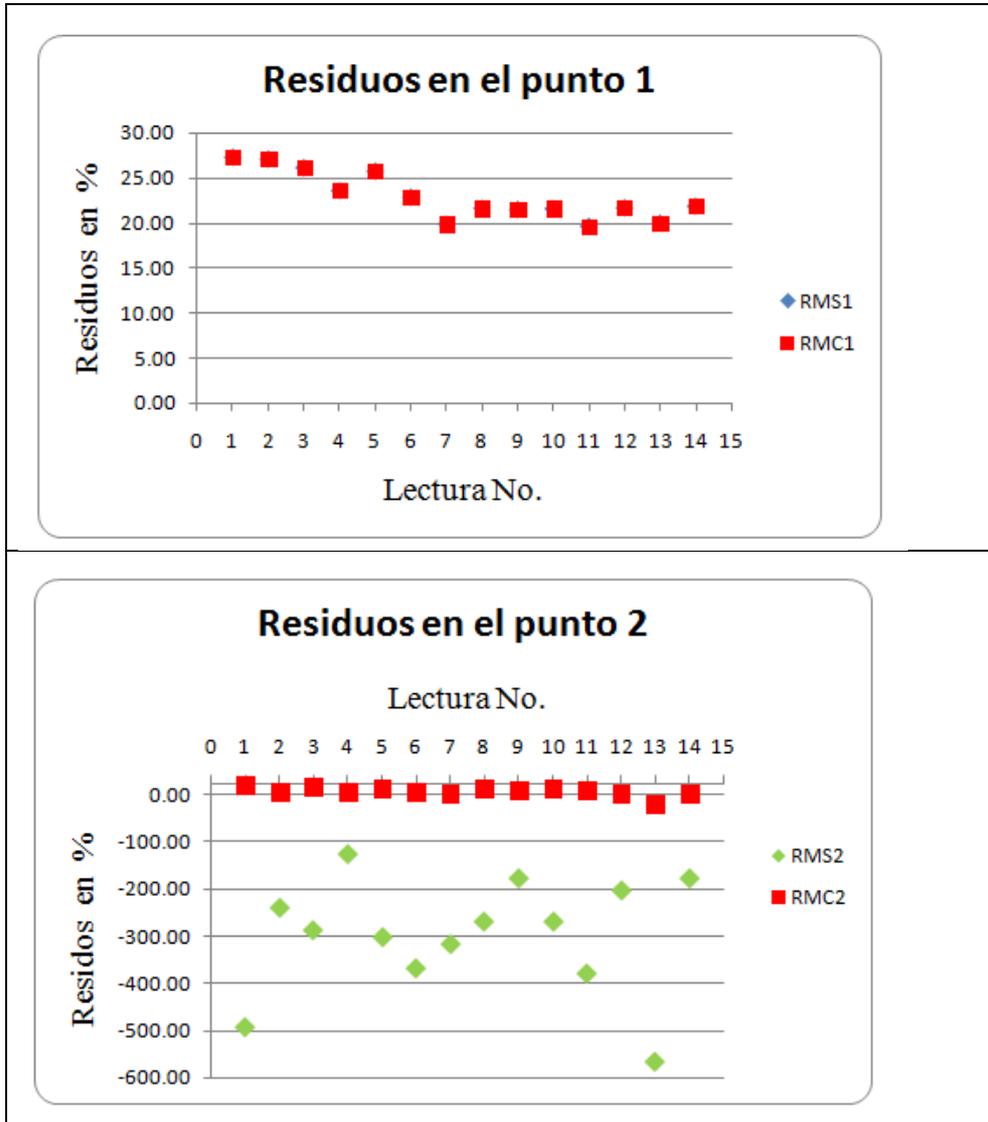


Figura 7.1.22 Comparación combinación 5, diferencias antes (RMS1 y RMS2) y después de la calibración (RMC1 y RMC2).

Las diferencias en el punto 1, en el modelo de simulación calibrado son de 19.5 a 27.2%.

Los discrepancias en el punto 2, están en el rango de -18.4 a 20.4%.



7.1.2 Caso 3: Calibración de tubería simple con 3 coeficientes de rugosidad.

En la figura 7.1.23 se muestra el esquema del subcaso analizado en este apartado.

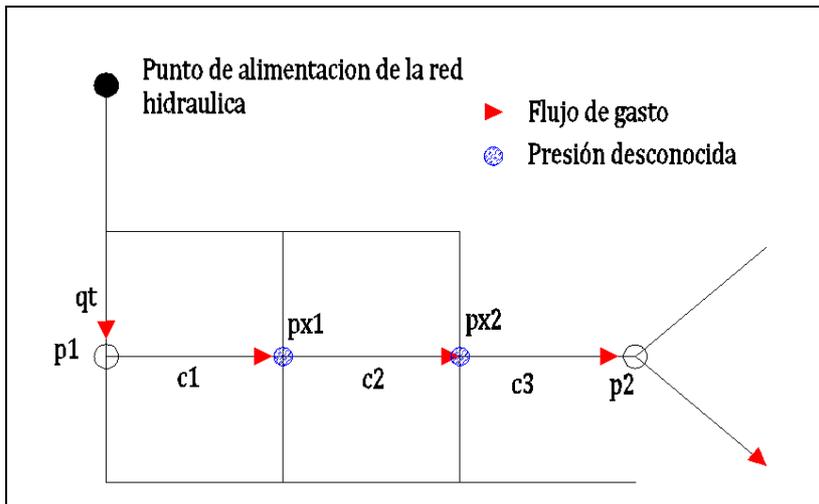


Figura 7.1.23 Esquema de tramo en el análisis de CMSH.

Se realizó un programa de calibración (*Calibra1_3Coeficientes*) para determinar 3 coeficientes de rugosidad en una tubería simple con las siguientes características. En este problema se tiene 3 incógnitas y 2 ecuaciones (problema indeterminado).

La tubería en la que se calibró para 3 coeficientes de rugosidad tiene las siguientes características: Gasto de entrada 2.9439 lps, Velocidad en el Medidor electromagnético 1.5, Presión de entrada 2.55 kg/cm², Presión de salida 0.45 kg/cm². La tubería es de 1.5" de diámetro nominal con 4.3 cm de diámetro interno, Longitud del tramo 1,2,3 es de 6.05 m. La elevación en los nodos que conforman la tubería simple es la misma por lo tanto se cancelan en el cálculo.

En la figura 7.1.24 se muestra el espacio de exploración de las soluciones, los círculos rojos son los C1, coeficientes de rugosidad del tramo 1, C2 (tramo 2 en círculos verdes) y C3



(tramo 3 en círculos azul marino), todos ellos evaluados en el programa de calibración. En el cuadro 7.13 se muestran los parámetros de calibración con máxima función de valor de cada ejecución del programa.

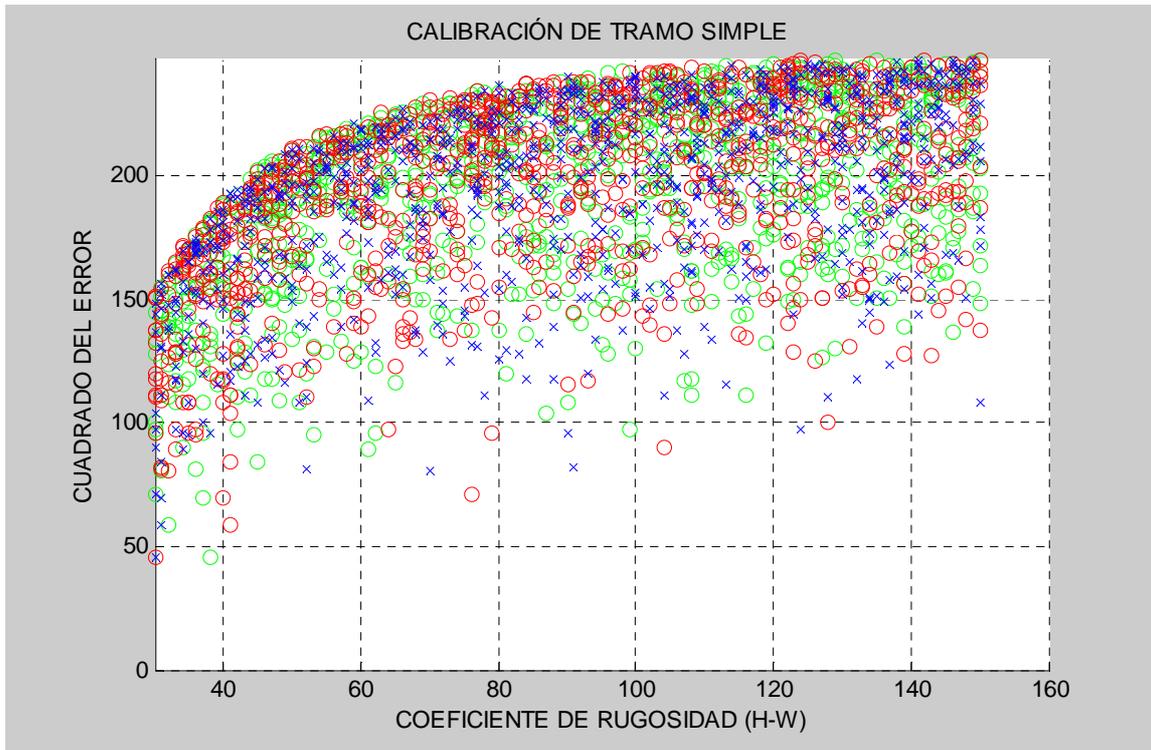


Figura 7.1.24 Espacio de exploración de las soluciones para 3 coeficientes de rugosidad, problema de calibración de tubería simple.

En el cuadro 7.1.18 se muestran los resultados de la calibración, se obtiene un coeficiente de rugosidad para cada tramo de tubería, y una función de valor para los mismos. Se sumaron las funciones de valor de los tres parámetros y se marcan los 4 valores más altos. Podemos asumir que los valores aproximados de los coeficientes con las características hidráulicas y topológicas antes mencionadas son para el tramo 1 ($C_1=75$), para el tramo 2 ($C_2=121$) y para el tramo 3 ($C_3=34$).



Cuadro 7.1.18 Calibración de tubería simple con 3 coeficientes de rugosidad.

No. Ejecuciones	C1	Fv1	C2	Fv2	C3	Fv3	Suma (Fv1+Fv2+Fv3)
1	140	0.4785	92	0.49	117	0.48	1.45
2	120	0.52	121	0.49	60	0.49	1.50
3	31	0.48	55	0.48	72	0.48	1.43
4	75	0.53	121	0.51	34	0.48	1.52
5	78	0.48	88	0.51	129	0.48	1.47
6	147	0.49	148	0.47	82	0.52	1.47
7	130	0.49	99	0.49	106	0.49	1.47
8	101	0.49	48	0.49	130	0.51	1.49
9	140	0.48	117	0.49	47	0.50	1.48
10	137	0.49	56	0.47	144	0.48	1.44
11	125	0.49	97	0.47	128	0.46	1.42
12	47	0.49	46	0.48	138	0.47	1.43
13	48	0.49	74	0.47	130	0.48	1.44
14	143	0.49	148	0.49	74	0.51	1.49
15	102	0.47	53	0.49	47	0.50	1.46
16	134	0.50	116	0.48	80	0.48	1.46
17	71	0.49	83	0.50	88	0.49	1.48
18	123	0.49	126	0.50	120	0.47	1.46
19	95	0.49	44	0.50	51	0.49	1.47
20	73	0.50	131	0.47	75	0.48	1.46
21	87	0.49	128	0.49	133	0.49	1.47
22	81	0.48	36	0.47	141	0.50	1.45
23	44	0.50	61	0.47	106	0.48	1.45
24	129	0.50	148	0.47	139	0.47	1.43
25	67	0.50	140	0.49	50	0.48	1.47



7.2 Caso de estudio No.2: Calibración hidráulica de tubería de un circuito

En el caso No.1, 2 y 3 se uso un circuito de literatura, el problema que presenta Walski (2003); En los casos No. 4 se uso el problema de calibración de modelo de simulación hidráulica (CMSH) de un circuito del modelo experimental Figura 7.2.4

7.2.1 Caso No.1: Problema un circuito de literatura con 4 incógnitas.

Considérese el problema de calibración siguiente se tiene un circuito, en él entra un gasto de 85.2 lps, el cual se distribuye en dos tuberías con longitudes de 701.04, 853.44 m, con diámetros de 10 y 8 pulgadas, respectivamente, la presión de entrada es de 37.99 m y de salida 33.06 m, por lo tanto con una pérdida de carga de 4.93 m, las elevaciones a la entrada y salida del circuito son las mismas. ¿Encontrar el conjunto de valores reales del gasto de la tubería 1,2 y sus respectivos coeficientes de rugosidad?.

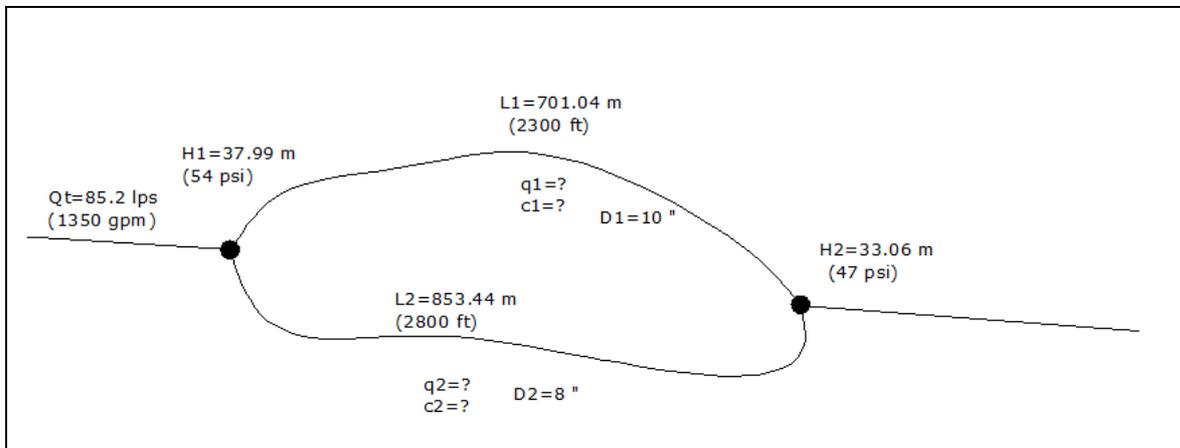


Figura 7.2.1 Esquema del problema de calibración de un circuito.

Fuente: Walski (2003).

En este problema de calibración hay 4 incógnitas (i.e. 2 valores desconocidos de coeficientes de rugosidad, 2 gastos de tubería desconocidos), 3 ecuaciones para resolver el



sistema (ecuación de la energía, ecuación para determinar pérdida de carga por fricción y ecuación de continuidad).

Al usar la ecuación de energía ecuación 4.2, la ecuación de pérdida de carga por fricción 4.7, y la ecuación de continuidad, el problema lo podemos plantear de la siguiente forma:

$$z_1 + \frac{37.99 \text{ m}}{\gamma} + \frac{\left(\frac{q_1}{a_1}\right)^2}{2g} + h_p = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\left(\frac{q_2}{a_2}\right)^2}{2g} + h_f + h_m \dots \dots (7.1)$$

$$\gamma = \text{Peso específico del agua pura a } 4^\circ\text{C} = 1\,000 \text{ kg/m}^3$$

$$Z_1 = Z_2$$

h_p = carga por bombas.

h_m = pérdida de carga localizada.

$$h_p = h_m = 0$$

$$d_1 = 0.254 \text{ m}$$

$$d_2 = 0.2032 \text{ m}$$

$$a_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} = 0.05067 \text{ m}^2$$

$$a_2 = \frac{\pi d_2^2}{4} = 0.03243 \text{ m}^2$$

Por lo tanto la ecuación 7.1 queda

$$(37.99 - p_2) + \frac{\frac{q_1^2}{0.05067}}{2 * 9.81} - \frac{\frac{q_2^2}{0.03243}}{2 * 9.81} = h_{f_1}$$



$$Q_T = q_1 + q_2 \dots\dots\dots(7.2)$$

$$Q_T - q_1 = q_2 \dots\dots\dots(7.3)$$

Pérdida de carga real entre el punto 1 y 2

$$H_f = 37.99 - 33.06 = 4.93 \text{ m.}$$

$$\frac{10.7 * L_1}{d_1^{4.87}} \left(\frac{q_1}{c_1}\right)^{1.852} = \frac{10.7 * L_2}{d_2^{4.87}} \left(\frac{q_2}{c_2}\right)^{1.852} = 4.93$$

En el cuadro 7.2.1, se muestran los resultados del programa de calibración de un circuito (*prueba3_2.m*), aquí el problema radica en elegir el conjunto de parámetros reales que describen el comportamiento del sistema físico. En este problema se tienen 4 incógnitas y 3 ecuaciones el problema es indeterminado (2 gastos, 2 coeficientes de rugosidad).



Cuadro 7.2.1 Resultados de parámetros de coeficiente de rugosidad y gasto en tubería en red hidráulica de un circuito.

No. Repeticiones	q1	q2	qtotal	C1	C2	hf1	hf2	ErrorTotal	FvQ1	FvC1	FvC2
1	44.86	40.31	85.17	86	150	4.94	5.23	0.31	215,830	144,920	1,619
2	76.40	8.77	85.17	150	36	4.73	4.36	0.77	1,865	2,002	1,783
3	47.76	37.41	85.17	91	141	5.00	5.10	0.24	14,136	10,360	7,045
4	77.29	7.89	85.17	150	31	4.83	4.72	0.31	9,882	7,483	1,551
5	85.17	0.00	85.17	150	150	5.79	0.00	5.79	1	1	1
6	54.19	30.98	85.17	105	132	4.85	4.07	0.95	12,454	12,118	949
7	46.75	38.42	85.17	90	150	4.91	4.78	0.17	251,220	251,220	3,994
8	75.33	9.842	85.17	143	36	5.04	5.39	0.57	6,459	6,439	423
9	85.17	0.00	85.17	150	150	5.79	0.00	5.79	1	1	1
10	46.81	38.36	85.17	91	150	4.82	4.77	0.27	7,426	6,384	6,511
11	85.17	0.00	85.17	150	150	5.79	0.00	5.79	1	1	1
12	85.17	0.00	85.17	150	150	5.79	0.00	5.79	1	1	1
13	45.24	39.94	85.17	87	150	4.92	5.14	0.22	964,870	666,370	1,602
14	46.94	38.23	85.17	94	150	4.56	4.74	0.56	580.5	610.3	2,354
15	85.17	0.00	85.17	150	150	5.79	0.00	5.79	1	1	1
16	45.11	40.06	85.17	88	150	4.79	5.17	0.38	3,679	3,808	1,287
17	47.25	37.92	85.17	90	143	5.00	5.10	0.24	12,784	11,620	2,784
18	85.17	0.00	85.17	150	150	5.79	0.00	5.79	1	1	1
19	47.89	37.29	85.17	90	150	5.13	4.52	0.61	1,970	1,970	511
20	48.14	37.03	85.17	94	143	4.78	4.88	0.20	3,892	3,628	26,606,000
21	85.17	0.00	85.17	150	150	5.79	0.00	5.8	1.0	1.0	1.0
22	85.17	0.00	85.17	150	150	5.79	0.00	5.8	1.0	1.0	1.0
23	44.67	40.50	85.17	86	150	4.9055	5.2714	0.4	144,090	104,140	3911.3
24	45.74	39.43	85.17	88	150	4.9122	5.0158	0.1036	547,700	448,330	7830.4
25	85.17	0.00	85.17	150	150	5.79	0.00	5.8	1.0	1.0	1.0

En el método de procesos de decisión de valor de Markov se eligen los valores de los parámetros Gasto tubería 1 (q1), Coeficiente de rugosidad tubería 1 (c1), coeficiente de rugosidad tubería 2 (c2), a través de una función de probabilidad normal, se evalúa la aptitud de cada valor con la error y una función de valor, que cambian en cada episodio de decisión. El método está diseñado para realizar una mayor exploración que explotación de las soluciones.

En el cuadro 7.2.2 en color verde están los 4 conjuntos de parámetros que tienen las funciones de valor máxima de FvQ1, FvC1, FvC2. Se elige la ejecución No. 24 debido a que las funciones de valor FvQ1, FvC1 y FvC2 tienen el valor más alto y la función objetivo 3.1 (i.e. ErrorTotal es mínimo).



7.2.2 Caso No. 2: Calibración de un circuito con 6 incógnitas.

El circuito que se analizó en el apartado 7.2.1, los tramos 1 y 2, se dividen a la mitad esto es se suponen que cada tramo tiene una rugosidad distinta y se busca determinar el valor real de los coeficientes de rugosidad de los tramos L1,L2,L3,L4. Los diámetros de tramos L1 y L2 es D1, el de los tramos L3 y L4 es D2.

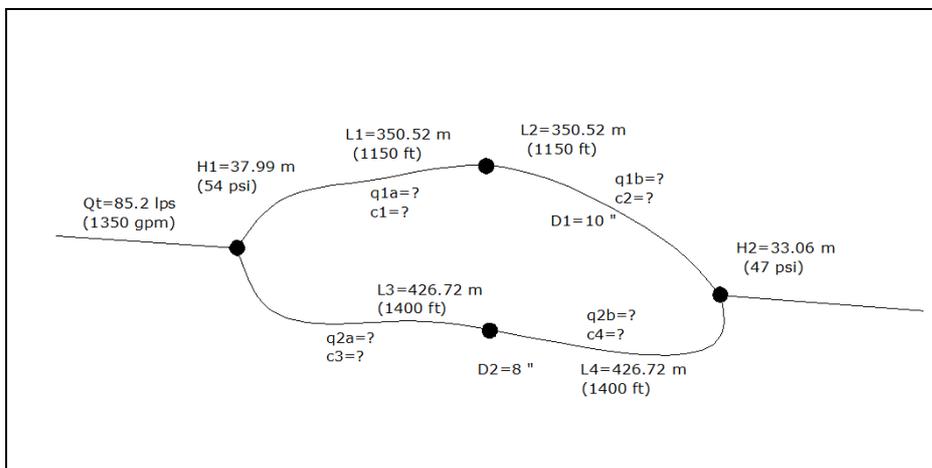


Figura 7.2.2.-Un circuito de literatura con 6 incógnitas.

Las incógnitas en este problema son el gasto q_{1a} y q_{1b} , ya que $q_{1a}=q_{1b}$, el gasto en el tramo 3 y 4 (q_{2a} , q_{2b} , $q_{2a}=q_{2b}$) y los coeficientes de rugosidad de cada tramo (C_1 , C_2 , C_3 , C_4).

Por tanto, las incógnitas son 6 y el número de ecuaciones son 3, el problema es indeterminado.

Para calibrar un circuito con 6 incógnitas se usó el programa *prueba3_2May.m*. que se desarrolló en lenguaje de programación de Matlab.



En el cuadro 7.2.2. se muestran los resultados de calibración de un circuito con 6 incógnitas, el error total es la suma del cuadrado del error de cálculo de la presión en el punto 2, del tramo 1 y del tramo 2, es decir la diferencia entre la presión observada y las pérdidas de carga en el tramo 1 y 2 (i.e. $(4.93 - hf_1)^2 + (4.93 - hf_2)^2$).

Cuadro 7.2.2 Resultados de calibración de un circuito con 6 incógnitas.

No. Repeticiones	q1	q2	qttotal	C1	C2	C3	C4	hf1	hf2	Error total
1	47.19	37.98	85.17	70	150	150	139	4.95	5.03	0.12
2	49.53	35.65	85.17	77	138	133	140	4.88	4.96	0.08
3	53.18	31.99	85.17	50	82	104	150	4.91	5.06	0.15
4	56.02	29.15	85.17	150	88	150	90	4.91	5.12	0.22
5	46.06	39.12	85.17	150	68	150	150	4.94	4.94	0.02
6	47.89	37.29	85.17	131	74	150	126	4.97	5.38	0.49
7	61.58	23.60	85.17	102	144	121	75	4.95	4.94	0.03
8	50.09	35.08	85.17	77	144	123	150	4.89	4.94	0.05
9	50.72	34.45	85.17	86	118	130	129	4.83	5.13	0.30
10	47.57	37.60	85.17	75	126	148	146	4.91	4.77	0.18
11	44.10	41.07	85.17	150	65	150	150	4.88	5.41	0.53
12	85.17	0.00	85.17	150	150	150	150	5.79	0.00	5.79
13	51.54	33.63	85.17	134	82	117	145	4.90	4.95	0.05
14	48.01	37.16	85.17	71	150	134	150	5.00	5.02	0.15
15	62.65	22.52	85.17	150	102	115	71	4.98	5.01	0.13
16	67.63	17.54	85.17	120	148	139	51	4.79	4.77	0.30
17	85.17	0.00	85.17	150	150	150	150	5.79	0.00	5.79
18	47.82	37.35	85.17	73	138	150	138	4.93	4.92	0.02
19	45.61	39.56	85.17	69	130	150	150	5.02	5.05	0.21
20	85.17	0.00	85.17	150	150	150	150	5.79	0.00	5.79
21	85.17	0.00	85.17	150	150	150	150	5.79	0.00	5.79
22	44.54	40.63	85.17	76	105	150	147	4.75	5.40	0.65
23	62.02	23.15	85.17	103	148	69	150	4.87	4.88	0.11
24	85.17	0.00	85.17	150	150	150	150	5.79	0.00	5.79
25	68.77	16.40	85.17	150	119	51	93	4.94	4.84	0.09



En el cuadro 7.2.3 se muestran los valores de funciones de valor máxima para cada ejecución del programa o repeticiones, en color verde se marcan 4 conjuntos de valores que tienen los mayores valores de funciones de valor de las 25 repeticiones hechas en el programa de calibración.

Cuadro 7.2.3 Resultados de calibración de un circuito con 6 incógnitas.

No. Repeticiones	FvQ1	FvC1	FvC2	FvC3	FvC4
1	195,560	195,560	195,560	4,556	6,921
2	32,566	32,559	43,798	53,595	48,498
3	329,240	329,240	426,940	4,746	3,714
4	284,690	230,630	230,630	1,722	1,785
5	570,340	570,340	570,340	276,750	276,750
6	42,885	32,545	31,912	2,325	2,575
7	96,403	81,960	88,131	478,060	443,690
8	63,927	53,169	53,997	417,260	528,780
9	8,622	8,622	9,051	1,590	1,959
10	285,540	285,540	376,360	2,715	2,175
11	37,966	37,966	37,966	352	352
12	1	1	1	1	1
13	75,943	87,412	81,775	105,420	121,240
14	12,989	11,776	11,494	13,058	16,053
15	17,938	17,938	23,476	9,919	12,406
16	3,901	3,901	4,461	3,421	3,273
17	1	1	1	1	1
18	3,475,900	3,475,900	3,475,900	952,390	952,390
19	7,175	7,095	7,103	5,636	5,636
20	1	1	1	1	1
21	1	1	1	1	1
22	2,455	2,681	2,455	350	350
23	19,759	29,652	23,403	27,714	21,679
24	1	1	1	1	1
25	707,350	707,350	707,350	10,853	9,374



El conjunto de valores de los parámetros que son las soluciones más probables son la número 5,18, tiene las funciones de valor más altos, y minimiza la discrepancia entre el valor medido y el valor calculado (i.e. la función objetivo 3.1).

7.2.3 Caso No. 3: Calibración de un circuito con 10 incógnitas.

Al problema de CSMH del apartado 7.2.2 se suma las demandas desconocidas en los Nodos 3 y 4.

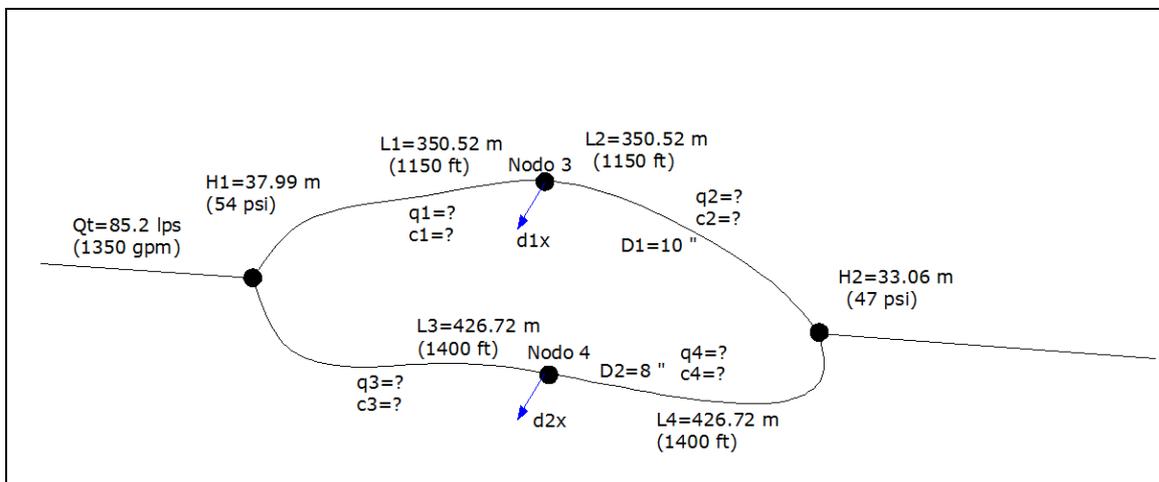


Figura 7.2.3. Problema de CSMH, un circuito con 10 incógnitas.

En este problema se tienen 10 incógnitas: gasto en el tramo 1 (q_1). Gasto en el tramo 2 (q_2), gasto en el tramo 3 (q_3), gasto en el tramo 4 (q_4), demanda desconocida en tramo 1 (d_{1x}), demanda desconocida en tramo 2 (d_{2x}), coeficientes de rugosidad en el tramo 1,2,3 y 4.

Se asignó un rango de búsqueda de 0-2 lps para las demandas d_{1x} y d_{2x} .



En el cuadro 7.2.4. se muestran los resultados de calibración de un circuito con 10 incógnitas y 4 ecuaciones, siendo el problema indeterminado.

