

**ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE
CALIBRACIÓN DE REDES Y DEL ÍNDICE DE AGUA NO CONTABILIZADA EN
LOS DISTRITOS DE FLORIDA, BUCARICA Y CARACOLÍ.**

**JOSE LUIS GONZALEZ RADA
CAMILO ANDRES RODRÍGUEZ GIL**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO MÉCANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2011

**ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE
CALIBRACIÓN DE REDES Y DEL ÍNDICE DE AGUA NO CONTABILIZADA EN
LOS DISTRITOS DE FLORIDA, BUCARICA Y CARACOLÍ.**

**JOSE LUIS GONZALEZ RADA
CAMILO ANDRES RODRÍGUEZ GIL**

**Trabajo de grado modalidad de Investigación
Para optar al título de:
Ingeniero Civil**

**Director:
Luis Fernando Castañeda Galvis
Ingeniero Civil, M.sc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO MÉCANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2011

A Dios por darme la oportunidad de realizar cada uno de mis proyectos y continuar realizándolos, a mis padres Clarena Yolanda Rada Jaraba, Francisco Javier González Jiménez, Javier Zambrano Villa y Rosario Lara; por su constante apoyo, esfuerzo y por creer en mí.

A mis hermanos Mary Carmen, Diana, Eliana, Francisco y Santiago; por su amistad, cariño y comprensión.

A María Arévalo e hijos, por su cariño, amistad y apoyo en todas las decisiones tomadas.

A Camilo Andrés Rodríguez Gil por su continuo apoyo durante las diferentes etapas de formación integral como persona y realización del proyecto; a mis demás familiares y amigos por acompañarme en cada etapa de mi vida.

Jose Luis González Rada

A Dios por bendecirme con mis padres, mis hermanos, mi novia, mi sobrina y toda mi familia; por darme la oportunidad de sonreír todos días y darme a entender que todo es posible con mi esfuerzo y su ayuda.

A mis padres, María Omaída y Fortunato a quienes amo profundamente por toda su comprensión, apoyo, cariño, respeto y amor, por todas las oportunidades que me han brindado sin esperar nada a cambio más que la satisfacción de ver a sus hijos totalmente realizados.

A mis hermanos Diana Paola y Javier Fernando por su cariño y respeto, por convertirse en mis mejores amigos, por caminar juntos de la mano guiados por nuestros padres.

A mi amada Sandra quien me ha inspirado todos los días, gracias a su amor, su lealtad, su confianza, su ternura, su firmeza, su complicidad, por sus voces de aliento en los momentos difíciles, por todos los buenos momentos vividos y por todos los que vamos vivir.

A mi sobrina Manuelita que quiero con el alma por ser la luz que ahora ilumina nuestras vidas con su ángel.

A mi ahijado Juanito por recordarme la importancia de la niñez al sonreír y enseñarme que la fortaleza para seguir adelante no tiene edad.

A toda mi familia; mis abuelas, mis tíos, mis tías, mis primos de las familias Gil Vianchá y Rodríguez Rodríguez, por enseñarme la importancia de la unión familiar, a mi abuelo Ángel que desde el cielo ha hecho alusión a su nombre, y demás seres queridos que lo acompañan .

A mi suegra Lucía por su cariño y hacerme sentir como un hijo.

A todos y a cada unos de mis amigos, los que han pasado por mi vida desde mi infancia hasta el día hoy, por enseñarme los diferentes aspectos de la vida.

Camilo Andrés Rodríguez Gil

AGRADECIMIENTOS

Al Ingeniero Luis Fernando Castañeda Galvis por su tiempo, dedicación, contribución y guía en el desarrollo de este proyecto, además de sus consejos dirigidos al desarrollo intelectual, personal y humano.

Al Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, a sus ingenieros, técnicos y demás personal del sistema SCADA por brindarnos la oportunidad de realizar este proyecto de la mano con ellos con todo su soporte técnico y tecnológico.

A todos los profesores de la Escuela de Ingeniería Civil, personal administrativo y técnico por su tiempo y dedicación en todo nuestro proceso educativo.

A la Universidad Industrial de Santander por brindarnos la formación académica necesaria para ser profesionales competentes.

A nuestras familias por la fortaleza que nos dan y la confianza depositada en nosotros.

A todos nuestros amigos y compañeros por sus aportes no solamente en el desarrollo de este proyecto, también en el paso por la universidad, la que sentimos como nuestra casa.

CONTENIDO

| | pág. |
|---|------|
| INTRODUCCIÓN | 20 |
| OBJETIVOS | 22 |
| OBJETIVO GENERAL | 22 |
| OBJETIVOS ESPECÍFICOS. | 22 |
| 1. MARCO TEÓRICO | 23 |
| 1.1 GESTIÓN INTEGRAL DE REDES | 23 |
| 1.2 MODELO PREDICTIVO – PREVENTIVO | 23 |
| 1.3 PÉRDIDAS DE CARGA DE PRESIÓN | 24 |
| 1.3.1 Pérdidas Lineales | 24 |
| 1.3.2 Ecuación General De Darcy-Weisbach | 24 |
| 1.3.3 Ecuaciones de Prandtl Y Von Kármán | 26 |
| 1.3.4 Ecuaciones De Colebrook Y White | 28 |
| 1.3.5 Pérdidas Menores en Accesorios | 29 |
| 1.3.6 Pérdidas Totales de Energía | 29 |
| 1.4 CONSERVACIÓN DE LA MASA | 29 |
| 1.5 CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA | 30 |
| 1.6 CALIBRACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN | 30 |
| 1.7 MODELOS HIDRÁULICOS | 31 |
| 1.8 SOFTWARE | 32 |
| 1.9 ÍNDICE DE AGUA NO CONTABILIZADA | 32 |
| 1.10 CALIBRACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCION DE REDES DE AGUA POTABLE | 32 |
| 1.10.1 Variables Hidráulicas | 33 |
| 1.10.2 Variables Topológicas | 33 |
| 1.10.3 Agua No Contabilizada en Redes de Distribución. | 34 |
| 1.11 PLANO ÓPTIMO DE PRESIONES | 35 |

| | |
|--|----|
| 1.12 PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN | 35 |
| 1.12.1 Escenarios. | 35 |
| 1.12.2 Diámetros. | 35 |
| 1.12.3 Rugosidad. | 36 |
| 2. ANTECEDENTES | 37 |
| 2.1 PROYECTOS DESARROLLADOS | 37 |
| 3. DESCRIPCIÓN DE LA RED DEL DISTRITO FLORIDA, BUCARICA Y CARACOLÍ | 39 |
| 3.1 DESCRIPCIÓN TOPOLÓGICA DE RED | 39 |
| 3.4 DESCRIPCIÓN DEL USO DE LA RED | 41 |
| 3.4.1 Descripción del sector de Bucarica. | 43 |
| 3.4.2 Descripción del sector de Florida. | 44 |
| 3.4.4 Descripción del sector de Caracolí. | 46 |
| 4. SOFTWARE UTILIZADOS EN EL PROCESOS DE CALIBRACIÓN | 49 |
| 4.1 EPANET | 49 |
| 4.1.1 Capacidades de Epanet | 50 |
| 4.2 CALIBRA | 51 |
| 5. CALIBRACIÓN DE LA RED DEL DISTRITO | 52 |
| 5.1 MEDICIONES EN LA RED DEL DISTRITO | 52 |
| 5.1.1. Medición De Presión. | 52 |
| 5.1.2. Medición De Caudal | 53 |
| 5.2 MODELO INCIAL | 54 |
| 5.3 LÍNEA BASE 1 | 56 |
| 5.3.1 Análisis por demandas desconocidas. | 57 |
| 5.3.2 Análisis por emisores. | 61 |
| 5.4 LINEA BASE 2 | 65 |
| 5.4.1 Análisis por diámetros | 66 |
| 5.4.2 Análisis por rugosidades. | 68 |
| 5.4.3 Análisis por pérdidas menores. | 69 |
| 5.5 MODELO UNIFICADO | 69 |

| | |
|---|----|
| 5.6 ANÁLISIS DE INDICE DE AGUA NO CONTABILIZADA | 71 |
| 5.7. OBRAS PARA REDUCIR EL IANC EN EL DISTRITO DE FLORIDA, BUCARICA Y CAROCOLI | 72 |
| 5.8. ANÁLISIS DEL DISTRITO EN RÉGIMEN DE PRESIÓN ALTA | 73 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 76 |
| BIBLIOGRAFÍA | 78 |
| ANEXO | 79 |

LISTA DE TABLAS

| | pág. |
|---|------|
| Tabla 1. Rugosidades absolutas (ks) para diferentes materiales utilizados. | 36 |
| Tabla 2. Materiales presentes en longitud de la red. | 39 |
| Tabla 3. Distribución porcentual de los diámetros de la red | 40 |
| Tabla 4. Clasificación de estrato | 42 |
| Tabla 5. Cantidad de usuarios según uso del sector de Bucarica. | 43 |
| Tabla 6. Cantidad de usuarios según estrato del sector de Bucarica. | 44 |
| Tabla 7. Cantidad de usuarios según uso del sector de Florida. | 45 |
| Tabla 8. Cantidad de usuarios según estrato del sector de Florida. | 46 |
| Tabla 9. Cantidad de usuarios según uso del sector de Caracolí. | 47 |
| Figura 11. Distribución porcentual del uso de la red del sector de Caracolí. | 47 |
| Tabla 10. Cantidad de usuarios según estrato del sector de Caracolí. | 47 |
| Tabla 11. Listado de Nodos. | 52 |
| Tabla 12. Clasificación de barrios según estratificación. | 58 |
| Tabla 13. Escenario por demandas y multiplicadores de acuerdo al estrato. | 59 |
| Tabla 14. Dirección de emisores en el distrito | 62 |
| Tabla 15. Factores multiplicadores de la demanda utilizados en los distintos estratos | 63 |
| Tabla 16. Coeficientes de Escenarios por emisores. | 63 |
| Tabla 17. Coeficientes de emisores para la conformación de la Línea Base 2. | 65 |
| Tabla 18. Listado de escenarios de calibración para diámetros. | 67 |
| Tabla 19. Listado de escenarios de calibración por rugosidades. | 69 |
| Tabla 20. Listado de escenarios de calibración por pérdidas menores. | 69 |

LISTA DE GRAFICAS

| | Pág. |
|---|------|
| Figura 1. Flujo completamente desarrollado en un conducto. | 25 |
| Figura 2. Distribución del flujo por rugosidad y subcapa laminar viscosa | 26 |
| Figura 3. Flujo hidráulicamente liso y rugoso | 27 |
| Figura 4. Diagrama de Moody | 28 |
| Figura 5. Distribución porcentual de los materiales de la red | 40 |
| Figura 6. Distribución porcentual de los diámetros de la red | 41 |
| Figura 7. Distribución porcentual de los diámetros de la red | 43 |
| Figura 8. Distribución porcentual de usuarios según del sector de Bucarica. | 44 |
| Figura 9. Distribución porcentual del uso de la red del sector de Florida | 45 |
| Figura 10. Distribución porcentual de usuarios según del sector de Florida. | 46 |
| Figura 11. Distribución porcentual del uso de la red del sector de Caracolí. | 47 |
| Figura 12. Distribución porcentual de usuarios según del sector de Caracolí. | 48 |
| Figura 13. Interfaz gráfica de Epanet 2.0. | 50 |
| Figura 14. Diagrama de flujo de metodología empleada. | 54 |
| Figura 15. Caudal de salida medido y sin calibrar de la planta de tratamiento de Floridablanca. | 55 |
| Figura 16. Presión en punto 1913 | 55 |
| Figura 17. Comportamiento de medición de caudal en Línea base 1. | 56 |
| Figura 18. Comportamiento del punto de medición de presión en Línea base 1. | 57 |
| Figura 19. Comportamiento del punto de medición de caudal en el análisis por demandas. | 60 |
| Figura 20. Comportamiento del punto de medición de presión en el análisis por demandas | 60 |
| Figura 21. Escenario determinado en el análisis por demandas. | 61 |

| | |
|--|----|
| Figura 22. Comportamiento del punto de medición de caudal en el análisis por emisores. | 64 |
| Figura 23. Comportamiento del punto de medición de presión en el análisis por emisores. | 64 |
| Figura 24. Línea Base 2. | 65 |
| Figura 25. Comportamiento del punto de medición de presión en Línea base 2. | 66 |
| Figura 26. Comportamiento del punto de medición de caudal en análisis por diámetros. | 67 |
| Figura 27. Comportamiento del punto de medición de presión en análisis por diámetros. | 68 |
| Figura 28. Modelo Unificado para el punto de medición de caudal. | 70 |
| Figura 29. Modelo Unificado para el punto de medición de presión | 70 |
| Figura 30. Caudal de salida de la planta. | 72 |
| Figura 31. Caudal de salida de la planta en régimen de presión alta. | 74 |
| Figura 32. Modelo del distrito de Florida, Bucarica y Caracolí en régimen de presión alto. | 75 |

LISTA DE ECUACIONES

| | Pág. |
|--|-------------|
| Ecuación 1. Ecuación General de pérdidas de Darcy-Weisbach. | 25 |
| Ecuación 2. Coeficiente de fricción de régimen laminar. | 25 |
| Ecuación 3. Coeficiente de fricción de Flujo Hidráulicamente Liso. | 27 |
| Ecuación 4. Ecuación 3. Coeficiente de fricción de Flujo Hidráulicamente Rugoso. | 27 |
| Ecuación 5. Ecuaciones de Colebrook y White | 28 |
| Ecuación 6. Pérdidas menores en accesorios | 29 |
| Ecuación 7. Pérdidas totales de energía | 29 |
| Ecuación 8. Conservación de la Masa | 30 |
| Ecuación 9. Conservación de la energía | 30 |
| Ecuación 10. Índice de Agua No Contabilizada | 32 |

LISTA DE ANEXOS

| | Pág. |
|---|-------------|
| ANEXO A-1. Listado de Tuberías que conforman la red del distrito de Florida Bucarica y Caracolí de acuerdo al diámetro y al material. | 79 |
| ANEXO A-2. Diámetros de la tubería que integran la Red. | 81 |
| ANEXO B. MANEJO DEL PROGRAMA CALIBRA | 82 |
| ANEXO C. FOTOGRAFIAS CAUDALIMETRO DIGITAL | 85 |
| ANEXO D. GRÁFICAS DE PRESIÓN POR ANÁLISIS DE DEMANDAS | 88 |
| ANEXO E. GRAFICAS DE PRESIÓN OBTENIDAS DE LA LÍNEA BASE 2 | 93 |
| ANEXO F. GRÁFICAS DE PRESIÓN POR ANÁLISIS DE DIÁMETROS EN LA LÍNEA BASE 2 | 98 |
| ANEXO G. GRAFICAS DE PRESIÓN POR ANÁLISIS DE RUGOSIDADES EN LA LÍNEA BASE 2 | 103 |
| ANEXO I. CAUDALES DE SALIDA Y VOLUMEN DE PLANTA Y MODELO | 113 |

RESUMEN

TITULO: ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE CALIBRACIÓN DE REDES Y DEL ÍNDICE DE AGUA NO CONTABILIZADA EN LOS DISTRITOS DE FLORIDA, BUCARICA Y CARACOLÍ.

AUTORES:

JOSE LUIS GONZALEZ RADA
CAMILO ANDRES ROFRIGUEZ GIL

PALABRAS CLAVES: Modelo, parámetros, demanda, distrito, presión, Epanet, variables hidráulicas, volumen, caudal, presión, calibración.

DESCRIPCIÓN: La creación de un modelo calibrado fue necesario para comprobar si la red de distribución de agua potable se encontraba trabajando bajo las condiciones óptimas de servicio y a la vez permitir identificar las zonas donde se presenta pérdidas considerables, tanto de masa como de presión; para esto fue necesario evaluar las variables hidráulicas y topológicas. Esta evaluación se realizó en el siguiente orden: demanda, emisores, diámetros, rugosidades y por último las pérdidas menores.

Se hizo evidente durante el proceso un aumento considerable de la demanda requerida, esto posiblemente al aumento de suscriptores, conexiones ilegales, daños o imperfecciones en la red de lenta o difícil detención. Por lo tanto, fue necesario variar las características de la red de distribución idealizada de acuerdo a los anteriores parámetros y a la vez calcular el Índice de Agua no Contabilizada para tomar las acciones preventivas y correctivas que permitan disminuirlo y brindar continuidad en el servicio .

La inclusión de los factores multiplicadores para cada uno de los parámetros necesarios para la calibración de la red del distrito de Florida, Bucarica y Caracolí, permiten hacer un análisis de sensibilidad para cada parámetro y de esta forma obtener los factores finales para obtener así la calibración final de caudal y presión, una vez hecha la calibración proceder a calcular el índice de agua no contabilizada hallando la diferencia porcentual del volumen de la curva de medición del caudal y la curva del modelo hidráulico.

* Proyecto de Grado.

** Facultad de Físico Mecánicas. Escuela de ingeniería civil. Director: Luis Fernando Castañeda Galvis.

SUMMARY

TITLE: ESTIMATION OF THE PARAMETERS AFFECTING THE CALIBRATION PROCESS NETWORKS AND THE INDEX OF WATER NORECORDED IN THE DISTRICT OF FLORIDA, BUCARICA AND CARACOLE.

AUTHORS:

JOSE LUIS GONZALEZ RADA
CAMILO ANDRÉS RODRÍGUEZ GIL

KEYWORDS: Model, parameters, demand, district, pressure, Epanet, hydraulic variables, volume, flow, pressure, calibration.

DESCRIPTION: The creation of a calibrated model was necessary to verify if the distribution network of drinkable water was working under optimal service conditions and simultaneously to allow identifying areas where it has considerable losses, both mass and pressure, for this was necessary to evaluate the hydraulic and topological variables. This evaluation was performed in the following order: demand, emitters, diameter, roughness and finally the minor losses.

There became evident, during the process, a considerable increase of the required demand, this possibly to the increase of subscribers, illegal connections, damages or imperfections in the network of slow or difficult detention. Therefore, it was necessary to change the characteristics of the idealized distribution network according to the above parameters and calculating the rate of water norecorded to take preventive and corrective actions that may decrease, and provide continuity of service.

The inclusion of multipliers for each of the parameters needed for the calibration of the network in the district of Florida, Bucarica and Caracolí, allows a sensitivity analysis for each parameter and thus obtain the final factors for the calibration and final pressure and flow, once made to the calculation of the calibration rate of unaccounted for water by finding the percentage difference in the volume of flow measurement curve and the curve of the hydraulic model.

*Graduation Project.

**Faculty of Physical Mechanics. School of Civil Engineering. Director: Luis Fernando Castañeda Galvis

INTRODUCCIÓN

El actual crecimiento poblacional de las ciudades principales e intermedias, como Bucaramanga y Floridablanca ha provocado el aumento del nivel de complejidad de las mismas. Asimismo, se ha visualizado un incremento en la demanda del servicio de agua potable.

El índice de agua no contabilizada (IANC) es de valiosa importancia ya que permite determinar la eficiencia de las empresas prestadoras del servicio de acueducto. Así mismo, el IANC permite verificar la cantidad de agua tratada que es pérdida en la red, por causa de fraudes, estallidos y pérdidas no visibles en la red.

Es de vital importancia establecer el índice de agua no contabilizada por medio de parámetros que influyen en la calibración de las redes de dichas poblaciones. Disminuir el porcentaje de agua no contabilizada es una de las principales prioridades de cualquier entidad prestadora de servicio de acueducto, permitiendo disminuir el volumen de agua que no es facturado por la falta de un plano de presiones uniforme, que minimice las presiones de consumo con las presiones entregadas a los suscriptores en cada uno de los puntos de la red.

La pérdida económica que se genera en las empresas prestadoras de servicio de agua potable es un gran inconveniente, que restringe la posibilidad de mejorar el servicio, invertir en infraestructura, en continuidad del servicio y ampliar cobertura.

Por lo tanto, se debe buscar la manera de reducir este índice y optimizar de la mejor manera posible el servicio de acueducto. Debido a que en Latinoamérica se presenta el mayor índice de agua no contabilizada por lo que se deben optar medidas que favorezcan tanto a los suscriptores reduciendo la tarifa como a la empresa aumentando sus ingresos y eficiencia³.

Mediante este proyecto se busca establecer los niveles de pérdida de agua potable y la forma en que se afecta el IANC en el distrito de Florida, Bucarica y Caracolí mediante un modelo hidráulico calibrado, comprobar que el sistema presenta los niveles óptimos de presión para el adecuado funcionamiento y así identificar los puntos más sensibles a presentar fallas en el servicio y tomar las acciones preventivas y correctivas en la red asegurando el servicio continuo a los usuarios.

³ "Metodología para la definición de plano óptimo de presiones y reducción de agua no contabilizada". Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería Civil. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Tomo II.

La tenencia de un modelo calibrado permite modelar acertadamente las condiciones reales de la red en diferentes estados de presión y consumo de los usuarios, el estado físico de las tuberías, la inclusión de nuevos usuarios y de las obras realizadas en las redes de agua potable, de esta manera incrementar la optimización del servicio.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Estimar los parámetros que influyen en el proceso de calibración, así como el índice de agua no contabilizada (IANC) en diferentes regímenes de presión (alta y baja), mediante la realización de un modelo hidráulico de los sectores de Florida, Bucarica, Caracolí.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Realizar el montaje de un modelo hidráulico de la red de suministro de agua potable de los distritos de Florida, Bucarica y Caracolí.
- Identificar los parámetros que influyen en el proceso de calibración, en los distritos de Florida, Bucarica y Caracolí del amb. SA. ESP.
- Encontrar zonas con alta posibilidad de fugas y conexiones fraudulentas.
- Estimar los índices de agua no contabilizada para el sector de estudio (Florida, Bucarica y Caracolí), en diferentes estados de presión.
- Calibrar el modelo hidráulico realizando hipótesis de variación de parámetros.
- Proponer obras para la mejora del IANC del sector en mención.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 GESTIÓN INTEGRAL DE REDES⁴

El termino Gestión integral de redes es aun relativamente nuevo, sobre todo cuando los esfuerzos de gestión están destinados al mejoramiento de los diferentes procesos que afectaran a la comunidad en general. El proceso se ha vuelto más eficiente con la instalación de estaciones reguladoras de presión que permitan la disminución de perdidas, así como de macromedidores que permitan obtener la información actualizada de caudales y presiones en diferentes puntos.