Se busca disminuir la discrepancia entre el gasto medido y el gasto simulado; además de disminuir la diferencia entre la presión medida 2 y la presión simulada en el punto 2 del circuito.

Se cumple con los criterios $q_1 + q_3 = q_{total}$ y $q_2 + d_{1x} + q_4 + d_{2x} = q_{total}$

Cuadro 7.2.4. Resultados de calibración de un circuito con 10 incógnitas.

No. Repeticiones	q1	q2	q3	q4	d1x	d2x	qtotal	$q_2+d_{1x}+q_4+d_{2x}$	C1	C2	C3	C4
1	47.89	45.89	37.29	36.80	2.0	0.5	85.17	85.17	69	150	150	144
2	58.67	57.56	26.50	24.65	1.1	1.9	85.17	85.17	97	141	97	150
3	53.69	51.69	31.48	30.28	2.0	1.2	85.17	85.17	114	96	150	102
4	57.92	56.97	27.25	25.25	1.0	2.0	85.17	85.17	90	150	124	86
5	85.17	83.17	0.00	0.00	2.0	0.0	85.17	85.17	150	150	150	150
6	63.15	61.15	22.02	20.02	2.0	2.0	85.17	85.17	106	150	68	130
7	45.87	43.87	39.31	39.19	2.0	0.1	85.17	85.17	108	74	150	139
8	46.06	44.06	39.12	37.12	2.0	2.0	85.17	85.17	126	74	150	150
9	45.05	43.25	40.13	39.78	1.8	0.4	85.17	85.17	66	135	150	150
10	55.71	54.26	29.46	27.46	1.5	2.0	85.17	85.17	86	150	117	107
11	55.71	55.34	29.46	29.13	0.4	0.3	85.17	85.17	150	79	96	150
12	85.17	83.17	0.00	0.00	2.0	0.0	85.17	85.17	150	150	150	150
13	51.04	50.99	34.13	33.88	0.1	0.3	85.17	85.17	115	80	124	150
14	85.17	83.17	0.00	0.00	2.0	0.0	85.17	85.17	150	150	150	150
15	85.17	83.17	0.00	0.00	2.0	0.0	85.17	85.17	150	150	150	150
16	44.29	42.29	40.88	38.88	2.0	2.0	85.17	85.17	66	150	150	150
17	85.17	83.17	0.00	0.00	2.0	0.0	85.17	85.17	150	150	150	150
18	60.44	58.44	24.73	22.73	2.0	2.0	85.17	85.17	150	96	75	144
19	45.93	45.68	39.24	37.28	0.3	2.0	85.17	85.17	70	150	150	150
20	85.17	83.17	0.00	0.00	2.0	0.0	85.17	85.17	150	150	150	150
21	85.17	83.17	0.00	0.00	2.0	0.0	85.17	85.17	150	150	150	150
22	51.86	49.86	33.31	31.31	2.0	2.0	85.17	85.17	79	150	120	65
23	53.44	51.44	31.73	30.65	2.0	1.1	85.17	85.17	150	78	150	109



No. Repeticiones	q1	q2	q3	q4	d1x	d2x	qttotal	$q2+d1x+q4+d2x$	C1	C2	C3	C4
24	50.35	50.35	34.83	34.03	0.0	0.8	85.17	85.17	131	78	30	150
25	46.75	46.60	38.42	36.42	0.2	2.0	85.17	85.17	95	91	150	144

En el cuadro 7.2.5 se muestran las pérdidas de carga en el tramo 1, 2 (hf1) y en el tramo 3 y 4 (hf2), el error total, tiene el mismo significado que en la calibración de un circuito con 6 incógnitas, se pueden ver en este mismo cuadro 7.15b el valor de las funciones de valor para cada parámetro de calibración buscado por procesos de decisión de Markov.

Cuadro 7.2.5. Resultados de calibración de un circuito con 10 incógnitas.

No. repeticiones	hf1	hf2	Error total	FvQ1	Fvd1x	Fvd2x	FvC1	FvC2	FvC3	FvC4
1	5.12	4.64	0.47	228	228	63	228	228	63	63
2	4.82	3.74	1.29	2,100	2,176	1,998	2,683,000	2,683,000	2,028	2,683,000
3	4.67	4.79	0.40	527	525	1245	553	404	1,887	1,766
4	5.02	4.88	0.14	3,016	2,019	6,605	2,869	2,894	6,508	6,575
5	5.66	0.00	5.66	1	1	1	1	1	1	1
6	4.73	4.62	0.51	613	613	246	613	613	173	173
7	4.82	5.35	0.53	171,700	171,700	115	171,700	171,700	115	115
8	4.44	4.71	0.71	71	71	2,876	71	71	2,876	2,876
9	5.07	5.14	0.35	340	340	5,139	340	340	5,139	5,139
10	4.95	4.72	0.23	6,501	6,492	379	6,492	6,531	379	325
11	5.59	4.77	0.81	72	72	346	72	72	346	346
12	5.66	0.00	5.66	1	1	1	1	1	1	1
13	5.42	4.62	0.79	133	133	103	133	133	103	103
14	5.66	0.00	5.66	1	1	1	1	1	1	1
15	5.66	0.00	5.66	1	1	1	1	1	1	1
16	4.73	5.13	0.39	653	653	329	653	653	329	329
17	5.66	0.00	5.66	1	1	1	1	1	1	1
18	4.82	4.79	0.24	1,320	1,358	3,640	1,320	1,320	3,640	3,640
19	4.69	4.75	0.42	219	219	397	219	219	397	397
20	5.66	0.00	5.66	1	1	1	1	1	1	1
21	5.66	0.00	5.66	1	1	1	1	1	1	1
22	4.86	10.47	5.62	36,473	36,730	266	36,473	36,473	251	251



No. repeticiones	hf1	hf2	Error total	FvQ1	Fvd1x	Fvd2x	FvC1	FvC2	FvC3	FvC4
23	5.04	4.52	0.52	1,094	1,094	118	1,094	1,063	150	118
24	5.07	41.16	36.38	2,493	2,493	51,899	2,324	2,493	51,899	51,899
25	4.61	4.73	0.53	82	82	2,014	82	82	2,014	2,014

En el cuadro 7.2.5 se marcan en color verde los 4 conjuntos de valores más altos, de los cuales se eligen la repetición No. 7, la cual tiene los valores más altos en las funciones de valor para el gasto (FvQ1) en el tramo 1 y la demanda (Fvd1x) en el tramo 1.

7.2.4 Caso No. 4: Calibración de un circuito en modelo experimental

En la figura 7.2.4, se muestra la formulación del problema de calibración de 1 circuito en el modelo experimental de laboratorio, el cual inicia con 10 incógnitas y 4 ecuaciones, se procede a simplificar el problema hasta solo tener 8 incógnitas y 4 ecuaciones, aun así el problema sigue siendo indeterminado. El problema que se resuelve por medio del método Procesos de decisión de Markov es el de 10 incógnitas y 4 ecuaciones.



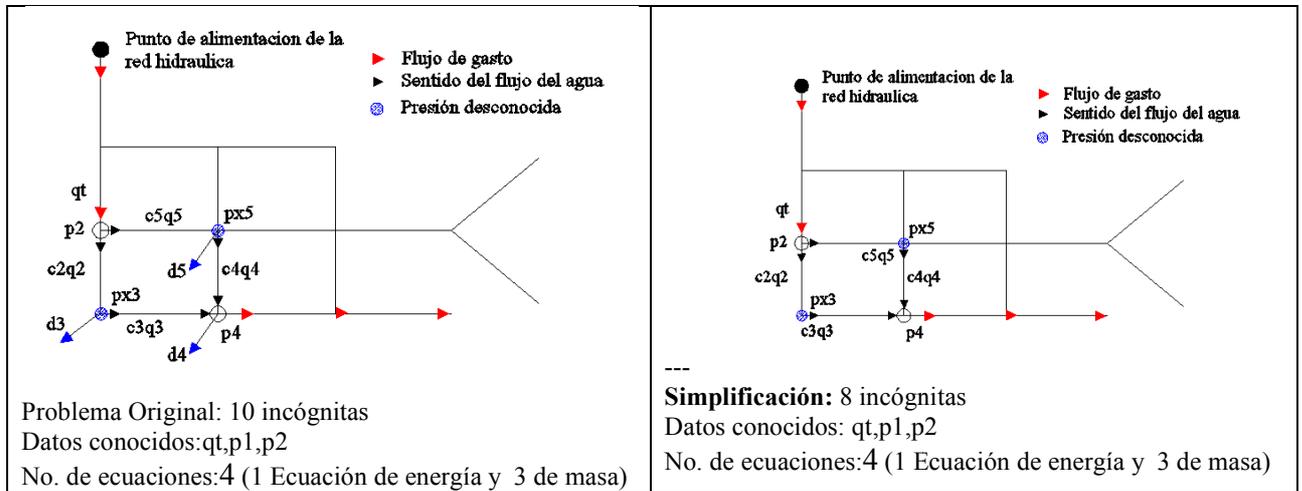


Figura 7.2.4 Formulación de problema de calibración de 1 circuito en un modelo de simulación.

En la figura 7.2.4 en la simplificación se consideran demandas conocidas d_3, d_4, d_5 .

Los datos medidos son q_t, p_2, p_4 , aparte de estos se conoce la topología de la red hidráulica, elevaciones de los nodos, longitud de los tramos, diámetros internos. Asimismo se considera conocida la curva característica actual de la bomba que alimenta la red de distribución del modelo experimental.

En la figura 7.2.5, se muestra el arreglo en el modelo de simulación para la calibración de 1 circuito (i.e. Coeficiente de rugosidad y demandas nodales), en el cual hay demandas en los nodos o tomas domiciliarias.



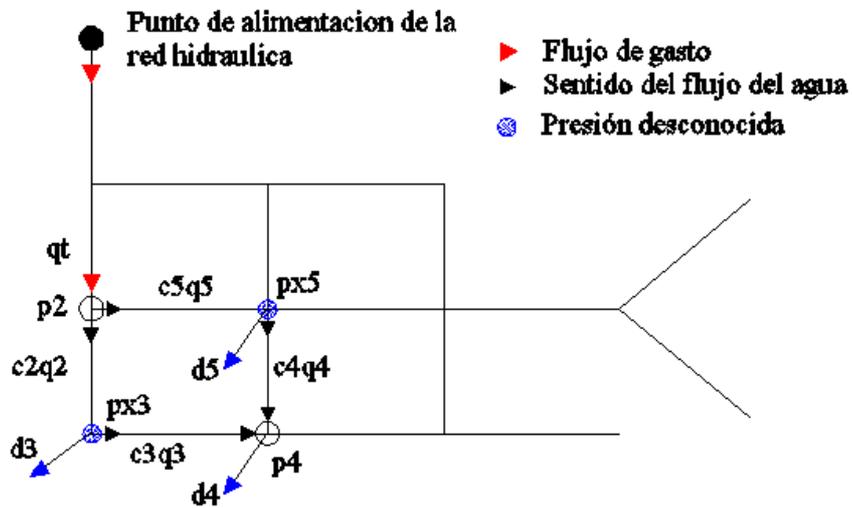
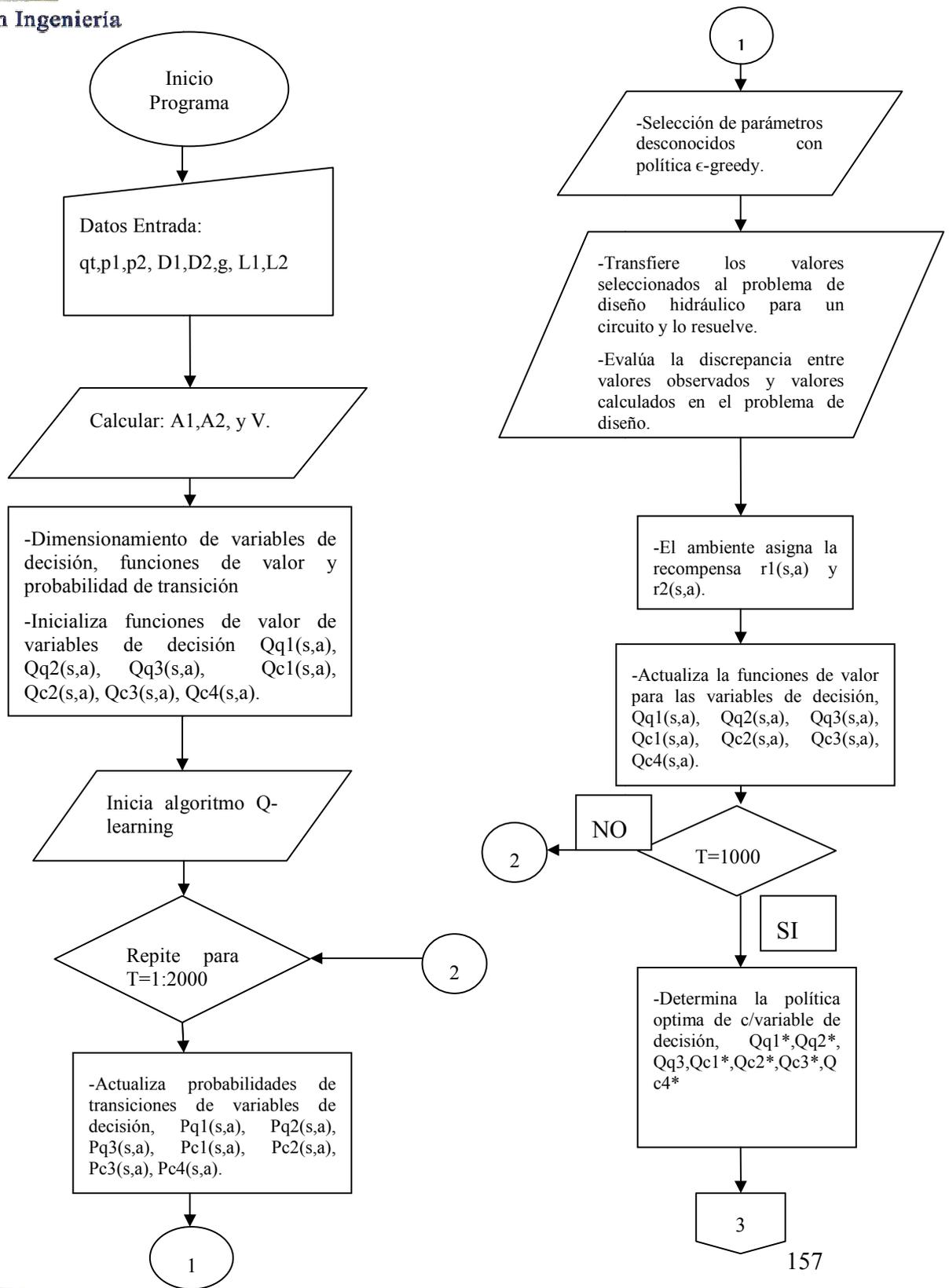


Figura 7.2.5
 Modelo de simulación sin calibrar de un circuito.

calibrar de un circuito.

En la figura 7.2.6 se muestra el diagrama de flujo para la calibración de un circuito para estimar los valores de coeficientes de rugosidad y demanda, para un circuito .





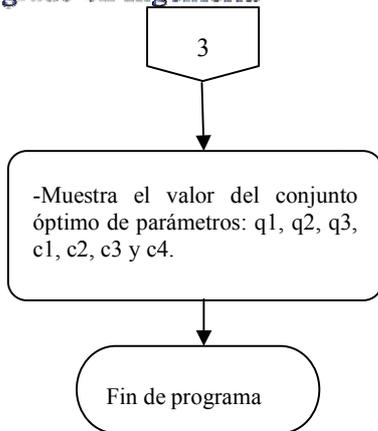


Figura 7.2.6 Diagrama de flujo para calibración en un circuito.

Solución de problema de diseño

En el cuadro 7.2.6 se muestra la solución del problema de diseño hidráulico en el modelo de simulación. Se conoce el gasto medido que entra a la red (3 l/s), la carga medida y en el MS en el punto 1 es de 32.5 m, se tienen 3 nodos de demanda (en MS) con valores de 1 l/s. Se tienen 4 tramos de tubería, con una pérdida de carga localizada indicada en el mismo cuadro.

Cuadro 7.2.6.-Solución del problema de diseño

Tramo	km	f	v (m/s)	hf (m)	ht (m)	alfa	Nodo	d (m ³ /s)	H (m)	Q (m ³ /s)
2-3	0.6	0.0219	1.157	0.072833	0.11374	48779	3	0.001	32.386	0.0015271
3-4	0.9	0.0282	0.3992	0.011168	0.018478	66527	4	0.001	32.368	0.00052707
4-5	0.6	0.02898	0.3582	0.0092463	0.013171	58875	5	0.001	32.381	0.00047293
2-5	0.8	0.02208	1.1157	0.068318	0.11907	54880				0.0014729

Donde:

km=Pérdidas de carga menores.

f= factor de fricción.

v=velocidad en el tramo de tubería, m³/s.

hf=Pérdidas de carga por fricción en el tramo, en m.



alfa= variable para el método de gradiente.

d= demanda en el nodo en m³/s.

H= Carga piezométricas en el nodo i.

Q= Gasto en el tramo i, en m³/s.

Se realizaron 4 pruebas para la calibración de modelo de simulación de dos circuitos. Prueba 1: válvulas de tramo 5-2 y tramo 3-4 completamente abiertas; Prueba 2: válvulas de tramo 5-2 y tramo 3-4 cerrada 1/3; Prueba 3: válvula de tramo 5-2 cerrada 1/3, válvula de tramo 3-4 cerrada 2/3; Prueba 4: válvulas de tramos 5-2 y 3-4 cerrada 2/3.

En el cuadro 7.2.7 se muestran lecturas de la prueba 1, problema de calibración de un circuito, estimación de coeficientes de rugosidad y demanda nodal, con válvulas de esfera completamente abiertas.

Cuadro 7.2.7 Prueba 1.- Lecturas para calibración de un circuito con válvulas esfera completamente abiertas.

Q(l/s)	P2 (kg/cm2)	p4 (kg/cm2)	p2-p4. (kg/cm2)	d4 (m3)				d4 (l/s)	d4 (m3/s)
				Lini	Lfin	V (m3)	t(s)		
1.4685	3.25	3.1	0.15	66.781	66.81	0.029	60	0.483	0.000483
1.4901	3.25	3.1	0.15	66.91	66.939	0.029	60	0.483	0.000483
1.4948	3.25	3.1	0.15	66.988	67.017	0.029	60	0.483	0.000483
1.497	3.25	3.1	0.15	67.042	67.071	0.029	60	0.483	0.000483
1.5025	3.25	3.1	0.15	67.142	67.171	0.029	60	0.483	0.000483
1.491	3.25	3.1							0.000483

Nota: Q=Gasto que entra al circuito; p2=carga de presión en nodo 2; p4=carga de presión en nodo 4; d4=demanda nodal en nodo 4, medida; Lini=Lectura inicial en medidor volumétrico; Lfin: Lectura final en medidor; V= Volumen medido; t=tiempo de medición.



En los cuadros 7.2.8a al 7.2.8f se pueden ver los resultados de la prueba 1, las cargas de presión para 8 soluciones, gasto en los tramos de tubería, valores estimados de coeficientes de rugosidad y demanda nodal, y las funciones de valor de los respectivos parámetros.

Cuadro 7.2.8a.- Carga de presión (m) para prueba 1, de red de un circuito.

Nodo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
3	32.4	32.49	32.489	32.33	32.335	32.337	32.407	32.322
4	32.399	32.452	32.488	32.33	32.33	32.336	32.404	32.294
5	32.431	32.455	32.493	32.379	32.336	32.438	32.409	32.3

Cuadro 7.2.8b.- Gasto de tuberías (m³/s)

Tramo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
2-3	0.000403	0.000434	0.000265	0.000550	0.000766	0.000555	0.000489	0.000646
3-4	0.000038	0.000285	0.000157	0.000053	0.000286	0.000058	0.000071	0.000186
4-5	0.000326	0.000121	0.000274	0.000415	0.000095	0.000439	0.000273	0.000228
2-5	0.000479	0.000291	0.000303	0.000531	0.000538	0.000887	0.000422	0.000725

Cuadro 7.2.8c.- Estimación de coeficientes de rugosidad por tramo de tubería

Tramo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
2-3	33	150	77	34	49	35	42	39
3-4	91	40	127	123	141	113	36	30
4-5	51	84	136	52	31	36	134	89
2-5	50	37	127	40	34	116	37	42

Cuadro 7.2.8d.- Estimación de demanda nodal (m³/s) en red de un circuito.

Nodo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
3	0.000364	0.000149	0.000108	0.000497	0.000480	0.000497	0.000418	0.000460
4	0.000364	0.000406	0.000431	0.000468	0.000381	0.000497	0.000344	0.000414
5	0.000153	0.000170	0.000029	0.000116	0.000443	0.000447	0.000149	0.000497



Cuadro 7.2.8e.- Funciones de valor de demanda nodal.

Nodo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
3	6.80E+04	1.42E+05	3.70E+05	3.91E+06	7.88E+04	4.14E+06	55580	2.55E+05
4	8.59E+04	2.03E+05	4.42E+05	5.37E+06	1.16E+05	6.16E+06	6.23E+04	2.55E+05
5	6.75E+04	1.33E+05	3.33E+05	3.91E+06	8.69E+04	4.69E+06	52873	2.55E+05

Cuadro 7.2.8f.- Funciones de valor de coeficiente de rugosidad.

Tramo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
2-3	42.756	39.948	51.536	40.472	38.895	96.469	63.836	42.844
3-4	43.839	40.349	57.164	39.095	38.198	67.406	59.843	41.685
4-5	42.011	38.803	57.577	39.946	38.661	69.476	52.911	41.158
2-5	42.026	39.581	58.02	40.434	38.966	67.099	66.36	42.636

En la figura 7.2.7a, la solución 4 y 6 tienen discrepancias $\pm 10\%$ de la demanda medida.

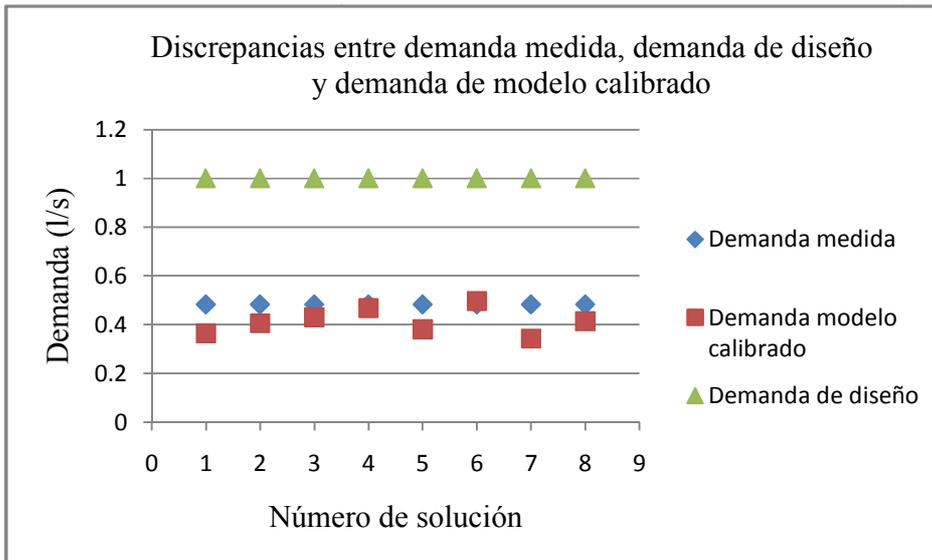


Figura 7.2.7a.- Prueba 1: Discrepancias entre demanda medida y demanda de modelo calibrado, en red de un circuito.



En la figura 7.2.7b se puede ver en la solución 6 y 8, la discrepancia entre el gasto medido y del gasto del modelo de la red de dos circuitos calibrado es menor del 10%, cumplen con lo recomendado por la guía del ECAC (1999). Las soluciones 1-5 y 7 no cumplen con ese criterio.

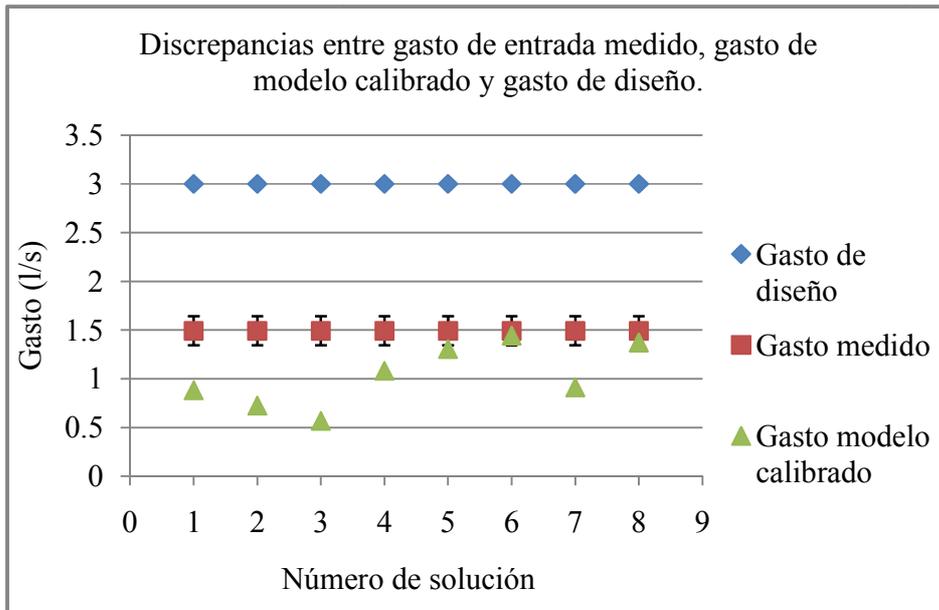


Figura 7.2.7b Prueba 1: Discrepancias entre gasto medido y gasto del modelo calibrado, red de un circuito.



En la figura 7.2.7c se puede ver las diferencias entre cargas medidas, carga de diseño y carga de modelo calibrado son menores a ± 3.5 m.

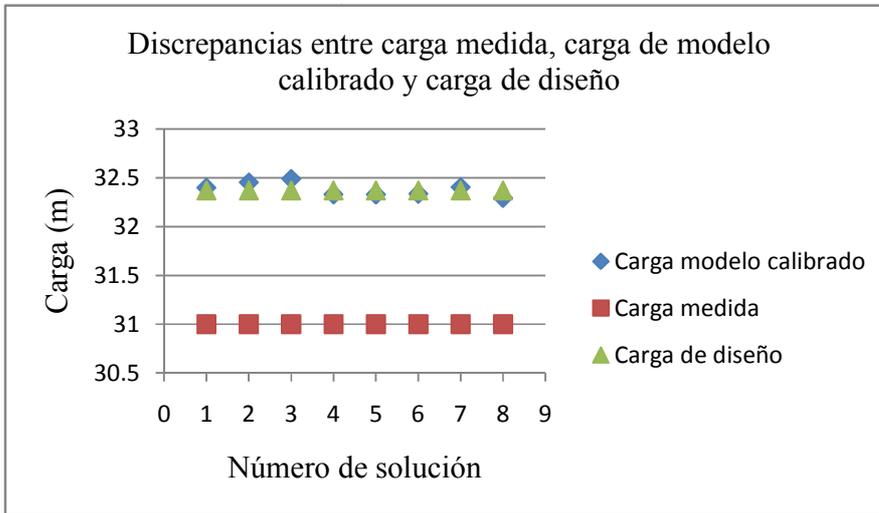


Figura 7.2.7c.- Prueba 1: Discrepancias entre cargas de presión, red de un circuito.

En la figura 7.2.7d se muestra que las soluciones 4, 5, 6 y 8 reducen la discrepancia entre el modelo de simulación de un circuito y la carga observada en el nodo 4, del modelo experimental, en 2.9%, 2.2%, 2.2% y 5.1% respectivamente. Como comentario adicional se puede decir que la discrepancia es menor a ± 1.4 m, por tanto el modelo podría ser usado para propósitos de operación, sin tener que estimar los valores de coeficiente de rugosidad de la tubería.



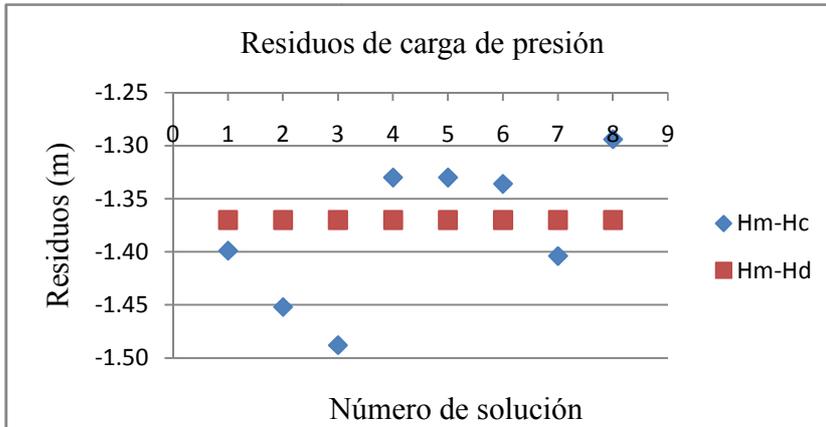


Figura 7.2.7d. Prueba 1: Residuos de carga de presión.

La diferencia entre gasto medido (1.49 l/s) y gasto en el modelo de simulación (3 l/s) es de 50%, 100.1% mayor al recomendado por la guía del ECAC (1999), por tanto no se puede usar el MS sin calibrar para propósito de planeación, operación y calidad del agua. La solución 6, disminuye la diferencia entre gasto medido (1.49 l/s) y el gasto calculado por calibración, hasta en un 96.7%.

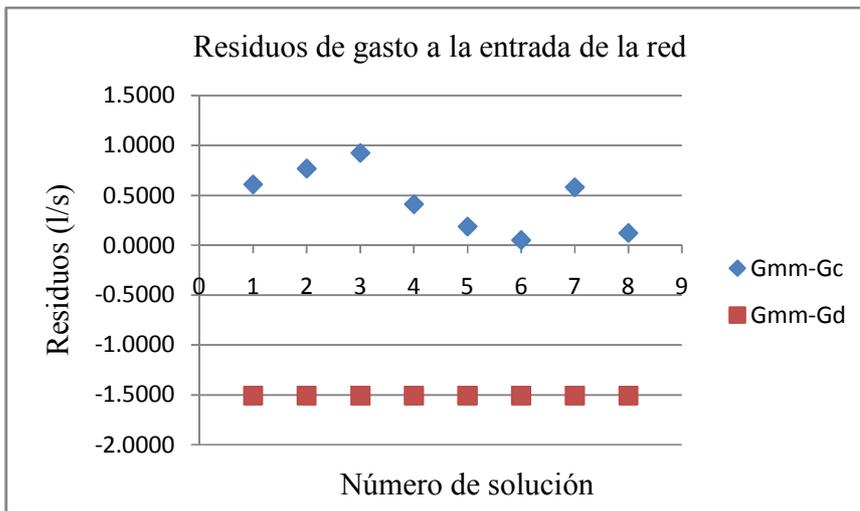


Figura 7.2.7e Residuos de gasto a la entrada de la red de un circuito.



En el cuadro 7.2.9 se muestran lecturas de la prueba 2, problema de calibración de un circuito, estimación de coeficientes de rugosidad y demanda nodal, con válvulas de esfera 1/3 cerradas (30°).

Cuadro 7.2.9.- Prueba 2: Lecturas de gasto, presión en punto 1 y demanda nodal en punto 4.

Q(l/s)	p2 (kg/cm2)	p4 (kg/cm2)	p2-p4. (kg/cm2)	d4 (m3)				d4 (l/s)	d4 (m3/s)
				Lini	Lfin	V (m3)	t(s)		
1.5027	3.25	3.1	0.15	69.39	69.419	0.029	60	0.483	0.000483
1.4843	3.25	3.05	0.2	69.895	69.924	0.029	60	0.483	0.000483
1.4851	3.25	3.05	0.2	69.895	69.924	0.029	60	0.483	0.000483
1.4891	3.25	3.05	0.2	70.461	70.491	0.03	60	0.500	0.000500
1.4831	3.25	3.1	0.15	70.712	70.741	0.029	60	0.483	0.000483
1.489	3.25	3.07							0.000487

En los cuadros del 7.2.10a al 7.2.10f se pueden ver los resultados de la prueba 2, carga de presión, gasto en tuberías, estimación de demanda nodal, coeficiente de rugosidad y sus funciones de valor.

Cuadro 7.2.10a.- Carga de presión (m) para prueba 2, de red de un circuito.

Nodo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
3	32.346	32.284	32.304	32.383	32.273	32.398	32.49	32.245
4	32.342	32.283	32.272	32.383	32.231	32.396	32.448	32.233
5	32.365	32.315	32.276	32.398	32.252	32.448	32.448	32.236

Cuadro 7.2.10b.- Gasto de tuberías (m³/s)

Tramo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
2-3	0.000580	0.000591	0.000661	0.000453	0.000680	0.000431	0.000317	0.000763
3-4	0.000241	0.000107	0.000339	-0.000018	0.000229	0.000137	0.000317	0.000267
4-5	0.000214	0.000373	0.000137	0.000349	0.000168	0.000264	- 0.000019	0.000176
2-5	0.000430	0.000758	0.000633	0.000436	0.000631	0.000438	0.000337	0.000614



Cuadro 7.2.10c.- Estimación de coeficientes de rugosidad por tramo de tubería

Tramo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
2-3	38	32	38	34	36	35	98	38
3-4	115	88	52	31	30	124	42	74
4-5	39	59	63	88	32	31	113	106
2-5	30	46	34	36	32	53	40	30

Cuadro 7.2.10d.- Estimación de demanda nodal (m³/s) en red de un circuito.

Nodo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
3	0.000339	0.000484	0.000323	0.000472	0.000451	0.000294	0.000000	0.000496
4	0.000455	0.000480	0.000476	0.000331	0.000397	0.000401	0.000298	0.000443
5	0.000215	0.000385	0.000496	0.000087	0.000463	0.000174	0.000356	0.000438

Cuadro 7.2.10e.- Funciones de valor de demanda nodal.

Nodo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
3	7.31E+05	1.04E+07	7.26E+06	49013	1.51E+05	1.65E+05	24082	3.60E+05
4	1.19E+06	2.34E+07	9.46E+06	49958	1.51E+05	1.65E+05	34012	6.17E+05
5	6.83E+05	1.06E+07	5.33E+06	48188	1.51E+05	1.65E+05	25207	3.60E+05

Cuadro 7.2.10f.- Funciones de valor de coeficiente de rugosidad.

Tramo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
2-3	25.91	27.708	26.937	26.636	28.008	26.058	24.705	28.976
3-4	25.611	26.831	26.727	25.828	27.199	25.467	24.631	27.935
4-5	25.768	26.762	26.691	26.36	27.35	25.65	24.747	27.968
2-5	25.892	27.244	27.442	26.731	28.406	25.692	24.861	28.828



Las soluciones 1-3 y 8, de demanda de modelo calibrado tienen discrepancias menores al 10% de la demanda medida, ver figura 7.2.8a.

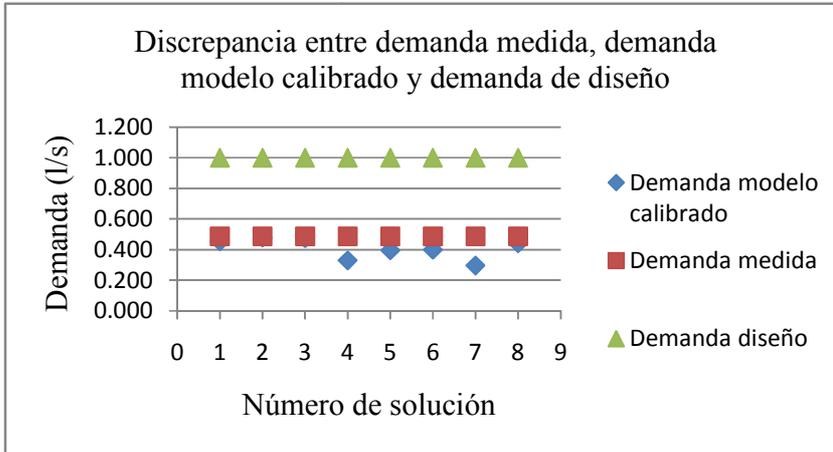


Figura 7.2.8a.-Prueba 2: Discrepancias entre demandas nodales, red de un circuito

En la figura 7.2.8b se puede ver la discrepancia entre gasto medido y gasto de modelo calibrado, en la solución 2 y 8, son menores al $\pm 10\%$.

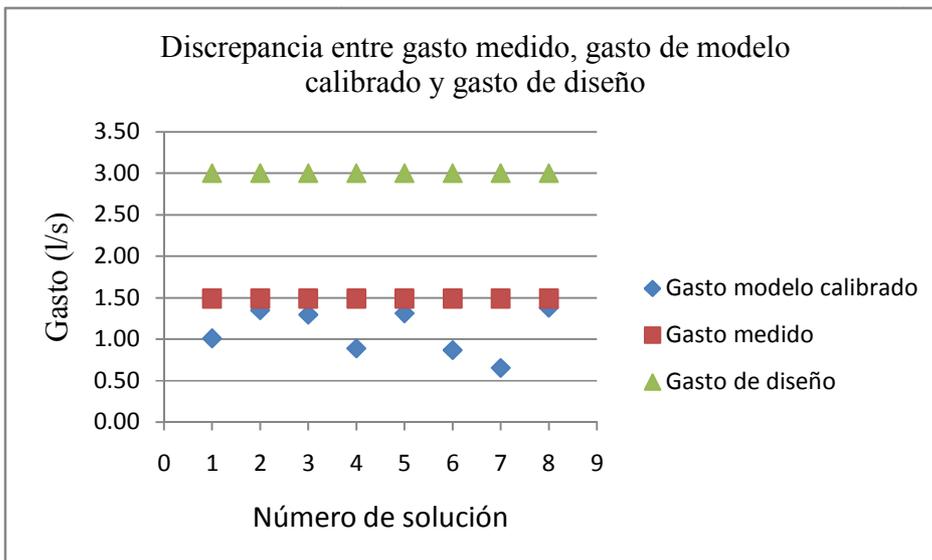


Figura 7.2.8b.-Prueba 2: Discrepancias entre gastos, red de un circuito.



La figura 7.2.8c muestra las discrepancias de las cargas de presión medida, carga de modelo calibrado y carga de diseño, las cuales son menores a ± 3.5 m con respecto a la carga medida.

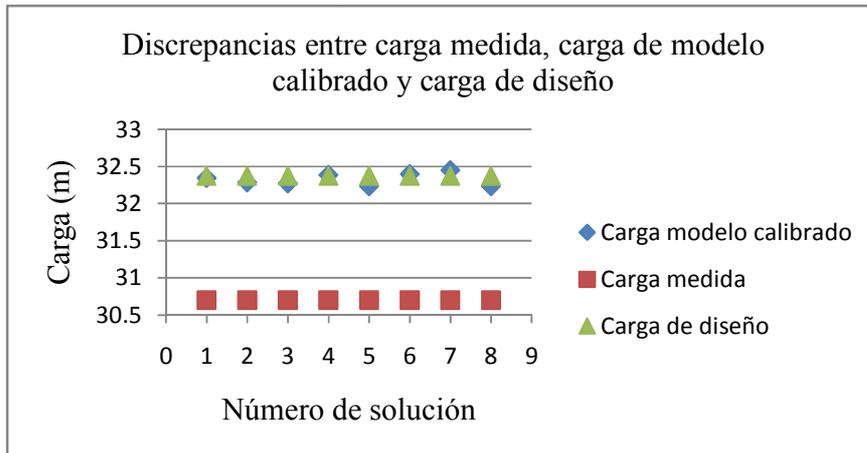


Figura 7.2.8c.- Prueba 2: Discrepancias entre cargas de presión, red un circuito.

La diferencia entre carga medida y carga de presión en el modelo de simulación es de -1.67 m. Si el MS se usa para propósito de planeación y de calidad del agua la diferencia es aceptable por la guía del ECAC(1999), no así para propósitos de operación, en el que recomienda una discrepancia ± 1.4 m. La solución 5 tiene la diferencia mínima entre carga de presión medida y calculada del modelo calibrado, y es de $| 1.531 |$ m y la máxima es la solución 7 de $| 1.75 |$.



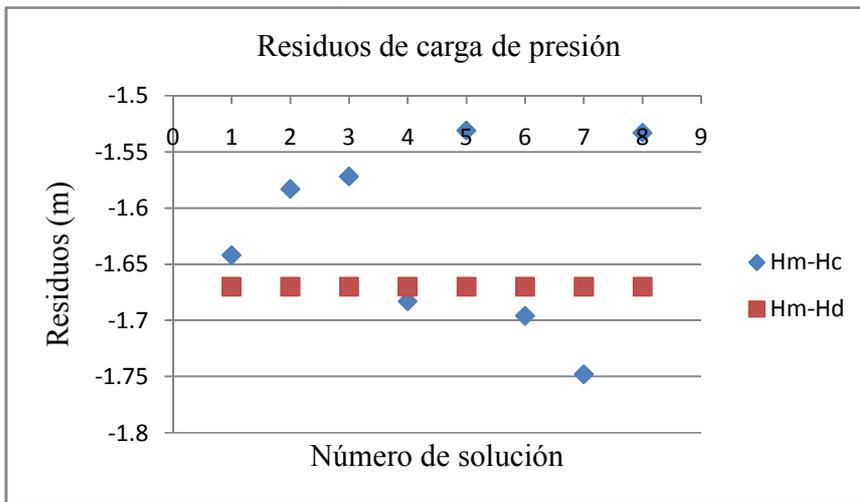


Figura 7.2.8d.-Prueba 2: Residuos de carga de presión, para red de un circuito.

La diferencia entre el gasto medido ($G_{mm}=1.489$ l/s) y el gasto de modelo de simulación sin calibrar ($G_d=3$ l/s) es de -1.511 l/s, en porcentaje es del 100.1%. La solución 8 tiene la discrepancia mínima entre gasto medido y calculado (G_c) de 0.11 l/s (7.4% con respecto al gasto medido) y la solución 7 la diferencia máxima de 0.84 l/s (56.4% con respecto a G_{mm}), ver figura 7.2.9e. La solución 8, se considera una aproximación aceptable ya que disminuye la diferencia entre G_{mm} y G_d , a un valor de $7.4 < 10\%$ sugerido por el ECAC (1999).

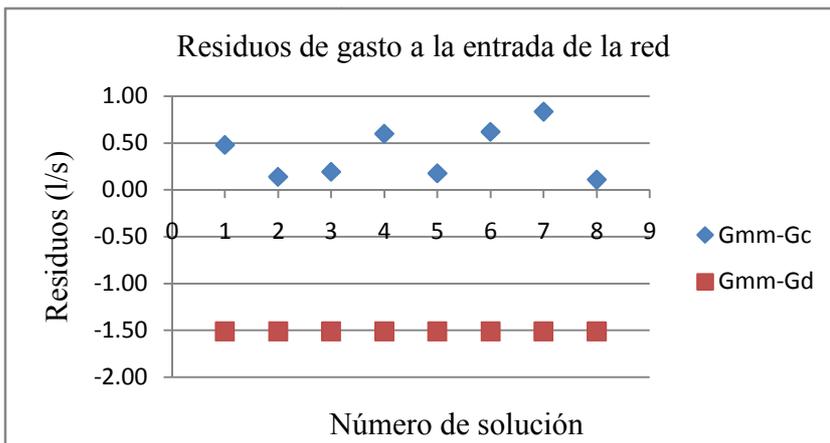


Figura 7.2.8e.-Prueba 2: Residuos de gasto a la entrada de la red de un circuito.



En el cuadro 7.2.11, se muestra la Prueba 3, con válvula del tramo 2-5 cerrada 30° y válvula del tramo 3-4 cerrada 60°.

Cuadro 7.2.11.- Prueba 3: Lecturas de gasto, presión en punto 1 y demanda nodal en punto 4.

Q (l/s)	p2 (kg/cm2)	p4 (kg/cm2)	p2-p4. (kg/cm2)	d4 (m3)				d4 (l/s)	d4 (m3/s)
				Lini	Lfin	V (m3)	t(s)		
1.4889	3.25	3	0.25	71.465	71.494	0.029	60	0.483	0.000483
1.4624	3.2	3	0.2	71.817	71.845	0.028	60	0.467	0.000467
1.483	3.25	3	0.25	71.211	71.24	0.029	60	0.483	0.000483
1.4781	3.25	3	0.25	72.522	72.551	0.029	60	0.483	0.000483
1.4835	3.25	3	0.25	72.986	73.015	0.029	60	0.483	0.000483
1.479	3.24	3	0.24						0.000480

En los cuadros del 7.2.12a al 7.2.12f se pueden ver los resultados de la prueba 3, carga de presión, gasto en tuberías, estimación de demanda nodal, coeficiente de rugosidad y sus funciones de valor.

Cuadro 7.2.12a.- Carga de presión (m) para prueba 3, de red de un circuito.

Nodo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
3	32.335	32.227	32.264	32.378	32.168	32.236	32.352	32.201
4	32.321	32.225	32.262	32.375	32.109	32.234	32.352	32.153
5	32.326	32.248	32.313	32.379	32.112	32.276	32.375	32.156

Cuadro 7.2.12b.- Gasto de tuberías (m³/s)

Tramo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
2-3	0.000569	0.000541	0.000475	0.000226	0.000578	0.000524	0.000313	0.000751
3-4	0.000471	0.000060	0.000056	0.000169	0.000302	0.000175	0.000045	0.000324
4-5	- 0.000159	0.000310	0.000318	0.000156	0.000191	0.000318	0.000476	0.000145
2-5	0.000334	0.000614	0.000359	0.000271	0.000684	0.000499	0.000620	0.000588



Cuadro 7.2.12c.- Estimación de coeficientes de rugosidad por tramo de tubería

Tramo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
2-3	61	33	33	42	30	33	38	43
3-4	133	36	40	121	33	125	148	40
4-5	66	59	38	91	112	42	97	87
2-5	32	41	32	53	32	37	143	30

Cuadro 7.2.12d.- Estimación de demanda nodal (m³/s) en red de un circuito.

Nodo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
3	0.000099	0.000481	0.000419	0.000058	0.000275	0.000349	0.000357	0.000427
4	0.000312	0.000370	0.000374	0.000325	0.000493	0.000493	0.000431	0.000468
5	0.000493	0.000304	0.000041	0.000115	0.000493	0.000181	0.000144	0.000444

Cuadro 7.2.12e.- Funciones de valor de demanda nodal.

Nodo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
3	39824	79938	94677	41613	7.10E+06	7.10E+06	4.00E+05	4.55E+06
4	42635	98724	1.07E+05	49665	7.10E+06	7.10E+06	5.08E+05	8.84E+06
5	39938	76009	87496	37045	7.10E+06	7.10E+06	4.14E+05	3.26E+06

Cuadro 7.2.12f.- Funciones de valor de coeficiente de rugosidad.

Tramo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
2-3	13.852	14.459	13.832	13.6	14.727	14.383	13.934	14.683
3-4	14.262	14.159	13.667	13.436	14.533	14.106	14.001	14.426
4-5	14.33	13.982	13.668	13.429	14.538	14.246	14.441	14.448
2-5	14.345	14.234	13.681	13.479	14.932	14.239	14.21	14.744



En la figura 7.2.9a, las soluciones 5,6 y 8 la discrepancia entre la demanda medida y la demanda del modelo calibrado está en $\pm 10\%$.

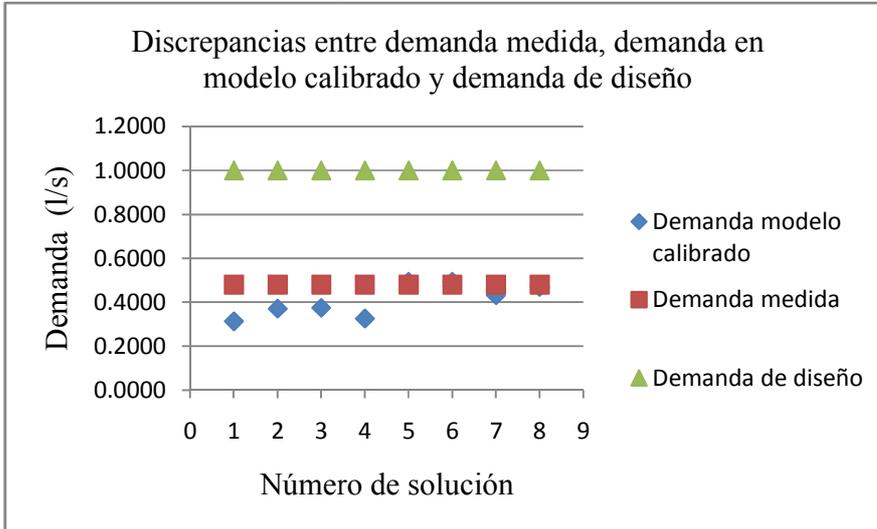


Figura 7.2.9a.-Prueba 3: Discrepancias entre demandas nodales, red de un circuito.

En la figura 7.2.9b se puede ver que la solución 8, es la única que tiene una discrepancia menor o igual al 10%. La cual cumple con el criterio del ECAC (1999) para el gasto.

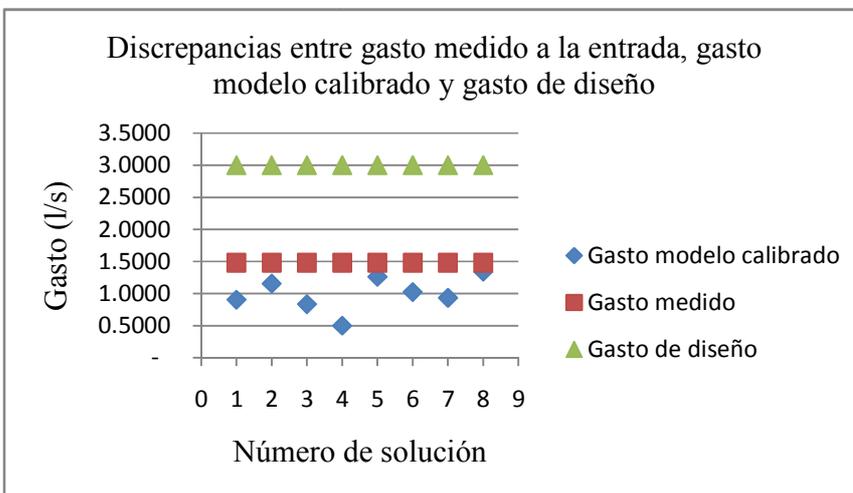


Figura 7.2.9b.-Prueba 3: Discrepancias entre gasto a la entrada de la red de un circuito.



En la figura 7.2.9c se puede ver las discrepancias entre cargas de presión medida, carga de presión de modelo calibrado y carga de diseño son menores a 3.5 m.

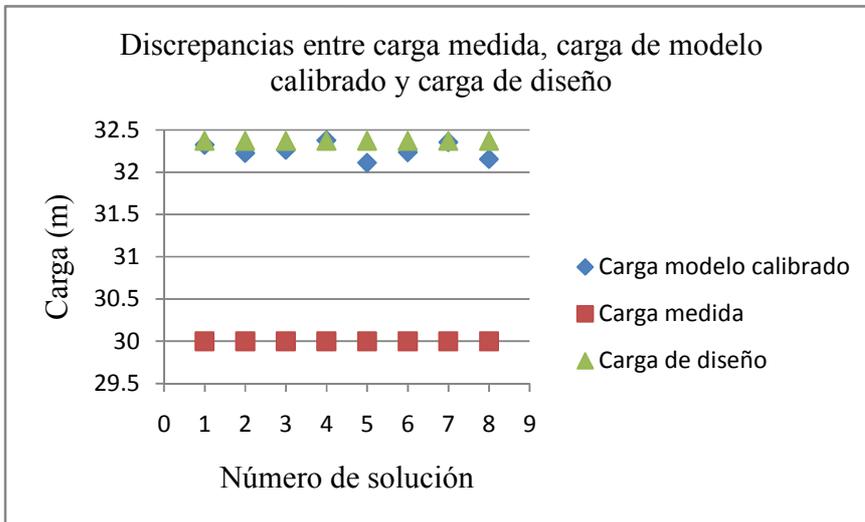


Figura 7.2.9c.-Prueba 3: Discrepancias entre cargas de presión, red de un circuito.

La diferencia entre carga medida (Hm) en el nodo 4 y la carga de presión en el MS sin calibrar (Hd), es de -2.37 m; el modelo de simulación se puede usar sólo para propósitos de planeación, no para operación ni de calidad del agua de acuerdo a la guía del ECAC (1999). La solución 5, tiene la diferencia mínima entre carga medida y carga calcula por el modelo simulado calibrado, ésta es de $|2.11|$ m y la máxima diferencia es de $|2.38|$ m de la solución 4, ver figura 7.2.9d. A pesar de ajustar los parámetros de coeficiente de rugosidad no se logró disminuir la discrepancia para que pueda usarse el MS para operación ó de calidad del agua.



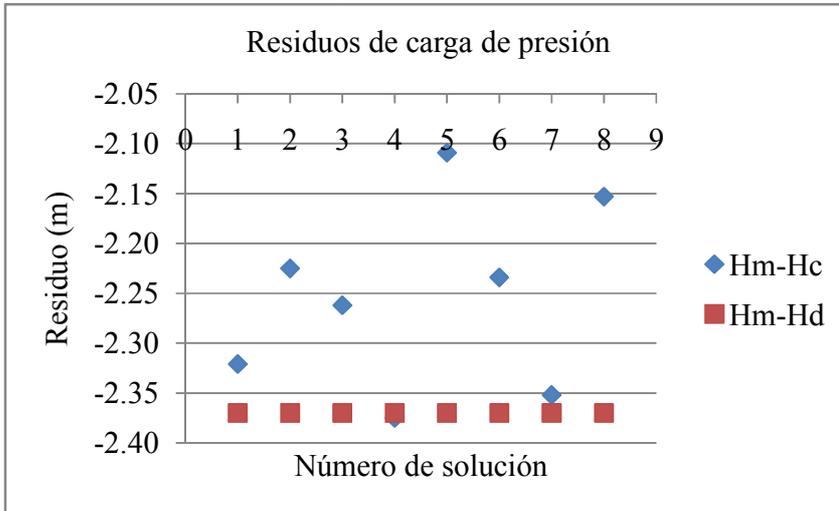


Figura 7.2.9d.-Prueba 3: Residuos de carga de presión, red de un circuito.

Hay una diferencia entre gasto medido ($G_{mm}=1.479$ l/s) y el gasto de MS sin calibrar ($G_d=3$ l/s) de -1.521 l/s, es decir de 100.3%. La solución 8 tiene la diferencia mínima que es de 0.14 l/s (9.5% con respecto al gasto medido) y la solución 4 tiene la diferencia máxima, es de 0.98 l/s (66.2% con respecto al G_{mm}), ver figura 7.2.9d.

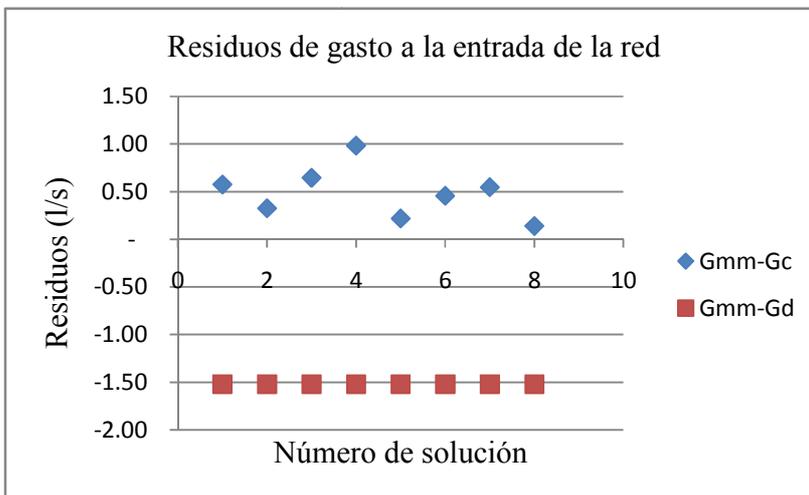


Figura 7.2.9d.-Prueba 3: Residuos de gasto a la entrada de la red



En el cuadro 7.2.13, se muestra la Prueba 4, con válvula del tramo 2-5 cerrada 60° y válvula del tramo 3-4 cerrada 60°.

Cuadro 7.2.13.- Prueba 4: Lecturas de gasto, presión en punto 1 y demanda nodal en punto 4.

Q(l/s)	P2 (kg/cm ²)	p4 (kg/cm ²)	P2-p4. (kg/cm ²)	d4 (m ³)				d4 (l/s)	d4 (m ³ /s)
				Lini	Lfin	V (m ³)	t(s)		
1.0579	2.95	0.85	2.1	74.186	74.202	0.016	60	0.267	0.00027
1.0509	2.95	0.85	2.1	74.402	74.417	0.015	60	0.250	0.00025
1.0361	2.9	0.8	2.1	74.592	74.607	0.015	60	0.250	0.00025
1.0474	3.05	0.85	2.2	74.754	74.766	0.012	60	0.200	0.00020
1.0418	3.05	0.85	2.2	74.981	74.997	0.016	60	0.267	0.00027
1.0468	2.98	0.84							0.00025

En los cuadros del 7.2.14a al 7.2.14f se pueden ver los resultados de la prueba 4, carga de presión, gasto en tuberías, estimación de demanda nodal, coeficiente de rugosidad y sus funciones de valor.

Cuadro 7.2.14a.- Carga de presión (m) para prueba 4, de red de un circuito.

Nodo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
3	29.749	29.787	29.791	29.768	29.739	29.789	29.779	29.756
4	29.748	29.786	29.783	29.762	29.736	29.788	29.775	29.756
5	29.75	29.79	29.784	29.762	29.754	29.79	29.776	29.763

Cuadro 7.2.14b.- Gasto de tuberías (m³/s)

Tramo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
2-3	0.000258	0.000393	0.000378	0.000294	0.000522	0.000399	0.000488	0.000339
3-4	0.000092	0.000111	0.000139	0.000157	0.000173	0.000062	0.000209	0.000020
4-5	0.000144	0.000177	0.000082	0.000067	0.000167	0.000119	0.000082	0.000251
2-5	0.000481	0.000247	0.000410	0.000416	0.000411	0.000148	0.000378	0.000547



Cuadro 7.2.14c.- Estimación de coeficientes de rugosidad por tramo de tubería

Tramo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
2-3	30	111	132	45	58	122	103	44
3-4	126	106	46	58	91	101	113	126
4-5	110	86	119	84	34	82	111	97
2-5	61	78	107	61	53	40	72	87

Cuadro 7.2.14d.- Estimación de demanda nodal (m³/s) en red de un circuito.

Nodo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
3	0.000166	0.000282	0.000238	0.000137	0.000349	0.000337	0.000279	0.000320
4	0.000236	0.000288	0.000221	0.000224	0.000340	0.000180	0.000291	0.000270
5	0.000337	0.000070	0.000329	0.000349	0.000244	0.000029	0.000297	0.000297

Cuadro 7.2.14e.- Funciones de valor de demanda nodal.

Nodo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
3	1.77E+06	4.36E+05	4.07E+05	6.02E+05	74601	84400	3.52E+05	8.06E+05
4	2.99E+06	4.36E+05	7.43E+05	9.17E+05	76802	1.29E+05	3.76E+05	1.50E+06
5	1.77E+06	4.36E+05	4.93E+05	4.69E+05	74136	91484	3.40E+05	1.17E+06

Cuadro 7.2.14f.- Funciones de valor de coeficiente de rugosidad.