El mantenimiento actual de las redes obedece en su mayoría al modelo correctivo, modelo que implica el cambio de accesorios de la red cuando alguno de estos ha sufrido algún daño que afecta el funcionamiento de la misma y la distribución de agua potable a los usuarios, este modelo aunque es efectivo no es el ideal ya que los cortes del servicio afectan directamente a los usuarios por causas ajenas a los mismos, las cuales deberían estar contempladas por las empresas prestadoras de servicio de agua potable, que poseen la información topológica y catastral de sus redes de distribución.

1.2 MODELO PREDICTIVO – PREVENTIVO⁵

Se busca que mediante la información histórica de daños, datos de suelos, materiales, entre otras se permita llegar a la temprana detección de un daño así como del adecuado mantenimiento que evite la ocurrencia de los mismos.

También es necesaria la utilización de indicadores de fácil análisis que además permitieran tomar una decisión en términos de soporte y mantenimiento, estos indicadores son tiempo de revisión, de atención, de reparación, de cierre, de efectividad de soporte entre otros.

⁴ "Metodología para la definición de plano optimo de presiones y reducción de agua no contabilizada". Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniera Civil. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Tomo I.

⁵ "Metodología para la definición de plano optimo de presiones y reducción de agua no contabilizada". Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniera Civil. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Tomo I.

1.3 PÉRDIDAS DE CARGA DE PRESIÓN⁶

El flujo de un líquido en una tubería viene acompañado de una pérdida de energía, que suele expresarse en términos de energía por unidad de peso de fluido circulante (dimensiones de longitud), denominada habitualmente pérdida de carga. En el caso de tuberías horizontales, la pérdida de carga se manifiesta como una disminución de presión en el sentido del flujo. La pérdida de carga está relacionada con otras variables fluidodinámicas según sea el tipo de flujo, laminar o turbulento. Además de las pérdidas de carga lineales (a lo largo de los conductos), también se producen pérdidas de carga singulares en puntos concretos como codos, ramificaciones, válvulas, etc., denominadas pérdidas menores por accesorios.

1.3.1 Pérdidas Lineales⁷

Las pérdidas lineales son debidas a las tensiones cortantes de origen viscoso que aparecen entre el fluido y las paredes de la tubería. Considerando flujo estacionario en un tramo de tubería de sección constante, las pérdidas de carga se pueden obtener por un *balance de fuerzas* en la dirección del flujo.

1.3.2 Ecuación General De Darcy-Weisbach⁸

Se supone una tubería por la que circula un líquido incompresible de peso específico γ , y en ella el volumen comprendido entre las secciones 1 y 2, separadas una distancia L . (ver figura 1)

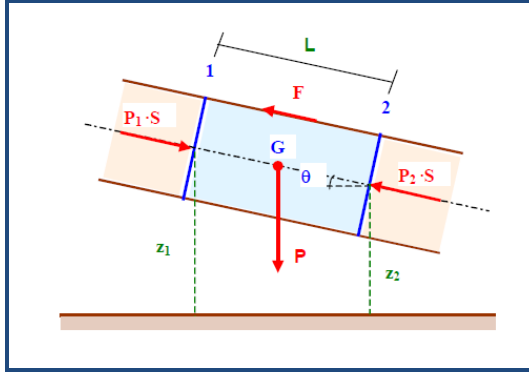
El elemento de tubería considerado forma un ángulo θ respecto a la horizontal.

⁶ Saldarriaga, Juan. "Hidráulica de tuberías, Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos". Alfaomega. Universidad de los Andes.

⁷ Saldarriaga, Juan. "Hidráulica de tuberías, Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos". Alfaomega. Universidad de los Andes

⁸ Saldarriaga, Juan. "Hidráulica de tuberías, Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos". Alfaomega. Universidad de los Andes

Figura 1. Flujo completamente desarrollado en un conducto.



Fuente. Hidráulica de Tuberías, Juan Saldarriaga

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

Ecuación 1. Ecuación General de pérdidas de Darcy-Weisbach.

Dónde.

h_f = pérdida de carga debida a la fricción (m).

f = factor de fricción de Darcy (m).

L = longitud de la tubería (m).

D = diámetro de la tubería (m).

v = velocidad media del fluido (m/s).

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

En **flujo laminar** también es válida la ecuación de Darcy-Weisbach, en donde el coeficiente de fricción depende exclusivamente del número de Reynolds, y se puede obtener su valor:

$$f_{\text{laminar}} = \frac{64}{Re}$$

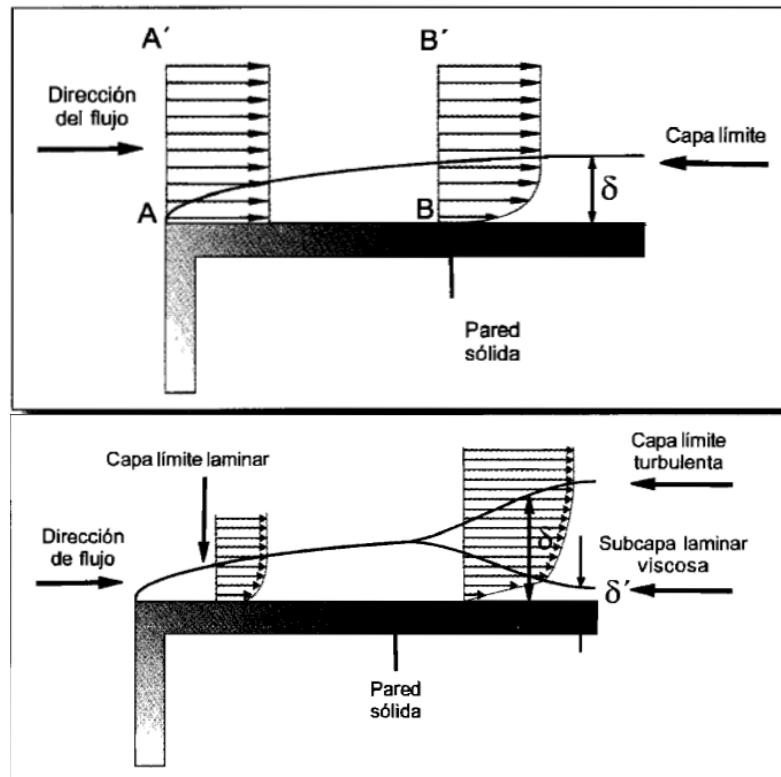
Ecuación 2. Coeficiente de fricción de régimen laminar.

En **régimen turbulento** el coeficiente de fricción depende, además de Re , de la rugosidad relativa, $\varepsilon_r = \varepsilon/D$ donde ε es la rugosidad absoluta de la tubería, que representa el promedio de las irregularidades de la superficie del interior de la tubería.

1.3.3 Ecuaciones de Prandtl Y Von Kármán⁹

La nueva teoría introducida por Prandtl establece que siempre un fluido en movimiento interactúa con una pared sólida dependiendo del espesor de la subcapa laminar viscosa δ' y del tamaño de la rugosidad media k_s , determinado dos tipo de flujo turbulento, flujo hidráulicamente liso cuando $k_s < \delta'$ e hidráulicamente rugoso cuando $k_s > \delta'$.

Figura 2. Distribución del flujo por rugosidad y subcapa laminar viscosa



Fuente. Hidráulica de Tuberías, Juan Saldarriaga

Para establecer las ecuaciones finales Prandtl y Von Kármán realizar pruebas de laboratorio en tuberías circulares de diferentes materiales y establecieron la velocidad media mediante la distribución de velocidades por medio del tubo de **Pitot** obteniendo así las ecuaciones para cada tipo de flujo turbulento.

⁹ Saldarriaga, Juan. "Hidráulica de tuberías, Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos". Alfaomega. Universidad de los Andes

1.3.3.1. Flujo Hidráulicamente Liso

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

Ecuación 3. Coeficiente de fricción de Flujo Hidráulicamente Liso.

Dónde.

Re: es el número de Reynolds,

f: el factor de fricción

1.3.3.2. Flujo Hidráulicamente Rugoso

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log_{10} \left(\frac{d}{k_s} \right) + 1.14$$

Ecuación 4. Ecuación 3. Coeficiente de fricción de Flujo Hidráulicamente Rugoso.

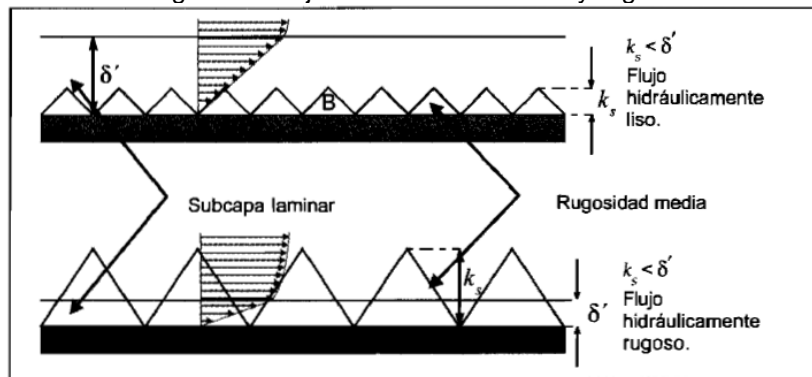
Dónde.

k_s: *Rugosidad Absoluta*

d: Diámetro de la tubería

f: el factor de fricción

Figura 3. Flujo hidráulicamente liso y rugoso



Fuente. Hidráulica de Tuberías, Juan Saldarriaga

1.3.4 Ecuaciones De Colebrook Y White¹⁰

Colebrook y White (1939) combinaron diversas expresiones y propusieron una única expresión para el coeficiente de fricción que puede aplicarse en cualquier régimen turbulento

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

Ecuación 5. Ecuaciones de Colebrook y White

Dónde.

Re: es el número de Reynolds (Adimensional).

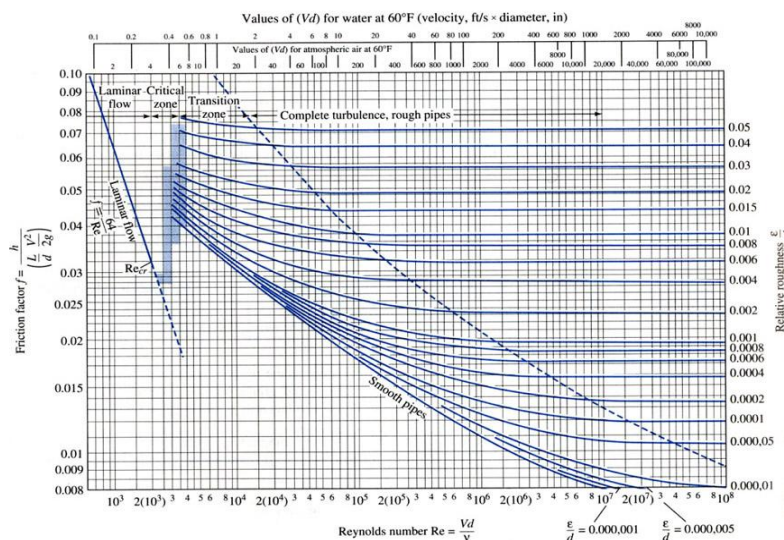
Ks: Rugosidad Absoluta (m).

D: Diámetro de la tubería (m).

f: el factor de fricción (Adimensional).

Esta ecuación tiene el inconveniente de que el coeficiente de fricción no aparece en forma explícita, y debe recurrirse al cálculo numérico (un procedimiento iterativo) para su resolución. A partir de ella, Moody desarrolló un diagrama que lleva su nombre (Figura 4), en el que se muestra una familia de curvas de iso-rugosidad relativa, con las que se determina el coeficiente de fricción a partir de la intersección de la vertical del número de Reynolds, con la iso-curva correspondiente.

Figura 4. Diagrama de Moody



¹⁰ Saldarriaga, Juan. "Hidráulica de tuberías, Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos". Alfaomega. Universidad de los Andes

Fuente. Hidráulica de Tuberías, Juan Saldarriaga

1.3.5 Pérdidas Menores en Accesorios¹¹

Los accesorios y los cambios de dirección de cada uno de ellos ubicado en la red, generan pérdidas de carga, estas pérdidas de energía se calculan mediante la siguiente ecuación, en la cual se tiene en cuenta un coeficiente k_m que corresponde a cada tipo de accesorio y a cada material.

$$h_m = \sum k_m * \frac{V^2}{2g}$$

Ecuación 6. Pérdidas menores en accesorios

1.3.6 Pérdidas Totales de Energía¹²

Las pérdidas totales de carga corresponden a la sumatoria de pérdidas por fricción y las pérdidas menores generadas por los accesorios.

$$H = H_f + H_m$$

Ecuación 7. Pérdidas totales de energía

1.4 CONSERVACIÓN DE LA MASA¹³

La Ley de la conservación de la masa afirma que la masa dentro de un sistema permanece constante con el tiempo (haciendo caso omiso de los efectos de la relatividad), es decir que se debe mantener la misma en todos los nodos.

¹¹ Saldarriaga, Juan. "Hidráulica de tuberías, Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos". Alfaomega. Universidad de los Andes

¹² Evaluación de métodos de inteligencia artificial para la calibración de redes de acueducto. Universidad de los Andes. Departamento de ingeniería de sistemas y computación. Junio de 2003. Daniel Eduardo Salas Useche.

¹³ Evaluación de métodos de inteligencia artificial para la calibración de redes de acueducto. Universidad de los Andes. Departamento de ingeniería de sistemas y computación. Junio de 2003. Daniel Eduardo Salas Useche.

$$\sum_{i=1}^I Q_i = \sum_{s=1}^S Q_s + D$$

Ecuación 8. Conservación de la Masa

Dónde.

- I : Cantidad de tubos que aportan caudal al nodo
- S : Cantidad de tubos que reciben caudal del nodo
- D : Caudal demandado en el nodo
- Q_i : Caudal aportado al nodo por el tubo i
- Q_s : Caudal recibido por el tubo

1.5 CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA¹⁴

La ecuación de conservación de la energía, afirma que la energía en un punto de una tubería aguas arriba es igual a la de un punto de la tubería aguas abajo más pérdidas de carga.

$$E_F = E_I - L$$

Ecuación 9. Conservación de la energía

Dónde.

- E_f : Energía total al final de la tubería
- E_i : Energía total al inicio de la tubería
- L : Perdidas de energía a lo largo de la tubería.

1.6 CALIBRACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN¹⁵

Actualmente en la ingeniería hidráulica el diseño de una red de distribución es un trabajo no frecuente ya que la mayoría de las ciudades ya cuentan con una red, el trabajo se centra entonces en las redes ya construidas con el fin de optimizar los procesos de distribución. Los tipos de trabajos más frecuentes son la ampliación de la red debido al crecimiento de la población en una ciudad incrementando la demanda de agua potable.

¹⁴ Evaluación de métodos de inteligencia artificial para la calibración de redes de acueducto. Universidad de los Andes. Departamento de ingeniería de sistemas y computación. Junio de 2003. Daniel Eduardo Salas Useche.

¹⁵ "Metodología para la definición de plano optimo de presiones y reducción de agua no contabilizada". Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniera Civil. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Tomo II.

Otro trabajo importante es el mantenimiento preventivo y correctivo de la red de distribución que incluye el manejo de fugas, daños en los tubos, eventos de contaminación, cambio de válvulas, tuberías antiguas, y accesorios, el control de agua no contabilizada. La puesta en marcha de estos trabajos se vería beneficiada si la red se apoyara en un modelo hidráulico que represente un prototipo en la forma más exacta, simulando las condiciones físicas reales existentes en la red.

Crear un modelo hidráulico en cualquier paquete computacional genera condiciones físicas ideales, las cuales no concuerdan con la realidad, por tal razón es importante llevar a cabo un proceso de calibración que represente bien el prototipo de red existente, con un modelo calibrado es fácil probar el aumento o la disminución de las variables incidentes en la red tales como demanda de agua, la presión, el caudal, entre otras, lo que hace que este proceso no sea tan sencillo, debido al mismo crecimiento poblacional, las diferentes edades de las tuberías, los materiales de las mismas, pérdidas en válvulas de acuerdo con su porcentaje de apertura entre otros, por tal la calibración requiere mediciones en campo para lograr este proceso.

Asumiendo lo anterior la modelación hidráulica y su calibración corresponde al cálculo de presiones en cada uno de los nodos y los caudales de cada tubo, en un instante de tiempo o periodos extendidos, teniendo en cuenta demanda de agua por los consumidores, conservación de la masa y la energía. Los valores calculados de las presiones y caudales también dependen de la topología de la red y las características físicas de tubos y accesorios, en caso de fugas o robo de agua por parte de los usuarios no inscritos a la red generando pérdidas de presión y aumentando el índice de agua no contabilizada de la red.

1.7 MODELOS HIDRÁULICOS¹⁶

La modelación hidráulica permite establecer de manera rápida la evolución de un sistema ante cualquier situación. Por lo tanto la adecuada investigación topográfica y topológica, así como la información de macro y micromedidores permite la elaboración de modelos de alto nivel, que permitan determinar los niveles de consumos determinados en puntos de la ciudad, junto con la información de pérdidas, tuberías, etc.

¹⁶ “Metodología para la definición de plano óptimo de presiones y reducción de agua no contabilizada”. Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería Civil. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Tomo I.

1.8 SOFTWARE¹⁷

La utilización del software, permite enfocarse en la priorización de la red, debido a que su utilización hace posible determinar qué sectores se ven afectados por el corte del servicio, determinar el caudal que se pierde por daño o el que se deja de vender debido a las reparaciones.

También se busca determinar el orden de prioridad de atención de acuerdo al caso tal como el agua que se pierde por algún daño (Fuga abierta) y el agua que se deja de vender (Fuga Contenida). La metodología consiste en analizar cuál es la que afecta y representa un mayor costo para la empresa y atender el daño según su prioridad.

1.9 ÍNDICE DE AGUA NO CONTABILIZADA¹⁸

El índice de agua no contabilizada consiste en relacionar la información de consumo de una red en el macromedidores que la antecede y compararlo con la información que arroja los micromedidores instaladas en la residencia de los usuarios y de esta forma contabilizar el agua que no ha sido reportada. Este índice se calcula con esta ecuación.

$$\text{Índice de agua no contabilizada} = \left(\frac{Q_{macro} - Q_{micro}}{Q_{macro}} \right) * 100$$

Ecuación 10. Índice de Agua No Contabilizada

1.10 CALIBRACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCION DE REDES DE AGUA POTABLE

Cuando se encuentran en funcionamiento las redes de distribución, es difícil estimar las variables, debido a que las propiedades de los materiales, han variado

¹⁷ "Metodología para la definición de plano óptimo de presiones y reducción de agua no contabilizada". Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería Civil. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Tomo I.

¹⁸ Jurado, Cesar Mauricio." Metodología de Calibración de Redes de Distribución de Agua Potable". Universidad de los Andes, Bogotá enero de 2007.

a lo largo de su uso, por lo tanto mediante modelos hidráulicos se busca representar correctamente el funcionamiento en campo de la red. Este proceso es llamado calibración y se realiza para que pueda ser usado en la toma de decisiones, mantenimiento y prevención.

Los variables que intervienen en el proceso de calibración son:

1.10.1 Variables Hidráulicas. Llamada así porque representa la cantidad de agua, que circula en la red, puede ser originada por:

- **Demandas Desconocidas:** Representan los problemas de tipo comercial, asociados a conexiones ilegales, descalibración en micromedidores, errores en mediciones o falta de ellos.
-
- **Emisores:** En la modelación hidráulica son consideradas como fugas, el caudal que es arrojado a la atmosfera es función de la presión, expresado en la siguiente ecuación.

$$Q = CP^x$$

Ecuación 11. Caudal emitido por emisores.

Donde

Q es caudal en l/s

P es la presión en m.c.a

C es el coeficiente de entrada l/ms^{0.5}

X es factor de 0.5 para orificios rígidos

$$Q = CA\sqrt{2gH}$$

Ecuación 12. Ecuación de descarga a través de un orificio rígido.

1.10.2 Variables Topológicas. Son aquellas características físicas que intervienen en la dirección y velocidad de flujo. Entre ellas encontramos: diámetros, rugosidad y pérdidas menores.

1.10.2.1 Aproximaciones a la Calibración De Redes De Distribución. Debido al número de incógnitas presente en un sistema de distribución de agua potable, no puede ser resuelto de manera directa, por lo tanto se procede al tanteo o con otro método computacional que permita dar soluciones en un corto tiempo.

1.10.2.2 Validación de Modelos. Debido al tamaño y complejidad de los espacios modelados, es necesario realizar un proceso a través del cual se garantice el funcionamiento del modelo ante cualquier situación y no una en particular. Por lo tanto su validación se debe hacer ante datos diferentes a los modelados.

1.10.3 Agua No Contabilizada en Redes de Distribución. Se denomina al índice de agua no contabilizada a la diferencia entre el volumen de líquido producido por la planta potabilizadora para un sector hidráulico en particular y la sumatoria de los valores micromedidos en el proceso de facturación. El problema financiero es uno de los principales problemas de las entidades prestadoras de servicios, debido a la cantidad de agua representada en dinero que se pierde.

Debido a los costos de captación, tratamiento y transporte, su total control y disminución es una de las prioridades de las empresas prestadora de servicio. De esta manera en el país se viene implementando una normatividad vigente para instaurar sanciones a las empresas que tengan índices altos e incentivos a las entidades que le busquen reducir los Altos Índice de Agua No Contabilizada.

Las pérdidas en el sistema se clasifican de acuerdo el fenómeno que la genera, de esta manera:

1.10.3.1 Pérdidas Comerciales. Se refiere a las pérdidas que se generan por demandas de agua no reportadas por los procesos de micromedición, en términos de calibración se representan como demandas desconocidas.

Entre las principales causas se destaca el error en la base de datos de la empresa, lo que causa que a algunos usuarios conectados en forma ilegal no reciban el cobro de su consumo. Otro tipo muy común es la descalibración o el robo de los equipos de micromedición lo que hace que las lecturas sean erróneas o no puedan llevarse a cabo. También se presenta la manipulación en los equipos de medición causando que no las demandas no queden registradas en la micromedición de la empresa.

1.10.3.2 Pérdidas Técnicas. Conocida como la cantidad de agua que se pierde con los daños e imperfecciones en las tuberías ocasionadas por la carga a la que se ven sometidas, la edad, las presiones, las condiciones del suelo y el material; lo que ocasiona que sea difícil de especificar el momento y lugar de ocurrencia.

La cantidad de agua que fluye obedece a las características geométricas y a la presión hidrostática, originándose mayores pérdidas técnicas durante la noche.

El agua no contabilizada producto de las pérdidas técnicas representa riesgo para estructuras aledañas y estabilidad de taludes, de ahí su vital importancia de su detección y reparación por parte de las empresas prestadoras de servicios.

1.11 PLANO ÓPTIMO DE PRESIONES

El plano óptimo de presiones se refiere a la superficie de energía, que presenta los menores valores de presión, garantizando un servicio adecuado a los usuarios del sistema.

A partir de este se busca uniformizar el comportamiento de la red, mediante el control de puntos estratégicos, para evitar la fatiga de los materiales y de esta manera disminuir los ***Índice de Agua No contabilizada***.

1.12 PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN

Se refiere a las características que serán tenidas en cuenta para el desarrollo, modificación y asignación de las acciones. Entre las que cabe destacar:

1.12.1 Escenarios. Se entiende como escenario el subconjunto de datos, que caracterizan las condiciones actuales de la red y bajo los cuales se está analizando. Entre la categoría de datos que la conforman se encuentran:

- Diámetros de la tubería.
- Coeficiente de rugosidad de cada tubería.
- Coeficiente de pérdidas menores.

1.12.2 Diámetros. El diámetro interno de las tuberías puede llegar a variar con el paso del tiempo, debido a factores como incrustaciones y sedimentos que afectan su adecuado funcionamiento.

La determinación de los diámetros correctos es una tarea compleja debido al gran tamaño de la red, las tuberías se encuentran cubiertas y el cambio continuo del diámetro a lo largo del tiempo; de tal forma es necesario estimar su valor a través del proceso de calibración.

1.12.3 Rugosidad. Representa las irregularidades presentes en las tuberías las cuales favorecen las pérdidas de energía. Estas irregularidades dependen del tipo de material por lo tanto se establece un valor promedio que simule el comportamiento del fluido en el interior de la red. El diámetro de las tuberías puede variar a lo largo del tiempo lo que hace modificar el coeficiente de calibración de las mismas, por tal se realiza el proceso de calibración para estimar el valor de las misma en las redes de distribución de agua potable.

La siguiente tabla presenta el valor del coeficiente K_s para tuberías nuevas de acuerdo al material de elaboración, identificadas en el Distrito de Florida, Bucarica y Caracolí.

Tabla 1. Rugosidades absolutas (k_s) para diferentes materiales utilizados.

| MATERIAL | K_s (mm) |
|--------------------|------------------------------|
| PVC | 0.0015 |
| ASBESTO CEMENTO | 0.03 |
| HIERRO FORJADO | 0.09 |
| HIERRO GALVANIZADO | 0.15 |
| HIERRO FUNDIDO | 0.25 |
| HIERRO DUCTIL | 0.26 |

2. ANTECEDENTES

Como ya se mencionó anteriormente, la disminución del Índice de Agua No Contabilizada (IANC) es uno de los principales objetivos que tiene el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A E.S.P, aunque cuenta actualmente con unos de los índices más bajos en el país queriendo disminuir las pérdidas económicas que representa. De esta manera surgió la necesidad de desarrollar una metodología que permitiera identificar los puntos en la red que afectaran de manera considerable al sistema y así mejorar sustancialmente la respuesta de la Empresa frente a cualquier suceso en la red de suministro.

Esta metodología consiste en desarrollar un modelo hidráulico idealizado en el software EPANET 2.0 y comparado con las mediciones hechas en campo por la empresa, incluyendo el catastro de la red actualizado, para poder identificar los puntos que no posean un adecuado nivel de presión y caudal. A partir de estos puntos realizar las respectivas revisiones de cada distrito para localizar el daño, estimar las posibles pérdidas de agua potable y soluciones correspondientes.

2.1 PROYECTOS DESARROLLADOS¹⁹

A continuación se presenta una lista de los principales proyectos desarrollados mediante la calibración de redes de distribución y plano óptimo de presiones, desarrollados en los últimos años:

- Diseño e implementación de un plan estratégico de manejo de las redes de distribución de agua potable de los municipios de Andalucía, Ansermanueva, Bolívar, Bugalagrande, Candelaria, Ginebra, Guacarí, La Cumbre y Toro. Entidad financiadora: ACUAVALLE.
- Determinación del plano óptimo de presiones en los sectores 8 y 35 de la red de distribución de agua potable de la ciudad de Bogotá. Entidad financiadora: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá EAAB.

¹⁹ Jurado, Cesar Mauricio." Metodología de Calibración de Redes de Distribución de Agua Potable". Universidad de los Andes, Bogotá enero de 2007.

- Determinación de plano óptimo de presiones en redes de distribución de agua potable y control de agua no contabilizada. Entidad financiadora: Agua de Manizales S.A. E.S.P.
- Plano óptimo de presiones del Distrito Estadio de la Red de Distribución de la Ciudad de Bucaramanga: entidad financiadora: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga amb S.A. E.S.P.

3. DESCRIPCIÓN DE LA RED DEL DISTRITO FLORIDA, BUCARICA Y CARACOLÍ

El distrito conformado por Florida, Bucarica y Caracolí, cuenta con una red de abastecimiento de agua potable compuesta por 87.42 km de tuberías de diferentes diámetros, se encuentran 6 tipos de materiales, siendo el PVC y el asbesto cemento los más utilizados.

El sistema de abastecimiento se conforma por la planta de tratamiento de Florida y 2 tanques de almacenamiento ubicados en cercanías de Bucarica y Caracolí.

La Planta Floridablanca se encuentra en la zona suroriental del área metropolitana de Bucaramanga, en la parte alta de los barrios Bucarica y Caracolés del municipio de Floridablanca, a una altura media de 1042 msnm y está destinado a tratar las aguas provenientes de las fuentes de la hoya del Rio Frio, para abastecer su zona de influencia.

La red se encuentra equipada con 6 válvulas reguladoras de presión y 3984 tuberías que en total suman alrededor de 87.42 km, la cual presenta una gran variedad de diámetros y materiales.

3.1 DESCRIPCIÓN TOPOLÓGICA DE RED

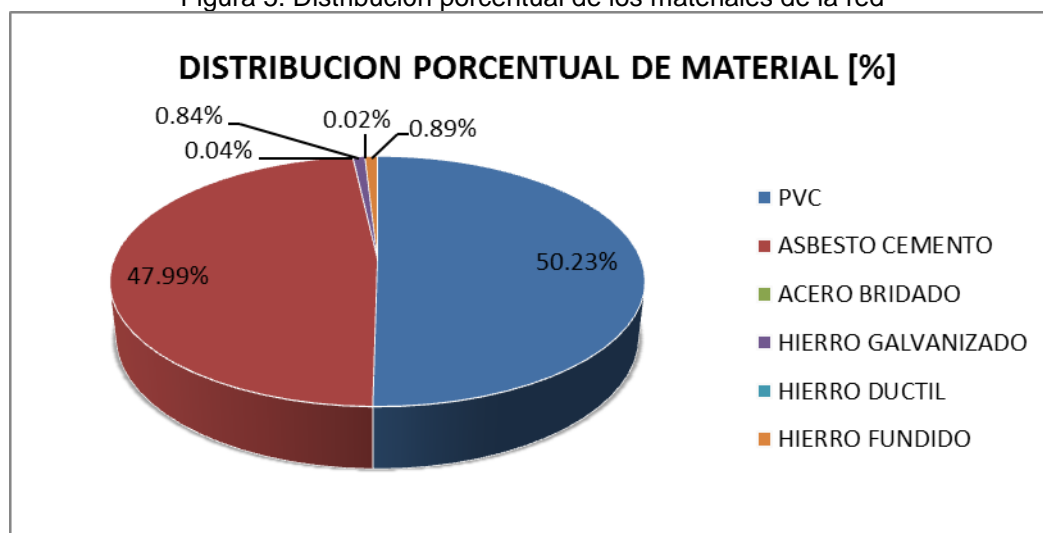
De todos los materiales presentes se destaca el PVC con un 50% de la red en longitud seguido por el asbesto cemento con el 48%, los demás porcentajes se muestran en la siguiente tabla, seguido por la gráfica. (Ver anexo A.1)

Tabla 2. Materiales presentes en longitud de la red.

| MATERIALES | RUGOSIDAD | LONGITUD [m] | PORCENTAJE [%] |
|--------------------|-----------|-----------------|----------------|
| PVC | 0.0015 | 43910.05 | 50.23 |
| ASBESTO CEMENTO | 0.03 | 41949.14 | 47.99 |
| ACERO BRIDADO | 0.09 | 32.92 | 0.04 |
| HIERRO GALVANIZADO | 0.15 | 731.89 | 0.84 |
| HIERRO DUCTIL | 0.25 | 17.46 | 0.02 |
| HIERRO FUNDIDO | 0.26 | 778.61 | 0.89 |
| TOTAL | | 87420.07 | 100% |

Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

Figura 5. Distribución porcentual de los materiales de la red



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

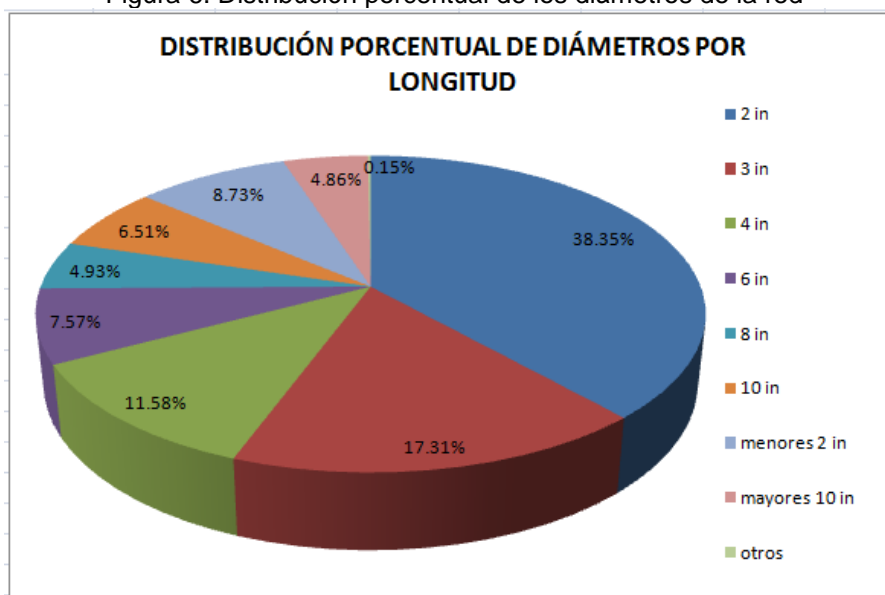
Además de la caracterización basada en los materiales, las redes de distribución de agua potable también pueden describirse a partir de los diámetros de las tuberías que la integran. Para el caso del distrito de Florida, Bucarica y Caracolí, se presentan una gran variedad de diámetros, de los cuales el más abundante en longitud de tubería tiene una magnitud de 2 in (50.8 mm) y corresponde al 15.03% de la red. A este diámetro le siguen 2 in (54,356 mm) con un presencia de 11.11%. Las tuberías de 2 in (49,784 mm) representan el 12.20%, 3 in (80,518 mm) representan el 6.68%, 4in 103,378 mm representan el 5.74%, 3 in (76.2 mm) representan el 5.35%, 3 in (74.93 mm) representan el 5.19%. Las tuberías de diámetros de 3.5 in (38.1 mm, 43.434 mm), 4 in (99.822 mm), 6 in (149.86 mm) se encuentran entre el 3.04% y el 4.45%. La resto de diámetros representan longitudes de la red muy pequeñas que corresponden a porcentajes inferiores al 3%, que se muestran en la siguiente tabla, seguido por la gráfica (Ver anexo A.2).

Tabla 3. Distribución porcentual de los diámetros de la red
Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

| DIAMETROS [in] | PORCENTAJE [%] |
|----------------|----------------|
| 2 in | 38.35% |
| 3 in | 17.31% |
| 4 in | 11.58% |
| 6 in | 7.57% |
| 8 in | 4.93% |
| 10 in | 6.51% |
| menores 2 in | 8.73% |

| | |
|---------------|----------------|
| mayores 10 in | 4.86% |
| otros | 0.15% |
| TOTAL | 100.00% |

Figura 6. Distribución porcentual de los diámetros de la red



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

3.4 DESCRIPCIÓN DEL USO DE LA RED

Este distrito se encuentra al sur de la ciudad de Bucaramanga y se extiende desde los límites orientales a los occidentales de la ciudad. Al norte se encuentra limitado por los sectores correspondientes a Malpaso, Cañaveral, El Carmen, La Cumbre, Villabel Alto y Bajo, Bellavista y Santa Ana. Esto quiere decir, que gran parte del costado norte está trazado por el río Frío.

Esta zona se caracteriza por tener construcciones de tipo semi-urbano dado que la mayoría se encuentran hacia las afueras de la ciudad. Entre los barrios de mayor tamaño están, La Paz, Buenos Aires, Bosques de la Florida, Altos de Caracolí y Jardín del Limoncillo. Adicionalmente en el área existen algunos equipamientos deportivos y recreativos, así como industrias, colegios y edificaciones de tipo oficial. Este es el caso de Club Sport Country, Sede Recreacional Transilvania, Vanguardia Liberal, el Gimnasio San Diego, el Colegio UIS, la Policía de Carreteras y la Electrificadora Santander.

El modelo está compuesto por 2870 nodos y 3203 tubos, los cuales conforman la red de 874200 m de longitud que es utilizada para suplir una demanda de 153.96 L/s para 14464 usuarios.

Los usuarios de estratos superiores a estrato 6 poseen una clasificación especial en los sectores componentes del distrito, debido a que estos poseen acometidas del mismo tamaño del macromedidor, la clasificación de dichos estratos se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 4. Clasificación de estrato

| CODIGO | NOMBRE |
|---------------|-----------------|
| 0 | NO EXISTE |
| 1 | ESTRATO 1 |
| 2 | ESTRATO 2 |
| 3 | ESTRATO 3 |
| 4 | ESTRATO 4 |
| 5 | ESTRATO 5 |
| 6 | ESTRATO 6 |
| 7 | MENOR A 5/8" |
| 8 | 3/4" |
| 9 | 1" |
| A | MAYOR A 1" |
| B | GRAN PRODUC 2-3 |
| C | CATEGORIA 3 |
| D | DEMOLIDO/INEXIS |
| E | ESPECIAL ASEO |
| F | CATEGORIA 1 |
| G | GRAN PRODUCTOR |
| H | CATEGORIA 2-1 |
| I | CATEGORIA 2-2 |
| J | CATEGORIA 2-3 |
| K | CATEGORIA 2-4 |
| L | PEQ PROD SIN AP |
| M | GRAN PRO SIN AP |
| N | NO LIQUIDA ASEO |
| P | PLAZAS |
| Q | PEQ PRODUCTOR |
| R | MEDIDOR CONTROL |
| S | ESPECIAL ASEO |
| T | GRAN PRODUC 3-4 |
| U | EXCLUIDO |
| V | GRAN PRODUC 5-6 |
| W | GRAN PRODUC 4-5 |
| X | ESPECIAL |
| Y | RUIOQUE E.S.P |
| Z | CAMB |

Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

3.4.1 Descripción del sector de Bucarica. El sector de Bucarica se clasifica de acuerdo al uso y al estrato socio-económico presente.

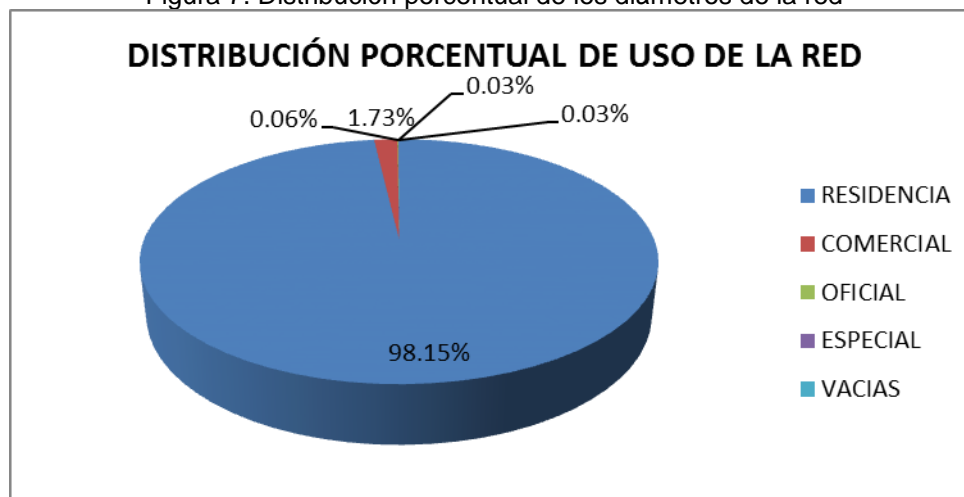
3.4.1.1 Descripción del sector de Bucarica según el uso. El distrito de Bucarica presenta la siguiente configuración de usuarios inscritos de acuerdo al uso que se le da al servicio de distribución de la red de agua potable, mostrada en la siguiente tabla, seguida por la gráfica.

Tabla 5. Cantidad de usuarios según uso del sector de Bucarica.

| USO | CANTIDAD DE USUARIOS |
|-----------------------------------|----------------------|
| RESIDENCIAL | 3398 |
| COMERCIAL | 60 |
| OFICIAL | 2 |
| ESPECIAL | 1 |
| NO DEFINIDAS | 1 |
| CANTIDAD TOTAL DE USUARIOS | 3462 |

Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

Figura 7. Distribución porcentual de los diámetros de la red



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

El sector de Bucarica se caracteriza por el uso residencial en su mayoría con un porcentaje del 98.15%, seguido por el uso comercial en un 1.73% y los demás usos con porcentajes muy pequeños.

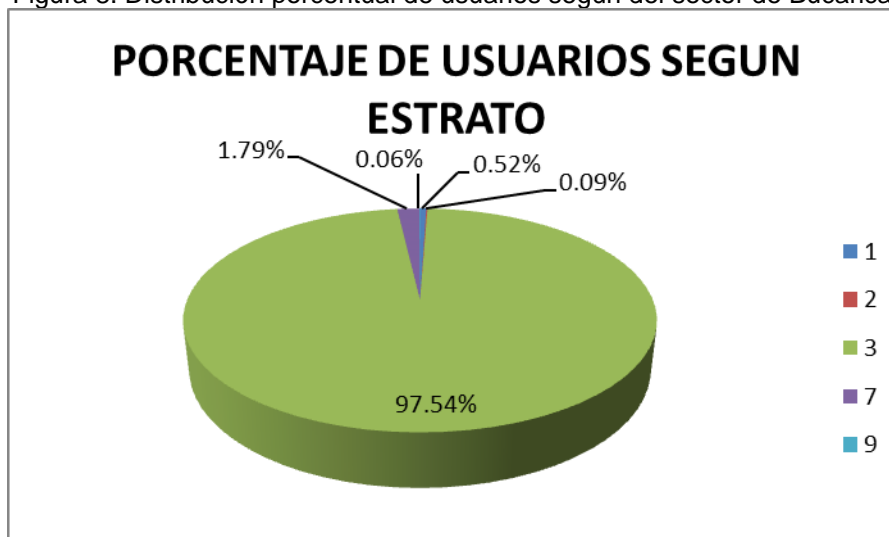
3.4.1.2 Descripción del sector de Bucarica según el estrato socio-económico. La siguiente distribución de acuerdo al estrato se encuentra clasificada de la siguiente manera para el distrito de Bucarica.

Tabla 6. Cantidad de usuarios según estrato del sector de Bucarica.

| ESTRATO | CANTIDAD DE USUARIOS |
|---------|----------------------|
| 1 | 18 |
| 2 | 3 |
| 3 | 3377 |
| 7 | 62 |
| 9 | 2 |

Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

Figura 8. Distribución porcentual de usuarios según del sector de Bucarica.



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

El sector de Bucarica se caracteriza por el uso albergar en su mayoría usuarios clasificados en estrato 3 con porcentaje del 97.54%, seguido por el estrato 7 en un 1.79% y los demás estratos con porcentajes muy pequeños.

3.4.2 Descripción del sector de Florida. El sector de Florida se clasifica de acuerdo al uso y al estrato socio-económico presente.