Tramo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
2-3	0.21201	0.20913	0.2152	0.21028	0.21147	0.20543	0.20992	0.20199
3-4	0.21541	0.21455	0.2001	0.21999	0.22779	0.21519	0.20879	0.21838
4-5	0.20222	0.2204	0.20408	0.20567	0.20763	0.21222	0.21755	0.21857
2-5	0.20507	0.20977	0.21925	0.21455	0.20712	0.21091	0.20326	0.20466

En la figura 7.2.10a se muestra que la solución 1 y 8, tienen una discrepancia menor al 10% entre demanda medida y demanda de modelo de simulación calibrado.



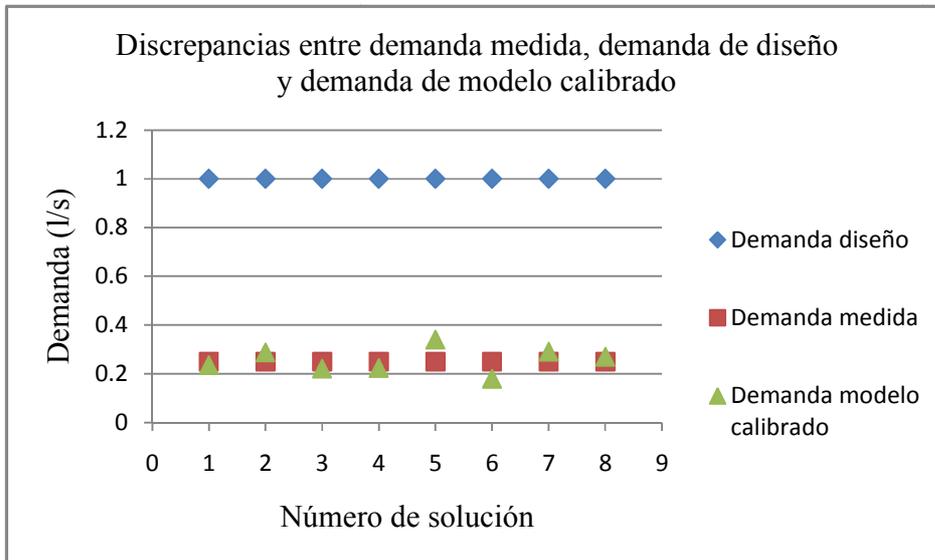


Figura 7.2.10a Prueba 4: Discrepancias entre demanda medida y modelo calibrado, para la red de un circuito.

De la figura 7.2.10b se muestra que las soluciones encontradas tienen una discrepancia mayor al $\pm 10\%$ por tanto ninguna cumple con el criterio del ECAC (1999).

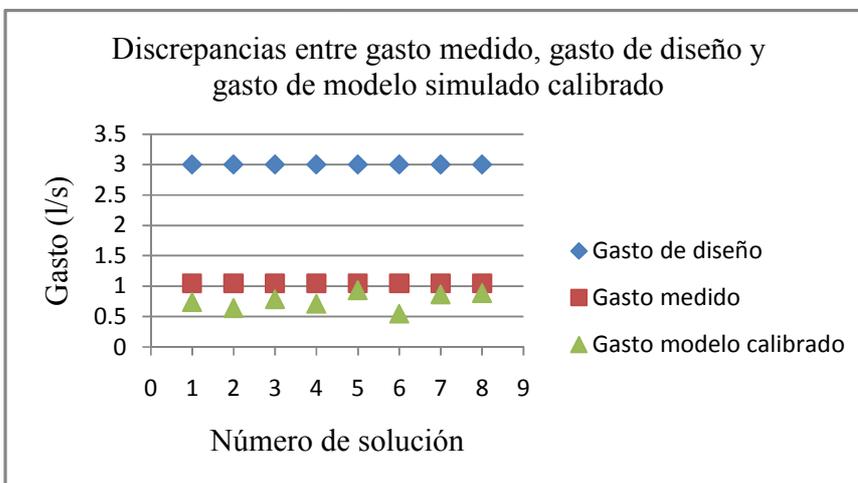


Figura 7.2.10b Prueba 4: Discrepancias entre gasto medido y gasto de modelo simulado calibrado para red de un circuito.



En la figura 7.2.10c se puede ver que las discrepancias entre cargas de presión, son mayores a ± 3.5 m. No se pudo ajustar los valores del modelo calibrado al valor medido.

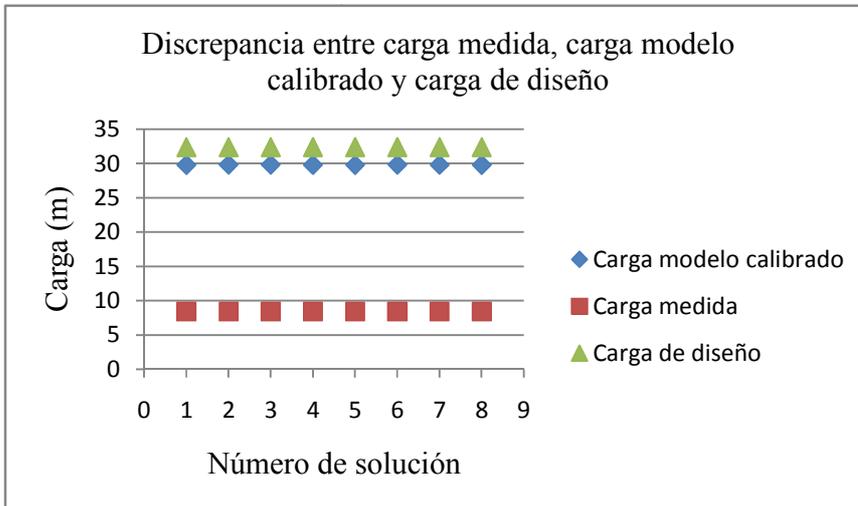


Figura 7.2.10c.-Prueba 4: Discrepancias entre cargas de presión, en red de un circuito.

La diferencia entre carga de presión medida y carga de presión en el MS sin calibrar es de - 24 m, el MS no puede ser usado para propósitos de planeación, operación ni de calidad del agua, debido a que ésta diferencia es mayor a las diferencias máximas recomendadas por la guía del ECAC (1999), para los propósitos antes mencionados. En la figura 7.2.10d se muestra que a pesar de disminuir la discrepancia entre carga medida y carga calculada con modelo calibrado, no es una calibración aceptable, tal que la diferencia es mayor a ± 3.5 m en todas las soluciones.



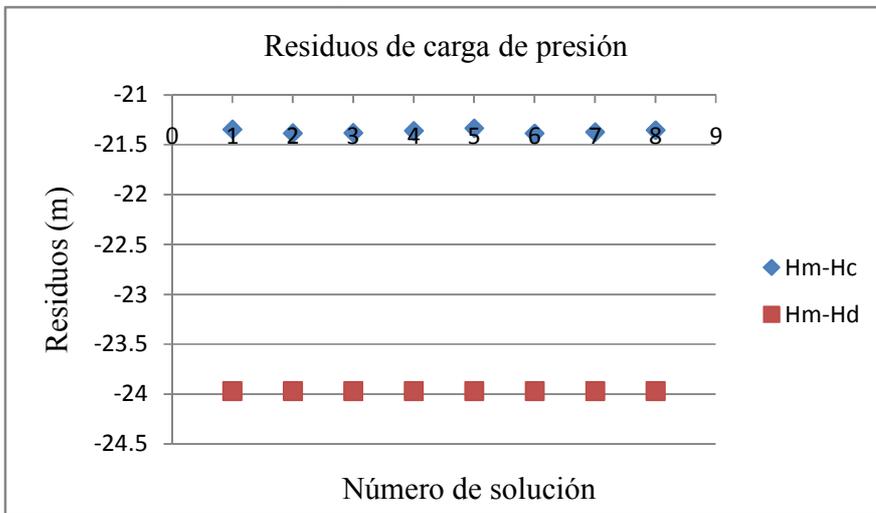


Figura 7.2.10d.-Prueba 4: Residuos de carga de presión para red de un circuito.

La diferencia entre gasto medido (1.046 l/s) y el gasto del MS sin calibrar (3 l/s) es de -1.95 l/s, es decir de 186% con respecto al gasto medido. En la figura 7.2.10e se puede ver que la discrepancia mínima es de 0.11 l/s (i.e. 10.5% con respecto al gasto medido) en la solución 5 y la máxima es 0.5 l/s (i.e. 47.8% con respecto a Gmm) en la solución 6. La demanda real medida en el nodo 3 es $d_3=0.51$ l/s, en el nodo 5 es $d_5=0.26$ l/s y en el nodo 4 es $d_4=0.25$ l/s. La demanda nodal calculada en el modelo calibrado es de $d_3=0.35$, $d_4=0.34$ y $d_5=0.24$ l/s.

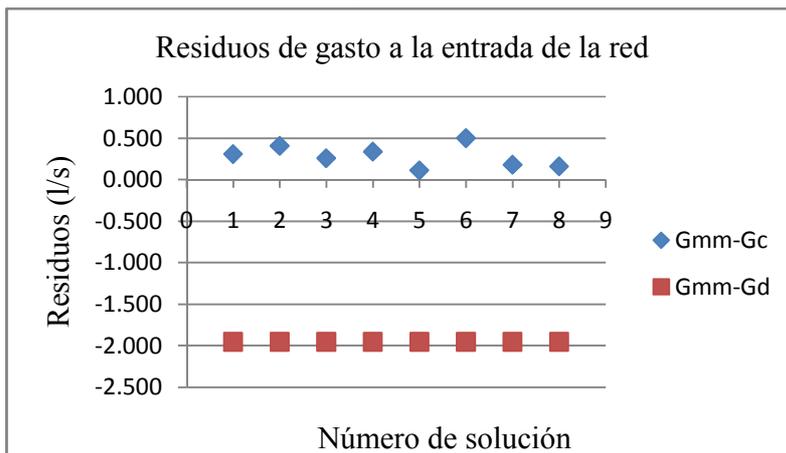


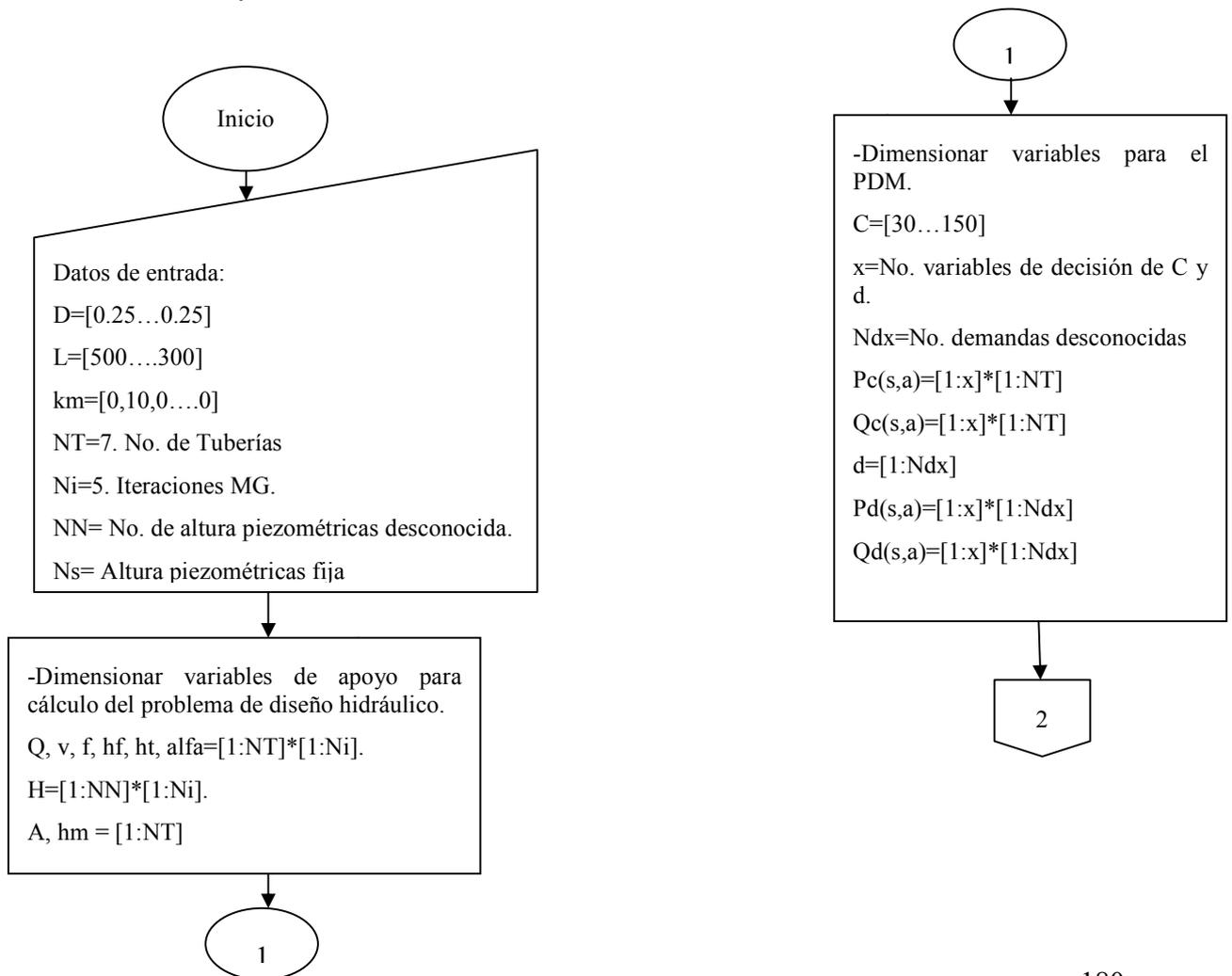
Figura 7.2.10e.- Prueba 4: Residuos de gasto a la entrada de la red de un circuito.

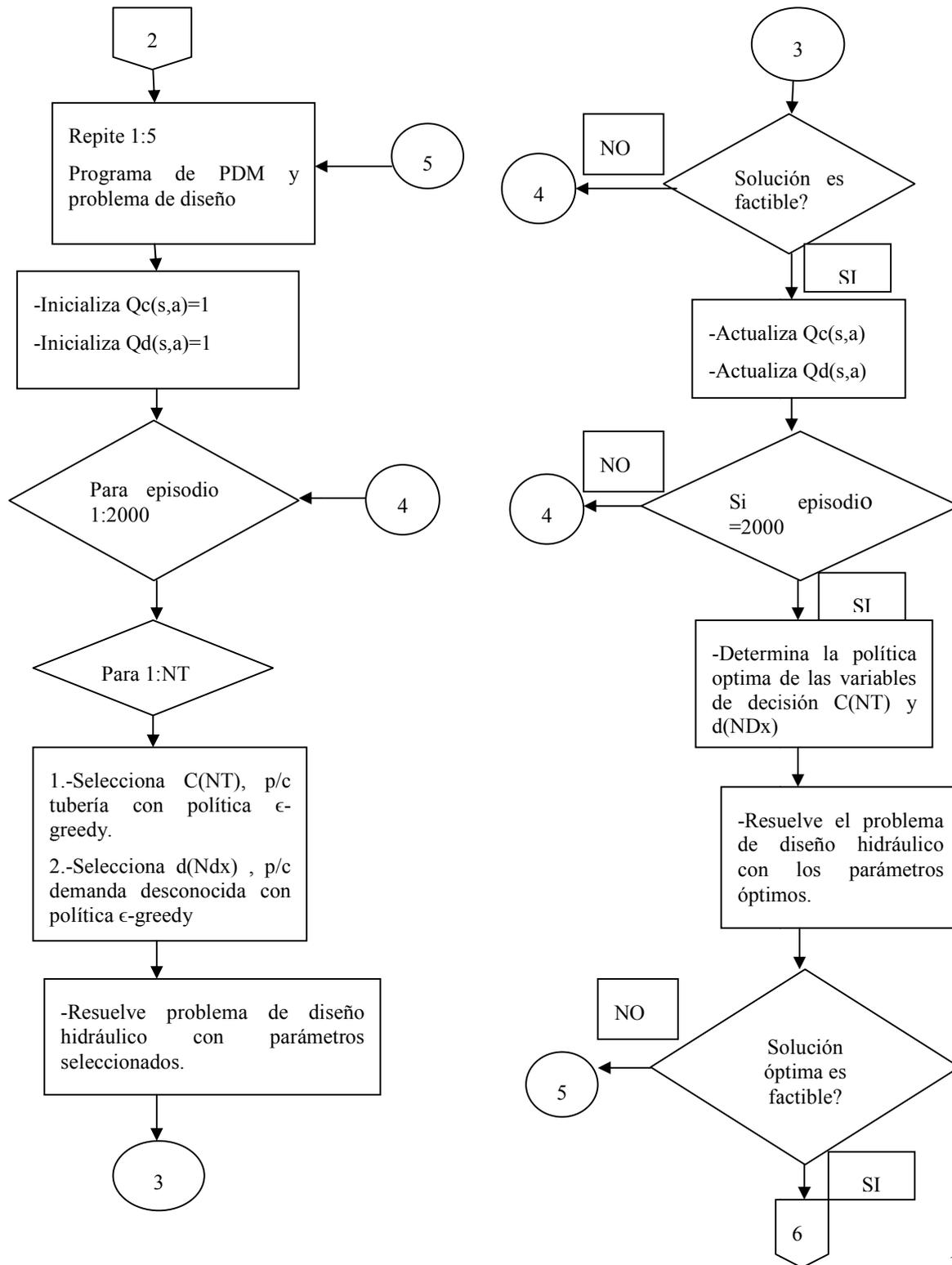


7.3 Caso de estudio 3: Calibración de modelo de simulación hidráulica de 2 circuitos

En este caso de estudio se analizaron dos casos la CSMH de un problema de literatura (apartado 7.3.1 y una red hidráulica experimental apartado 7.3.2).

En el siguiente diagrama figura 7.3.1 se muestra el procedimiento general para la calibración del modelo de simulación del problema de literatura; el procedimiento es aplicable al modelo de simulación del modelo experimental solo cambian los valores de los datos de entrada y el dimensionamiento de las variables.





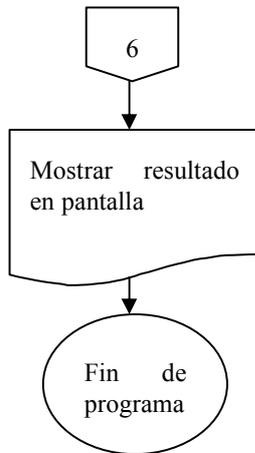


Figura 7.3.1 Diagrama de flujo para CSMH de dos circuitos.



7.3.1 Caso No. 1.- Calibración de 2 circuitos de ejemplo de literatura.

En la figura 7.3.2 se muestra la red hidráulica de dos circuitos se considera que todos los nodos tiene la misma altura, y tienen las características topológicas que se muestran. Se resuelve el problema de diseño hidráulico, en el que se supone conocido los valores de coeficientes de fricción, se determina las presiones en los nodos y los gastos que circulan en la tubería.

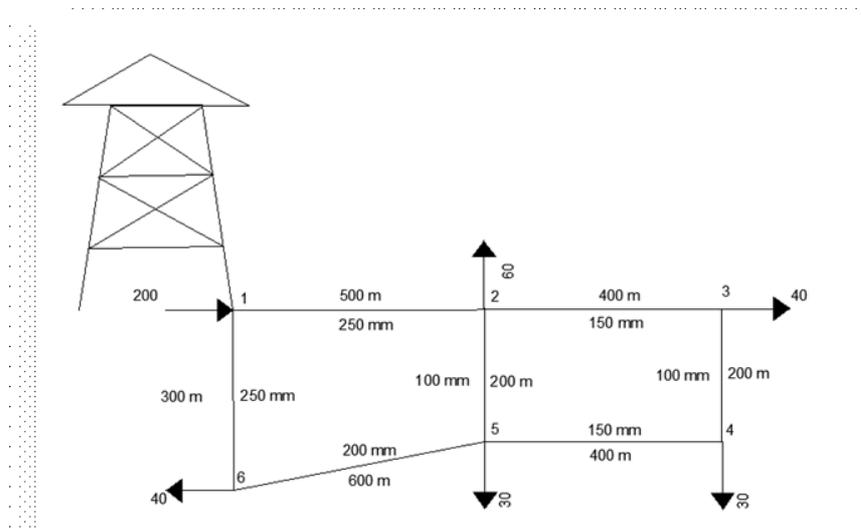


Figura 7.3.2 Red hidráulica ejemplo para calibración de coeficientes de rugosidad y demanda.



Solución de problema de diseño

En el cuadro 7.3.1 se muestra la solución del problema de diseño hidráulico en el modelo de simulación, con los datos mostrados en la figura 7.2.8. Se conoce el gasto medido que entra a la red (203 l/s), la carga medida y en el MS en el punto 1 es de 100 m, se tienen 5 nodos de demanda (en MS) con valores de 60 l/s a 30 l/s. Se tienen 7 tramos de tubería, con una pérdida de carga localizada $km=10$, en el tramo 2-3.

Cuadro 7.3.1.-Solución del problema de diseño

Tramo	km	f	v (m/s)	hf (m)	ht (m)	alfa	Nodo	d (m ³ /s)	H (m)	Q (m ³ /s)
1-2	0	0.013	2.18	6.48	6.48	564.82	2	0.06	93.6	0.107
2-3	10	0.015	2.05	8.47	10.61	8100.4	3	0.04	82.8	0.036
3-4	0	0.022	0.48	0.52	0.52	35897	4	0.03	83.2	0.004
4-5	0	0.015	1.91	7.49	7.49	6551.1	5	0.03	90.6	0.034
2-5	0	0.017	1.39	3.4	3.4	28710	6	0.04	97	0.01
5-6	0	0.015	1.68	6.33	6.33	2259.5				0.053
1-6	0	0.014	1.89	3	3	347.55				0.093

Donde:

km =Pérdidas de carga menores.

f = factor de fricción.

v =velocidad en el tramo de tubería, m³/s.

hf =Pérdidas de carga por fricción en el tramo, en m.

$alfa$ = variable para el método de gradiente.

d = demanda en el nodo en m³/s.

H = Carga piezométricas en el nodo i .

Q = Gasto en el tramo i , en m³/s.



7.3.1.1 Calibración de 2 circuitos considerando como parámetros desconocidos los coeficientes de rugosidad.

En el problema de calibración se considera que los parámetros a estimar son los coeficientes de rugosidad de la tubería y se conocen las demandas en los nodos y la carga observada hipotética en el nodo 4.

Se desarrolló un programa de calibración que usa Procesos de decisión de Markov para elegir los valores de los coeficientes de rugosidad y los pasa al procedimiento de diseño, se usa el método de gradiente, se evalúan los resultados de diseño y posteriormente se seleccionan los coeficientes de rugosidad que tienen el valor máximo de las funciones de valor.

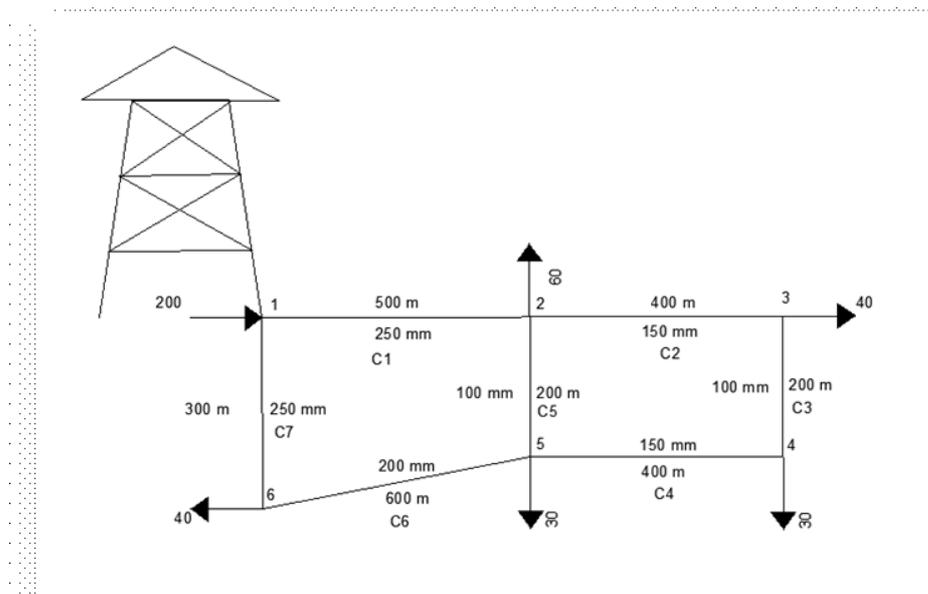


Figura 7.3.3 Calibración de los coeficientes de rugosidad para 2 circuitos

En la Ejecución 1 ver Cuadro 7.3.2, muestra 5 soluciones de las cuales se elige la que tiene un mayor valor en la función de valor de los coeficientes de rugosidad, están dentro del rango de 133-138. La diferencia entre la carga en el modelo de simulación (problema de diseño en el nodo 4, es de -9.2 m). La carga piezométricas estimada con el programa de calibración en el nodo 4, es de 78.7 m y la carga piezométrica medida (hipotética) es de 74 m, la diferencia entre ambas es de ± 4.7 m, aunque se disminuye la discrepancia, la calibración no es aceptable ya que no cumple con el criterio de la Guía del ECAC (1999), la diferencia debería estar en el rango de ± 3.5 m.

Cuadro 7.3.2 Ejecución 1: Determinación de parámetros de ajuste de Coeficientes de Rugosidad.

	Gasto en la tubería	Función de valor de Coeficientes de Rugosidad	Coeficiente de Rugosidad	Cargas piezométricas en los nodos	Pérdida de Carga Total	Suma de Pérdidas Circuito 1	Suma de Pérdidas Circuito 2	Cargas de diseño	Carga medida hipotética
Tramo	Qop (m3/s)	maxFvC	Cop1 (H-W)	Hop (m)	htop (m)	SumaperdidasCC1	SumaperdidasCC2	H (m)	Hm (m)
1-2	0.107	1.32E+30	133	91.5	8.57	0.624	-0.890	93.6	*
2-3	0.037	1.32E+30	137	78.4	12.91			82.8	*
3-4	0.003	1.32E+30	138	78.7	0.44			83.2	74
4-5	0.033	1.32E+30	134	87.9	9.32			90.6	*
5-6	0.010	1.32E+30	134	96.2	4.04			97.0	*
2-5	0.053	1.32E+30	133		8.17				
6-1	0.093	1.32E+30	135		3.81				

Nota: * Carga no conocida ni medida.



En la ejecución 2 ver cuadro 7.3.3, de 5 soluciones que se encontró se seleccionó la que tiene el mayor valor de la función de valor de los coeficientes de rugosidad. Los coeficientes H-W tienen un rango de 123-129. La carga piezométrica en el nodo 4 es de 75.9 m, la carga piezométrica medida (hipotética) es de 74 m, la diferencia es la carga calibrada estimada y la carga hipotética es de +1.9, por lo tanto la calibración es aceptable de acuerdo al criterio de la Guía del ECAC (1999).

Cuadro 7.3.3 Ejecución 2: Determinación de parámetros de ajuste de Coeficientes de Rugosidad.

	Gasto en la tubería	Función de valor de Coeficientes de Rugosidad	Coefficiente de Rugosidad	Carga piezométrica en los nodos	Pérdida de Carga Total	Suma de Pérdidas Circuito 1	Suma de Pérdidas Circuito 2	Cargas de diseño	Carga medida hipotética
Tramo	Qop (m ³ /s)	maxFvC	Cop1 (H-W)	Hop (m)	htop (m)	SumaperdidasCC1	SumaperdidasCC2	H (m)	Hm (m)
1-2	0.107	9.31E+29	123	90.2	9.85	0.768	-1.119	93.6	*
2-3	0.037	9.31E+29	128	75.5	14.42			82.8	*
3-4	0.003	9.31E+29	126	75.9	0.49			83.2	74
4-5	0.033	9.31E+29	124	86.4	10.70			90.6	*
5-6	0.010	9.31E+29	124	95.8	4.35			97.0	*
2-5	0.053	9.31E+29	125		9.26				
6-1	0.093	9.31E+29	129		4.17				



En la solución 2 ver cuadro 7.3.4, de la ejecución 2, dió valores de funciones de valor altos, a pesar de ello la carga calibrada estimada en el nodo 4 es de 32.9 m, la carga hipotética es de 74 m, la diferencia entre ellas es de 41.14 m, por lo tanto la calibración de coeficientes de H-W, no es aceptable de acuerdo al criterio del ECAC (1999).

Cuadro 7.3.4 Ejecución 2: Determinación de parámetros de ajuste de Coeficientes de Rugosidad.

	Gasto en la Tubería	Función de valor de Coeficientes de Rugosidad	Coeficiente de Rugosidad	Carga piezométrica en los nodos	Pérdida de Carga Total	Suma de Pérdidas Circuito 1	Suma de Pérdidas Circuito 2
Tramo	Qop (m3/s)	maxFvC	Cop1 (H-W)	Hop (m)	Htop (m)	SumaperdidasCC1	SumaperdidasCC2
1-2	0.10661	1.39E+29	94	83.912	16.094	0.044814	-0.015993
2-3	0.023074	1.39E+29	32	16.072	67.844		
3-4	0.016926	1.39E+29	99	32.863	16.79		
4-5	0.046926	1.39E+29	90	69.589	36.725		
5-6	0.02354	1.39E+29	150	82.108	14.345		
2-5	0.053386	1.39E+29	107		12.509		
6-1	0.093386	1.39E+29	59		17.885		

En la ejecución 3 ver cuadro 7.3.5, del programa de calibración, la carga piezométrica estimada en el nodo 4 es 77.2 m, la carga hipotética es 74 m, la discrepancia entre ambas cargas es de +3.2, por tanto la calibración es aceptable cumple con el criterio del ECAC (1999).



Cuadro 7.3.5 Ejecución 3: Determinación de parámetros de ajuste de Coeficientes de Rugosidad.