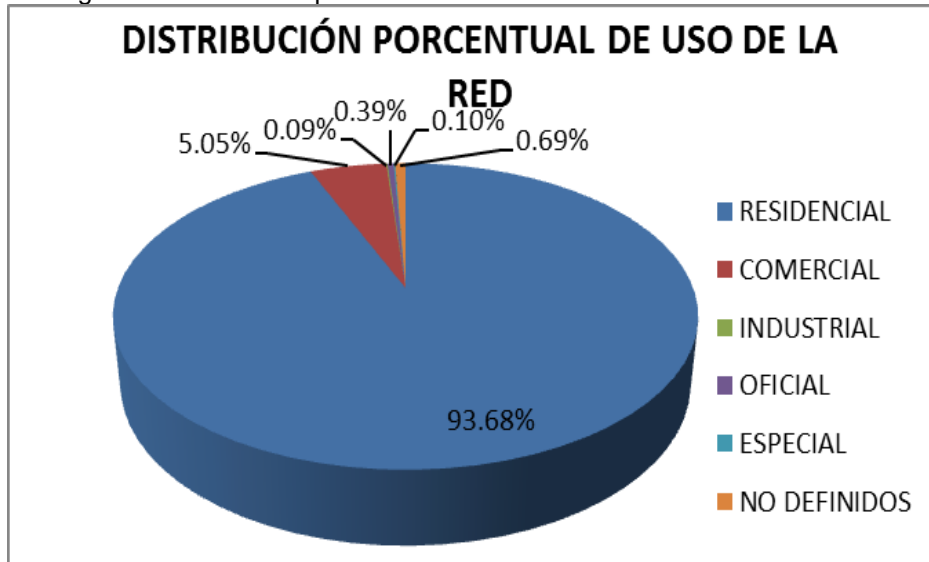
3.4.2.1 Descripción del sector de Florida según el uso. El distrito de Florida presenta la siguiente configuración de usuarios inscritos de acuerdo al uso que se le da al servicio de distribución de la red de agua potable, mostrada en la siguiente tabla, seguida por la gráfica.

Tabla 7. Cantidad de usuarios según uso del sector de Florida.

| USO | CANTIDAD DE USUARIOS |
|-----------------------------------|----------------------|
| RESIDENCIAL | 9347 |
| COMERCIAL | 504 |
| INDUSTRIAL | 9 |
| OFICIAL | 39 |
| ESPECIAL | 10 |
| NO DEFINIDAS | 69 |
| CANTIDAD TOTAL DE USUARIOS | 9978 |

Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

Figura 9. Distribución porcentual del uso de la red del sector de Florida



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

El sector de Florida se caracteriza por el uso residencial en su mayoría con un porcentaje del 93.68%, seguido por el uso comercial en un 5.05% y los demás usos con porcentajes muy pequeños.

3.4.2.2 Descripción del sector de Florida según el estrato socio-económico.

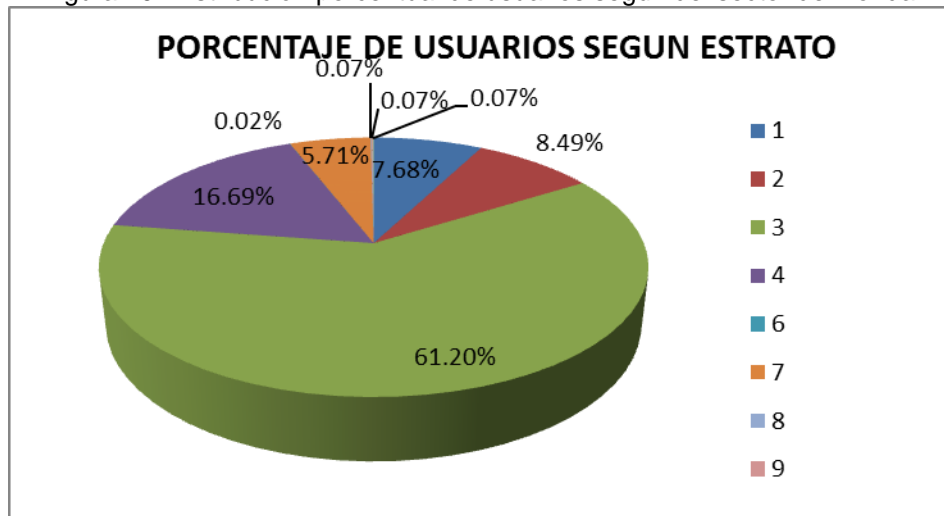
La siguiente distribución de acuerdo al estrato se encuentra clasificada de la siguiente manera para el distrito de Florida.

Tabla 8. Cantidad de usuarios según estrato del sector de Florida.

| ESTRATO | CANTIDAD DE USUARIOS |
|--------------|----------------------|
| 1 | 766 |
| 2 | 847 |
| 3 | 6107 |
| 4 | 1665 |
| 6 | 2 |
| 7 | 570 |
| 8 | 7 |
| 9 | 7 |
| NO DEFINIDAS | 7 |

Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

Figura 10. Distribución porcentual de usuarios según del sector de Florida.



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

El sector de Florida se caracteriza por el uso albergar en su mayoría usuarios clasificados en estrato 3 con porcentaje del 61.20%, seguido por el estrato 4 en un 16.69%, estrato 2 con un 8.49%, estrato 1 con un 7.68%, estrato 7 con un 5.71% siendo estos estratos los más representativos en el sector de Florida, y los demás estratos con porcentajes muy pequeños.

3.4.3 Descripción del sector de Caracolí. El sector de Caracolí se clasifica de acuerdo al uso y al estrato socio-económico presente.

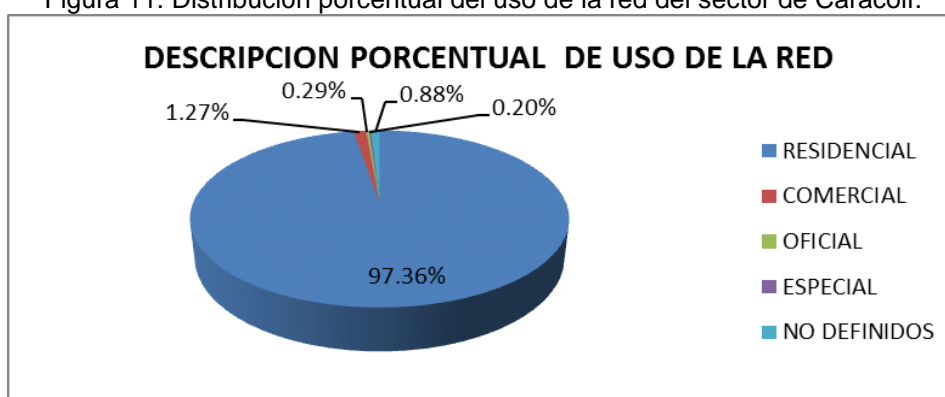
3.4.3.1 Descripción del sector de Caracolí según el uso. El distrito de Caracolí presenta la siguiente configuración de usuarios inscritos de acuerdo al uso que se le da al servicio de distribución de la red de agua potable, mostrada en la siguiente tabla, seguida por la gráfica.

Tabla 9. Cantidad de usuarios según uso del sector de Caracolí.

| USO | CANTIDAD DE USUARIOS |
|-----------------------|----------------------|
| RESIDENCIAL | 997 |
| COMERCIAL | 13 |
| OFICIAL | 3 |
| ESPECIAL | 2 |
| NO DEFINIDAS | 9 |
| CANTIDAD TOTAL | 1024 |

Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

Figura 11. Distribución porcentual del uso de la red del sector de Caracolí.



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

El sector de Caracolí se caracteriza por el uso residencial en su mayoría con un porcentaje del 97.36%, seguido por el uso comercial en un 1.27% y los demás usos con porcentajes muy pequeños

3.4.3.2 Descripción del sector de Caracolí según el estrato socio-económico.

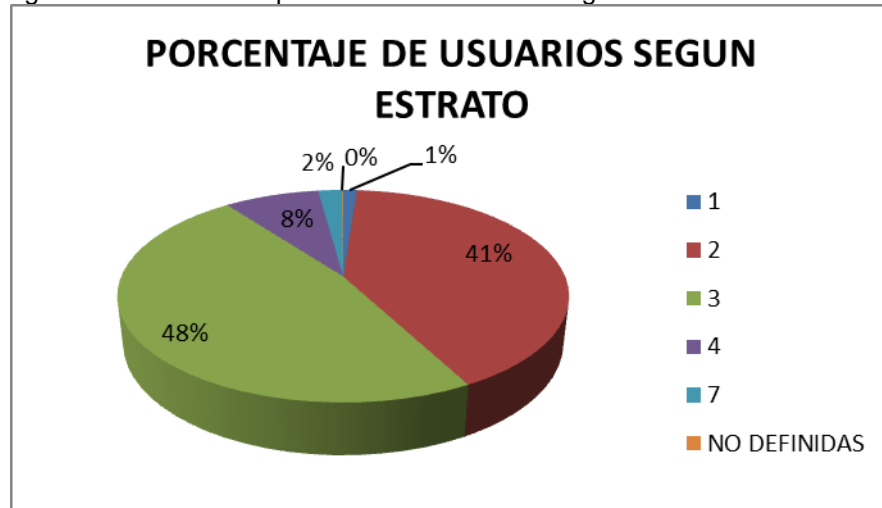
La siguiente distribución de acuerdo al estrato se encuentra clasificada de la siguiente manera para el distrito de Florida.

Tabla 10. Cantidad de usuarios según estrato del sector de Caracolí.

| ESTRATO | CANTIDAD DE USUARIOS |
|--------------|----------------------|
| 1 | 12 |
| 2 | 420 |
| 3 | 487 |
| 4 | 83 |
| 7 | 21 |
| NO DEFINIDAS | 1 |

Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

Figura 12. Distribución porcentual de usuarios según del sector de Caracolí.



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

El sector de Caracolí se caracteriza por el uso albergar en su mayoría usuarios clasificados en estrato 3 con porcentaje del 48%, seguido por el estrato 2 en un 41%, estrato 4 con un 8%, estrato 7 con un 2%, estrato 1 con un 1% siendo estos estratos los más representativos en el sector de Florida, y los demás estratos con porcentajes muy pequeños.

4. SOFTWARE UTILIZADOS EN EL PROCESOS DE CALIBRACIÓN

En el proceso de calibración de una red de distribución de agua potable es necesario realizar un modelo hidráulico en un software que satisfaga todas las necesidades técnicas y computacionales, para la calibración del modelo del distritito de Florida, Bucarica y Caracolí se utilizó el programa **EPANET** y el programa **CALIBRA** los cuales serán descritos a continuación.

4.1 EPANET²⁰

EPANET es un programa orientado al análisis del comportamiento de los sistemas de distribución de agua y el seguimiento de la calidad del agua, de distribución libre, elaborado por La Agencia para la Protección del Medio Ambiente de EEUU, EPA por sus siglas en inglés (*Environmental Protection Agency*). Una red puede estar constituida por tuberías, nodos (uniones de tuberías), bombas, válvulas y tanques de almacenamiento o embalses. De esta manera la herramienta efectúa un seguimiento de la evolución de los caudales en las tuberías, las presiones en los nodos, los niveles en los tanques, y la concentración de las especies químicas presentes en el agua, a lo largo del periodo de simulación discretizado en múltiples intervalos de tiempo. Su acogida se debe principalmente que su creador L. Rossman, utilizó una interfaz gráfica potente y de fácil manejo.

Las múltiples aplicaciones del programa es lo que garantiza tanto su uso, como la optimización de las redes de distribución y el análisis de sus diferentes variables; entre estas aplicaciones cabe nombrar el trazado y selección de nuevos elementos, la detección de los 'cuellos de botella' de la red, la evaluación de la calidad y tiempo de vida de los materiales, la regulación de las presiones en la red, la reducción de los costos de operación, la regulación del uso de los tanques para reducir los tiempos de retención del agua, la previsión de la respuesta de la red ante la clausura de un punto de alimentación o la incorporación de nuevas urbanizaciones, la planificación de actuaciones en casos de emergencia, como la entrada de un contaminante no controlado, la localización de estaciones de recloración, la sectorización de la red para el control de fugas.

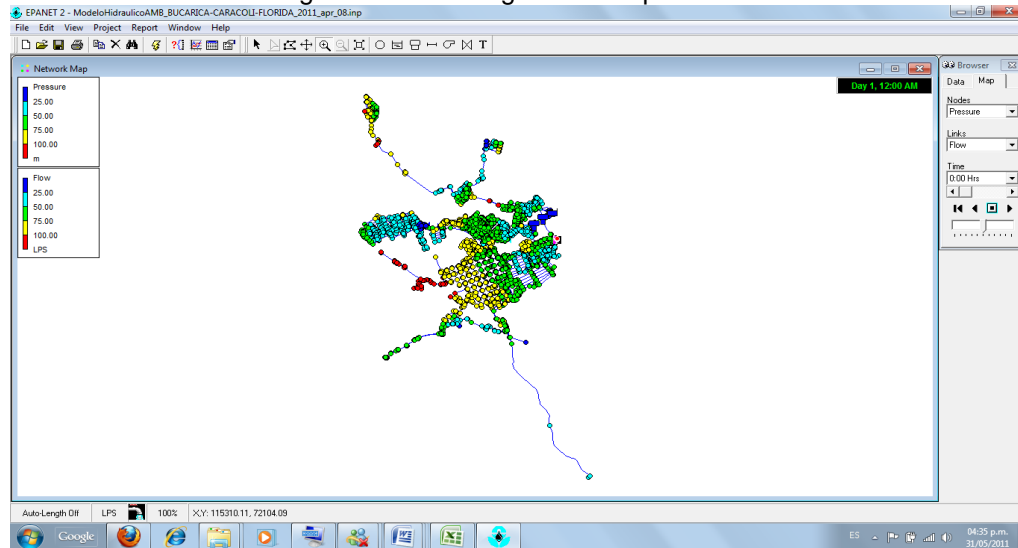
De esta manera la creación de modelos permite que la toma de decisiones técnicas en las empresas se presente de una mejor manera, identificando solamente los factores que estén afectando determinada operación. Además permite modificar el régimen de bombeo, o de llenado y vaciado de los depósitos, también establecer planes de limpieza y reposición de tuberías.

Las actuales modificaciones hechas al programa han permitido un nuevo entorno para manejar con destreza gráficos de redes complejas, de esta manera se puede

²⁰ EPANET 2, Manual de Usuario en Español, traducido por Fernando Martínez Alzamora, Universidad Politécnica de Valencia, España.

trabajar con redes que posean un gran número de nodos y ocupar menos memorias al guardar la información. También la adopción de unidades del Sistema Internacional, así como la ecuación de Darcy-Weisbach, son entre otras las series de mejoras que permiten trabajar de mejor manera en el programa.

Figura 13. Interfaz gráfica de Epanet 2.0.



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

4.1.1 Capacidades de Epanet

- No existe límite en cuanto al tamaño de la red que puede procesarse.
- Las pérdidas de carga pueden calcularse mediante las fórmulas de Hazen-Williams, de Darcy-Weisbach o de Chezy-Manning.
- Contempla pérdidas menores en codos, accesorios, etc.
- Admite bombas de velocidad fija o variable.
- Determina el consumo energético y sus costos.
- Permite considerar varios tipos de válvulas, tales como válvulas de corte, de retención, y reguladoras de presión o caudal.
- Permite considerar diferentes tipos de demanda en los nudos, cada uno con su propia curva de modulación en el tiempo.
- Permite modelar tomas de agua cuyo caudal dependa de la presión.

4.2 CALIBRA²¹

Es un programa desarrollado por el centro de investigación **CIACUA** de la **UNIVERSIDAD DE LOS ANDES** de Colombia que facilita el proceso de calibración por ensayo y error de los modelos a analizar. Además permite la comparación de los diversos escenarios creados con los datos de medición de campo, en parámetros tanto de caudal como de energía, mediante una interfaz gráfica que se cubre las necesidades requeridas por parte del usuario para mejorar su comprensión.

La creación del programa surge por la necesidad de optimizar el proceso de calibración y lograr que la red de distribución trabaje de la mejor manera en un adecuado Plano Optimo de Presiones. (Ver anexo B).

²¹ CALIBRA 2006, Manual de Usuario, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados, Universidad de los Andes, Colombia.

5. CALIBRACIÓN DE LA RED DEL DISTRITO

5.1 MEDICIONES EN LA RED DEL DISTRITO

En las mediciones de presión y caudal se disponen una serie de nodos en los cuales se encuentran los puntos de presión baja, presión alta y puntos rotación, en las mediciones de caudal se ubican las tuberías que conduzcan el caudal de consumo de los usuarios de la red.

5.1.1. Medición De Presión. Las mediciones de presión se realizan por medio de manómetros digitales los cuales son instalados en nodos que han sido establecidos de acuerdo al régimen de presión en que se encuentran, esta información es descargada en la base de datos del programa **SIIDAR** del Acueducto Metropolitano De Bucaramanga **amb** como datos crudos (información sin procesar) estos datos son filtrados cada 15 minutos por 24 horas iniciando desde la hora 00:00, en esta red se hizo uso de 10 nodos en diferente régimen, los manómetros registran las presiones en **psi** los que se multiplican por el factor 0.7035 para transformarlos en **metros de columna de agua m.c.a**, en la siguiente tabla se muestra el tipo régimen y la dirección de ubicación en el distrito.

Tabla 11. Listado de Nodos.

| Régimen De Presión | Nodo | Dirección |
|-----------------------------------|----------|--|
| Presión Baja | 7776 | Cra 2 # 24a-8 Florida |
| | 1928 | Cra10 #7-06 Caracolí |
| | 1879 | Cra 10 AE # 25b-04 lote 39 Florida |
| Punto de Rotación | 1913 | Cra 7 # 5-54 Florida |
| Presión alta válvulas reguladoras | 5508 | Entrada Villa Jardín (aguas abajo) |
| | vf_5508 | Entrada Villa Jardín (aguas arriba) |
| | 4937 | Cra 3 Calle 5, Entrada Lagos II |
| | vf_4937 | Cra 3 Calle 5, Entrada Lagos II |
| | 61588 | Paraguitas dentro del Jardín Botánico (aguas abajo) |
| | vf_61588 | Paraguitas dentro del Jardín Botánico (aguas arriba) |

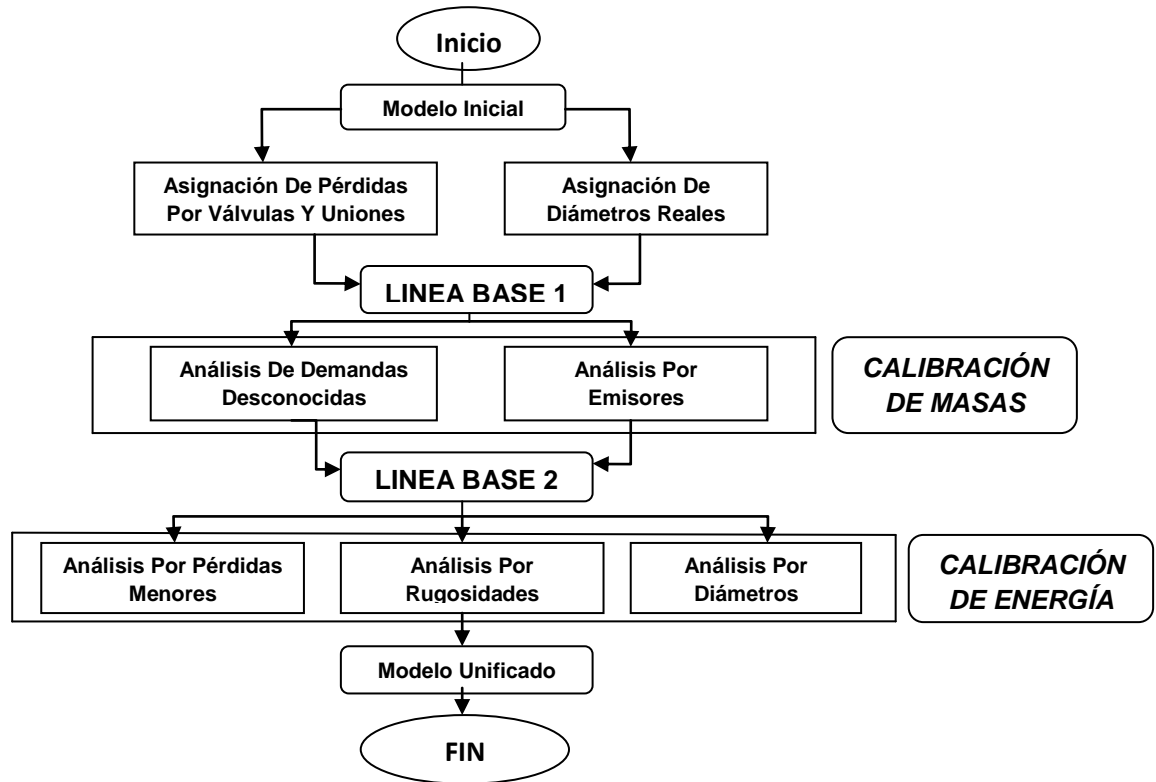
Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

5.1.2. Medición De Caudal

- La mediciones de caudal se realizan por 2 métodos diferentes, el primero se realiza por medio de caudalímetros digitales los cuales son instalados en las tuberías de la red, en este caso se instaló en las tuberías de salida de los tanques de Florida, Bucarica y Caracolí, los datos de dichas mediciones son descargadas en la base de datos y procesadas de igual forma que las mediciones de presión como se mencionó anteriormente, debido a las complicaciones climáticas dichas mediciones se rechazaron por daños en tuberías a causa de deslizamientos de tierra afectando no solamente las mediciones sino el consumo de los usuarios.(Ver anexo C).
- La segunda forma de realizar las mediciones de caudal es por medio de un balance de masas en los tanques del distrito, registrando los niveles del agua almacenada en el tanque cada 15 minutos durante 24 horas continuas e instalando un caudalímetro en la tubería de entrada, procesando estos datos se obtiene el caudal de salida del tanque, este proceso se realizó en los tanques de distribución de Bucarica y Caracolí.
- La tercera forma de medir los caudales es tomar la mediciones a la salida de la planta de tratamiento, estos datos tienen un comportamiento de pulsos de carga y descarga de caudal debido al estado los flotadores en los tanques de Bucarica y Caracolí, con una serie de 90 días, las 24 horas y cada minuto, estos datos se promedian para obtener la curva de caudal de consumo de la red del distrito.

Para realizar el proceso de calibración de la red del distrito es necesario seguir una metodología que abarque todos los pasos necesarios para la obtención de buenos resultados, haciendo la revisión bibliográfica y apoyada en el estado del arte de proyectos de calibración de redes similares a este, la metodología utilizada se expresa en el siguiente diagrama de flujo.

Figura 14. Diagrama de flujo de metodología empleada.



Fuente: Jurado, Cesar Mauricio. Metodología de Calibración de Redes de Distribución de Agua Potable

5.2 MODELO INCIAL

El modelo inicial de la red de distribución de agua potable del distrito de Florida, Bucarica y Caracolí fue suministrado por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga **amb**, empresa que posee en su base de datos la topología, catastro, topografía, curvas de demanda y demás variables hidráulicas necesarios para la creación del modelo de dicho distrito.

Para el distrito de Florida, Bucarica y Caracolí; se obtuvo la gráfica 15 que representa el caudal de salida de la planta tanto medido como modelado.

Figura 15. Caudal de salida medido y sin calibrar de la planta de tratamiento de Floridablanca.

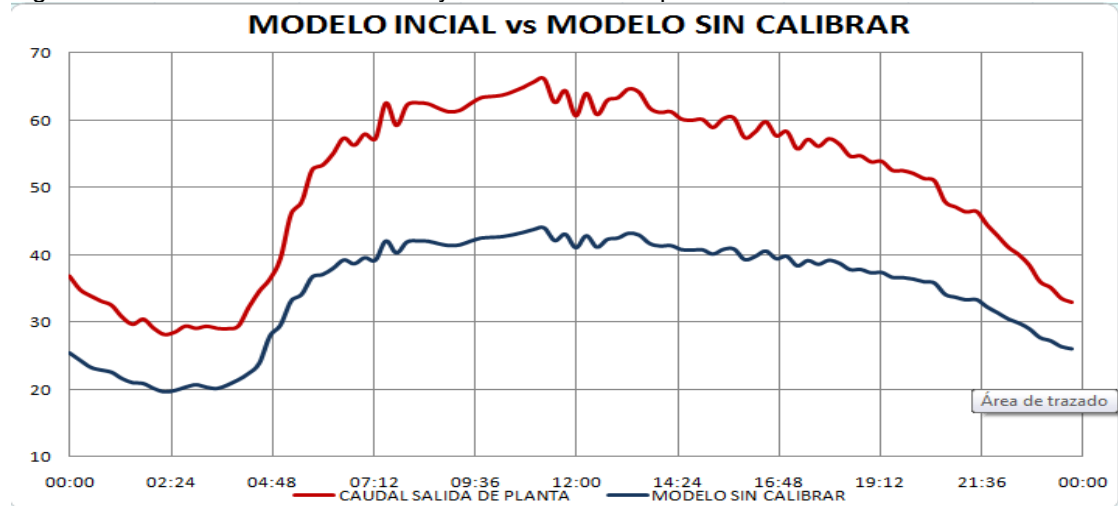
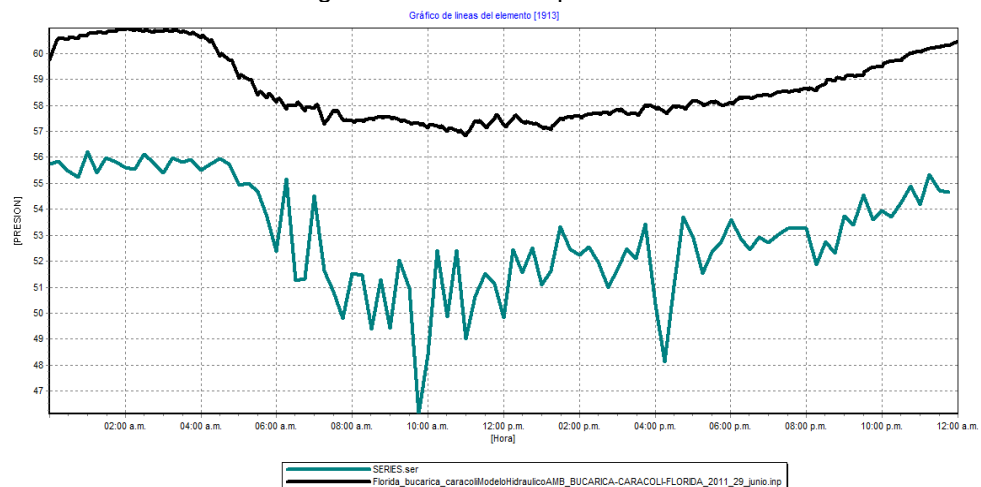


Figura 16. Presión en punto 1913



El modelo hidráulico es revisado minuciosamente para que el software **EPANET** corra el modelo, dicha revisión se hace en cada una de los componentes del modelo tales como nodos, válvulas, tuberías, tanques, embalses, curvas de modelación y de demanda, etc. La duración de esta actividad depende del número de errores al momento de la creación del modelo, entre los errores más frecuentes se encuentran.

- Nodos sin asignación de la curva de demanda.
- Válvulas abiertas, cerradas o aperturas incorrectas.
- Tuberías en estado cerrado, longitudes, diámetros y rugosidades incorrectas.
- Tuberías no pertenecientes al distrito.
- Tanques con alturas topográficas incorrectas, niveles bajos en el tanque y variables de entrada erróneas.

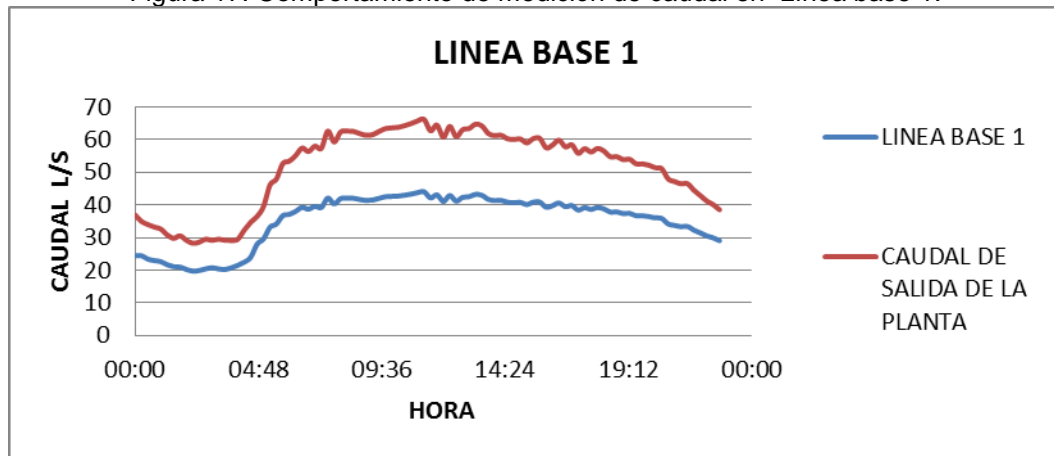
- Embalses con alturas topográficas incorrectas.

La corrección de los anteriores errores se realiza directamente en la interfaz gráfica del programa en el archivo **.NET** o en la extensión **.INP** la cual exporta la información del programa en forma de texto, archivo que es compatible con los programas **Microsoft Excel o Block de Notas** y de esta forma ser modificado.

5.3 LÍNEA BASE 1

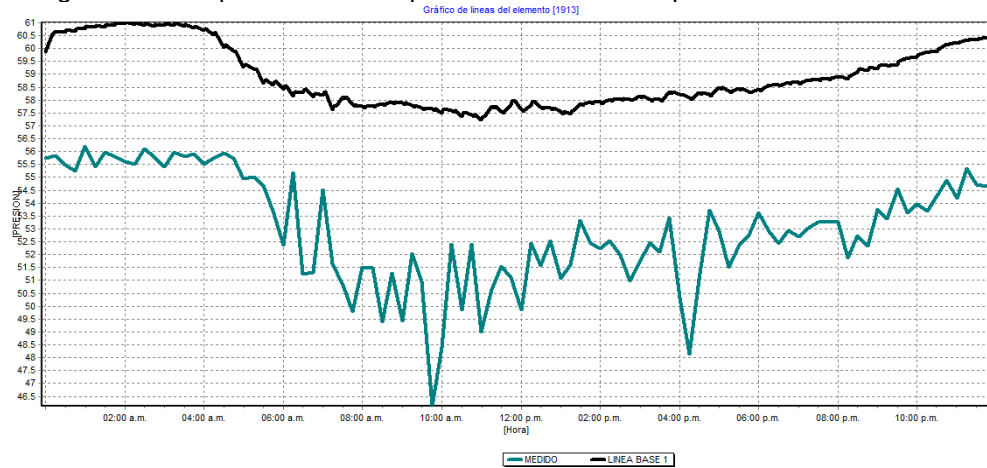
La línea base 1 muestra la gráfica inicial del modelo hidráulico sin ningún escenario de calibración, en la línea base solo se considera la asignación de diámetros reales en cada tipo de material. La siguiente grafica representa la línea base 1.

Figura 17. Comportamiento de medición de caudal en Línea base 1.



Al asignar los diámetros reales, la curva del modelo varía muy poco lo cual permite percibir que los cambios que se realicen en la modificación de los diámetros no generan cambios considerables a la curva Base 2, la cual tendrá explicación más adelante.

Figura 18. Comportamiento del punto de medición de presión en Línea base 1.



Con respecto a los puntos de medición de presión 1913 en los cuales las modificaciones incluidas por la Línea base 1 se esperaba tuvieran un efecto directo. Por lo tanto no existen ninguna diferencia entre el modelo Línea Base 1 (Figura 17 y Figura 18) y los del modelo sin calibrar (Figura 15 y Figura 16).

La calibración del modelo hidráulico se realiza comparando las mediciones de presión y caudal en la red, dichas mediciones son realizadas en diferentes nodos y tuberías de la red del distrito de Florida, Bucarica y Caracolí.

5.3.1 Análisis por demandas desconocidas. El análisis por demanda se realiza teniendo en cuenta los nodos de la red del distrito los cuales están asociados a una curva de modulación de demanda correspondiente al mismo distrito y a un consumo en particular de acuerdo a la facturación hecha para los usuarios de la red, aunque la demanda facturada siempre está por debajo de la real, es necesario conocer en qué proporción esta subestimada la demanda en el modelo.

Este análisis debe contar con la información socioeconómica del distrito y poder identificar cada nodo a un estrato socioeconómico y al uso correspondiente, esta clasificación se expresó anteriormente por cada sector que compone el distrito. La forma de realizar este análisis por demandas es hallar unos factores multiplicadores para cada estrato socioeconómico e ir variando dichos multiplicadores hasta lograr ajustar la curva de caudal de los nuevos modelos a la curva medida en campo, estos multiplicadores deben ser independientes en cada estrato. Por lo tanto de acuerdo a la presión de servicio, al estrato, material y diámetro de la tubería se determina el coeficiente aplicado en cada nodo. Los barrios a los cuales se les aumento la demanda de acuerdo a su estratificación y números de usuarios aplicándole multiplicadores representativos utilizados en la generación de escenarios se pueden ver en las siguientes tablas.

Tabla 12. Clasificación de barrios según estratificación.

| ESTRATO | BARRIOS | USUARIOS |
|----------------|---|-----------------|
| 1 | Altos de la Florida, Belencito, Escoflor, García Echeverri, Los Laureles, Los Olivos, Prados del Sur, Santa Inés, José A. Morales, Las Palmeras entre otros. | 796 |
| 2 | Altos de Bellavista, Altos de Caracoli, Balcón de Alares, Balcón del Reposo, Caracoli, El Carmen I; II; III; IV; V y VI, Nuevo Villabel, Los Robles, San Bernardo, Santa fe, Santa Ana, Villabel, Caldas, PioXII (cumbre), Villa Alcázar entre otros | 1270 |
| 3 | Altamira I, II, III, y casas, Casco Antiguo, Guanaca, Bucarica, Ciudad Valencia, El Dorado, Limoncito, Fátima, Favuis, Nogales de la Florida, Portal de Castilla, Villa España, Bosques de la Florida, Parque San Agustín, Cracovia II, Lagos II, III, IV y V, Los Molinos, Rosales, El Verde, Villa Piedra del Sol, Villa de San Francisco, Torres de Sevilla, Villa Italia, San Ángel, entre otros. | 9971 |
| 4 | Andalucía, Bosque sectores A, B, C, D, La Ronda, Lagos I, Los Andes, Los Pirineos, Alto de Cañaveral I, II, III, IV, Cracovia I, Las Carabelas, Los Guayacanes, Los Trinitarios, Paraguitas, Torres de Aragón, Villa Firenze, Cañaveral, Quitas de Florida, Quintas de Cañaveral, Palmar del Viento, entre otros. | 1748 |
| 6 | Cañaveral Campestre I, II, III, Camino Real, Hoyo Uno, La Perita, Monte Llano Campestre, entre otros. | 679 |
| | TOTAL | 14464 |

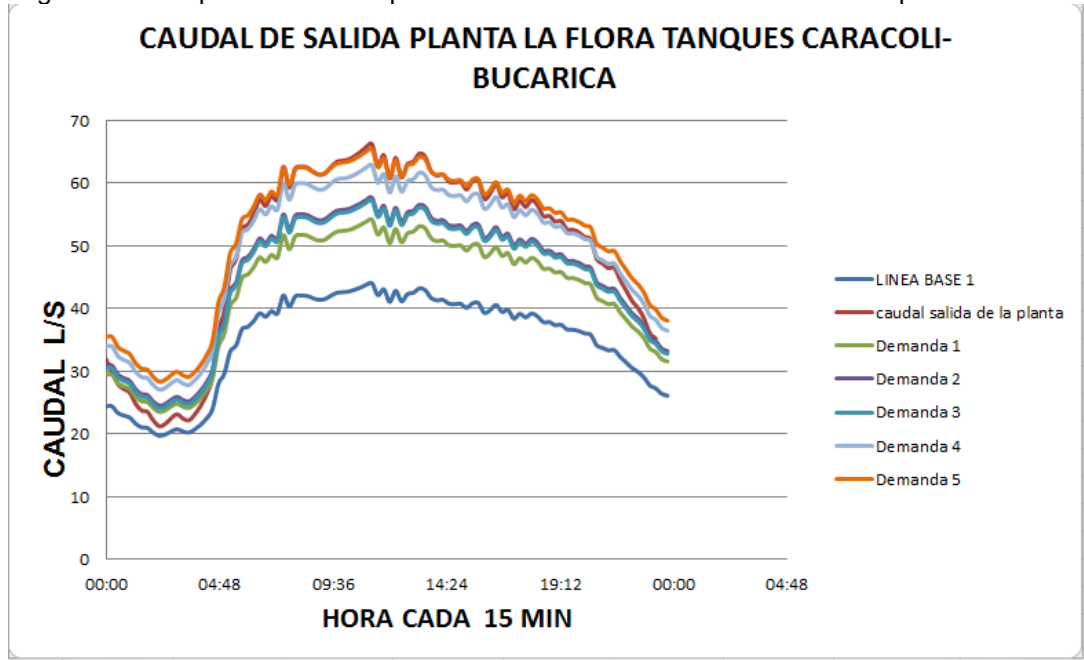
Fuente. <http://www.floridablanca.gov.co>, DANE

Tabla 13. Escenario por demandas y multiplicadores de acuerdo al estrato.

| ESCENARIO | ACCIONES | |
|------------------|--|--|
| Demandas 1 | NodoEstrato_1,DEMANDA,MULTIPLICAR,1 | NodoEstrato_4,DEMANDA,MULTIPLICAR,1 |
| | NodoEstrato_2,DEMANDA,MULTIPLICAR,1 | NodoEstrato_6,DEMANDA,MULTIPLICAR,1 |
| | NodoEstrato_3,DEMANDA,MULTIPLICAR,1.5 | |
| Demandas 2 | NodoEstrato_1,DEMANDA,MULTIPLICAR,0.8 | NodoEstrato_4,DEMANDA,MULTIPLICAR,0.8 |
| | NodoEstrato_2,DEMANDA,MULTIPLICAR,0.8 | NodoEstrato_6,DEMANDA,MULTIPLICAR,0.8 |
| | NodoEstrato_3,DEMANDA,MULTIPLICAR,1.7 | |
| Demandas 3 | NodoEstrato_1,DEMANDA,MULTIPLICAR,0.6 | NodoEstrato_4,DEMANDA,MULTIPLICAR,0.8 |
| | NodoEstrato_2,DEMANDA,MULTIPLICAR,0.6 | NodoEstrato_6,DEMANDA,MULTIPLICAR,0.8 |
| | NodoEstrato_3,DEMANDA,MULTIPLICAR,1.7 | |
| Demandas 4 | NodoEstrato_1,DEMANDA,MULTIPLICAR,1.2 | NodoEstrato_4,DEMANDA,MULTIPLICAR,1.2 |
| | NodoEstrato_2,DEMANDA,MULTIPLICAR,1.2 | NodoEstrato_6,DEMANDA,MULTIPLICAR,1.2 |
| | NodoEstrato_3,DEMANDA,MULTIPLICAR,1.9 | |
| Demandas 5 | NodoEstrato_1,DEMANDA,MULTIPLICAR,1.4 | NodoEstrato_4,DEMANDA,MULTIPLICAR,1.4 |
| | NodoEstrato_2,DEMANDA,MULTIPLICAR,1.4 | NodoEstrato_6,DEMANDA,MULTIPLICAR,1.4 |
| | NodoEstrato_3,DEMANDA,MULTIPLICAR,2 | |
| Demandas 6 | NodoEstrato_1,DEMANDA,MULTIPLICAR,1.1 | NodoEstrato_4,DEMANDA,MULTIPLICAR,1.5 |
| | NodoEstrato_2,DEMANDA,MULTIPLICAR,1.4 | NodoEstrato_6,DEMANDA,MULTIPLICAR,1.2 |
| | NodoEstrato_3,DEMANDA,MULTIPLICAR,2.3 | |
| Demandas 7 | NodoEstrato_1,DEMANDA,MULTIPLICAR,1.1 | NodoEstrato_4,DEMANDA,MULTIPLICAR,1.3 |
| | NodoEstrato_2,DEMANDA,MULTIPLICAR,1.2 | NodoEstrato_6,DEMANDA,MULTIPLICAR,1.2 |
| | NodoEstrato_3,DEMANDA,MULTIPLICAR,2.1 | |
| Demandas 8 | NodoEstrato_1,DEMANDA,MULTIPLICAR,1.1 | NodoEstrato_4,DEMANDA,MULTIPLICAR,1.4 |
| | NodoEstrato_2,DEMANDA,MULTIPLICAR,1.3 | NodoEstrato_6,DEMANDA,MULTIPLICAR,1.2 |
| | NodoEstrato_3,DEMANDA,MULTIPLICAR,2.2 | |
| Demandas 9 | NodoEstrato_1,DEMANDA,MULTIPLICAR,1.1 | NodoEstrato_4,DEMANDA,MULTIPLICAR,1.45 |
| | NodoEstrato_2,DEMANDA,MULTIPLICAR,1.35 | NodoEstrato_6,DEMANDA,MULTIPLICAR,1.2 |
| | NodoEstrato_3,DEMANDA,MULTIPLICAR,2.25 | |
| Demandas 10 | NodoEstrato_1,DEMANDA,MULTIPLICAR,1.1 | NodoEstrato_4,DEMANDA,MULTIPLICAR,1.47 |
| | NodoEstrato_2,DEMANDA,MULTIPLICAR,1.37 | NodoEstrato_6,DEMANDA,MULTIPLICAR,1.2 |
| | NodoEstrato_3,DEMANDA,MULTIPLICAR,2.27 | |

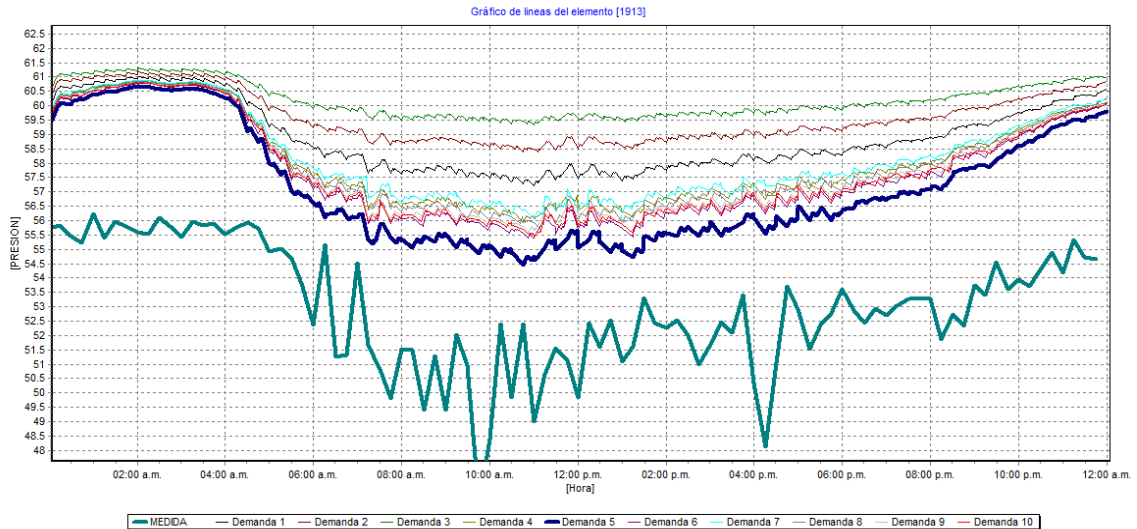
Los resultados al variar el modelo con los escenarios anteriores se muestran en las siguientes graficas:

Figura 19. Comportamiento del punto de medición de caudal en el análisis por demandas.



En la figura 19 se muestra el comportamiento del punto de medición de caudal de la tubería de salida de la planta. Se puede observar que los escenarios mejoran el comportamiento de la curva modelada siendo el escenario 5 de demanda que logra un ajuste ideal de masa, nombrado en la tabla 11. *Demanda 5*.