	Gasto en la tubería	Función de valor de Coeficientes de Rugosidad	Coeficiente de Rugosidad	Carga piezométrica en los nodos	Pérdida de Carga Total	Suma de Pérdidas Circuito 1	Suma de Pérdidas Circuito 2
Tramo	Qop (m ³ /s)	maxFvC	Cop1 (H-W)	Hop (m)	Htop (m)	SumaperdidasCC1	SumaperdidasCC2
1-2	0.107	2.22E+30	130	91.1	9.0	0.657	-1.003
2-3	0.037	2.22E+30	129	76.8	14.1		
3-4	0.003	2.22E+30	125	77.2	0.6		
4-5	0.033	2.22E+30	129	87.1	10.1		
5-6	0.010	2.22E+30	130	95.8	4.5		
2-5	0.053	2.22E+30	129		8.6		
6-1	0.093	2.22E+30	129		4.1		



7.3.1.2 Calibración de coeficientes de rugosidad y demanda de ejemplo de literatura.

Se utilizó el mismo ejemplo de literatura que la calibración de coeficientes de rugosidad, solo que en este caso se consideró desconocidas a 4 demandas nodales (d2, d3, d5, d6), ver figura 7.3.4

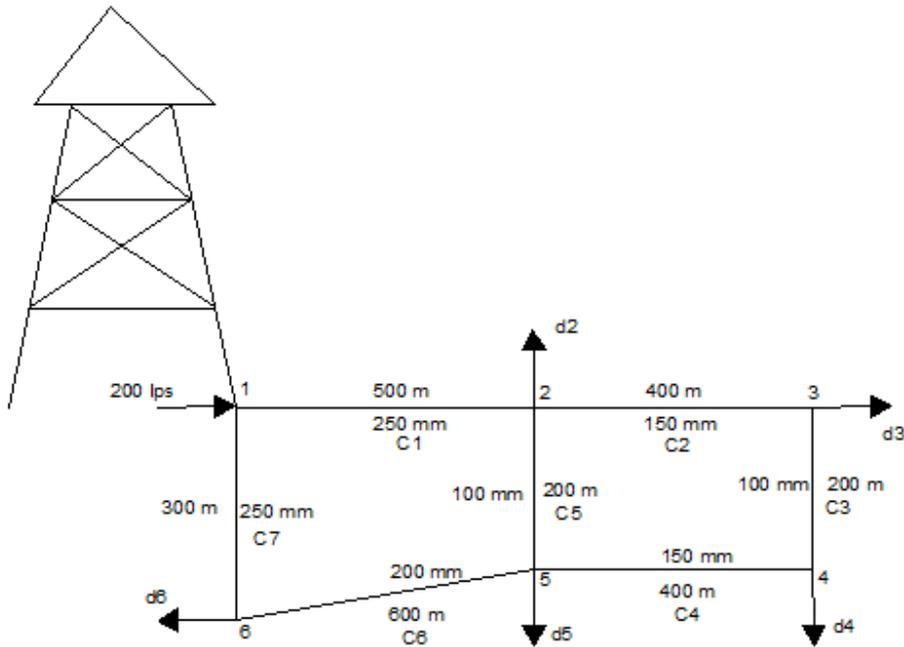


Figura 7.3.4 Ejemplo de literatura de calibración de dos circuitos considerando como parámetros de ajuste a la rugosidad y la demanda.

En las funciones de recompensa de procesos de decisión de Markov, se consideró conocerse una demanda y carga hipotética en el nodo 4. Se considera una pérdida menor en el tramo 2-3, considerada dentro del cálculo del problema de diseño y calibración.



En el Cuadro 7.3.6 se muestran los valores seleccionados por medio de PDM y sus correspondientes valores de las funciones de valor que son los máximos encontrados por el método. La carga piezométrica en el nodo 4, obtenido del programa de calibración es de 63.7 m y la carga hipotética es de 70 m, por tanto hay una diferencia de -6.3 m. Los valores óptimos de las demandas en los nodos (qop1), son elegidos también por PDM y la suma de éstos es de 0.19 m³/s. A pesar de haber ajustado los valores de coeficientes de rugosidad en todas las tuberías de la red hidráulica la carga piezométrica en el nodo 4, esta fuera del criterio de la guía ECAC(1999), la diferencia entre la carga estimada por la calibración y la carga hipotética es mayor a ± 3.5 ; Se supone un gasto medido hipotético a la entrada de la red de 203 l/s, ó 0.203 m³/s, de acuerdo al gasto de demandas nodales la calibración en cuanto al gasto es aceptable, la diferencia es de $-4.2\% < a \pm 10\%$.

Cuadro 7.3.6 Ejecución 1: Determinación de parámetros de ajuste

	Gasto en tuberías	Función de Valor del Coeficiente Rugosidad	Coeficiente de Rugosidad	Carga piezométrica en los nodos	Pérdida de Carga Total	Función de valor de demanda nodal	Demanda nodal	Suma de Pérdidas Circuito 1	Suma de Pérdidas Circuito 2
Tramo	Qop (m ³ /s)	maxFvC	Cop1 (H-W)	Hop(m)	htop(m)	maxFvq	qop1 (m ³ /s)	SumaperdidasCC1	SumaperdidasCC2
1-2	0.11	1.481E+28	139	92.2	7.8	797.84	0.042	0.199	-0.381
2-3	0.04	1.481E+28	98	63.3	28.8	2.60E+05	0.0455		
3-4	0.00	1.481E+28	123	63.7	0.5	3.00E+05	0.0295		
4-5	0.03	1.481E+28	104	78.1	14.4	1.60E+05	0.06		
5-6	0.02	1.481E+28	141	96.7	14.3	797.84	0.0175		
2-5	0.07	1.481E+28	114		18.6				



	Gasto en tuberías	Función de Valor del Coeficiente Rugosidad	Coeficiente de Rugosidad	Carga piezométrica en los nodos	Pérdida de Carga Total	Función de valor de demanda nodal	Demanda nodal	Suma de Pérdidas Circuito 1	Suma de Pérdidas Circuito 2
Tramo	Qop (m ³ /s)	maxFvC	Cop1 (H-W)	Hop(m)	htop(m)	maxFvq	qop1 (m ³ /s)	SumaperdidasCC1	SumaperdidasCC2
6-1	0.09	1.481E+28	139		3.3	Sumadem	0.1945		
						Errorodem	0.0055		

La solución 2 ver Cuadro 7.3.7, de la misma ejecución 1 del programa de calibración, se encuentra en segundo lugar en cuanto a los valores de función de valor en los coeficientes de rugosidad. La calibración no es aceptable en cuanto al ajuste de los coeficientes de rugosidad de acuerdo al criterio de la guía del ECAC (1999) y si es aceptable en cuanto al gasto en los nodos, la diferencias entre el gasto estimado de la calibración (0.186 m³/s) y del gasto medido (0.203 m³/s) en la red hidráulica es -8.4%, menor a ±10% del gasto medido sugerido por la guía.

Cuadro 7.3.7 Ejecución 1: Determinación de parámetros de ajuste

	Gasto en tuberías	Función de Valor del Coeficiente Rugosidad	Coeficiente de Rugosidad	Carga piezométrica en los nodos	Pérdida de Carga Total	Función de valor de demanda nodal	Demanda nodal	Suma de Pérdidas Circuito 1	Suma de Pérdidas Circuito 2
Tramo	Qop (m ³ /s)	maxFvC	Cop1 (H-W)	Hop (m)	Htop (m)	maxFvq	qop1 (m ³ /s)	SumaperdidasCC1	SumaperdidasCC2
1-2	0.09	8.37E+18	150	94.8	5.3	520.2	0.051	0.199	-0.381
2-3	0.03	8.37E+18	150	85.5	8.7	3848.8	0.027		
3-4	-0.01	8.37E+18	149	86.7	0.8	4687.4	0.034		



	Gasto en tuberías	Función de Valor del Coeficiente Rugosidad	Coefficiente de Rugosidad	Carga piezométrica en los nodos	Pérdida de Carga Total	Función de valor de demanda nodal	Demanda nodal	Suma de Pérdidas Circuito 1	Suma de Pérdidas Circuito 2
Tramo	Qop (m3/s)	maxFvC	Cop1 (H-W)	Hop (m)	Htop (m)	maxFvq	qop1 (m3/s)	SumaperdidasCC1	SumaperdidasCC2
4-5	0.03	8.37E+18	150	92.2	5.9	4420.1	0.026		
5-6	0.01	8.37E+18	150	96.9	3.2	530.1	0.049		
2-5	0.04	8.37E+18	150		4.7				
6-1	0.09	8.37E+18	150		3.1	Sumadem	0.186		
						Error dem	0.015		

En la ejecución 2 ver Cuadro 7.3.8, del programa de calibración, se encontraron valores casi idénticos del coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams (150), sin embargo, la calibración en cuanto al ajuste de los valores de los coeficientes no es aceptable. La calibración en cuanto al gasto si es aceptable diferencia es de -8.4%, está en el rango de aceptabilidad de la guía del ECAC (1999). La Suma de pérdidas de carga en el circuito 1 y 2 son de 0.35 y -0.47 m respectivamente.



Cuadro 7.3.8 Ejecución 2: Determinación de parámetros de ajuste

	Gasto en tuberías	Función de Valor del Coeficiente Rugosidad	Coeficiente de Rugosidad	Carga piezométrica en los nodos	Pérdida de Carga Total	Función de valor de demanda nodal	Demanda nodal	Suma de Pérdidas Circuito 1	Suma de Pérdidas Circuito 2
Tramo	Qop (m ³ /s)	maxFvC	Cop1 (H-W)	Hop (m)	Htop (m)	maxFvq	qop1 (m ³ /s)	SumaperdidasCC1	SumaperdidasCC2
1-2	0.082	3.65E+17	150	95.8	4.2	733.3	0.021	0.353	-0.468
2-3	0.048	3.65E+17	150	77.0	18.8	6501.1	0.06		
3-4	0.012	3.65E+17	150	80.9	4.0	8333.3	0.027		
4-5	0.039	3.65E+17	150	90.9	10.1	7915.9	0.021		
5-6	0.013	3.65E+17	149	96.1	5.1	733.3	0.057		
2-5	0.047	3.65E+17	150		5.2				
6-1	0.104	3.65E+17	150		3.8	Sumadem	0.186		
						Errorrem	0.014		

En la ejecución 3 ver Cuadro 7.3.9, del programa de calibración, la carga piezométrica estimada con el programa es de 76 m, y la carga hipotética es de 70 m, la diferencia es de +6 m, por tanto no cumple con el criterio de la guía del ECAC (1999), es decir la diferencia es mayor a ± 3.5 m. La diferencia entre el gasto de entrada (0.203 m³/s) y el gasto calculado en el programa (0.2075 m³/s) es de +2.22%, la diferencia es menor de $\pm 10\%$ del gasto medido, la calibración para el gasto es aceptable. La suma de pérdidas de carga en el circuito 1 y 2, es de 0.279 y -0.41 m respectivamente.



Cuadro 7.3.9 Ejecución 3: Determinación de parámetros de ajuste

	Gasto en tuberías	Función de Valor del Coeficiente Rugosidad	Coeficiente de Rugosidad	Carga piezométrica en los nodos	Pérdida de Carga Total	Función de valor de demanda nodal	Demanda nodal	Suma de Pérdidas Circuito 1	Suma de Pérdidas Circuito 2
Tramo	Qop (m ³ /s)	maxFvC	Cop1 (H-W)	Hop (m)	Htop (m)	maxFvq	qop1 (m ³ /s)	SumapérdidasCC1	SumapérdidasCC2
1-2	0.11	1.92E+27	149	93.2	6.81	2.71E+13	0.0405	0.279	-0.410
2-3	0.05	1.92E+27	149	73.6	19.53	29005	0.058		
3-4	0.01	1.92E+27	148	76.0	2.51	33333	0.0285		
4-5	0.04	1.92E+27	148	85.7	9.68	25652	0.0465		
5-6	0.02	1.92E+27	149	96.2	7.75	2.71E+13	0.034		
2-5	0.07	1.92E+27	148		10.54				
6-1	0.10	1.92E+27	149		3.74	Sumadem	0.2075		
						Error dem	-0.0075		

La ejecución 3 ver Cuadro 7.3.10, solución 2, del programa de calibración, ahí se muestra que la carga piezométrica estimada en el nodo 4 es de 78.6 m, la carga medida (hipotética) es de 70 m, la diferencia entre ellas es de +8.6 m. La calibración para los parámetros de coeficientes de rugosidad no es aceptable de acuerdo al criterio de la ECAC (1999). La diferencia entre el gasto que entra a la red hidráulica (0.203 m³/s) y el calculado por el programa de calibración (0.202 m³/s) es de -0.5%, por tanto cumple con el rango de aceptabilidad del ECAC.



Cuadro 7.3.10 Ejecución 3: Determinación de parámetros de ajuste

	Gasto en tuberías	Función de Valor del Coeficiente Rugosidad	Coeficiente de Rugosidad	Carga piezométrica en los nodos	Pérdida de Carga Total	Función de valor de demanda nodal	Demanda nodal	Suma de Pérdidas Circuito 1	Suma de Pérdidas Circuito 2
Tramo	Qop (m3/s)	maxFvC	Cop1 (H-W)	Hop (m)	htop (m)	maxFvq	qop1 (m3/s)	SumaperdidasCC1	SumaperdidasCC2
1-2	0.108	1.35E+27	145	92.6	7.5	2.84E+16	0.0555	0.733	-0.873
2-3	0.047	1.35E+27	143	73.4	19.0	2.16E+05	0.06		
3-4	0.013	1.35E+27	145	78.6	5.3	3.00E+05	0.0295		
4-5	0.043	1.35E+27	143	91.6	13.1	2.03E+05	0.0065		
5-6	0.006	1.35E+27	143	96.6	1.5	2.84E+16	0.0505		
2-5	0.043	1.35E+27	143		4.8				
6-1	0.094	1.35E+27	145		3.4	Sumadem	0.202		
						Error dem	-0.002		



7.3.2 Caso No. 2.- Calibración de Modelo simulación de red hidráulica experimental usando dos circuitos.

En este caso se consideró como red hidráulica real el sistema de tuberías que se construyó en el laboratorio de hidráulica de la depfi.

En la figura 7.3.5 se muestra el arreglo en el modelo experimental para la calibración de 2 circuitos, con demanda en los nodos o tomas domiciliarias.

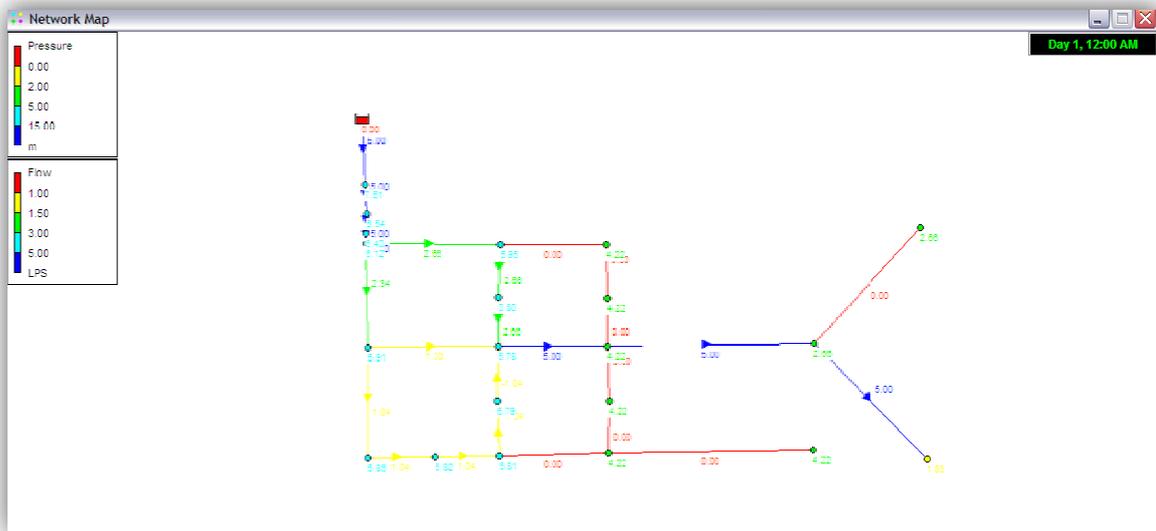


Figura 7.3.5 Modelo de simulación sin calibrar de 2 circuitos.

En la figura 7.3.6 se muestra el problema real de calibración de 2 circuitos en el modelo de simulación de modelo experimental con 5 demandas desconocidas. En este se tienen 18 incógnitas y 2 ecuaciones de energía y 5 ecuaciones de masa. En el problema simplificado B), se tienen 12 incógnitas y 7 ecuaciones.



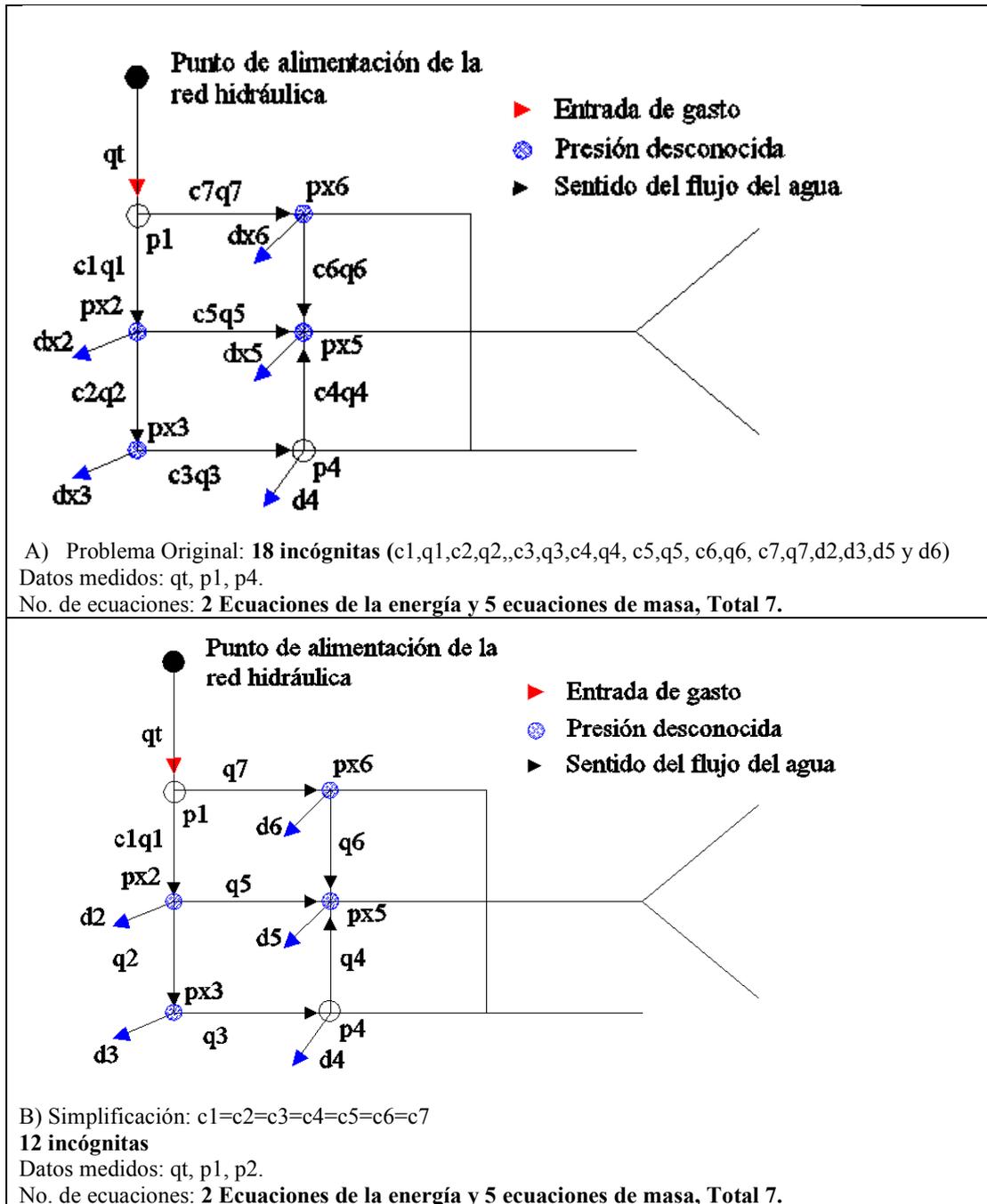


Figura 7.3.6 Formulación de problema de calibración de 2 circuitos en modelo experimental con demandas desconocidas.



Solución del problema de diseño

Las características geométricas de los circuitos en el problema de diseño y calibración, se muestran en el cuadro 7.3.11.

Los coeficientes de pérdida de carga localizada se obtuvieron de literatura Saldarriaga (2007).

Cuadro 7.3.11 Características geométricas de modelo de simulación de dos circuitos.

Tramo	D (m)	L (m)	Km
1-2	0.041	2	0.6
2-3	0.041	2	0.6
3-4	0.041	2	0.9
4-5	0.041	2	0.6
2-5	0.041	2	0.8
5-6	0.041	2	0.8
1-6	0.041	2	0.8

Nota: D= Diámetro interno; L= Longitud del tramo; Km=Coefficiente de pérdidas menores (Tees, Crucero, Tuerca Unión).

En el cuadro 7.3.12 se resuelve el problema de diseño hidráulico en flujo permanente en el modelo de simulación, con demanda nodal de diseño 1 l/s, en 5 nodos. Se considera una carga constante (fuente de almacenamiento), la carga de presión a la entrada es de 28.5 m.

Cuadro 7.3.12 Solución del problema de diseño hidráulico.

Tramo	f	v (m/s)	hf (m)	ht (m)	alfa	Nodo	d (m ³ /s)	H (m)	Q (m ³ /s)
1-2	0.019324	2.0669	0.20525	0.3359		2	0.001	28.164	0.0027289
2-3	0.023488	0.84945	0.042138	0.064204		3	0.001	28.1	0.0011217
3-4	0	-0.092016	0	0.0003884		4	0.001	28.1	-0.00012167
4-5	0.024873	0.66541	0.027381	0.040922		5	0.001	28.141	0.00087833
2-5	0.027206	0.46006	0.014317	0.022947		6	0.001	28.232	0.00060718
5-6	0.022823	0.96278	0.052598	0.090395					0.0012711
1-6	0.020084	1.7202	0.14776	0.26842					0.0022711



Nota: Donde f =factor de fricción; v =velocidad en el tramo; hf =pérdidas de carga por fricción; ht = pérdidas de carga total (fricción + menores); d =demanda en el modelo de simulación; H =Carga en el nodo i , en el MS; Q =Gasto en el tramo i .

7.3.2.1 Calibración de modelo simulación ajustando los coeficientes de rugosidad de Hazen-Williams y demanda nodal

Se desarrollo un programa de calibración para estimar los valores reales de parámetros de rugosidad y demanda nodal, se resuelve el problema de la figura 7.3.7, se realizan 4 diferentes cierres de válvulas de esfera, prueba 1: válvulas de esfera completamente abiertas, prueba 2: válvulas de esfera 1/3 cerradas; prueba 3: válvula de esfera de tramo 6-1 cerrada 1/3, tramo 5-2 cerrada 2/3, tramo 3-4 cerrada 2/3; Prueba 4: válvulas de esfera 2/3 cerradas.

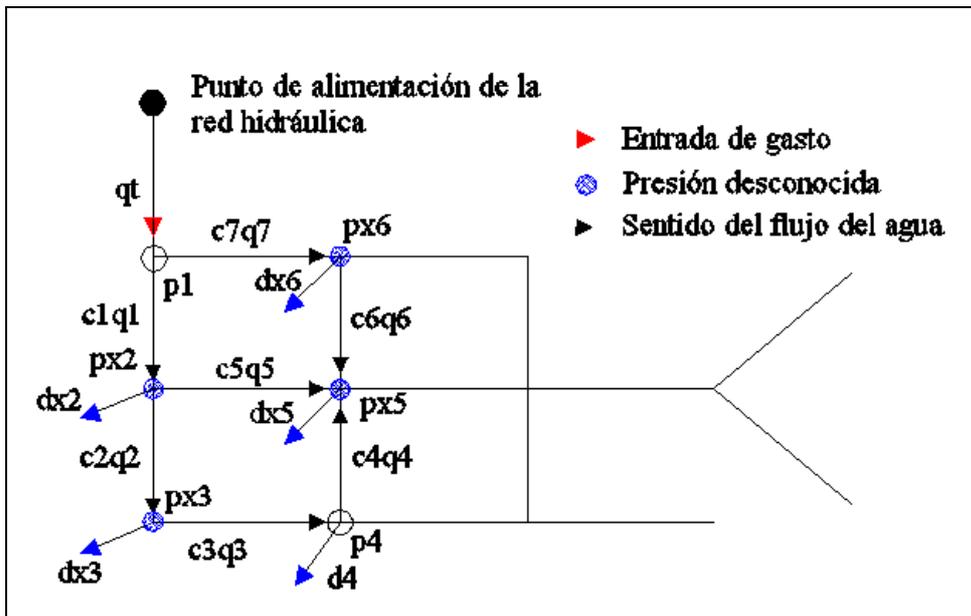


Figura 7.3.7 Problema con 18 incógnitas y 7 ecuaciones disponibles.



En el siguiente cuadro se muestra las lecturas realizadas para la prueba 1, donde se mide gasto en el punto 1 y presión en el punto 1 y 4; y la demanda en d4, y se estima el valor real de los coeficientes de rugosidad de la tubería y la demanda en los nodos mostrados en la figura 7.3.8.

Cuadro 7.3.13 Prueba 1: Lecturas de gasto y presión en nodo1, y demanda en nodo 4.

Q(l/s)	p1 (kg/cm2)	p4 (kg/cm2)	p1-p4. (kg/cm2)	d4 (m3)		V (m3)	T (s)	d4 (l/s)	d4 (m3/s)
				Lini	Lfin				
2.2436	2.9	2.75	0.15	65.099	65.126	0.027	60	0.45	0.00045
2.247	2.85	2.7	0.15	65.19	65.217	0.027	60	0.45	0.00045
2.2467	2.9	2.7	0.2	65.272	65.299	0.027	60	0.45	0.00045
2.2329	2.85	2.75	0.1	65.477	65.505	0.028	60	0.47	0.00047
2.2321	2.9	2.75	0.15	65.532	65.559	0.027	60	0.45	0.00045
2.24	2.88	2.73	0.15	65.31	65.34	0.0272	60	0.45	0.00045

En los cuadros 7.3.14a al 7.3.14f se muestran los resultados al ejecutar el algoritmo de calibración, se muestran los coeficientes de rugosidad, demanda nodales y sus respectivos valores de funciones de valor, para la prueba 1.

Cuadro 7.3.14a.- Cargas de presión en los nodos de la red de dos circuitos en m.

Nodo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
2	28.34	28.63	28.76	28.36	28.74	28.59	28.41	28.33
3	28.32	28.62	28.74	28.33	28.72	28.57	28.39	28.31
4	28.32	28.62	28.74	28.33	28.72	28.61	28.39	28.31
5	28.33	28.63	28.75	28.36	28.73	28.59	28.41	28.33
6	28.41	28.71	28.78	28.46	28.74	28.59	28.44	28.41

Cuadro 7.3.14b.- Gasto en las tuberías de la red de dos circuitos en m³/s.

Tramo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
1-2	0.00105	0.00078	0.00051	0.00087	0.00074	0.00064	0.00076	0.00085



Posgrado en Ingeniería

Tramo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
2-3	0.00042	0.00049	0.00037	0.00026	0.00042	0.00065	0.00026	0.00054
3-4	0.00003	-0.00020	-0.00014	0.00009	-0.00017	-0.00055	0.00015	-0.00013
4-5	0.00048	0.00020	0.00026	0.00053	0.00022	-0.00024	0.00057	0.00031
2-5	0.00018	0.00016	0.00014	0.00017	0.00019	-0.00035	0.00020	0.00006
5-6	0.00074	0.00037	0.00020	0.00068	0.00012	0.00028	0.00057	0.00036
1-6	0.00119	0.00044	0.00029	0.00079	0.00053	0.00061	0.00091	0.00079

Cuadro 7.3.14c.- Estimación de los valores de coeficientes de rugosidad en cada tramo, adimensional.

Tramo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
1-2	38	49	71	32	84	35	30	30
2-3	94	133	83	40	85	148	49	120
3-4	136	120	135	60	106	67	119	130
4-5	129	59	76	100	51	59	146	66
2-5	100	135	58	76	119	51	140	102
5-6	78	35	32	56	47	122	95	34
1-6	48	38	67	34	60	34	38	31

Cuadro 7.3.14d.-Estimación de los valores de demanda nodal en m³/s.

Nodo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
2	0.00045	0.00012	0.00000	0.00043	0.00013	0.00034	0.00030	0.00025
3	0.00045	0.00029	0.00022	0.00035	0.00025	0.00010	0.00041	0.00041
4	0.00045	0.00040	0.00041	0.00044	0.00039	0.00031	0.00042	0.00044
5	0.00045	0.00034	0.00008	0.00033	0.00009	0.00017	0.00020	0.00012
6	0.00045	0.00007	0.00009	0.00011	0.00041	0.00032	0.00033	0.00042

Cuadro 7.3.14e.-Funciones de valor de los coeficientes de rugosidad

Tramo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
1-2	71.2	60.8	36.1	55.4	41.6	38.4	45.2	44.6
2-3	63.1	68.4	35.8	49.2	42.0	37.5	44.1	44.4
3-4	64.8	68.0	35.4	50.8	41.7	39.1	42.5	47.5
4-5	63.1	72.4	35.7	49.6	39.9	38.0	43.3	46.2



Tramo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
2-5	59.9	53.9	36.2	50.1	41.5	37.7	43.1	46.6
5-6	62.2	63.5	35.9	48.9	40.6	38.6	43.2	45.8
1-6	66.0	67.0	35.8	53.2	40.6	38.8	44.1	44.5

Cuadro 7.3.14f.-Funciones de valor de las demandas nodales.

Nodo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
2	2.81E+08	3.42E+05	4.76E+05	1.26E+07	3.34E+05	46469	1.42E+06	5.82E+06
3	2.81E+08	2.93E+05	4.74E+05	1.26E+07	3.34E+05	4.72E+04	1.42E+06	5.82E+06
4	2.81E+08	4.41E+05	6.07E+05	1.26E+07	3.34E+05	5.44E+04	1.42E+06	1.26E+07
5	2.81E+08	3.56E+05	4.47E+05	1.26E+07	3.34E+05	4.62E+04	1.42E+06	5.82E+06
6	2.81E+08	3.18E+05	4.69E+05	1.26E+07	3.34E+05	49522	1.42E+06	7.19E+06

En la figura 7.3.8a se muestra la demanda medida en el punto 4 (0.45 l/s), la demanda de diseño (1 l/s) y la demanda encontrada por el programa de calibración, la solución se ajusta exactamente a la demanda medida.