Figura 20. Comportamiento del punto de medición de presión en el análisis por demandas

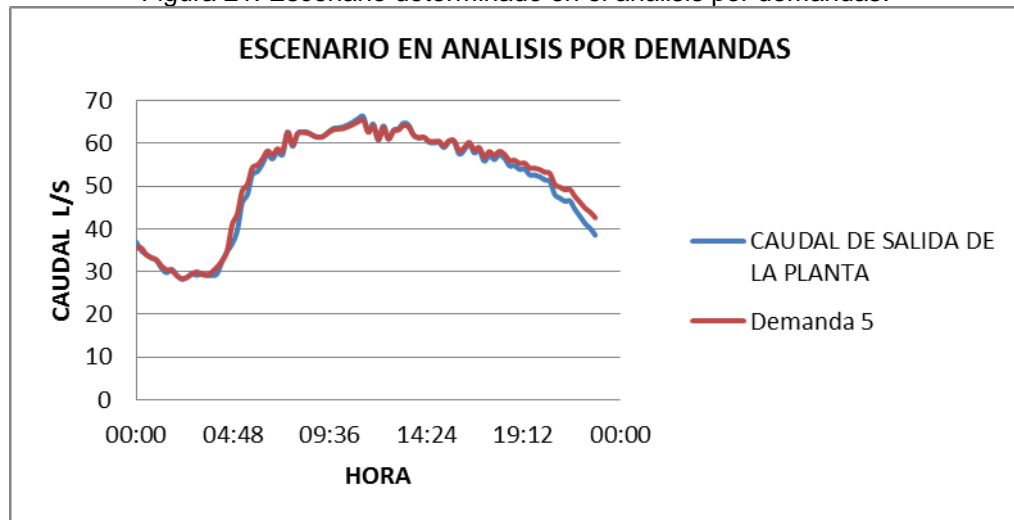


El punto de medición de presión 1913 de la red del distrito de Floridablanca, Bucarica y Caracolí durante el análisis por demandas (Figura 20), presento un

mejor comportamiento con los escenarios probados, siendo el escenario Demandas 5 (Tabla 11) el que consiguió el mejor resultado. Lo anterior se origina debido a que estos escenarios representan estados de demanda alta y por lo tanto disminuye la energía disponible en toda la red.

De esta manera el escenario que presenta un mejor comportamiento es el escenario Demandas 5, logrando balancear la cantidad de masa que entra al sistema, por lo que será considerado el definitivo del análisis de masa por demandas. En la gráfica 21 se puede observar detalladamente la manera como ajusta el escenario Demandas 5 con los datos medidos.

Figura 21. Escenario determinado en el análisis por demandas.



Se puede observar las gráficas de presión de análisis por demandas en Anexo D.

5.3.2 Análisis por emisores. El análisis por emisores se realiza teniendo en cuenta los nodos que están sometidos a grandes presiones debido a que es en estos puntos donde es muy probable se presenten daños en las tuberías por altas presiones soportadas por el material, los nodos asociados a emisores debido a las anteriores circunstancias se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 14. Dirección de emisores en el distrito

| Nodo | Dirección |
|-------------|---|
| 1889 | Cra 1 Calle 7 / Caracolí |
| 1947 | Cra 4A Calle 9 / Caracolí |
| 2028 | Cra 16B Calle 3, Urb. Jardín del limoncito IV ETAPA / Florida |
| 2114 | Cra 16B Calle 3, Urb. Jardín del limoncito IV ETAPA / Florida |
| 267071 | Ruitoque |
| 275753 | Cra 27, TCC / Florida |
| 275756 | Cra 27, SENA / Florida |
| 275763 | Cra 27, Colegio Agustiniiano/Florida |
| 275959 | Cra 8 Calle 1 / Caracolí |
| 4579 | Cra 6 Calle 5, Barrio Altos de Villabel/ Florida |
| 5748 | Urb. Bucarica |
| 5783 | Cra 3 Calle 43, Lagos II / Florida |
| 62083 | Urb. Bucarica, casa 14-16 |
| 62262 | Autopista a Bucaramanga, Estación de servicio TERPEL |
| 6665 | Cra 5 Calle 9 / Florida |
| 6826 | Cra 8 Calle 56, Lagos II / Florida |
| 7343 | Cra 38A Calle 9 / Florida |
| 7480 | Cra 41 Calle 10, Urb. Los Andes/ Florida |
| 7573 | Autopista a Bucaramanga, Entrada a Florida |
| 7720 | Cra 3 Calle 4 / Florida |
| 7737 | Papi quiero Piña / Florida |
| 7795 | Cra 5 Calle 6 / Florida |
| 7826 | Cra 8 Calle 6 / Florida |

Fuente. Archivo propio.

En la calibración se debe tener en cuenta la ubicación de los nodos con mayor presión, los materiales de la tubería, edad de las tuberías ya que cada una de las consideraciones anteriores son totalmente independientes.

Tabla 15. Factores multiplicadores de la demanda utilizados en los distintos estratos

| | presion | | multiplicar según estrato | | | | multiplicador material | | | multiplicador diametro | | |
|------------|---------|--------|---------------------------|-----|-----|------|------------------------|------|------|------------------------|--------|------|
| | alta | baja | 1 | 2 | 3 | 4 | AC | PVC | HD | <50 | 50-100 | >100 |
| emisores 1 | 0.001 | 0.0003 | 1.7 | 1.2 | 1 | 1 | 1.5 | 1 | 1 | 1 | 1.2 | 1.5 |
| emisores 2 | 0.009 | 0.0009 | 2.9 | 1.5 | 1.2 | 1.05 | 1.7 | 1.05 | 1.01 | 1.1 | 1.5 | 1.7 |
| emisores 3 | 0.01 | 0.0015 | 3 | 1.6 | 1.7 | 1.1 | 1.9 | 1.1 | 1.01 | 1.15 | 1.8 | 1.9 |
| emisores 4 | 0.03 | 0.003 | 3.5 | 1.9 | 2 | 1.1 | 2.5 | 1.3 | 1.01 | 1.3 | 2 | 2.05 |
| emisores 5 | 0.03 | 0.003 | 3.8 | 2 | 2.2 | 1.1 | 2.9 | 1.15 | 1.01 | 1.3 | 2.1 | 2.1 |
| emisores 6 | 0.03 | 0.003 | 3.6 | 2 | 2.1 | 1.1 | 2.6 | 1.1 | 1.01 | 1.3 | 2.1 | 2.1 |

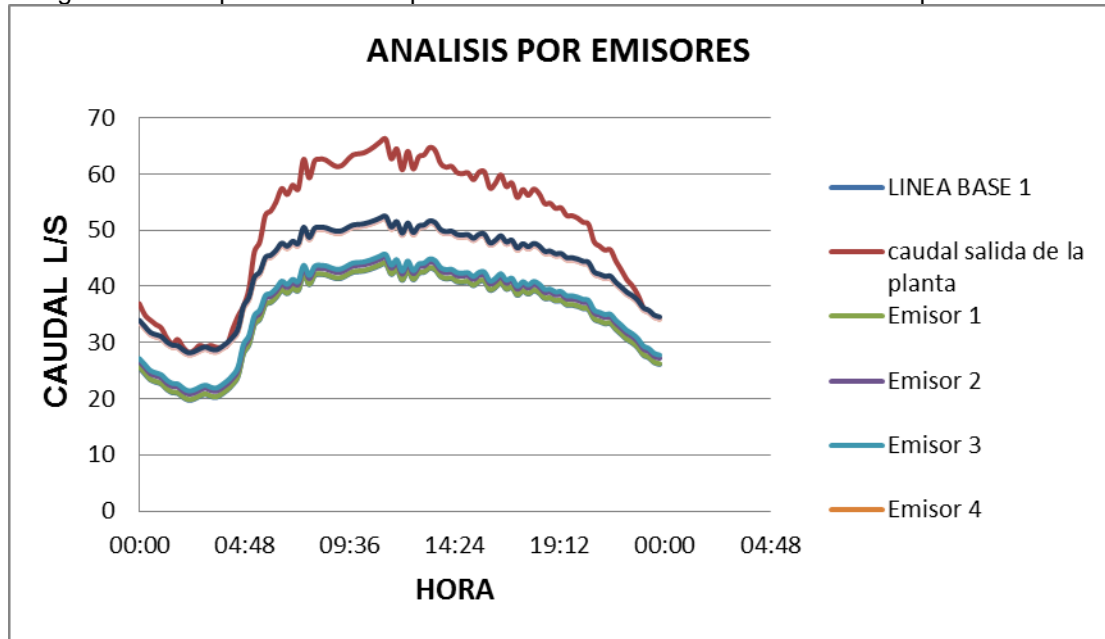
Para el distrito de Florida, Bucarica y Caracolí se consideraron los siguientes escenarios de calibración por emisores, donde se inicializaron 27 nodos escogidos de acuerdo al régimen de presiones al que se encuentran sometidos y de esta manera determinar los coeficientes aproximados para simular las posibles fugas originadas por las altas presiones. Los nodos seleccionados y los coeficientes en cada uno de ellos de acuerdo al escenario, son enunciados en la siguiente tabla.

Tabla 16. Coeficientes de Escenarios por emisores.

| ID NODO | ESCENARIOS | | | | | |
|---------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | Emisores 1 | Emisores 2 | Emisores 3 | Emisores 4 | Emisores 5 | Emisores 6 |
| 1889 | 0.0018 | 0.025245 | 0.03496 | 0.18525 | 0.100035 | 0.2028 |
| 1947 | 0.0018 | 0.025245 | 0.03496 | 0.18525 | 0.100035 | 0.2028 |
| 2028 | 0.00045 | 0.0020196 | 0.0055718 | 0.0195 | 0.01404 | 0.021294 |
| 2114 | 0.00045 | 0.0020196 | 0.0055718 | 0.0195 | 0.01404 | 0.021294 |
| 267071 | 0.000918 | 0.0066555 | 0.01539 | 0.10.0525 | 0.0378 | 0.058968 |
| 275753 | 0.000765 | 0.0046589 | 0.009405 | 0.0279825 | 0.0154 | 0.024948 |
| 275756 | 0.00045 | 0.0019278 | 0.0053295 | 0.01599 | 0.0088 | 0.014553 |
| 275763 | 0.000765 | 0.0046589 | 0.009405 | 0.0279825 | 0.0154 | 0.024948 |
| 275959 | 0.000675 | 0.0031212 | 0.0092055 | 0.03075 | 0.0216 | 0.034398 |
| 4579 | 0.00054 | 0.0025245 | 0.005244 | 0.018525 | 0.013338 | 0.02028 |
| 5149 | 0.0027 | 0.039015 | 0.05776 | 0.292125 | 0.1539 | 0.3276 |
| 5748 | 0.00036 | 0.001701 | 0.005049 | 0.0156 | 0.0088 | 0.014553 |
| 5783 | 0.000675 | 0.0031212 | 0.0092055 | 0.03075 | 0.0216 | 0.034398 |
| 62083 | 0.0012 | 0.01701 | 0.03366 | 0.156 | 0.066 | 0.14553 |
| 62262 | 0.000918 | 0.0066555 | 0.01539 | 0.0525 | 0.0378 | 0.058968 |
| 6665 | 0.00081 | 0.0039015 | 0.008664 | 0.0292125 | 0.02052 | 0.03276 |
| 6826 | 0.00225 | 0.031212 | 0.06137 | 0.3075 | 0.162 | 0.34398 |
| 7343 | 0.00036 | 0.0014884 | 0.003267 | 0.00858 | 0.00484 | 0.007623 |
| 7480 | 0.0012 | 0.0148838 | 0.02178 | 0.0858 | 0.0363 | 0.07623 |
| 7573 | 0.0018 | 0.0240975 | 0.03344 | 0.151905 | 0.0627 | 0.1386 |
| 7720 | 0.00054 | 0.002754 | 0.008721 | 0.03 | 0.0216 | 0.034398 |
| 7737 | 0.00036 | 0.001701 | 0.005049 | 0.0156 | 0.0088 | 0.014553 |
| 7795 | 0.00054 | 0.002754 | 0.008721 | 0.03 | 0.0216 | 0.034398 |
| 7826 | 0.00054 | 0.002754 | 0.008721 | 0.03 | 0.0216 | 0.034398 |

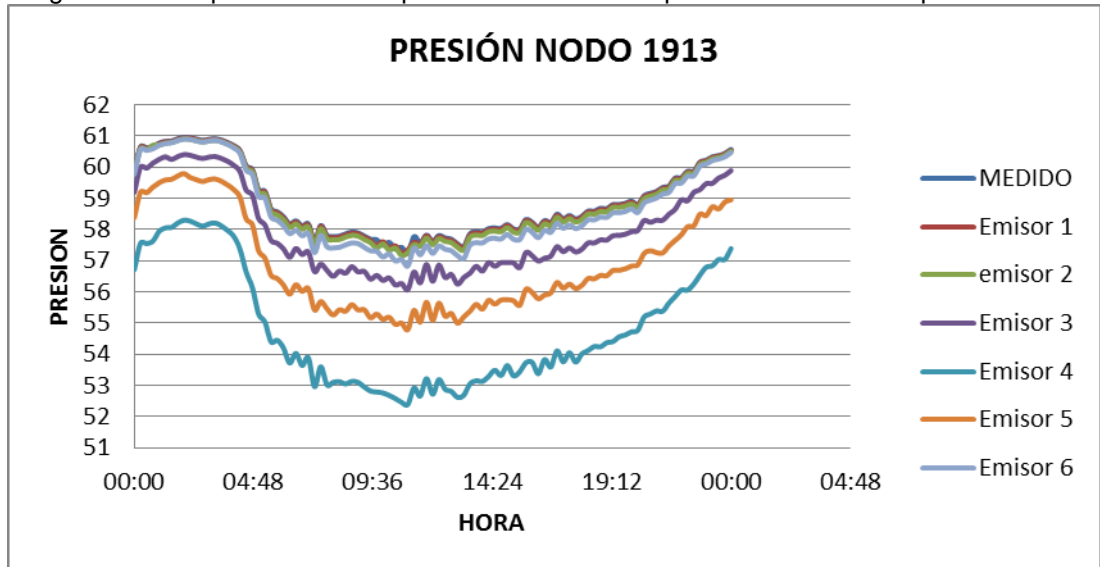
El comportamiento del modelo con la variación de escenarios por emisores se puede ver en la siguiente gráfica.

Figura 22. Comportamiento del punto de medición de caudal en el análisis por emisores.



Como se puede apreciar en la Figura 22, el escenario Emisor 6 presenta el mejor ajuste en las horas de bajo consumo para la curva de caudal de salida. Sin embargo, no representa el caudal de descarga en las horas de alto consumo.

Figura 23. Comportamiento del punto de medición de presión en el análisis por emisores.



De la Figura 23 se observa que el escenario Emisor 1 es el que mejor se ajusta. Aunque en la construcción de la Línea Base 2 se tendrá en cuenta el escenario Emisor 6 ya que logra el mejor ajuste de las curvas de la masa y al mismo tiempo mejora el desempeño de las curvas de presión respecto a la Línea Base 1.

5.4 LINEA BASE 2

Es el escenario que muestra los resultados del análisis por demandas desconocidas y emisores. Con la línea base 2 se busca ajustar de manera inmediata las curvas de masas y a la vez obtener un comportamiento adecuado con la curva de energía.

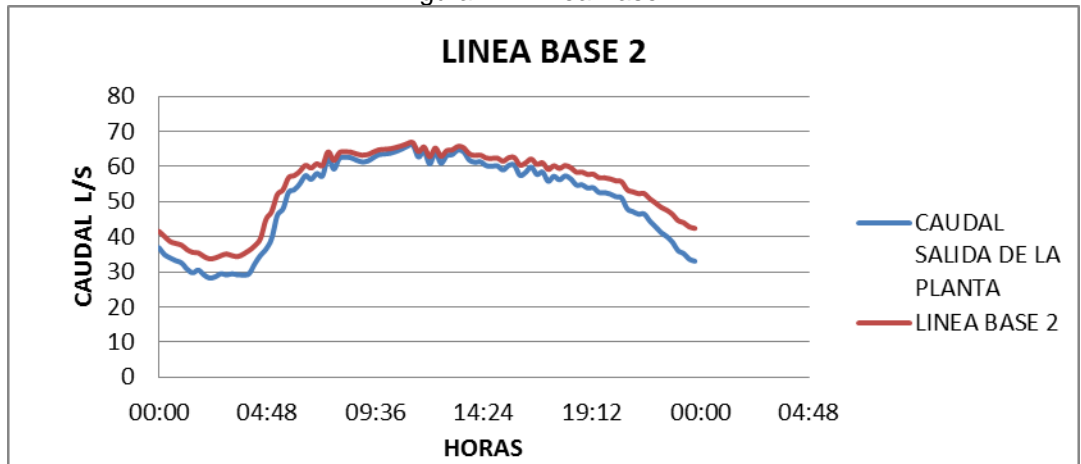
Para la elaboración de la Línea Base 2 en la red de distribución del distrito de Florida, Bucarica y Caracolí se tomaron en cuenta el análisis por demanda en este caso el escenario *Demanda 3*, de esta manera se logró un ajuste preciso de los puntos de medición de caudal.

Con respecto, al análisis por emisores como ya se mencionó anteriormente el que presenta un mejor ajuste es el escenario *Emisor 6*.

Tabla 17. Coeficientes de emisores para la conformación de la Línea Base 2.

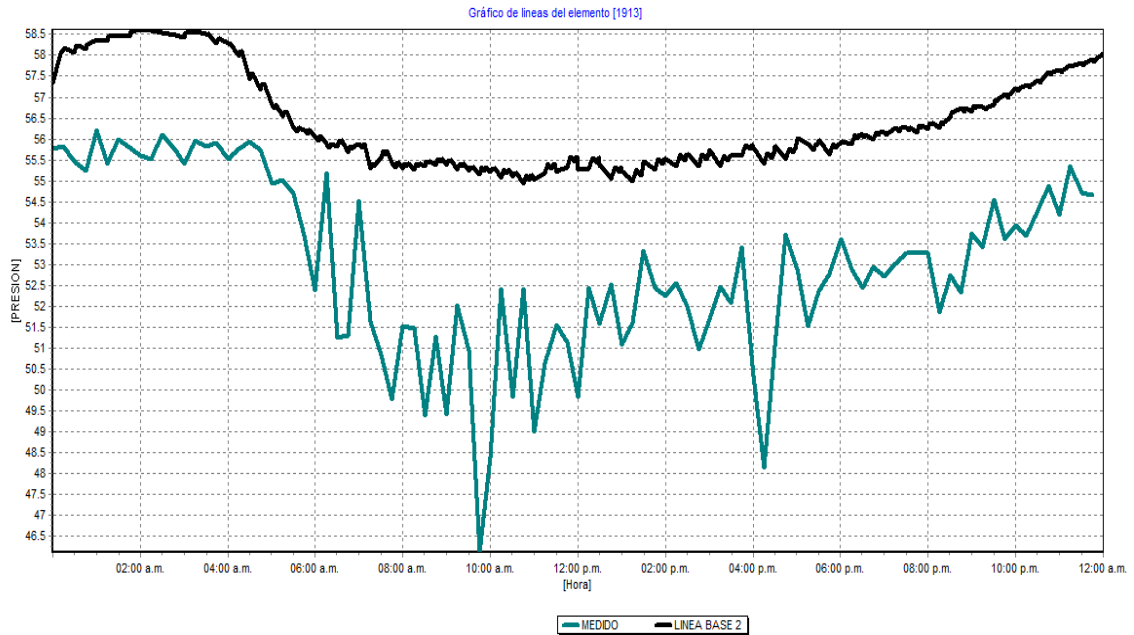
| | presion | | multiplicar según estrato | | | | multiplicador material | | | multiplicador diametro | | |
|------------|---------|-------|---------------------------|---|-----|-----|------------------------|-----|------|------------------------|--------|------|
| | alta | baja | 1 | 2 | 3 | 4 | AC | PVC | HD | <50 | 50-100 | >100 |
| emisores 6 | 0.03 | 0.003 | 3.6 | 2 | 2.1 | 1.1 | 2.6 | 1.1 | 1.01 | 1.3 | 2.1 | 2.1 |

Figura 24. Línea Base 2.



Como se puede observar en la nueva Línea Base 2 (Figura 24), el modelo tiene la capacidad de simular de manera acertada la cantidad de masa que ingresa al sistema de distribución de agua potable.

Figura 25. Comportamiento del punto de medición de presión en Línea base 2.



Al comparar la curva del punto de medición de la Línea Base 1 (Figura 17) y de la Línea Base 2 (Figura 24), se puede observar la mejoría en el análisis, ocasionando una disminución en las horas de menor consumo de alrededor de 3 m.c.a y en las horas de mayor consumo se redujo alrededor de 3 m.c.a

Se puede observar las demás graficas de presión obtenidas de Línea Base 2 en Anexo E.

5.4.1 Análisis por diámetros. A través de este se analiza el efecto que puede presentar por las modificaciones que se puedan realizar a los diámetros, así mismo como los errores en la red por las variaciones topológicas de las tuberías. De tal manera, se realizó el análisis en función de los materiales presentes en la red.

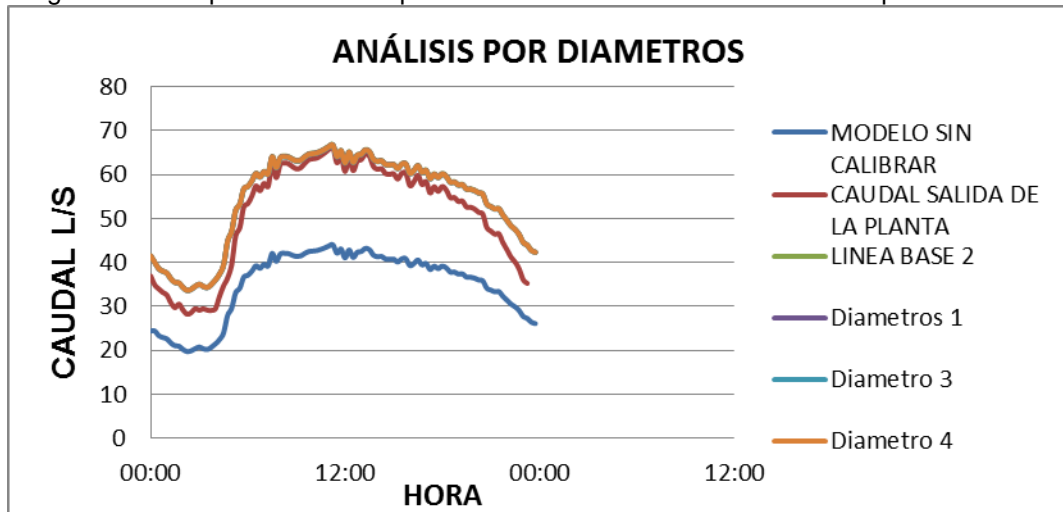
A pesar que la variación de los diámetros ocurre por diferentes factores, como incrustaciones o sedimentos, por desgaste, material y calidad del agua, es poca la variación porcentual que presentan los diámetros de las tuberías.

Para este proceso se tuvo en cuenta aspectos tales, como que el porcentaje de reducción a tuberías de hierro dúctil, galvanizado y fundido se encuentra entre un 50% y 70%. También para materiales como asbesto cemento se tuvo en cuenta en gran medida las incrustaciones. En la siguiente tabla se presentan los escenarios que varían la capacidad hidráulica de las tuberías por las modificaciones de los diámetros.

Tabla 18. Listado de escenarios de calibración para diámetros.

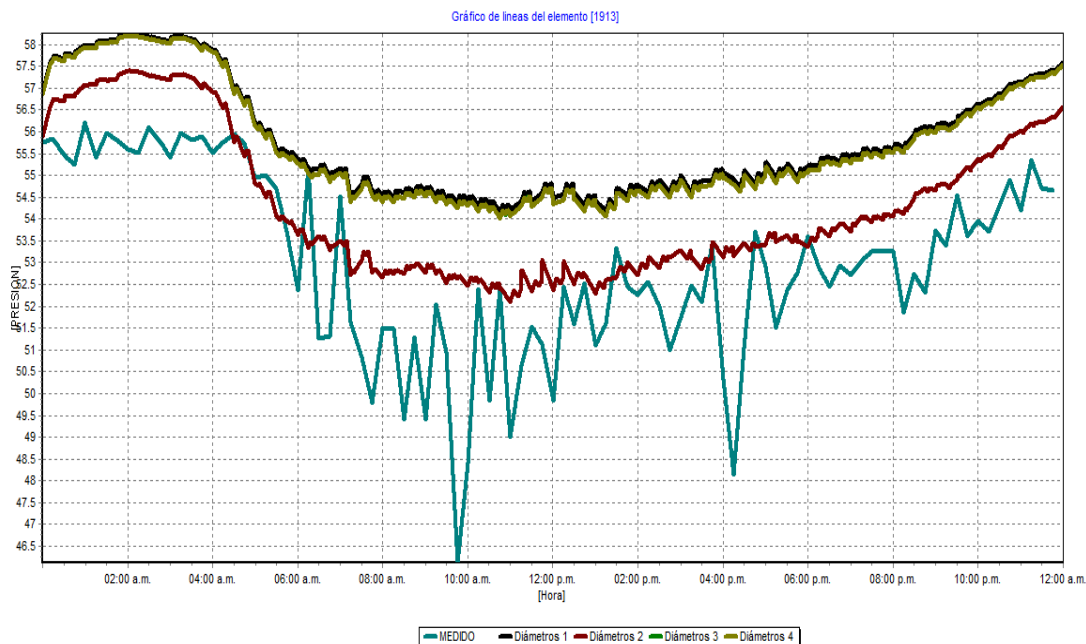
| ESCENARIOS | ACCIONES | | | |
|--------------|----------|------|------|------|
| | AC | PVC | HD | HG |
| Diámetros 1 | 0.9 | 1.01 | 0.9 | 0.9 |
| Diámetros 2 | 0.8 | 1 | 0.8 | 0.8 |
| Diámetros 3 | 0.85 | 1.05 | 0.75 | 0.8 |
| Diámetros 4 | 0.85 | 1.05 | 0.75 | 0.75 |
| Diámetros 5 | 0.9 | 1 | 1 | 1 |
| Diámetros 6 | 0.98 | 1.1 | 1 | 1 |
| Diámetros 7 | 0.98 | 1.01 | 1 | 1 |
| Diámetros 8 | 1 | 1 | 0.5 | 1 |
| Diámetros 9 | 1 | 1 | 0.7 | 1 |
| Diámetros 10 | 1 | 1 | 0.7 | 0.5 |

Figura 26. Comportamiento del punto de medición de caudal en análisis por diámetros.



Como se puede observar en la Figura 26 el escenario *Diámetros 1* es el que mejor se ajusta durante el comportamiento del punto de medición de caudal. También se puede apreciar que escenario *Diámetros 2* fue eliminado de la Figura 26 debido a que origina presiones negativas ocasionando fallas en el sistema de red de abastecimiento de agua potable.

Figura 27. Comportamiento del punto de medición de presión en análisis por diámetros.



Como se observa, el escenario que mejor se ajusta en el punto de medición de presión es el escenario *Diámetros 2* ya que empieza a reportar un crecimiento progresivo de la incrustaciones, por lo que se originan caídas de presión en el modelo.

Lo anterior por la disminución de la capacidad hidráulica de las tuberías. Aunque hay que destacar que el crecimiento de la biopelícula en redes de distribución de agua potable es imposible, la reducción de los diámetros solo se manifiestan en tuberías de materiales como hierro fundido, hierro dúctil otros metales y en el asbesto cemento.

Se puede observar las demás graficas de presión por análisis de diámetros en la línea base 2 en Anexo F.

5.4.2 Análisis por rugosidades. A través de este proceso se busca analizar las modificaciones generadas por el cambio de rugosidad de los diferentes materiales debido a los mismos efectos que disminuyen los diámetros de las mismas tuberías. Estos escenarios son construidos en base al material y a la velocidad del flujo. De tal manera se implementaron los siguientes escenarios de variación de la rugosidad de los materiales.

Tabla 19. Listado de escenarios de calibración por rugosidades.

| ESCENARIOS | ACCIONES | | | |
|-------------|----------|-----|----|----|
| | AC | PVC | HD | HG |
| RUGOSIDAD 1 | 2 | 1.5 | 2 | 2 |
| RUGOSIDAD 2 | 5 | 2 | 5 | 5 |
| RUGOSIDAD 3 | 10 | 5 | 10 | 10 |
| RUGOSIDAD 4 | 20 | 10 | 20 | 20 |

Se puede observar las demás graficas de presión por análisis de Rugosidades en la línea base 2 en Anexo G.

5.4.3 Análisis por pérdidas menores. En este se busca considerar las modificaciones generados por los accesorios y elementos que en contacto con el flujo ocasionan pérdidas de energías.

Tabla 20. Listado de escenarios de calibración por pérdidas menores.

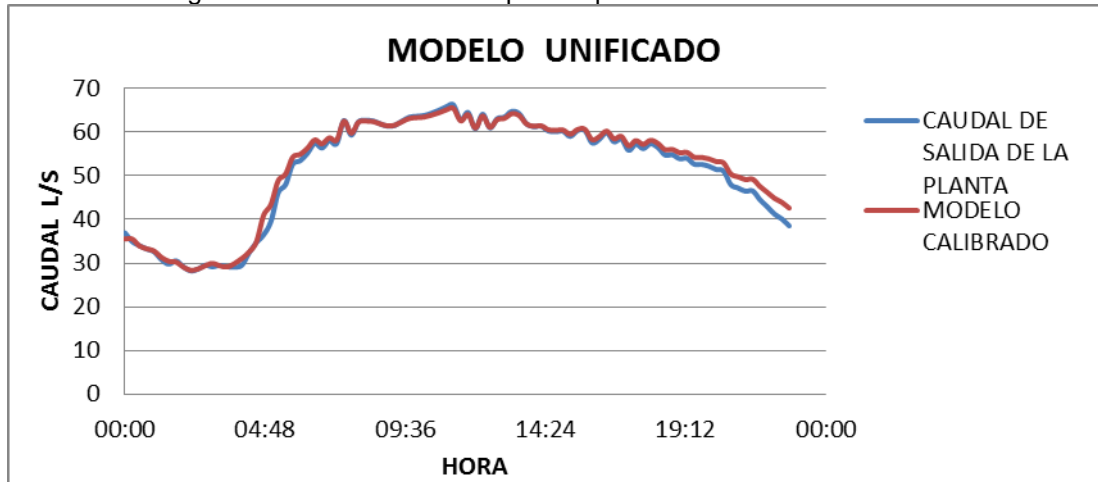
| ESCENARIOS | ACCIONES | | | |
|------------|----------|------|------|------|
| | AC | PVC | HD | HG |
| MENORES 1 | 1.02 | 1.01 | 1.05 | 1.05 |
| MENORES 2 | 1.05 | 1.02 | 1.07 | 1.07 |
| MENORES 3 | 1.2 | 1.05 | 1.3 | 1.3 |
| MENORES 4 | 1.1 | 1.05 | 1.2 | 1.2 |
| MENORES 5 | 1.15 | 1.05 | 1.25 | 1.3 |

5.5 MODELO UNIFICADO

Una vez realizados los análisis de sensibilidad de cada parámetro, se procede a tomar cada uno de los escenarios que logran un mejor ajuste para unificarlo en un modelo que abarque los escenarios de calibración que reflejen el comportamiento real de la red de agua potable del distrito.

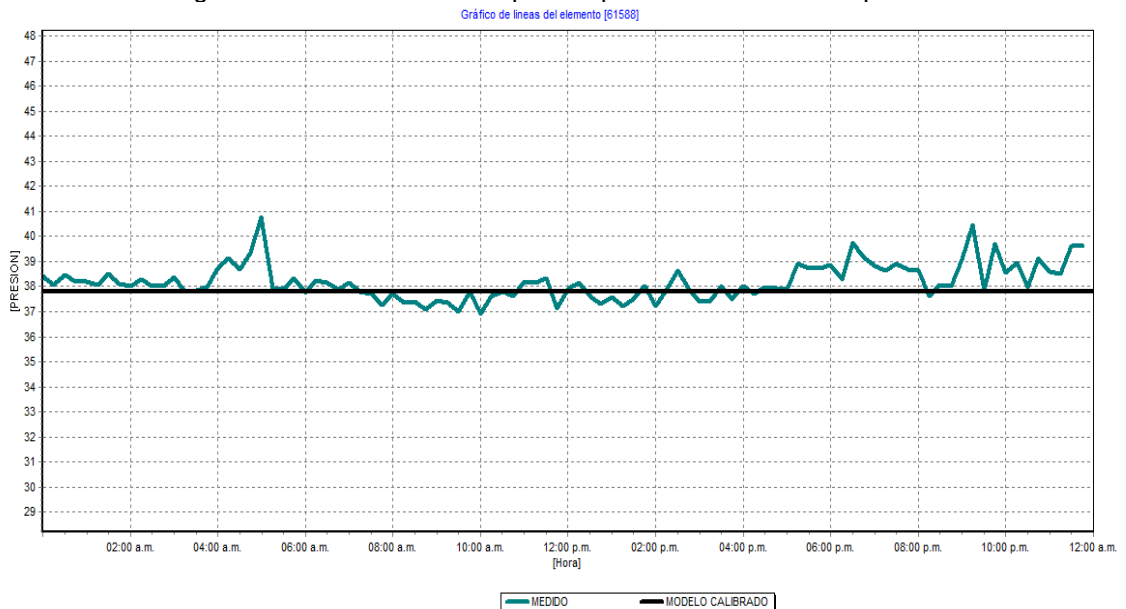
Con la asignación de demanda escenario *Demanda 3*, mostrado en la Tabla 13 y de *Emisores 6* obtenida en la Línea Base 2, mostrada en la Tabla 16, también la asignación del escenario *Diámetros 3* mostrado en la tabla 18, *Rugosidad 4* mostrado en la tabla 19 y el escenario *Menores 2* en la tabla 20. Los resultados de este modelo se presentan en las siguientes graficas:

Figura 28. Modelo Unificado para el punto de medición de caudal.



En la Figura 28, se puede observar el modelo unificado de la red de distribución del distrito de Florida, Bucarica y Caracolí representa casi de manera perfecta el comportamiento del punto de medición del caudal. Se presenta una diferencia de 3 L/s a las 9:00 p.m., lo que equivale un error del 8%. El Modelo unificado de la red de distribución simula correctamente la masa que ingresa al sistema para las condiciones de operación en las que se tomaron las mediciones.

Figura 29. Modelo Unificado para el punto de medición de presión



Mediante la figura 29 se puede asegurar que el modelo representa de manera correcta el comportamiento de las presiones de la red de distribución del distrito de

Florida, Bucarica y Caracolí. Las diferencias máximas de presión ocurren a las 4:40 a.m. y son del orden de 2.5 m.c.a., lo que equivale a un error del 4%.

Debido a que el Modelo unificado de la red de distribución representa adecuadamente tanto las curvas de masa como las de energía del sistema, puede ser utilizado para labores de operación, mantenimiento y diseño de la red.

Se puede observar las demás grafica de Presiones Modelo Unificado en Anexo H.

5.6 ANÁLISIS DE INDICE DE AGUA NO CONTABILIZADA

Después de la recopilación de los datos de medición que permitieron calcular el caudal de salida de los tanques de almacenamiento, se procedió a calcular el índice de agua no contabilizada mediante la diferencia entre el volumen de líquido producido por la planta potabilizadora y el registrado durante la facturación, en este caso el caudal idealizado del modelo.

A continuación se presenta los datos obtenidos del caudal de salida de la planta tanto medidos como los del modelo, junto con el volumen de líquido, que corresponde al área bajo la curva hallado con la ecuación del trapecio.

$$A = \frac{(B + b)}{2} * h$$

Ecuación 13. Área del trapecio.

Donde:

- B y b = Base mayor y menor respectivamente, en este caso valor del caudal cada 15 minutos.
- h = altura, en este caso 15 minutos.

A continuación se muestra la tabla de caudales de salida y volumen de planta y modelo sin calibrar (Ver anexo I).

Los datos correspondientes al volumen total de la planta y el modelo, son los siguientes.

| | |
|---------------------------------|------------------|
| VOLUMEN TOTAL MODELO | 3019054.5 lts |
|---------------------------------|------------------|

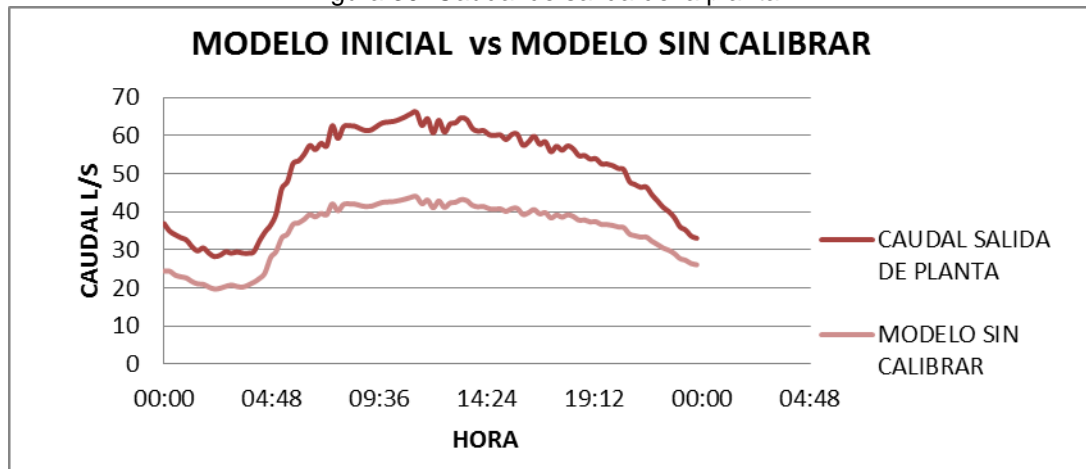
| | |
|--|------------------|
| VOLUMEN TOTAL SALIDA PLANTA | 4373135.1 lts |
|--|------------------|

Con los volúmenes correspondientes se realizó el cálculo del Índice de Agua no Contabilizada (Véase ecuación 10) para el régimen de presión bajo, obteniendo el siguiente resultado.

$$IANC = \frac{4373135.1 - 3019054.5}{4373135.1} * 100 = 30.96 \%$$

La gráfica generada por las anteriores tablas corresponde a la siguiente.

Figura 30. Caudal de salida de la planta.



5.7. OBRAS PARA REDUCIR EL IANC EN EL DISTRITO DE FLORIDA, BUCARICA Y CAROCOLI

Para reducir el índice de agua no contabilizada es necesario instalar válvulas reguladores de presión en varios sectores del distrito, de esta forma reducir la presión en zonas vulnerables, cambio de tuberías para evitar conexiones fraudulentas y estallidos en las tuberías de la red, entre otras, a continuación se nombran las acciones y lugares en los cuales necesario la intervención preventiva y correctiva por parte del acueducto metropolitano de Bucaramanga.

- La instalación de una válvula regula de presión en la tubería de conducción que abastece al barrio Altos de Villabel y zonas aledañas, ya que en este sector se presentan presiones desde 50 m.c.a hasta 106 m.c.a.
- El cambio de tubería de asbesto cemento en algunos sectores de la tubería de conducción al sector de Ruitoque por tubería de hierro dúctil ya que existen presiones superiores a los 75 m.c.a, y debido a la lejanía y el difícil acceso

estas tuberías son vulnerables a ser manipuladas para conexiones fraudulentas.

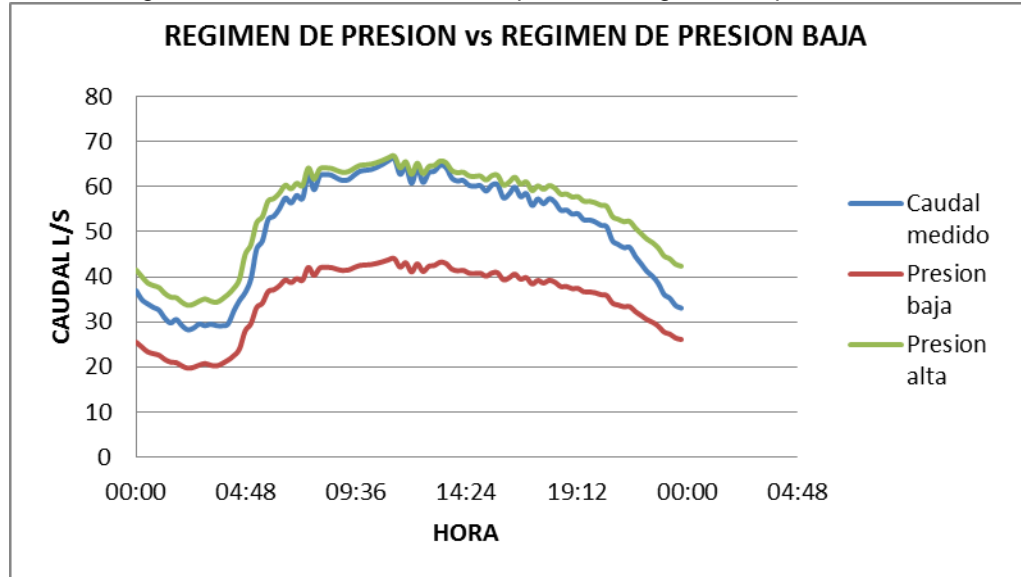
- La instalación de una válvula reguladora de presión en la calle 5- carrera 3 en el municipio de Floridablanca, en la tubería de conducción que finaliza en la Universidad Santo Tomas, debido a que los nodos asociados a esta tubería se encuentran con presiones superiores a los 105 m.c.a.
- El cambio de tubería de PVC a hierro dúctil o hierro galvanizado en la tubería de conducción al sector La Castellana debido a que esta tubería está expuesta a conexiones fraudulentas debido a los sectores agrícolas que se encuentran en dicha zona.
- La revisión de conexiones fraudulentas y estado de la tuberías en las zonas urbanas de del distrito de Florida, Bucarica y Caracolí, ya que en estas zonas es donde mayor cantidad de usuarios hay, por consiguiente es mayor la probabilidad de conexiones fraudulentas.

La implementación de estas obras ayudara notablemente a reducir los índices de agua no contabilizada del distrito, beneficiando a la empresa prestadora del servicio y a los usuarios brindando mayor calidad.

5.8. ANÁLISIS DEL DISTRITO EN RÉGIMEN DE PRESIÓN ALTA

Para realizar el análisis del distrito en régimen de presión alta en el modelo se simulo la apertura total de la válvula V_19284 ubicada cerca al colegio Gabriel García Márquez en la vía antigua que comunica a los municipios de Bucaramanga y Floridablanca, al realizar este proceso la mayoría los nodos del casco urbano del municipio de Floridablanca presenta presiones mayores a 100 m.c.a, los nodos emisores asumidos presentan mayor descarga de caudal a la atmosfera en horas de no consumo, mostrando un incremento en la curva de caudal, en este proceso se asumieron los mismos escenarios que en la calibración del modelo con el régimen de presión baja, el incremento de la curva de caudal se muestra en la *gráfica 30*, en algunos de los nodos también presentan un aumento considerable de presión, dichos nodos son los que están asociado directamente con el estado de apertura de la válvula V_19284 , como se muestra a continuación en la *gráfica 31*.

Figura 31. Caudal de salida de la planta en régimen de presión alta.