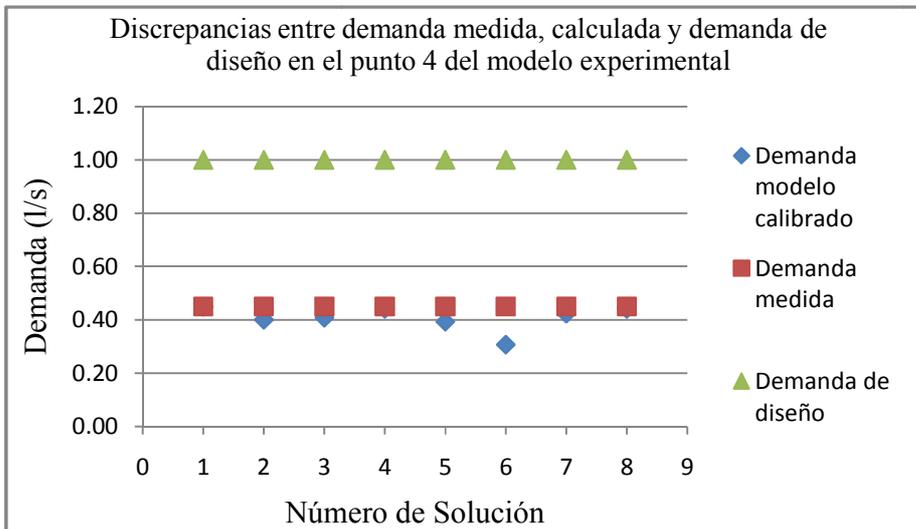


Figura 7.3.8a Prueba 1: Discrepancias de la demanda nodal en red de dos circuitos.



En la figura 7.3.8b se muestra la discrepancia entre el gasto medido a la entrada de la red de dos circuitos, para la prueba 1, el gasto en el modelo de simulación (diseño) y el gasto en el modelo calibrado; la solución 1 se ajusta exactamente al gasto medido, las soluciones 2-8, supera el 10% de discrepancia recomendado por la guía del ECAC (1999).

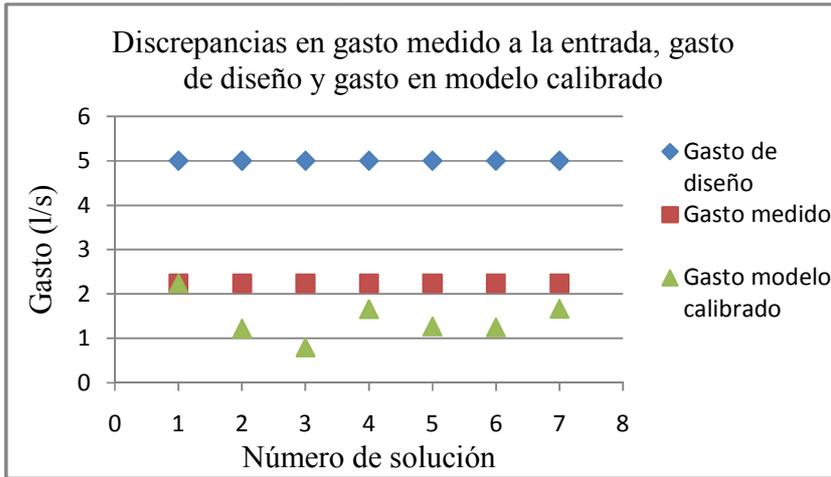


Figura 7.3.8b Discrepancias de gasto a la entrada de la red de dos circuitos.

Las discrepancias entre cargas medida, carga de diseño y carga de modelo calibrado es menor a ± 3.5 m, ver figura 7.3.8c.

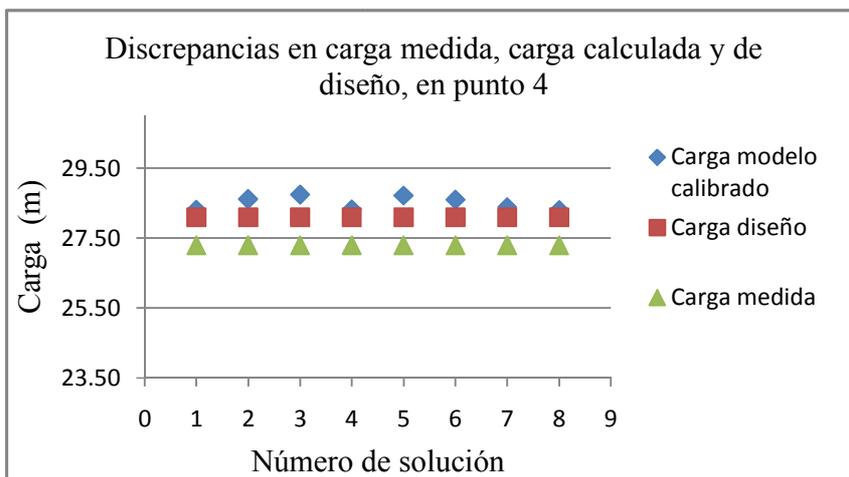


Figura 7.3.8c Discrepancias entre carga de presión en prueba 1



En la figura 7.3.8d se puede ver que la solución 8 tiene una diferencia mínima entre carga medida (Hm) y carga de modelo de simulación calibrado (Hc) en el nodo 4 es de $|1.01|$ y la diferencia máxima de $|1.44|$ m, a pesar de lo anterior, ninguna solución disminuye la discrepancia entre carga medida (Hm) y carga de modelo de simulación sin calibrar (Hd) esto es ningún valor de Hm-Hc está por encima de los valores de Hm-Hd. La precisión entre carga de presión medida en el nodo 4 y la carga de presión en el MS en el mismo nodo es de -0.8 m, el MS puede ser usado en los propósitos de planeación, operación y calidad del agua, de acuerdo al criterio del ECAC (1999).

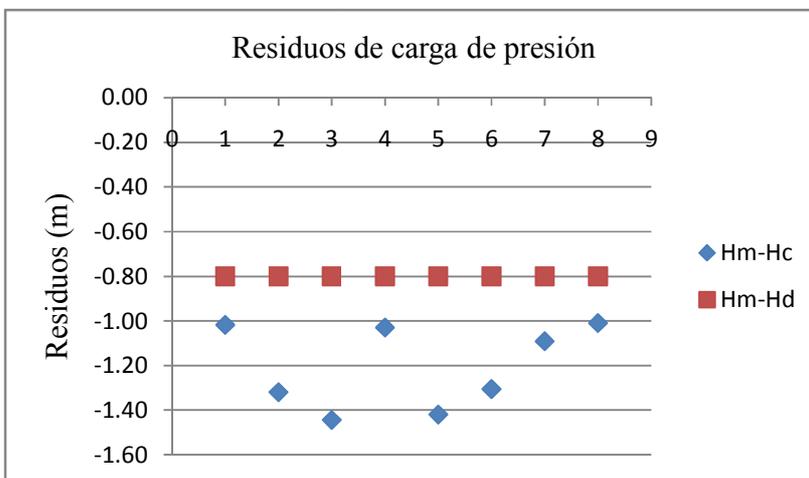


Figura 7.3.8d.- Prueba 1: Residuos de carga de presión en el nodo 4, red de dos circuitos.

Hay una diferencia entre gasto medido (2.24 l/s) y gasto en el MS sin calibrar (5 l/s) de -2.76 l/s, esto es 123% mayor al gasto medido. La solución 1 reduce la diferencia entre Gasto medido (Gmm) y gasto calculado con modelo calibrado (Gc) hasta 0 l/s, y la solución 3 tiene la diferencia máxima entre Gmm y Gc es de 1.44 l/s (64.3% con respecto a Gmm), ver figura 7.3.8e.



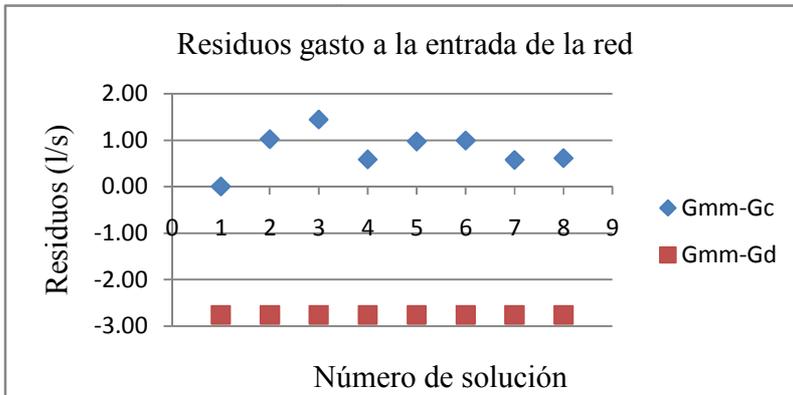


Figura 7.3.8e.-Prueba 1: Residuos gasto a la entrada de la red.

En el siguiente cuadro se muestra la prueba 2: válvulas de esfera 1/3 cerradas, y el valor promedio se muestra en letra negra, valores que se usan en el programa de calibración.

Cuadro 7.3.15.- Prueba 2: Lecturas de gasto y presión en nodo1, y demanda en nodo 4.

Q(l/s)	p1 (kg/cm2)	p4 (kg/cm2)	p1-p4. (kg/cm2)	d4 (m3)		V (m3)	T (s)	d4 (l/s)	d4 (m3/s)
				Lini	Lfin				
2.2756	2.85	2.7	0.15	62.736	62.763	0.027	60	0.45	0.00045
2.2691	2.9	2.7	0.2	62.789	62.816	0.027	60	0.45	0.00045
2.2667	2.85	2.7	0.15	62.857	62.884	0.027	60	0.45	0.00045
2.2587	2.85	2.7	0.15	62.899	62.927	0.028	60	0.47	0.00047
2.2644	2.9	2.7	0.2	62.966	62.993	0.027	60	0.45	0.00045
2.2669	2.87	2.7	0.17						0.00045

En los cuadros 7.3.16a al 7.3.16f pueden verse los resultados de la prueba 2, estimación de los parámetros de coeficiente de rugosidad y demanda nodal y sus funciones de valor.

Cuadro 7.3.16a.- Carga de presión (m) en los nodos de la red de dos circuitos.

Nodo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
2	28.63	28.69	28.62	28.66	28.62	28.59	28.39	28.55
3	28.58	28.67	28.61	28.58	28.61	28.57	28.36	28.42



Nodo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
4	28.58	28.68	28.61	28.70	28.61	28.58	28.36	28.42
5	28.59	28.69	28.61	28.68	28.62	28.59	28.37	28.54
6	28.59	28.69	28.66	28.68	28.62	28.62	28.38	28.61

Cuadro 7.3.16b.- Gastos (m³/s) en los tramos de tubería.

Tramo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
1-2	0.00096	0.00026	0.00052	0.00074	0.00082	0.00047	0.00067	0.00128
2-3	0.00036	0.00018	0.00041	0.00107	0.00026	0.00033	0.00038	0.00048
3-4	-0.00007	-0.00011	-0.00019	-0.00092	-0.00020	0.00012	-0.00009	-0.00003
4-5	0.00030	0.00020	0.00013	-0.00051	0.00020	0.00039	0.00031	0.00043
2-5	0.00050	-0.00002	-0.00030	-0.00049	0.00017	-0.00003	0.00028	0.00035
5-6	0.00008	0.00024	0.00070	0.00003	0.00030	0.00057	0.00032	0.00053
1-6	0.00051	0.00033	0.00083	0.00022	0.00075	0.00086	0.00075	0.00098

Cuadro 7.3.16c.- Estimación de valores de coeficientes de rugosidad en los tramos de tubería.

Tramo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
1-2	108	71	47	109	78	37	30	95
2-3	45	43	140	99	134	78	59	34
3-4	125	58	80	60	85	43	115	88
4-5	88	59	61	72	127	144	111	33
2-5	77	142	83	53	55	49	51	77
5-6	117	125	95	110	127	92	102	53
1-6	41	143	134	40	76	92	33	98

Cuadro 7.3.16d.-Estimacion de valores de demanda nodal en m³/s.

Nodo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
2	0.00009	0.00010	0.00041	0.00016	0.00039	0.00018	0.00001	0.00045
3	0.00030	0.00006	0.00022	0.00015	0.00006	0.00045	0.00029	0.00045
4	0.00037	0.00032	0.00032	0.00041	0.00040	0.00028	0.00040	0.00045
5	0.00028	0.00002	0.00026	0.00005	0.00027	0.00014	0.00028	0.00045
6	0.00043	0.00009	0.00013	0.00020	0.00045	0.00029	0.00043	0.00045



Cuadro 7.3.16e.-Funciones de valor de coeficiente de rugosidad.

Tramo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
1-2	126.01	41.07	35.075	56.67	56.684	37.559	27.469	56.47
2-3	141.91	38.032	30.573	58.631	61.759	35.799	27.082	56.987
3-4	137.17	40.624	34.662	59.534	61.108	36.058	27.015	56.727
4-5	146.86	44.441	32.635	51.746	72.733	39.02	27.281	58.186
2-5	125.91	43.5	32.806	54.912	60.32	36.491	27.258	57.767
5-6	98.731	39.038	31.978	54.618	51.869	34.19	26.864	55.316
1-6	113.11	40.951	34.23	60.224	49.073	34.478	27.735	58.273

Cuadro 7.3.16f.-Funciones de valor para las demandas nodales.

Nodo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
2	1.03E+05	57587	43974	4.44E+05	3.96E+05	31823	2.01E+05	9.85E+07
3	1.03E+05	39872	49342	4.71E+05	3.96E+05	30100	1.46E+05	9.85E+07
4	1.77E+05	63950	67755	6.39E+05	3.96E+05	37075	5.38E+05	9.85E+07
5	1.34E+05	43010	45420	5.00E+05	3.96E+05	34200	3.92E+05	9.85E+07
6	1.07E+05	46046	49047	4.08E+05	3.96E+05	31670	3.26E+05	9.85E+07

En la figura 7.3.9a se puede ver que la discrepancia entre la demanda nodal medida y la demanda nodal del modelo calibrado, en la solución 4 y 8, es menor al 10%. Lo cual corresponde a los valores máximos de función de valor de demanda nodal.



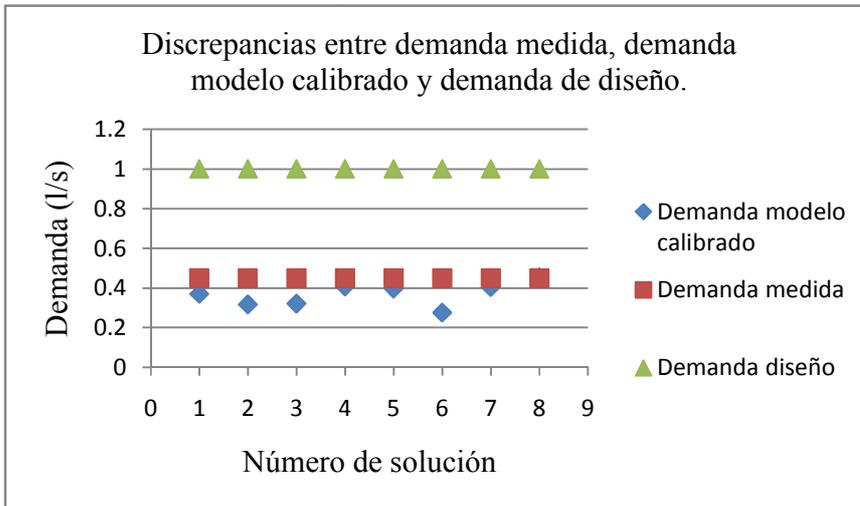


Figura 7.3.9a.-Prueba 2: Discrepancias entre demandas nodales, red dos circuitos.

En la figura 7.3.9b se puede ver que la solución 8, tiene una discrepancia menor al 10% entre gasto medido y gasto del modelo calibrado. Lo cual cumple con lo estipulado por el ECAC (1999).

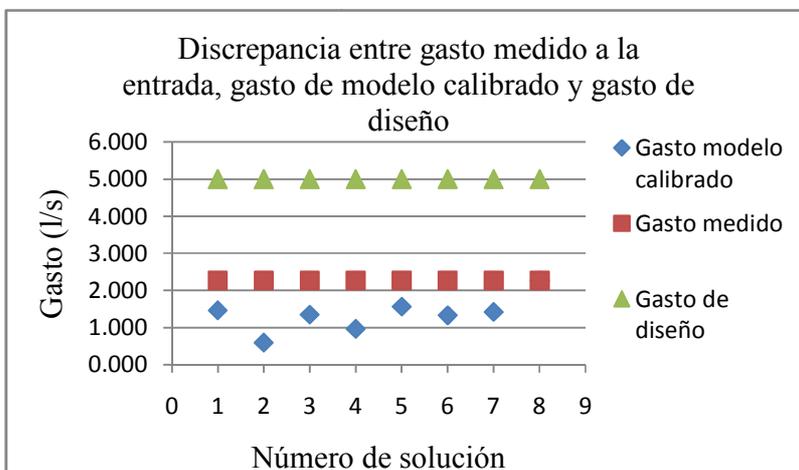


Figura 7.3.9b.-Prueba 2: Discrepancia entre gastos, en red de dos circuitos.



En la figura 7.3.9c se puede observar que la diferencia entre carga medida, carga de modelo calibrado y carga de diseño en las 8 soluciones es menor a 3.5 m. No se redujo la discrepancia entre carga medida y carga de modelo de simulación sin calibrar (diseño).

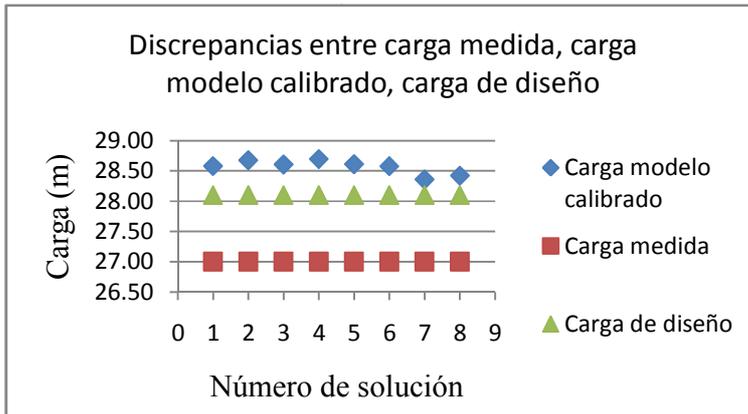


Figura 7.3.9c.-Prueba 2: Discrepancia entre cargas de presión, red dos circuitos.

En la figura 7.3.9d se puede ver la diferencia de carga de presión medida y la carga de presión en el modelo de simulación sin calibrar es de -1.1 m, lo cual indica que las pérdidas de carga se están subestimando en el MS sin calibrar, es decir hay más pérdidas en el SDA real que en el modelo de simulación, por tanto se ajustan los coeficientes de rugosidad. A pesar de haber calibrado el modelo de simulación (ajustado sus parámetros de rugosidad en los 7 tramos de tubería), no disminuyó la diferencia entre carga medida (Hm) y carga calculada (Hc), en ninguna de las 8 soluciones. El MS puede ser usado para propósitos de planeación, operación y de calidad del agua, ya que cumple con el criterio del ECAC (1999), la diferencia (ΔH) con respecto a lo medido está dentro de lo recomendado, ± 3.5 m para planeación, ± 2.1 m para calidad del agua y ± 1.4 para operación.



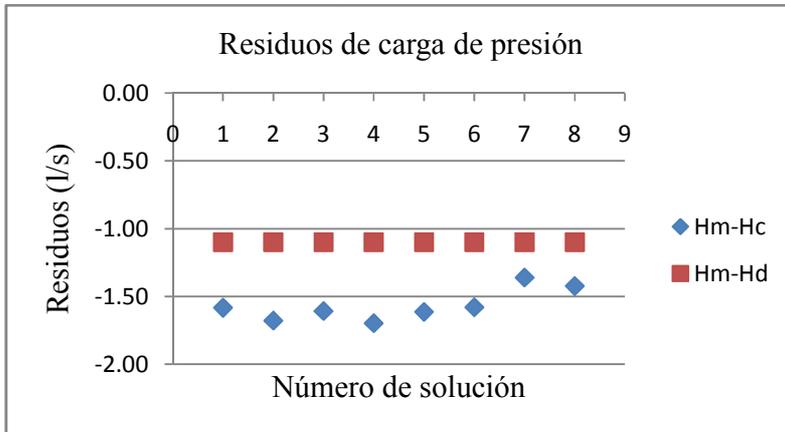


Figura 7.3.9d.-Prueba 2: Residuos de carga de presión.

La diferencia entre el gasto medido a la entrada del modelo experimental (2.26 l/s) y el gasto en el modelo de simulación sin calibrar (5 l/s) es de -2.73 l/s, esto es 121% mayor al gasto medido; lo cual significa que en el modelo de simulación hay una demanda nodal mayor que en el modelo experimental; se ajusta el valor de la demanda nodal en el programa de calibración.

La solución 8 disminuyó la diferencia entre gasto medido ($G_{mm}=2.26$ l/s) y gasto de diseño (5 l/s) hasta 0 l/s, la peor de las 8 soluciones que se muestran es la No. 2, que tiene una diferencia $G_{mm}-G_c$ de 1.67 l/s (73.8% de discrepancia con respecto a G_{mm}). Hay una solución (No. 8) de la 8 mostradas en la figura 7.3.9e que disminuye la discrepancia entre el G_{mm} y el G_d , cumpliendo con el criterio del ECAC (1999), para los propósitos de planeación, operación y de calidad del agua.



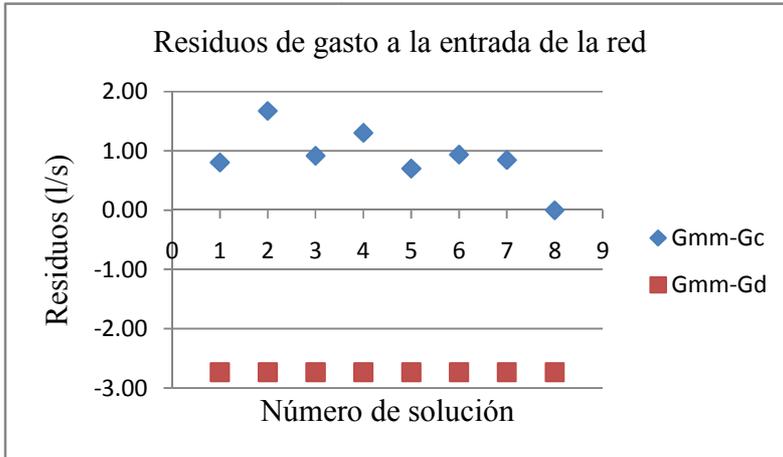


Figura 7.3.9e.-Prueba 2: Residuos de gasto a la entrada de la red de dos circuitos.

En el cuadro 7.3.17 se muestra las lecturas en la prueba 3, válvula en el tramo 1-6, cerrada 1/3, válvula del tramo 2-5 cerrada 2/3 y la del tramo 3-4 cerrada 2/3.

Cuadro 7.3.17.- Prueba 3: Lecturas de gasto en la entrada del circuito, presiones en 1 y 4 y la demanda nodal en 4.

Q(l/s)	p1 (kg/cm2)	p4 (kg/cm2)	p1-p4. (kg/cm2)	d4 (m3)		V (m3)	T (s)	d4 (l/s)	d4 (m3/s)
				Lini	Lfin				
2.2335	2.9	2.6	0.3	63.644	63.67	0.026	60	0.43	0.00043
2.2398	2.9	2.6	0.3	63.69	63.717	0.027	60	0.45	0.00045
2.2439	2.9	2.6	0.3	63.739	63.766	0.027	60	0.45	0.00045
2.2522	2.85	2.6	0.25	63.783	63.81	0.027	60	0.45	0.00045
2.2546	2.9	2.6	0.3	63.825	63.852	0.027	60	0.45	0.00045
2.2448	2.89	2.6	0.29						0.00045

En los cuadros 7.3.18a al 7.3.18f se pueden ver los resultados de la ejecución del programa de calibración, para la prueba 3.



Cuadro 7.3.18a.- Carga de presión (m) en los nodos 2 al 6.

Nodo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
2	28.849	28.785	28.362	28.848	28.766	28.845	28.79	28.769
3	28.842	28.766	28.336	28.802	28.748	28.837	28.881	28.731
4	28.843	28.767	28.337	28.803	28.757	28.842	28.663	28.731
5	28.848	28.783	28.357	28.843	28.762	28.844	28.862	28.747
6	28.861	28.854	28.401	28.85	28.843	28.873	28.876	28.774

Cuadro 7.3.18b.-Gasto (m^3/s) en las tuberías de la red de dos circuitos.

Tramo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
1-2	0.00081	0.00073	0.00103	0.00092	0.00076	0.00098	0.00060	0.00133
2-3	0.00033	0.00055	0.00041	0.00030	0.00042	0.00038	-0.00153	0.00043
3-4	0.00005	-0.00011	0.00004	-0.00006	-0.00027	-0.00020	0.00181	-0.00001
4-5	0.00029	0.00016	0.00049	0.00032	0.00014	0.00024	0.00217	0.00035
2-5	0.00005	0.00014	0.00016	0.00026	0.00008	0.00021	0.00200	0.00048
5-6	0.00041	0.00038	0.00077	0.00027	0.00034	0.00029	0.00039	0.00031
1-6	0.00070	0.00044	0.00122	0.00065	0.00042	0.00033	0.00063	0.00045

Cuadro 7.3.18c.-Estimación del valor de los coeficientes de rugosidad (adimensional).

Tramo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
1-2	108	57	34	128	55	134	47	108
2-3	132	133	75	38	94	124	129	60
3-4	62	111	58	77	90	39	41	52
4-5	126	35	106	44	58	126	66	79
2-5	65	122	76	124	38	147	59	101
5-6	128	38	119	112	31	48	95	54
1-6	112	57	43	85	48	57	134	33

Cuadro 7.3.18d.-Estimación del valor de la demanda nodal (m^3/s).

Nodo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
2	0.00042	0.00004	0.00045	0.00036	0.00027	0.00040	0.00012	0.00043
3	0.00039	0.00045	0.00045	0.00024	0.00015	0.00018	0.00028	0.00042
4	0.00023	0.00027	0.00045	0.00039	0.00041	0.00044	0.00036	0.00036



Posgrado en Ingeniería

Nodo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
5	0.00018	0.00036	0.00045	0.00020	0.00027	0.00026	0.00022	0.00045
6	0.00028	0.00006	0.00045	0.00038	0.00008	0.00004	0.00024	0.00014

Cuadro 7.3.18e.-Funciones de valor para coeficiente de rugosidad.

Tramo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
1-2	9.65	8.88	11.81	50.16	8.75	24.82	9.95	10.40
2-3	10.93	8.77	12.48	31.26	8.68	20.45	9.69	9.93
3-4	10.20	8.93	12.13	44.03	8.79	24.13	10.33	10.62
4-5	10.28	8.89	12.05	50.48	8.57	19.67	9.81	10.26
2-5	10.12	8.79	12.77	43.98	8.54	17.18	9.96	9.95
5-6	11.08	8.96	11.22	41.31	8.63	20.16	10.21	10.17
1-6	11.04	8.86	12.03	34.72	8.70	18.98	10.02	10.02

Cuadro 7.3.18f.-Funciones de valor para demandas nodales

Nodo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7
2	20272	28382	1.04E+09	2.28E+05	4.58E+05	1.55E+07	1.22E+05
3	19281	30285	1.04E+09	2.46E+05	2.62E+05	1.55E+07	1.28E+05
4	23664	33097	1.04E+09	2.69E+05	6.32E+05	1.55E+07	1.36E+05
5	21212	29270	1.04E+09	2.07E+05	4.31E+05	1.55E+07	1.27E+05
6	18324	29247	1.04E+09	2.44E+05	3.60E+05	1.55E+07	1.23E+05

En la figura 7.3.10a se muestra que las soluciones 3,5 y 6 de la demanda de modelo calibrado tienen una discrepancia menor al 10% con respecto a la demanda medida.



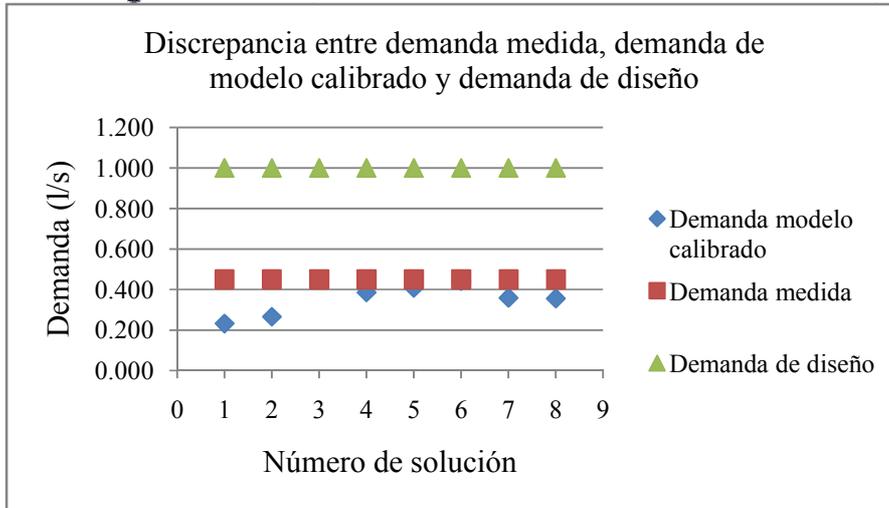


Figura 7.3.10a.-Prueba 3: Discrepancia entre demandas nodales, red dos circuitos.

La solución 3 gasto de modelo calibrado, se ajusta al valor del gasto medido ver Figura 7.3.10b.

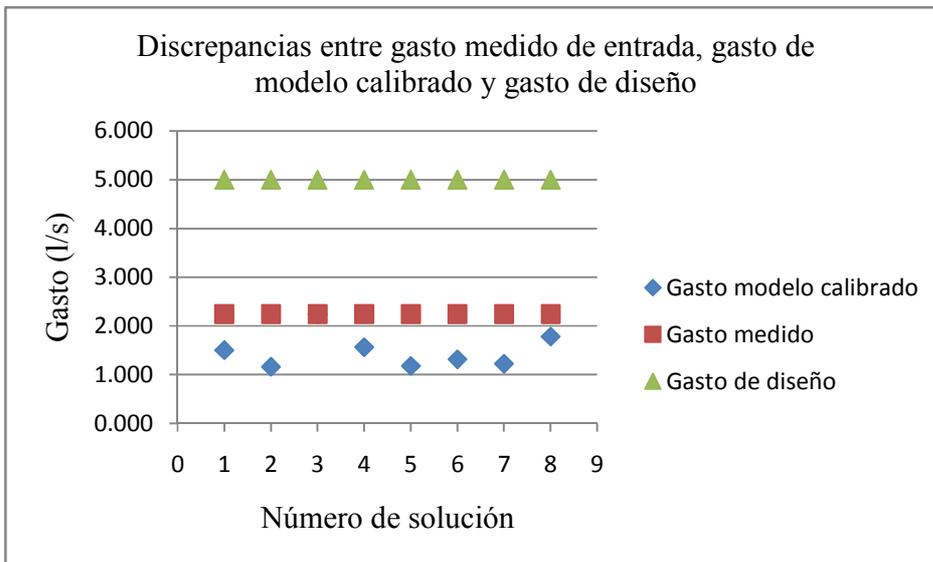


Figura 7.3.10b.-Prueba 3: Discrepancias entre gastos en red de dos circuitos.



En la figura 7.3.10d se puede ver que la diferencia la diferencia entre carga de presión medida (Hm) y carga de presión del MS sin calibrar es de -2.1 m, es decir el modelo de simulación sin calibrar puede usarse para propósitos de planeación y de calidad del agua, no para propósitos de operación en el que el criterio del ECAC(1999) sugiere tener una discrepancia menor a ± 1.4 m. Ninguna solución de carga calculada (Hc) encontrada por el programa de calibración ajustando los valores de coeficientes de rugosidad de los tramos de tubería, disminuye la diferencia entre carga medida (Hm) y carga del modelo de simulación sin calibrar (Hd), no puede usarse el MS para propósitos de operación.

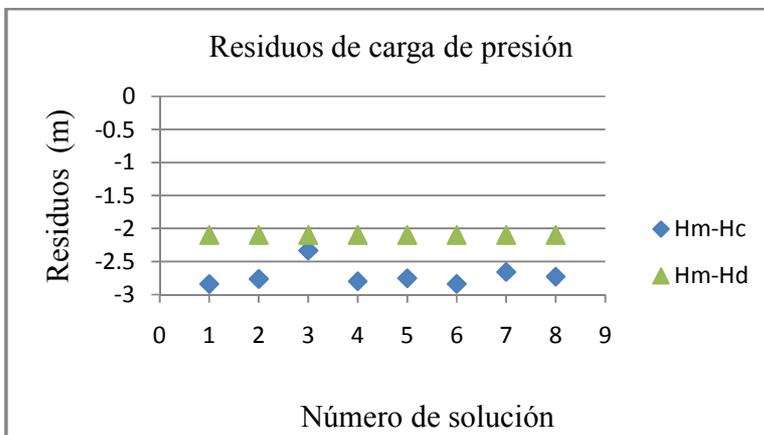


Figura 7.3.10d.-Prueba 3: Residuos de carga de presión.

En la figura 7.3.10e se muestra que la diferencia entre gasto medido ($G_{mm}=2.24$ l/s) y gasto del MS sin calibrar ($G_d=5$ l/s) es de -2.76 l/s, esto es 122% de discrepancia con respecto al gasto medido, el modelo no puede usarse para propósitos de planeación, operación y calidad del agua. La solución 3, tiene un residuo mínimo de 0 l/s; la solución 2 tiene un residuo máximo de 1.08 l/s (48.2% con respecto a G_{mm}).



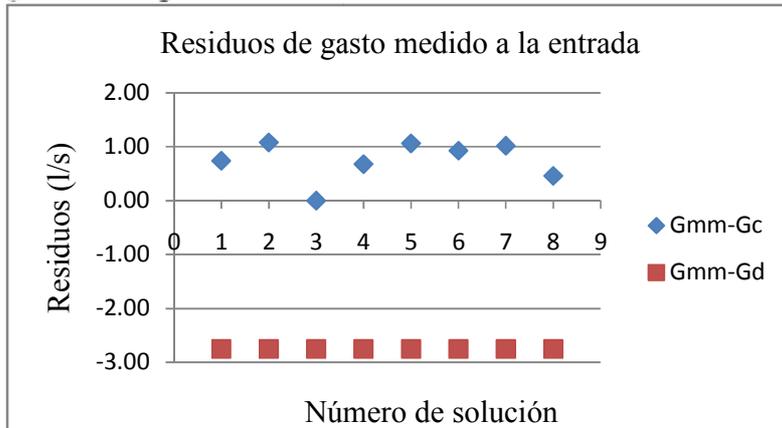


Figura 7.3.10e.-Prueba 3: Residuos de gasto medido a la entrada

En el siguiente cuadro se muestra las lecturas para la prueba 4, con válvulas de esfera cerrada 2/3.

Cuadro 7.3.19 Prueba 4.- Lecturas de gasto en la entrada del circuito, presiones en 1 y 4 y la demanda nodal en 4.

Q(l/s)	p1 (kg/cm ²)	p4 (kg/cm ²)	p1-p4. (kg/cm ²)	d4 (m ³)		V (m ³)	T (s)	d4 (l/s)	d4 (m ³ /s)
				Lini	Lfin				
1.6071	3.2000	0.5000	2.7000	63.8800	63.8920	0.0120	60.0000	0.2000	0.0002
1.5853	3.2000	0.5000	2.7000	63.8990	63.9110	0.0120	60.0000	0.2000	0.0002
1.5833	3.1000	0.5000	2.6000	63.9260	63.9380	0.0120	60.0000	0.2000	0.0002
1.5683	3.1500	0.5000	2.6500	63.9470	63.9590	0.0120	60.0000	0.2000	0.0002
1.5763	3.0500	0.5000	2.5500	63.9810	63.9930	0.0120	60.0000	0.2000	0.0002
1.5841	3.1400	0.5000	2.6400						0.0002

En los cuadros 7.3.20a al 7.3.20f se pueden ver los resultados de la ejecución del programa de calibración, es decir, las cargas de presión, gastos en tuberías, coeficientes de rugosidad, demandas nodales y funciones de valor para la prueba 4.



Cuadro 7.3.20a.-Carga de presión (m) para los nodos de la red de dos circuitos.

Nodo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
2	31.315	31.369	31.361	31.105	31.294	31.368	31.383	31.385
3	31.297	31.365	31.349	31.1	31.287	31.357	31.377	31.384
4	31.297	31.365	31.349	31.1	31.29	31.358	31.377	31.384
5	31.302	31.368	31.354	31.104	31.293	31.364	31.379	31.385
6	31.304	31.382	31.359	31.139	31.371	31.371	31.38	31.387

Cuadro 7.3.20b.- Gastos (m³/s) en los tramos de la red de dos circuitos

Tramo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
1-2	0.00075	0.00023	0.00045936	0.00066	0.00039	0.00062	0.00034	0.00025
2-3	0.00025	0.00021	0.00022695	0.00032	0.00020	0.00039	0.00016	0.00007
3-4	-0.00003	-0.00002	-2.37E-05	-0.00002	0.00009	-0.00011	-0.00002	-0.00001
4-5	0.00027	0.00023	0.00022449	0.00025	0.00022	0.00016	0.00016	0.00009
2-5	0.00031	-0.00002	0.0001981	0.00011	0.00009	0.00020	0.00014	-0.00001
5-6	0.00014	0.00037	0.000198	0.00039	0.00042	0.00027	0.00011	0.00012
1-6	0.00043	0.00052	0.00029832	0.00065	0.00062	0.00053	0.00040	0.00035

Cuadro 7.3.20c.-Estimación de los valores de coeficiente de rugosidad en cada tramo de tubería.

Tramo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
1-2	71	36	65	30	31	104	78	59
2-3	53	117	62	149	73	125	62	77
3-4	93	128	144	100	51	136	141	88
4-5	133	135	106	134	132	64	128	100
2-5	82	122	75	91	117	114	65	57
5-6	133	100	96	59	40	105	135	74
1-6	36	136	40	32	120	95	87	99

Cuadro 7.3.20d.-Estimación de los valores de demanda nodal

Nodo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
2	0.00020	0.00004	0.00003	0.00022	0.00010	0.00002	0.00004	0.00020
3	0.00022	0.00019	0.00020	0.00030	0.00029	0.00027	0.00014	0.00006



Posgrado en Ingeniería

Nodo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
4	0.00030	0.00025	0.00025	0.00028	0.00013	0.00027	0.00018	0.00010
5	0.00017	0.00012	0.00017	0.00025	0.00029	0.00031	0.00010	0.00002
6	0.00029	0.00015	0.00010	0.00026	0.00021	0.00026	0.00029	0.00023

Cuadro 7.3.20e.- Funciones de valor para coeficientes de rugosidad de los tramos de tubería.

Tramo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
1-2	0.18818	0.17684	0.17813	0.17931	0.18002	0.17906	0.184	0.19053
2-3	0.18397	0.18413	0.19122	0.17395	0.19502	0.18195	0.18701	0.19115
3-4	0.2079	0.18062	0.18959	0.18317	0.18101	0.19713	0.19292	0.19683
4-5	0.18416	0.18282	0.18347	0.18065	0.18065	0.19449	0.18406	0.19935
2-5	0.18275	0.18564	0.18868	0.18344	0.18997	0.18226	0.18358	0.19445
5-6	0.18231	0.18834	0.18302	0.18186	0.18182	0.19787	0.19415	0.19669
1-6	0.17927	0.18519	0.1903	0.19605	0.18509	0.18938	0.18633	0.18114

Cuadro 7.3.20f.- Funciones de valor para demandas nodales.

Nodo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5	Solución 6	Solución 7	Solución 8
2	45044	2.04E+05	1.45E+05	78451	1.12E+05	74369	1.19E+06	43052
3	4.51E+04	2.03E+05	1.28E+05	7.53E+04	1.04E+05	7.47E+04	1.19E+06	4.40E+04
4	4.91E+04	2.16E+05	2.16E+05	8.39E+04	1.17E+05	8.99E+04	1.19E+06	4.54E+04
5	4.55E+04	2.04E+05	1.71E+05	7.73E+04	1.08E+05	7.01E+04	1.19E+06	3.94E+04
6	4.29E+04	2.00E+05	1.72E+05	7.91E+04	1.07E+05	65060	1.19E+06	4.28E+04

En la figura 7.3.11a se puede ver que la solución 7, tiene una diferencia del 10% con respecto a la demanda medida, y es la de menor discrepancia. En la misma figura la demanda de diseño es decir, la demanda en modelo de simulación sin calibrar, se muestra en puntos azules.



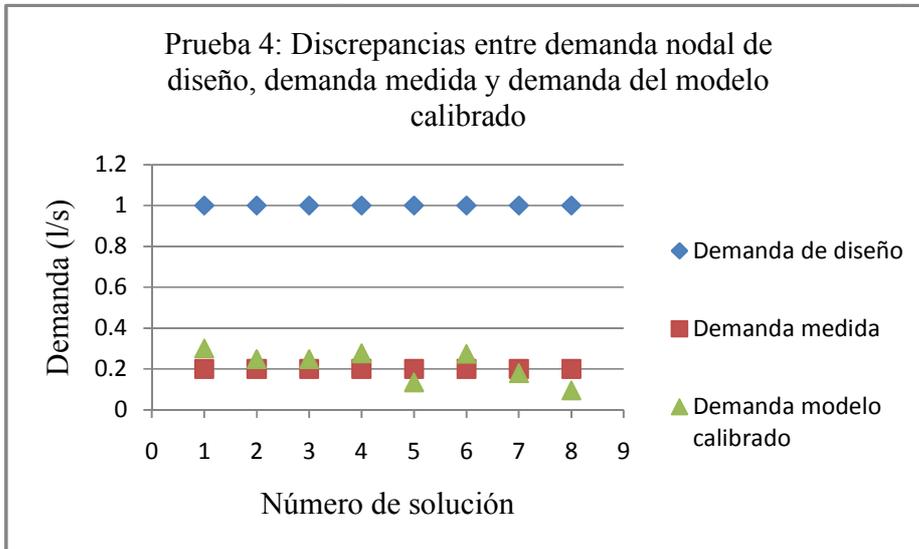


Figura 7.3.11 a.-Prueba 4: Discrepancias de demanda nodal, red de dos circuitos.

En la figura 7.3.11b se puede ver que las discrepancias entre los gasto del modelo calibrado y gasto medido son mayores al 10% recomendado por la guía del ECAC (1999), por tanto el ajuste o calibración no es aceptable.

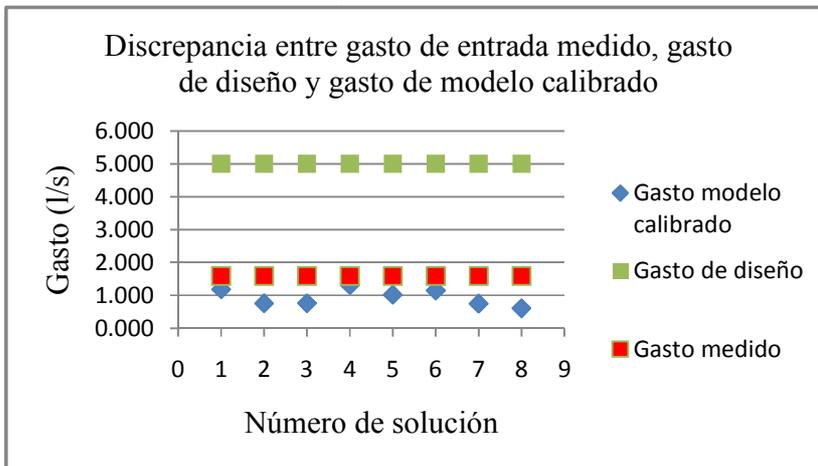


Figura 7.3.11b.-Discrepancias entre el gasto medido y gasto del modelo calibrado y gasto de diseño.



En la figura 7.3.11c se puede ver que no se pudo ajustar el modelo simulación calibrado al valor observado de carga de presión medido en el punto 4, de la red. Las discrepancias son mayores a ± 3.5 m, no se cumple con el criterio de calibración del ECAC (1999).

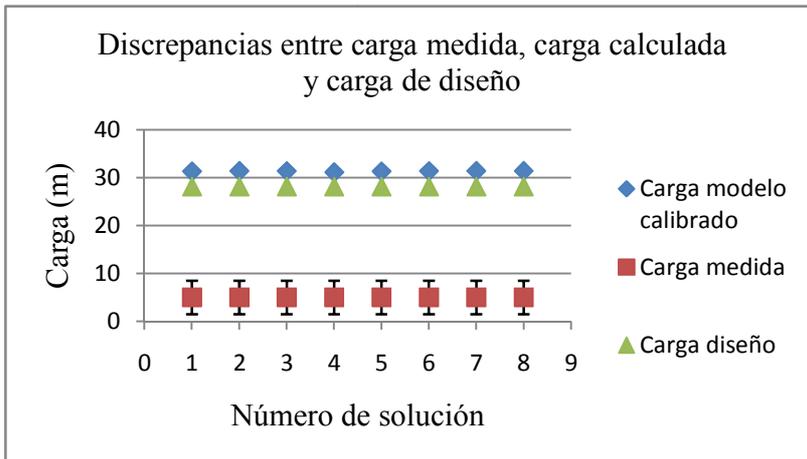


Figura 7.3.11c.-Prueba 4: Discrepancias entre carga de presión, red de dos circuitos.

En la figura 7.3.11c la diferencia entre carga de presión medido (Hm) y carga de presión del MS sin calibrar (Hd) es de -23.1 m, el modelo no se puede usar para propósitos de planeación, operación y de calidad del agua. Aún después de ajustar los parámetros de rugosidad C, en el modelo de simulación, ninguna solución disminuye la diferencia entre carga medida (Hm) y carga del modelo de simulación sin calibrar (Hd), no puede usarse el MS calibrado para ningún propósito, de acuerdo al criterio del ECAC (1999), para carga de presión.



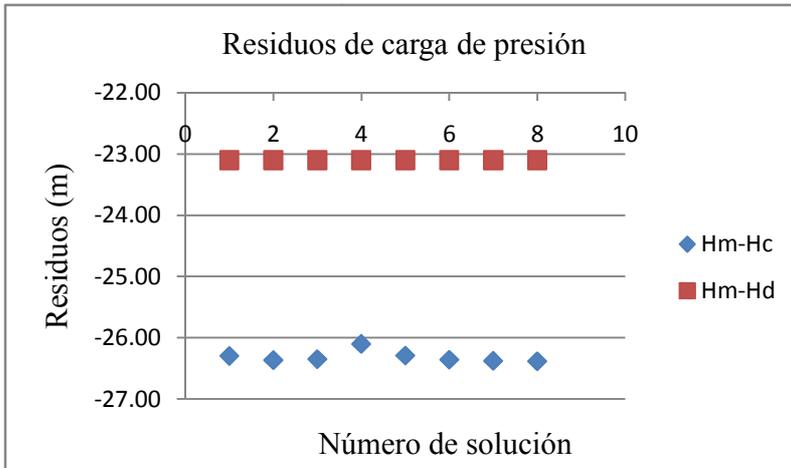


Figura 7.3.11c.-Prueba 4: Residuos de carga de presión

En el modelo de simulación sin calibrar el gasto a la entrada es de 5 l/s, 5 gastos nodales con 1 l/s cada uno; en el modelo experimental es de 1.584 l/s (gasto medido), una discrepancia del 215% con respecto a lo medido, el MS sin calibrar no puede usarse para propósitos de planeación, operación y calidad del agua. La solución que mejor estima los valores actuales de las demandas nodales es la No. 4. La solución No. 4 en el modelo calibrado, en las demandas nodales 2 y 3 tienen un valor de 0.22 y 0.3 l/s. Se comprobó en el modelo experimental que la demanda nodal 2 y 3 tienen una demanda de 0.49 y 0.5 l/s.

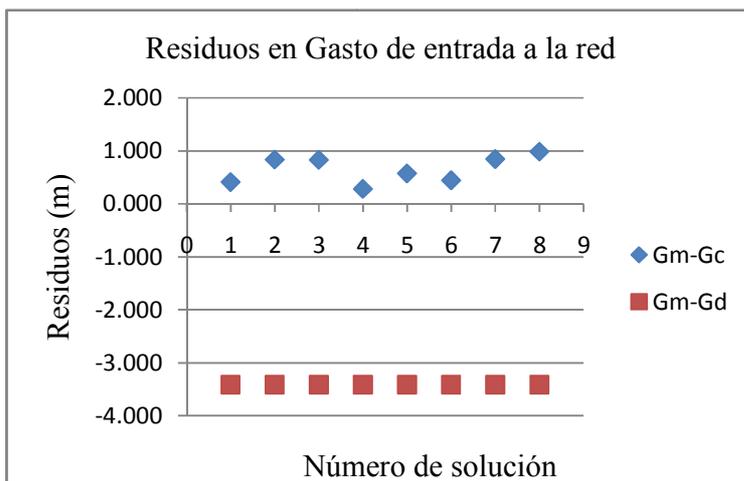


Figura 7.3.11d.-Prueba 4: Residuos de gasto medido a la entrada de la red.



Se disminuye la discrepancia entre Gmm y Gd sólo que no se encuentra el valor actual de la demanda en los nodos 2 y 3.

7.4 Resumen de resultados

Cuadro 7.4.1 Resultados de calibración de tubería simple para modelo de simulación cuyo uso es de planeación a largo plazo.

Apertura de válvulas	Combinación	Comentarios de resultados
Válvulas 100% abiertas	1	En el modelo de simulación calibrado más del 94% de las lecturas de presión al inicio y final del tramo en estudio se encuentra dentro del rango recomendado por la guía del ECAC (1999). La calibración no es aceptable debido a que el criterio lo debe cumplir el 100% de las lecturas de presión.
Válvula 5 cerrada a 1/3, 30°	2	En el modelo de simulación calibrado el 100% de las lecturas de presión al inicio y final del tramo en estudio cumplen el criterio de calibración recomendado por la guía del ECAC (1999). La calibración es aceptable, se cumple al 100% el criterio.
Válvula 5 cerrada 2/3, 60°	3	En el modelo de simulación calibrado más del 87% de las lecturas de presión al inicio y al final del tramo en estudio se encuentran dentro del rango recomendado por el ECAC (1999). La calibración no es aceptable.
Válvula 5 cerrada 1/3, 30° Válvula 8 cerrada 1/3, 30°	4	A pesar de ajustar los valores de coeficiente de rugosidad en el modelo de simulación solo el 14% de las lecturas de presión están dentro del rango recomendado por el ECAC.
Válvula 5 cerrada 2/3, 60° Válvula 8 cerrada 1/3, 30°.	5	Únicamente las lecturas de presión al final del tramo en estudio, del modelo de simulación calibrado se encuentran en un 100% dentro del rango estipulado por el ECAC (1999).



En la calibración de tubería simple con 3 coeficientes de rugosidad se eligió como solución óptima la No. 2 de un total de 25 soluciones arrojadas por el programa de calibración, que corresponde a valores de coeficientes de: 75,121,34.

En el problema de calibración de un circuito con 4 incógnitas, se eligió como solución óptima, la No. 7 de un total de 25 soluciones dadas por el programa de calibración, que corresponden a los valores de:

Cuadro 7.4.2 Solución óptima de problema de calibración de un circuito 4 incógnitas.

Parámetro desconocido o Función de valor (FV)	Valor	Unidad
Gasto en tubería 1	46.75	l/s
Gasto en tubería 2	38.42	l/s
Coefficiente H-W en tubería 1	90	Adimensional
Coefficiente H-W en tubería 2	150	Adimensional
FV de gasto en tubería 1	251,220	Adimensional
FV de coeficiente en tubería 1	251,220	Adimensional
FV de coeficiente en tubería 2	3 994	Adimensional

En la calibración de un circuito con 6 incógnitas, se seleccionó como solución optima la No. 18, de un total de 25 soluciones:



Cuadro 7.4.3 Solución óptima de problema de calibración de un circuito con 6 incógnitas.

Gasto en tubería 1	Gasto en tubería 2	Gasto Total	Coefficiente de Rugosidad Tubería 1	Coefficiente de Rugosidad Tubería 2	Coefficiente de Rugosidad Tubería 3	Coefficiente de Rugosidad Tubería 4
q1	q2	qtotal	C1	C2	C3	C4
47.82	37.35	85.17	73	138	150	138

Cuadro 7.4.4 Solución óptima de problema de calibración de un circuito con 6 incógnitas.

Función de valor de gasto en tubería 1	Función de valor de C en tubería 1	Función de valor de C en tubería 2	Función de valor de C en tubería 3	Función de valor de C en tubería 4
FvQ1	FvC1	FvC2	FvC3	FvC4
3,475,900	3,475,900	3,475,900	952,390	952,390

En el problema de calibración de un circuito con 10 incógnitas se eligió como solución óptima la No. 7, ver cuadro 7.4.5 al 7.4.8

Cuadro 7.4.5a Solución óptima de problema de calibración de un circuito con 10 incógnitas.

Gasto en tubería 1 (l/s)	Gasto en tubería 2 (l/s)	Gasto en tubería 3 (l/s)	Gasto en tubería 4 (l/s)	Demanda 1 (l/s)	Demanda 2 (l/s)	Gasto Total (l/s)	Comprobación (l/s)
q1	q2	q3	q4	d1x	d2x	qtotal	q2+d1x+ q4+d2x
45.87	43.87	39.31	39.19	2	0.1	85.17	85.17

Cuadro 7.4.5b Solución óptima de problema de calibración de un circuito con 10 incógnitas.

Coefficiente de Rugosidad Tubería 1	Coefficiente de Rugosidad Tubería 2	Coefficiente de Rugosidad Tubería 3	Coefficiente de Rugosidad Tubería 4
C1	C2	C3	C4
108	74	150	139



Cuadro 7.4.5c Solución óptima de problema de calibración de un circuito con 10 incógnitas.

Pérdida de carga en tramo 1	Pérdida de carga en tramo 2	Error total	Función de valor de gasto en tubería 1	Función de valor demanda 1	Función de valor demanda 2
hf1	hf2	Error total	FvQ1	Fvd1x	Fvd2x
4.82	5.35	0.53	171,700	171,700	115

Cuadro 7.4.5d Solución óptima de problema de calibración de un circuito con 10 incógnitas.

Función de valor de C1	Función de valor de C2	Función de valor de C3	Función de valor de C4
FvC1	FvC2	FvC3	FvC4
171,700	171,700	115	115

En el problema de calibración del modelo de simulación con red hidráulica de dos circuitos (red de literatura) con coeficientes de rugosidad como parámetros desconocidos, obtuvo los siguientes resultados en la solución óptima:

Cuadro 7.4.6 Solución óptima de problema de literatura, calibración de red hidráulica de dos circuitos.

	Gasto en la tubería	Función de valor de Coeficientes de Rugosidad	Coeficiente de Rugosidad	Carga piezométrica en los nodos	Pérdida de Carga Total	Suma de Pérdidas Circuito 1	Suma de Pérdidas Circuito 2
Tramo	Qop (m3/s)	maxFvC	Cop1 (H-W)	Hop (m)	htop (m)	SumaperdidasCC1	SumaperdidasCC2
1-2	0.107	9.31E+29	123	90.2	9.85	0.768	-1.119
2-3	0.037	9.31E+29	128	75.5	14.42		
3-4	0.003	9.31E+29	126	75.9	0.49		
4-5	0.033	9.31E+29	124	86.4	10.70		
5-6	0.010	9.31E+29	124	95.8	4.35		
2-5	0.053	9.31E+29	125		9.26		





Posgrado en Ingeniería

	Gasto en la tubería	Función de valor de Coeficientes de Rugosidad	Coeficiente de Rugosidad	Carga piezométrica en los nodos	Pérdida de Carga Total	Suma de Pérdidas Circuito 1	Suma de Pérdidas Circuito 2
6-1	0.093	9.31E+29	129		4.17		



La solución mostrada en el cuadro 7.4.6 tiene una calibración aceptable de acuerdo a la guía del ECAC (1999).

En el problema de calibración de modelo de simulación de dos circuitos con coeficientes de rugosidad y demanda como parámetros desconocidos la solución óptima se muestra en el cuadro 7.4.7, la calibración solo es aceptable en cuanto a los gastos nodales.

Cuadro 7.4.7 Solución óptima de problema de literatura calibración de red hidráulica de dos circuitos.

	Gasto en tuberías	Función de Valor del Coeficiente Rugosidad	Coeficiente de Rugosidad	Carga piezométrica en los nodos	Pérdida de Carga Total	Función de valor de demanda nodal	Demanda nodal	Suma de Pérdidas Circuito 1	Suma de Pérdidas Circuito 2
Tramo	Qop (m3/s)	maxFvC	Cop1 (H-W)	Hop (m)	Htop (m)	maxFvq	qop1 (m3/s)	SumaperdidasCC1	SumaperdidasCC2
1-2	0.11	1.92E+27	149	93.2	6.81	2.71E+13	0.0405	0.279	-0.410
2-3	0.05	1.92E+27	149	73.6	19.53	29005	0.058		
3-4	0.01	1.92E+27	148	76.0	2.51	33333	0.0285		
4-5	0.04	1.92E+27	148	85.7	9.68	25652	0.0465		
5-6	0.02	1.92E+27	149	96.2	7.75	2.71E+13	0.034		
2-5	0.07	1.92E+27	148		10.54				
6-1	0.10	1.92E+27	149		3.74	Sumadem	0.2075		
						Error dem	-0.0075		



En la calibración de modelo de simulación del modelo experimental construido en laboratorio de la División de estudios de Postgrado de la UNAM (Depfi, UNAM), con dos circuitos para la pruebas 1-3, se estimaron los valores reales de la demanda nodal, tal que se disminuye la discrepancia entre valores medidos y valores calculados.



VIII. CONCLUSIONES

El proceso de calibración de un modelo de simulación hidráulico, representa un trabajo complejo porque requiere la instalación de puntos de monitoreo gasto y presión en un SDA, tan solo el costo de un medidor electromagnético para una tubería de 8" y el sistema de telemetría es de aproximadamente 87 000 pesos; al abordar este problema se debe pensar que se enfrenta a un problema mal planteado, y la compensación de errores entre los parámetros ajustados ocurre con frecuencia.

El criterio de la guía del ECAC (1999) para aceptar o rechazar la calibración de un modelo de simulación cuyo uso sea de planeación a largo plazo tiene un rango de aceptación muy rígido se recomienda utilizar el criterio de Bush *et al.* (2010), mientras en la guía acepta discrepancias en la carga de presión de entre ± 3.5 m para el 100% de las lecturas, en el criterio de Bush es de ± 3.5 m para el 75% de las lecturas.

En la calibración de tubería simple en 2 de 5 combinaciones de cierre de las válvulas de esfera, se cumple con el ± 3.5 m para el 90% de las lecturas de presión. Sólo la combinación 2 cumple con el criterio del ECAC (1999) de aceptación de la calibración, ± 3.5 m para el 100% de las lecturas, para un modelo cuyo propósito de uso sea de planeación.

En las prueba 1 y 2, de la calibración del modelo de simulación un circuito, al cambiar la rugosidad de la tubería con las válvulas de esfera hasta cerrarlas a 1/3 (30°), la diferencia de presión entre el punto 1 y 2 es en promedio de 1.5 m. El cambio de presión con respecto a la rugosidad es prácticamente imperceptible.



En la calibración de uno y dos circuitos, prueba 4, válvulas de esfera cerradas 2/3, no se pudo estimar el valor actual de los parámetros de coeficiente de rugosidad y cumplir con el criterio del ECAC (1999), disminuir la discrepancia entre el modelo de simulación y el sistema de distribución real a un valor de ± 3.5 m. Sólo se estima correctamente la demanda nodal en la calibración de dos circuitos.

En la prueba 4 de la calibración de uno y dos circuitos al cerrar a 2/3 las válvulas de esfera, los nodos antes de las válvulas tienen una mayor presión y por tanto una mayor demanda. Lo anterior reafirma lo señalado en Alcocer (2007) y el consumo de agua real en un sistema de distribución de agua depende de la presión.

En la calibración de dos circuitos en modelo de simulación, 1 de cada 8 soluciones encontradas en las pruebas 1-3, se estima el valor real de los parámetros de demanda nodal tal que se cumple con 10% de discrepancia en el gasto medido y gasto calculado con modelo de simulación calibrado, de acuerdo al criterio del ECAC (1999).

Al ajustar valores de coeficiente de rugosidad en la calibración de modelo de simulación de dos circuitos, no disminuye la discrepancia entre los valores medidos de carga y los valores calculados en el programa de calibración, esto ocurre para las prueba 1-4.

Entre las ventajas del método de PDM están: No requiere de derivadas, fácil de programar, no requiere de un modelo del problema y el algoritmo “aprende por experiencia”. Sin embargo, no garantiza una solución global óptima.

El problema de CSMH no se puede resolver con absoluta certeza. Solo se pueden buscar soluciones probables, y seleccionar la mejor o mejores que minimizan las funciones objetivo de la calibración.



Asimismo la verificación entre el modelo y SDA, es útil para encontrar anomalías en los mismos.



IX. TRABAJO FUTURO

Como trabajo futuro se recomienda realizar un análisis de incertidumbre minucioso (con métodos como “Generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE)”, primer orden segundo momento (FSOM), métodos bayesianos, método de entropía etc.) en conjunto con la calibración del modelo de simulación, debido a que la incertidumbre es la principal fuente de discrepancia entre un sistema de distribución de agua real y su modelo de simulación.

Se recomienda enfocarse principalmente en reducir la incertidumbre epistémica tanto en el SDA real como en el modelo. Esta reducción debe empezar en las condiciones de frontera (i.e. tanques de almacenamiento, fuentes de abastecimiento, estación de bombeo entre otros).

Se recomienda probar el desempeño de PDM para calibración de SDA real junto con un modelo matemático en el que el consumo de agua dependa de la presión.

También se sugiere, realizar un diseño muestral para definir la cantidad de puntos de monitoreo de caudal y de presión, y su ubicación dentro de la red hidráulica de tal manera que se logren dos objetivos maximizar la precisión de la calibración y minimizar el costo de la recolección de datos.

En la calibración de redes hidráulicas reales es importante que se realice un análisis Beneficio-Costo del proceso de calibración, para tener un mejor conocimiento de los beneficios de ésta actividad.



X. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1.-Alcocer Yamanaka Víctor Hugo, Tzátchkov y Martin (2005). *Implementación y Calibración de un modelo de calidad del agua en sistemas de agua potable*. Informe Técnico: Comisión Nacional del Agua/Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- 2.- Alcocer Yamanaka Víctor Hugo, Tzátchkov G. Velitchko, (2004). *Modelo de transporte de sustancias en flujo no permanente en redes de agua potable*. Informe Técnico: Comisión Nacional del Agua/Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- 3.- Alcocer Yamanaka Víctor Hugo y Tzatchkov G. Velitchko (2007). *Manual de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento. Modelación Hidráulica y de Calidad del Agua en Redes de Agua Potable*. Instituto Mexicano de Tecnología del agua.
- 4.-Alves Z., Muranho J., Alburquerque T. and Ferreira A. (2014). Water distribution network's and calibration. *Procedia Engineering*, 70, 31-40. Doi: 10.1016/j.proeng.2014.02.005.
- 5.- Alvisi Stefano and Franchini Marco (2010). Pipe roughness calibration in water distribution Systems using grey numbers. *Journal of Hydroinformatics*, pages 424-445. Doi: 10.2166/hydro.2010.089.
- 6.-Altman Tom and Boulos Paul F. (1995). Solving Flow-Constrained Networks: Inverse Problem. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121 (5), 427-431.
- 7.-Araya Obando José Andrés (2012). *Modelación del Cloro Residual en la red de distribución del Acueducto la Sirena, Cali*. Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería de los Recursos Naturales y del Ambiente. Tesis de Maestría.



8.-Arniella Elio F. y Gianella Ernesto (2004). Desarrollo, Calibración y uso del modelo hidráulico para la planificación, diseño y operación del acueducto de la ciudad de Guayaquil, Ecuador. *XXIX Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS)*.

9.-Apaydin Oncu (2013). *Automated Calibration of water distribution networks. Middle East Technical University, Ankara, Turkey*. Thesis the degree of Master of Science in Civil Engineering.

10.- AWWA, (2005). *Manual of Water Supply Practices M32: Computer Modeling of Water Distribution Systems*. American Water Works Association, Denver, Colorado.

11.-Baggett Christopher C., Li Guohua, Rosario Roberto A., Khan Ameena Y., Lovins III William A., Powell Robert M. and Reed Tony (2008). Calibrating Pinellas County's 2000 Mile Hydraulic Water Distribution System Model. *Florida Water Resources Journal*.

12.-Bargiela Andrzej and Hainsworth Graham D. (1989). Pressure and Flow Uncertainty in Water Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 115, No.2, March, 1989.

13.-Behzadian Kourosh, Ardeshir Abdollah, Kapelan Zoran and Savic Dragan (2008). Stochastic sampling design for water distribution model calibration. *International Journal of Civil Engineering*. Vol. 6. No. 1.

14.-Berardi L., Laucelli D. and Giustolisi O. (2014). Accounting for local water storages in assessing WDN supply capacity. *Procedia Engineering*, 70 (2014) 142-151. Doi: 10.1016/j.proeng.2014.02.07.



- 15.-Bhave, P.R. (1988). "Calibrating Water Distribution Network Models", *Journal of Environmental Engineering*, 114(1), 120-136.
- 16.-Borzi Angelo, Gerbino Elisa, Bovis Stefano and Corradini Michele (2005). Genetic Algorithms for Water Distribution network calibration: A real application. Parma, Italy. Recuperado de: www.proteo.it/azienda/pubblicazioni/004.pdf
- 17.-Boulos Paul F., Altman Tom and Liou Jim C.P. (1993). On the Solvability of water distribution networks with unknown pipe characteristics. *Appl. Math. Modelling*, Vol. 17, July.
- 18.- Bush Cheri, Lee Yeongho, Piao Haishon, Ginty Mark, Edwards Jerry, Albright Marissa and Maher James, Sinha Eva (2010). Calibrating an EPS Distribution System Model. *Greater Cincinnati Water Works*.
Recuperado de: www.oawwa.org/.../2011/Distribution%20PM/Public_calibration.pdf
- 19.-Cabrera, E., Espert, V., García-Serra, J. y Martínez, F. (1996a). *Ingeniería Hidráulica Aplicada a los sistemas de distribución de agua. Volumen I*. Universidad Politécnica de Valencia.
- 20.-Cabrera E., Espert, V., García-Serra, J. y Martínez, F. (1996b). *Ingeniería Hidráulica Aplicada a los sistemas de distribución de agua. Volumen II*. Universidad Politécnica de Valencia.
- 21.-Cabrera Marcet Enrique y Abreu José (2005). Introducción al análisis de redes de distribución de agua. Recuperado de: www.ita.upv.es/ventas/doc_prods/previews/33.pdf



22.- Cabrera Enrique and García-Serra Jorge (1999). *Drought Management Planning in Water Supply Systems*. Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands.

23.-Cabrera Delgadillo M. Manuel (2012). Dinámica del coeficiente de rugosidad de Manning para tuberías de PEAD Corrugado. *XII Congreso Nacional de Hidráulica*. Acapulco, Guerrero, México.

24.-Cheng Weiping and He Zhiguo (2011). Calibration of Nodal Demand in Water Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol. 137, No. 1, January 1. DOI: 10.1061/(ASCE) WR.1943-5452.0000093.

25.-Cheng, W., Yu T., and Xu, G. (2014). “Real-Time Model of a Large-scale Water distribution System”. 16th Conference on Water Distribution System Analysis, *Procedia Engineering*, Vol. 89 (2014) 457-466.

26.- Darvini, G. and Soldini, L. (2014). Calibration of Numerical Model of WDS in a Real Case. 16th Conference on Water Distribution System Analysis, WDSA. *Procedia Engineering*, Vol. 89, 685-692. Doi: 10.1016/j.proeng.2014.11.495

27.-Davidson J.W. and Bouchart F.J. (2006). Adjusting nodal demands in SCADA constrained real time water distribution network models. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 132, No.1, January 1.

28.-Dietrich Claude R (2001). “On Simulation, Calibration and Ill-conditioning with Application to Environmental System Modelling”. Anderson Malcom G. and Bates Paul D. (Editors). *Model Validation: Perspectives in Hydrological Science*. John Wiley & Sons Ltd.



29.-Dini Mehdi and Tabesch Massoud (2014). A New Method for Simultaneous Calibration of Demand Pattern and Hazen-Williams Coefficients in Water Distribution Systems. Doi: 10.1007/s11269-014-0592-4. *Journal Water Resources Management*, Volume 28, Issue 7, pp 2021-2034.

30.- Escuela de Ingeniería de Antioquia, Colombia (EIA, 2002). *Modelos Hidráulicos*.

Recuperado de:

http://fluidos.eia.edu.co/obrashidraulicas/articulos/modelacionhidraulica/modelacion_hidraulica.html

31.-Edwards, J. and Brandt, M. (2006) Quantitative Results of EPS Model Calibrations with a Comparison to Industry Guidelines. *Water Distribution Systems Analysis Symposium*, 2006: pp. 1-17. Doi: 10.1061/40941(247)68

32.-Edwards Jerry P.E. (2006). Distribution System Hydraulic Calibration – Methodologies and Best Practices. *Annual Conference & Exposition*.

33.-Engineering Computer Applications Committe (ECAC, 1999). Calibration Guidelines for Water Distribution System Modeling.

34.-Fayegh David A. (1993). *Hydraulic Network Analysis and Model Calibration with Artificial Neural Nets*. University of British Columbia, Vancouver, Canada. Thesis of Doctor of Philosophy.

35.-Fiorini Morosini A., Veltri P., Costanzo F. and Savic D. (2014). Identification of leakages by calibration of WDS models. *Procedia Engineering* 70 (2014) 660-667. Doi: 10.1016/j.proeng.2014.02.072. Revisar si se cito en el texto.



36.-Fontana Nicola, Giugni Maurizio, Gliozzi Steffano and Vitaletti Marcello (2014). Shortest path criterion for sampling design of water distribution networks. *Urban Water Journal*, 12:2, 154-164. Doi: 10.1080/1573062X.2013.868498.

37.-Fuentes, García-Serra e Iglesias *et al.* (2002). *Modelación y diseño de redes de abastecimiento de agua*. Editorial Grupo Mecánica de Fluidos. Universidad Politécnica de Valencia.

38.-Greco M. and del Giudice G., (1999). New approach to water distribution network. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, 849-854.

39.-Giustolisi O. and Berardi L. (2011). Water distribution network calibration using enhanced GGA and topological analysis. *Journal of Hydroinformatics*.

40.-González Prudencio y Delahaye Carlos (2004). Calibración del modelo de la red de agua potable de Obras Sanitarias Sociedad del Estado (O.S.S.E.) San Juan. Argentina. Recuperado de: www.busde.paho.org/bvsaidis/argentina14/osse.pdf

41.-Gómez, R., Saldarriaga, J. y Salas, D. (2003). Calibración de redes de acueducto utilizando redes neuronales con diferentes configuraciones y niveles de agregación. *Seminario Internacional La Hidroinformática en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos*. Cartagena, Colombia.

42.-Haghighi Ali and Zahdei Asl Arezoo, 2014. Uncertainty analysis of water supply networks using the fuzzy set theory and NSGA II. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 32 (2014), 270-282.



- 43.-Herrin, G. (1997). "Calibrating the Model." *Practical Guide to Hydraulics and Hidrology*. Haestad Press, Waterbury, Connecticut.
- 44.- Hirrel D. Timothy (2008). How not to calibrate a hydraulic network model. *Journal American Water Work Association*. Volume 100, Number 8, August.
- 45.-Hutton Christopher J., Kapelan Zoran, Vamvakeridou-Lyroudia Lydia and Savic Dragan A. (2014a). Dealing with uncertainty in water distribution system models: A Framework for Real-Time Modeling and Data Assimilation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 140, No. 2, February 1. Doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000325.
- 46.-Hutton Christopher J., Kapelan Zoran, Vamvakeridou-Lyroudia Lydia and Savic Dragan A. (2014b). Application of Formal and Informal Bayesian Methods for Water Distribution Hydraulic Model Calibration. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 140. Doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000412.
- 47.-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (2012). *Modelación de la red primaria en el Macrosector I (Sectorización Gustavo A. Madero y Azcapotzalco)*. Avance del Informe Final.
- 48.-Jaimés Quintero Oscar Mauricio (2010). *Elaboración del macromodelo de la red de abastecimiento de la ciudad de Murcia: Aplicación al control en tiempo real*. Universidad Politécnica de Valencia. Máster en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.
- 49.-Kapelan Zoran (2010). *Calibration of Water Distribution System Hydraulic Models: Concepts, Methods and Examples*. Editorial LAP LAMBERT Academic Publishing AG & Co. KG and licensors.



50.-Kapelan Zoran, Savic D.A. and Walters, G.A. (2003). Multiobjective sampling design for water distribution model calibration. *Journal of Water Resources Planning and Management* 129 (6), 466-479.

51.-Kapelan, Z.S., Savic D.A. and Walter, G.A. (2007). Calibration of water distribution hydraulic models using a Bayesian-type procedure. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol 133 No. 8. Doi: 10.1061/(ASCE) 0733-9429(2007)133:8(927), 927-936.

52.- Kang Doosun and Lansey Kevin (2010). Optimal Meter Placement for Water Distribution System State Estimation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 136, No. 3, May/June 2010, Doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000037.

53.-Kang Doosun and Lansey Kevin (2011). Demand and Roughness Estimation in water distribution Systems. *Journal of water resources planning and management*. Vol. 137, No.1, January 1. Doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000086.

54.- Kerem Ar (2011). *Calibration of Water Distribution Networks. Middle East Technical University. School of Natural and Applied Sciences, Ankara, Turkey.* Thesis of Master of Science in Civil Engineering.

55.-Koor M., Puust R. and Vassiljev A. (2014). Database driven updatable hydraulic model for decision making. *Procedia Engineering* 70 (2014) 959-968.

56.-Koppel T., Vassiljev A., Lukjanov D. and Annus I. (2008). Use of pressure dynamics for calibration of water distribution system and leakage detection. *Proceedings of the 10th Annual Water Distribution Systems Analysis Conference WDSA.*



57.-Kozelj Daniel, Kapelan Zoran, Novak Gorazd and Steinman Franci (2014). Investigating prior parameter distributions in the inverse modeling of water distribution hydraulic models. *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 60 (2014) No. 11, 725-734.
Doi: 10.5545/sv-jme.2014.1741.

58.-Lansey Kevin E., El-shorbagy W., Ahmed I., Araujo J. and Haan C.T. (2001). Calibration assessment and data collection for water distribution networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 127, No. 4, April, 2001.

59.-León Velasco Assaely Diana (2010). *Regularización de problemas mal planteados*. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Metropolitana. Matemáticas aplicadas e industriales.

60.-López Jiménez P. Amparo, López Patiño Gonzalo, Martínez Solano F. Javier y Pérez García Rafael (2005). El modelo de la red de distribución como herramienta de gestión y toma de decisiones: La importancia de la calibración del mismo. Grupo Multidisciplinar de Modelación de Fluidos. Universidad Politécnica de Valencia.

61.-Mays W. Larry (2002). *Manual de sistemas de distribución de agua*. Traducción: Invaring, S.L. Editor: Departamento de Ingeniería Civil y Medio Ambiente, Universidad del Estado de Arizona (Tempe, Arizona).

62.-Machell J., Mounce R., and Boxall J.B. (2010). Online modeling of water distribution systems: a UK case study. *Published in Drink Water Engineering and Sciences*.

63.-Martínez F., Bartolín H., Bou V. and Ayllón M.A., (2003). Calibration of Valve-Driven Water Distribution Systems using jointly GIS and Genetic Algorithms. Application to the WDS of Valencia. REDHISP Group. IIAMA.



64.-Mariano Romero Carlos Eduardo (2001). *Aprendizaje por Refuerzo en optimización multiobjetivo*. Tesis de Doctor en Ciencias Computacionales. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Campus Cuernavaca.

65.-Morosini A. Fiorini, Costanzo F., Veltri P., Savic Dragan (2014). Identification of Measurement Points for calibration of Water Distribution Network Models. *Procedia Engineering* 89 (2014) 673-701. *16th Conference on Water Distribution System Analysis, WDSA*. Doi: 10.1016/j.proeng.2014.11.496. Recuperado de: www.sciencedirect.com

66.-Nicolini, M., Giacomello, C., and Deb, K. (2011). "Calibration and Optimal Leakage Management for a Real Water Distribution Network." *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 137(1), 134–142.

67.- Nicolini, M., Giacomello, C. and Deb. K. (2011). Calibration and Optimal Leakage Management for a Real Water Distribution Network. *Journal Water Resources Planning Management*, Vol. 137 (1), pages 134-142.

68.-Ormsbee Lindell E. and Lingireddy Srinivasa (1997). Calibration of Hydraulic Network Models. Department of Civil Engineering. University of Kentucky, Lexington, KY. *Journal of the AWWA*. Vol. 89 (2). Pp. 42-50.

69.-Ostfeld Avi, Salomons Elad, Ormsbee Lindell, Uber James G., Bros Christopher M., Kalungi Paul, Burd Richard, Zazula-Coetzee Boguslaw, Belrain Teddy, Kang Doosun, Lansey Kevin, Shen Hailiang, McBean Edward, Yi Wu Zheng, Walski Tom, Alvisi Stefano, Franchini Marco, Johnson Joshua P., Ghimire Santosh R., Barkdoll Brian D., Koppel Tiit, Vassiljev Anatoli, Kim Joong Hoon, Chung Gunhui, Yoo Do Guen, Diao Kegong, Zhou Yuwen, Li Ji, Liu Zilong, Chang Kui, Gao Jinliang, Qu Shaojian, Yuan Yixing, Prasad T. Devi, Laucelli Daniele, Lyroudia Vamvakeridou Lydia S., Kapelan



Zoran, Savic Dragan, Berardi Luigi, Barbaro Giuseppe, Giustolisi Orazio, Asadzadeh Masoud, Tolson Bryan A. y McKillop Robert, (2012). “Battle of the Water Calibration Networks”. *Journal of Water Resources Planning and Management*. September/October. Doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000191.

70.-Oreskes Naomi and Kenneth Belitz (2001). “Philosophical Issues in Model Assessment”. Anderson Malcom G. and Bates Paul D.(Editors). *Model Validation: Perspectives in Hydrological Science*. Editorial John Wiley & Sons, LTD.

71.-Pasha M.F.K., Lansey K., 2014. Effect of Data Collection on the estimation of Wall Reaction coefficients for Water Distribution Models. *Journal of Water Resources Planning and Managing*, Vol. 138, No. 6, November 1. Doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000207.

72.-Perez Arellano Rafael, Roldan Cañas José, Moreno Pérez María Fátima y García Alcubierre Sergio, (s.f.) Análisis del comportamiento hidráulico de la red de abastecimiento de la ciudad de cordoba mediante EPANET. Universidad de Cordoba & EMACSA.

73.-Preis Ami, Whitte Andrew and Ostfeld Avi (2009). On-line hydraulic state prediction for water distribution systems. *American Society of Civil Engineers*. ASCE.

74.-Puterman Martin L. (1994). *Markov Decision Processes: Discrete Stochastic Dynamic Programming*. University of British Columbia. Canada. John Wiley&Sons, Inc.

75.-Rodríguez Vázquez Kathia, Fuentes Mariles Oscar Arturo y Palma Nava A. (2011). Estimación y localización de fugas en una red de tuberías de agua potable usando algoritmos genéticos. *Revista Ingeniería, Investigación y Tecnología*. Vol. XII, Núm. 2, 235-242.



76.-Rossman Lewis A. (1999). Computer Models/Epanet. In May Larry (Ed). *Water distribution systems Handbook*. McGraw Hill. New York.

77.- Saldarriaga Valderrama Juan Guillermo, Salas Useche Daniel Eduardo, Gómez Díaz Rafael(2004). Aplicabilidad de métodos de inteligencia artificial a la calibración de redes de acueducto. Consultado 2013. *XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica y XVI Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología*. Sao Pablo, Brasil, y Armenia, Colombia. Recuperado de: www.bvsde.paho.org/bvsAIDIS/PuertoRico29/salas.pdf.

78.-Saldarriaga Valderrama Juan Guillermo y Salas Useche, Daniel Eduardo (2002). Calibración de redes de distribución de agua potable bajo un ambiente de fugas. Universidad de los Andes, Bogotá D.C. Colombia. *XV Congreso Latinoamericano de hidráulica*.

79.-Saldarriaga Valderrama Juan Guillermo (2007). *Hidráulica de Tuberías: Abastecimiento de agua, redes, riegos*. Universidad de los Andes, Colombia. Editorial Alfaomega.

80.-Saldarriaga Valderrama Juan Guillermo y Jurado César Mauricio (2008). Metodología de Calibración de Redes de Distribución de Agua Potable. *XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología*. Sociedad Colombiana de Ingenieros.

81.- Saldarriaga Valderrama Juan Guillermo y Rodríguez Daniel (2009). Efecto del Conocimiento Catastral de una Red en su calibración. *XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología*. Sociedad Colombiana de Ingenieros.



82.-Sanz G. y Pérez R. (2014). Demand pattern calibration in water distribution networks. *Procedia Engineering*, Volume 70 (2014) Pages 1495-1504. Doi: 10.1016/j.proeng.2014.02.164.

83.-Sargent RG (2013). Verification and validation of simulation models. *Journal of Simulation*, 7,12-24. Doi: 10.1057/jos.2012.20.

84.-Savic Dragan A. y Walters Godfrey (1995). Genetic Algorithm Techniques for Calibrating Network Models. Centre for Systems and Control Engineering. University of Exeter. United Kingdom. Recuperado de:
http://www.exeter.ac.uk/media/universityofexeter/schoolofengineeringmathematicsandphysicalsciences/research/cws/downloads/Report_95-12.pdf

85.-Savic Dragan A., Kapelan Zoran S. and Jonkergouw Philip M.R. (2009). Quo Vadis water distribution model calibration?. *Urban Water Journal*. Volume 6, Issue 1. Special Issue: WDS Model Calibration.

86.-Shamir Uri and Howard Charles D.D., (1977). Engineering Analysis of Water-Distribution Systems.

87.-Soares A.K., Reis L.F.R. and Carrijo I.B. (2003). Head-Driven Simulation Model (HDSM) for Water Distribution System Calibration. Sao Carlos School of Engineering University of Sao Paulo, Sao Carlos, Sao Paulo, Brazil.

88.-Sotelo Ávila Gilberto (2001). *Fundamentos de Hidráulica General. Volumen I*. Vigésimocuarta reimpresión. Editorial Limusa. Universidad Nacional Autónoma de México.



89.-Solano López Claudia Stella (2012). *Recopilación, Análisis y Evaluación de las metodologías de calibración de modelos de RDAP empleadas en algunas ciudades de Colombia*. Universidad de los Andes. Tesis de Maestría en Ingeniería Civil.

90.-Speight, V.L. (2009). Development of model calibration guidance. *Proceedings of the 10th Annual Water Distribution Systems Analysis Conference WDSA2008*. Doi: 10.1061/41024/340/76

91.-Speight Vanessa and Khanal Nabin (2009). Model Calibration and current usage in practice. *Urban Water Journal*, 6:1, 23-28. Doi: 10.1080/15730620802566851.

92.-Sumer Derya and Lansey Kevin (2009a). Effect of uncertainty on water distribution system model design decisions. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 135, No. 1, January/February, Doi: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2009)135:1(38).

93.-Sumer Derya and Lansey Kevin (2009b). WDS Calibration and assessment for alternative modelling objectives. *Journal Urban Water*, Vol. 6, No. 4, October, 2009, pages 265-277.

94.-Sutton Richard S. and Barto Andrew G. (1998). *Reinforcement Learning: An Introduction*. A Bradford Book. London, England.

95.-Tabesh M., Jamasb M., and Moeini R. (2011). Calibration of water distribution hydraulic models: A comparison between pressure dependent and demand driven analyses. *Urban Water Journal*. Vol. 8, No. 2, April 2011, 93-102. Doi: 10.1080/1573062X.2010.548525



96.-Takahashi S., Saldarriaga J.G., Vega M.C. and Hernández F., (2010). Water distribution system model calibration under uncertainty environments. *Water Science & Technology Water Supply*. Doi: 10.2166/ws.2010.906. IWA.

97.-Tarantola Albert (2005). *Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation*. Institut de Physique du Globe de Paris. Universite de Paris. Society for Industrial and Applied Mathematics (Siam).

Recuperado de: <http://www.ipgp.fr/~tarantola/Files/Professional/Books/index.html>

98.-Tarantola Albert and Valette Bernard (1982). Generalized Nonlinear Inverse Problems Solved Using the Least Squares Criterion. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, Vol. 20, No. 2, Pages 219-232, May 1982.

Recuperado de:

http://www.ipgp.fr/~tarantola/Files/Professional/Papers_PDF/GeneralizedNonlinear_latex.pdf

99.-Tarantola Albert (1995). *Inédito. The Mathematics of Continuity from general relativity to classical Dynamics*. Institut de Physique du Globe de Paris. Universite de Paris.

100.-Trifunovic Nemanja (2006). *Introduction to Urban Water Distribution*. UNESCO IHE (Institute for Water Education). Delft University of Technology, Netherlands.

101.- Tzatchkov G. Velitchko, Izurieta Dávila Jorge, Fuentes Mariles Oscar, Franco Hernández Luis E. (2007). Manual de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento. *Redes de Distribución*. Comisión Nacional del Agua-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.



102.-United Nations Development Programme (UNPD). (2006). Human Development Report, *Beyond, Scarcity: Power, poverty and the global water crisis*. Bruce Ross-Larson, Meta de Coquereumont and Christopher Trott (Eds). Recuperado de:
<http://www.undp.org/content/dam/undp/library/corporate/HDR/2006%20Global%20HDR/HDR-2006-Beyond%20scarcity-Power-poverty-and-the-global-water-crisis.pdf>

103.-Uusitalo Laura, Lehtikoinen Annukka, Helle Inari, and Myrberg Kai (2015). An overview of methods to evaluate uncertainty of deterministic models in decision support. *Journal Environmental Modelling & Software*, Volume 63, pages 24-31.

104.-Vitkovsky John P., Simpson Angus R. and Lambert Martin F. (2000). Leak Detection and Calibration Using Transients and Genetic Algorithms. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vo. 126, No. 4, July/August.

105.-Walski Thomas M. (1983). Technique for calibrating network models. *Journal of water resources Planning and Management*, Vol. 109, No. 4.

106.-Walski, T.M. (1995). "Standards for model calibration". *Proceedings of the 1995 AWWA Computer Conference, Norfolk, V.A.*

107.-Walski Thomas M., Chase Donald V., Savic Dragan A., Gray man Walter, Beckwith Stephen and Keller Edmund (2003). *Advanced Water Distribution Modeling and Management*. First Edition. Hasted Press, USA.

108.- Walski Thomas M. (2000). Model calibration data: the good, the bad, and the useless. *Journal American Water Works Association*. Volume 92, Issue 1.



109.-Walski, T.M., Defrank, N., Voglino, T., Wood. R., Whitman, E. (2008). “Determining the accuracy of automated calibration of pipe network models”. *8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium, Cincinnati, Ohio, USA*.

110.-Wagner J.M., Shamir U. and Marks D.H. (1988). Water distribution reliability: simulation methods. *Journal of Water Resources Planning and Management* 114(3), 276-294. Doi: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1988)114:3(276).

111.-World Health Organization (WHO). (2004). Evaluation of the Costs and Benefits of Water and Sanitation improvements at Global level. Recuperado de: www.who.int/water_sanitation_health/wsh0404.pdf

112.-Wu Zheng Y., Walski Thomas, Murkowski Robert, Herrin Gregg, Gorier Robert, Try by Michael (2002). Calibrating Water Distribution Model via Genetic Algorithms. *AWWA Mitch Conference*, April 14-17, Kansas City, Missouri, USA.

113.-Wu Zheng Y. and Walski Thomas (2005). Diagnosing error prone application of optimal model calibration. *International Conference of Computing and Control in the Water Industry*, Exeter, United Kingdom.

114.-Xionfei Xie, Bo Zeng and Mahmood Nachabe (2013). Sampling design for water distribution network chlorine decay calibration, *Urban Water Journal*, 12:3, 190-199, Doi: 10.1080/1573062X.2013.831911.

115.- EPA (2013).

Recuperado de: <http://www.epa.gov/nrmrl/wswrd/dw/epanet.html#downloads>

116.-ESRI (Hydraulic Modeling Generator) (2013).



Recuperado de: <http://arcscripsts.esri.com/details.asp?dbid=10117>

117.-KYPIPE (2013)

Recuperado de: http://kypipe.com/KYPipe_EPANET_Comparison

118.-BENTLEY (2013)

Recuperado de: <http://www.bentley.com/es-MX/Products/WaterCAD/Features-List.htm>

119.-INNOVYZE (2013)

Recuperado de: http://www.innovyze.com/products/infoworks_ws/

<http://asp-gb.secure-zone.net/v2/indexPop.jsp?id=1693/2198/4883&lng=en>

<http://www.innovyze.com.mx/infoworkswss.html>

120.-Markov process (mathematics) - Britannica Online Encyclopedia