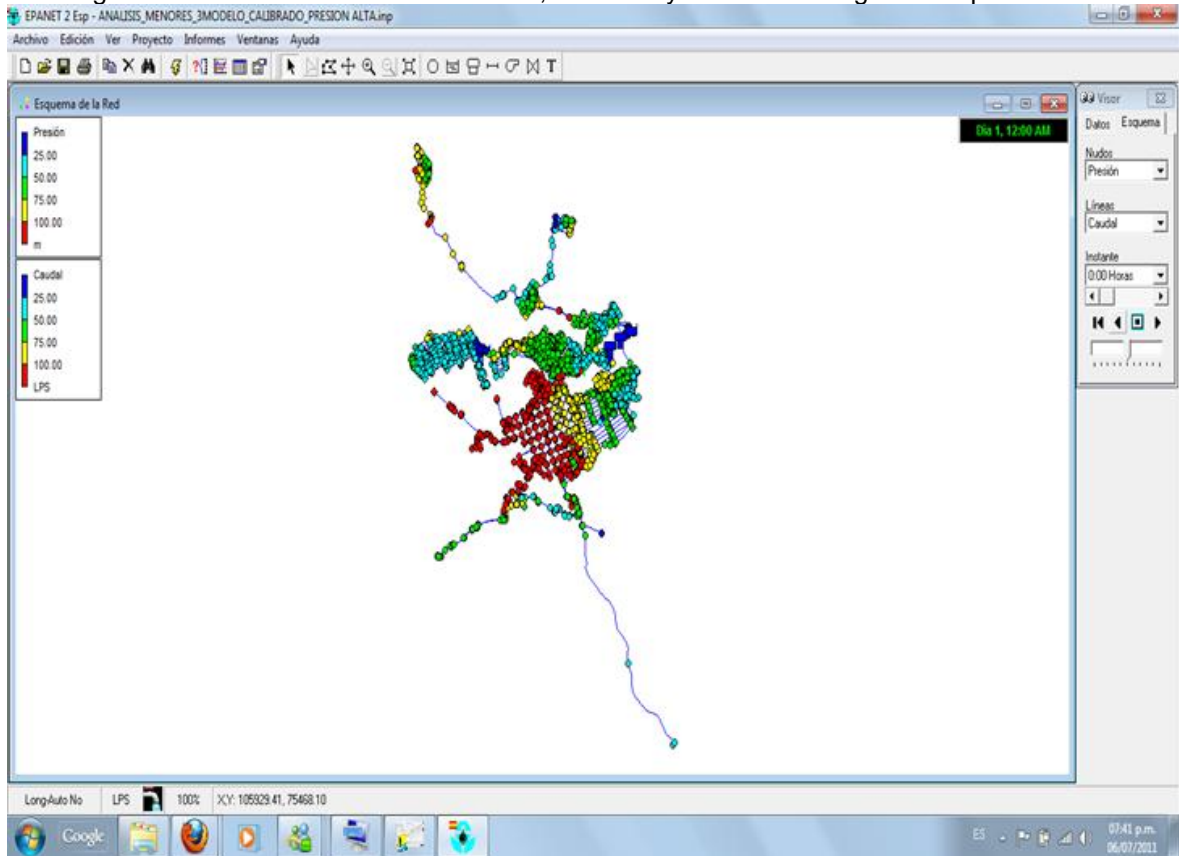
El volumen y el IANC se calculan de la misma forma utilizada anteriormente, debido al régimen de presión se espera que el IANC también aumente, como se expresa a continuación.

| | |
|-----------------------------|------------------|
| VOLUMEN TOTAL MODELO | 3019054.5 lts |
|-----------------------------|------------------|

| | |
|------------------------------------|-------------|
| VOLUMEN TOTAL SALIDA PLANTA | 4661100 lts |
|------------------------------------|-------------|

$$IANC = \frac{4661100 - 3019054.5}{4661100} * 100 = 35.71 \%$$

Figura 32. Modelo del distrito de Florida, Bucarica y Caracolí en régimen de presión alto.



El IANC aumento en 4.75% respecto al modelo de régimen de presión baja, aunque este valor sea pequeño indica que se pierde una gran cantidad de agua, aproximadamente 318 m^3 lo que equivale al consumo de 1590 personas aproximadamente.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El ajuste más significativo del modelo hidráulico de la red de distribución de agua potable del distrito Florida, Bucarica y Caracolí se da al variar la demanda con los factores multiplicadores en cada estrato socioeconómico, estrato 1 por 1.4, estrato 2 por 1.4, estrato 3 por 2, estrato 4 por 1.4 y el estrato 6 por 1.4 dichos multiplicadores fueron mencionados en este proyecto.
- El distrito de Florida, Bucarica y Caracolí, además de contar con zonas urbanas cuenta con zonas rurales, donde la red es más vulnerable a ser atacada por usuarios fraudulentos debido al restringido acceso de estos usuarios a la red, zonas donde se detectaron fugas debido a la lejanía del casco urbano son Vereda San Antonio y el sector conocido como Santillana al sur del municipio de Floridablanca y el sector La Constancia ubicado al oriente de Floridablanca.
- La curva de caudal logro su ajuste en la zona de no consumo por medio de escenarios con emisores, lo que permite afirmar que existen fugas no controladas en la red del distrito, aumentando el IANC en un 30%, el escenario que reflejo el comportamiento en las horas de menor consumo es el escenario 6.
- El ajuste final de la curva de caudal y las curvas de presión se dieron con la escenarios Demanda 3, Emisores 6, disminución de los diámetros con el escenario Diámetros 3, el aumento de las rugosidades con el escenario Rugosidad 4 y las perdidas menores con el escenario Menores 2 en tuberías de asbesto cemento, hierro dúctil, hierro fundido, hierro galvanizados y pvc, estos fenómenos se convierten en variables hidráulicas importantes en el proceso de calibración de la red del distrito.
- Mantener la red en régimen de presión bajo evita considerablemente las fugas por emisores, evita que las tuberías de la red estén dispuestas a roturas y estallidos. Además el cierre parcial adecuado de la válvula V_19284 reduce la presión en casco urbano del municipio de Floridablanca donde un estallido afectaría un gran número de usuarios, reduciendo el IANC en 4.75%.
- Se recomienda un estudio minucioso de las tuberías de la red del distrito de Florida, Bucarica y Caracolí que permita conocer la edad de cada tubería para

ser removidas de acuerdo al tiempo de funcionamiento en la red, especialmente en las zonas donde se establecieron los nodos asociados con emisores.

- Se recomienda realizar un estudio económico que permita establecer las pérdidas monetarias al tener el IANC expresado en el desarrollo de este proyecto en diferente régimen de presión.

BIBLIOGRAFÍA

Saldarriaga, Juan. "Hidráulica de tuberías, Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos". Alfaomega. Universidad de los Andes.

Metodología para la definición de plano óptimo de presiones y reducción de agua no contabilizada". Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería Civil. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P, Tomo I, 2008.

Metodología para la definición de plano óptimo de presiones y reducción de agua no contabilizada". Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería Civil. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P, Tomo II, 2008.

Jurado, Cesar Mauricio. Metodología de Calibración de Redes de Distribución de Agua Potable". Universidad de los Andes, Bogotá enero de 2007.

Salas Useche, Daniel Eduardo. Evaluación de métodos de inteligencia artificial para la calibración de redes de acueducto. Universidad de los Andes. Departamento de ingeniería de sistemas y computación. Junio de 2003.

EPANET 2, Manual de Usuario en Español, traducido por Fernando Martínez Alzamora, Universidad Politécnica de Valencia, España.

CALIBRA 2006, Manual de Usuario, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados, Universidad de los Andes, Colombia.

<http://www.floridablanca.gov.co>

ANEXO A-1. Listado de Tuberías que conforman la red del distrito de Florida Bucarica y Caracolí de acuerdo al diámetro y al material.

| TUBERIAS | LISTADO DE DIAMETROS [mm] |
|------------------------|----------------------------------|
| PVC, CPVC | 16.509 |
| | 25.4 |
| | 43.434 |
| | 38.1 |
| | 50.8 |
| | 54.356 |
| | 76.2 |
| | 101.6 |
| | 103.78 |
| | 152.4 |
| | 154.94 |
| | 203.2 |
| | 254 |
| ASBESTO CEMENTO | 49.784 |
| | 50.8 |
| | 62.484 |
| | 63.5 |
| | 74.93 |
| | 76.2 |
| | 99.822 |
| | 101.6 |
| | 149.86 |
| | 152.4 |
| | 199.898 |
| | 203.2 |
| | 249.936 |
| | 254 |
| | 299.974 |
| 304.8 | |
| 399.796 | |
| 406.4 | |
| | 149.86 |

| | |
|---------------------------|------------|
| ACERO BRIDADO | 152.4 |
| HIERRO GALVANIZADO | 43.434.002 |
| | 50.8 |
| | 76.2 |
| | 80.518 |
| | 127 |
| | 129.54 |
| HIERRO DUCTIL | 203.2 |
| | 254 |
| HIERRO FUNDIDO | 25.4 |
| | 38.1 |
| | 50.8 |
| | 63.5 |
| | 76.2 |
| | 101.6 |
| | 127 |
| | 152.4 |
| | 203.2 |
| | 254 |
| | 304.8 |
| 406.4 | |

Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

ANEXO A-2. Diámetros de la tubería que integran la Red.

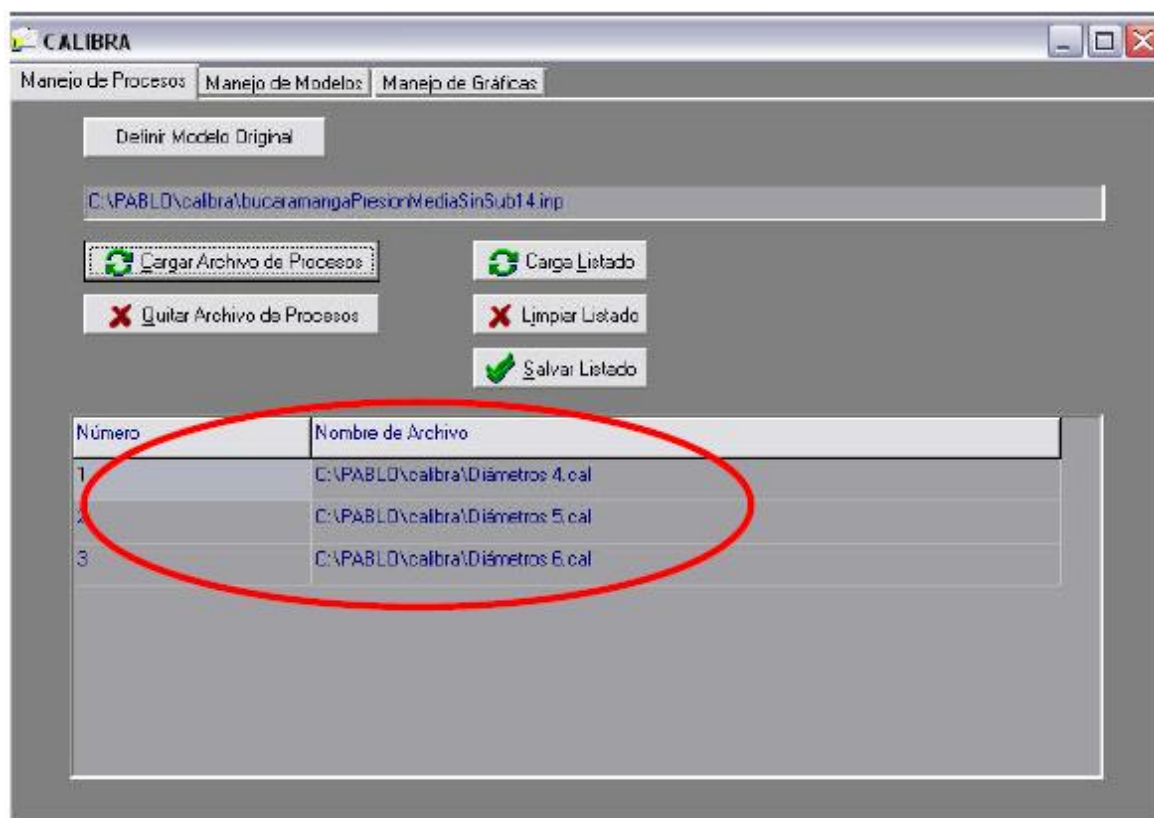
| DIAMETROS [mm] | LONGITUD [m] | PORCENTAJE [%] |
|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| 16.509 | 53.88 | 0.06 |
| 25.4 | 111.77 | 0.13 |
| 28.448 | 973.21 | 1.11 |
| 38.1 | 2657.79 | 3.04 |
| 43.434 | 3884.93 | 4.45 |
| 49.784 | 10658.87 | 12.20 |
| 50.8 | 13129.73 | 15.03 |
| 54.356 | 9705.34 | 11.11 |
| 63.5 | 76.24 | 0.09 |
| 74.93 | 4530.89 | 5.19 |
| 76.2 | 4671.79 | 5.35 |
| 80.264 | 79.63 | 0.09 |
| 80.518 | 5833.72 | 6.68 |
| 99.822 | 3049.07 | 3.49 |
| 101.6 | 2053.51 | 2.35 |
| 103.378 | 5013.47 | 5.74 |
| 127 | 131.02 | 0.15 |
| 129.54 | 262.34 | 0.30 |
| 149.86 | 3487.01 | 3.99 |
| 152.4 | 2071.52 | 2.37 |
| 154.94 | 661.52 | 0.76 |
| 199.818 | 1279.1 | 1.46 |
| 201.676 | 2519.15 | 2.88 |
| 203.2 | 510.7 | 0.58 |
| 246.888 | 2022.77 | 2.32 |
| 249.936 | 2905.43 | 3.33 |
| 254 | 756.24 | 0.87 |
| 299.974 | 786.94 | 0.90 |
| 304.8 | 205.4 | 0.24 |
| 349.758 | 1095.74 | 1.25 |
| 399.796 | 2083.77 | 2.39 |
| 406.4 | 72.53 | 0.08 |
| TOTAL | 87335.02 | 100% |

Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

ANEXO B. MANEJO DEL PROGRAMA CALIBRA²²

Es de gran importancia definir el modelo con el cual se va a trabajar para realizar el proceso de calibración. Este es el modelo que se ha generado en EPANET, por lo tanto es necesario dejar en la misma carpeta donde se encuentra el archivo EasyCal.exe el modelo hidraulico.inp.

De esta manera se procede a cargar el modelo original (archivo.inp) que es con quien se va a comparar, con el botón DEFINIR MODELO ORIGINAL (ver figura).



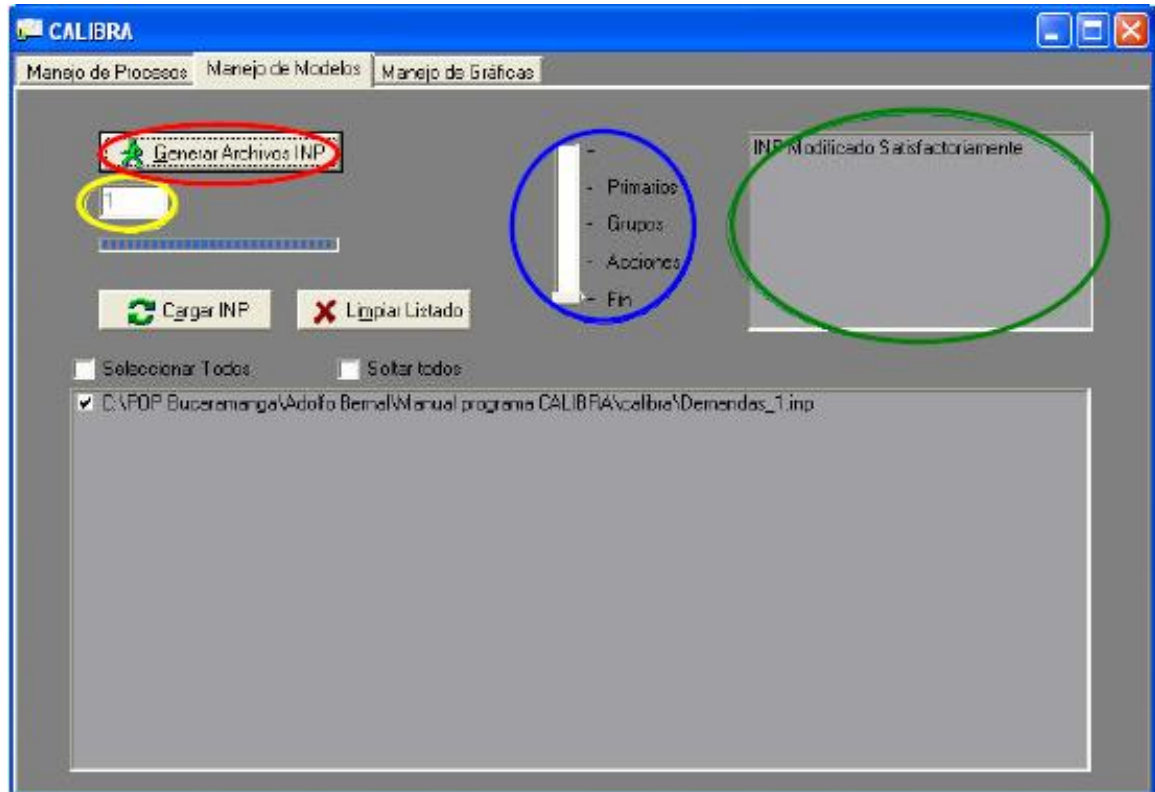
Ventana principal del programa CALIBRA

Con el modelo definido se procede a cargar las acciones definidas por el usuario para la calibración de la red y generación de escenarios. Este es el llamado archivo de procesos de extensión .CAL. Para cargar el archivo de procesos, se

²² CALIBRA 2006, Manual de Usuario, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados, Universidad de los Andes, Colombia.

procede con el botón CARGAR ARCHIVO DE PROCESOS (ver figura) y se selecciona con el que se desea trabajar. De la misma manera se procede para cargar los distintos escenarios a analizar.

Para el MANEJO DE MODELOS, se debe ingresar en esta ventana, ya que es la que representa la aplicación de las hipótesis planteadas en cada escenario a realizar. La figura 2 muestra la ventana correspondiente.



. Ventana de Manejo de Modelos

Al ejecutar el botón GENERAR ARCHIVOS INP, CALIBRA toma los archivos .CAL cargados previamente en la ventana “Manejo de Procesos” y los transforma en archivos de EPANET .INP. Durante el proceso de generación, el programa va mostrando su avance en la modificación mediante la barra indicadora ubicada en la parte superior central y los mensajes que van saliendo en el cuadro ubicado a su derecha. Cuando éste ha leído los Primarios y Grupos del archivo .CAL respectivo, y ha realizado las acciones sobre estos exitosamente, finaliza este proceso y lo indica en el cuadro antes mencionado mediante el mensaje: “INP modificado satisfactoriamente”.

El último paso antes de poder comparar la representación gráfica del modelo, con su respectivo archivo de procesos y la serie medidas de presión.

En primera medida se debe incorporar las series de presión. Para seleccionar las series con las cuales se desea trabajar se debe oprimir el botón SELECCIONAR ARCHIVO DE SERIES, donde se abrirá una ventana, para poder escoger el archivo de las series, de extensión .SER, aunque este archivo no tenga los datos, hace referencia y llama a un archivo .TXT, que tiene contiene las series de presión medidas.

ANEXO C. FOTOGRAFIAS CAUDALIMETRO DIGITAL



Fuente: archivo propio



Fuente: archivo propio



Fuente: archivo propio



Fuente: archivo propio

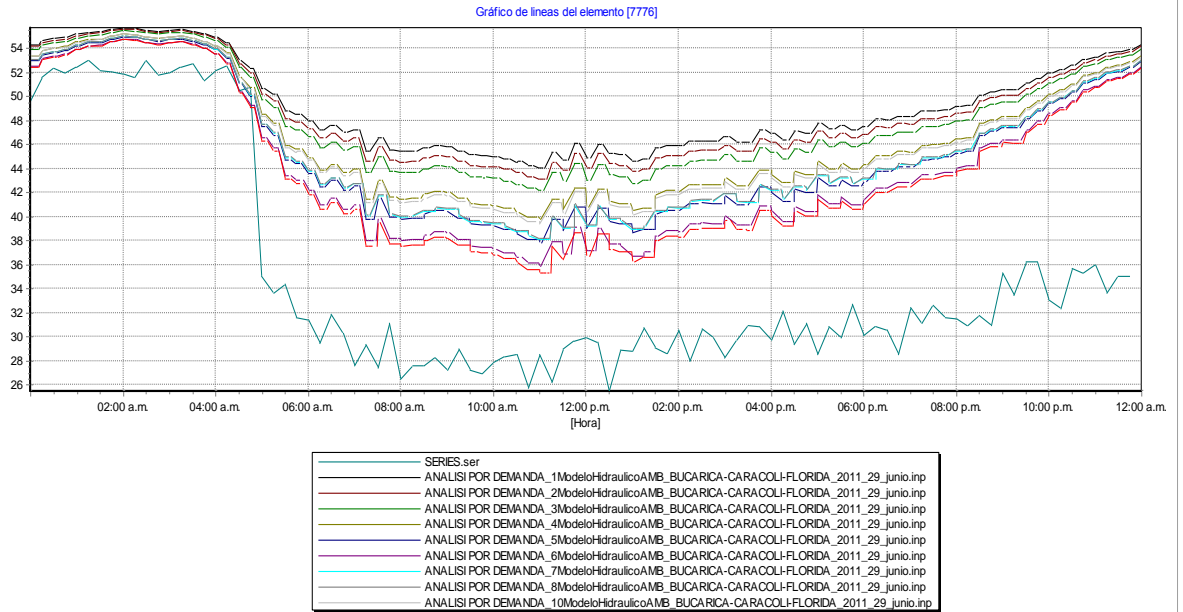
FOTOGRAFIAS MANOMETRO DIGITAL



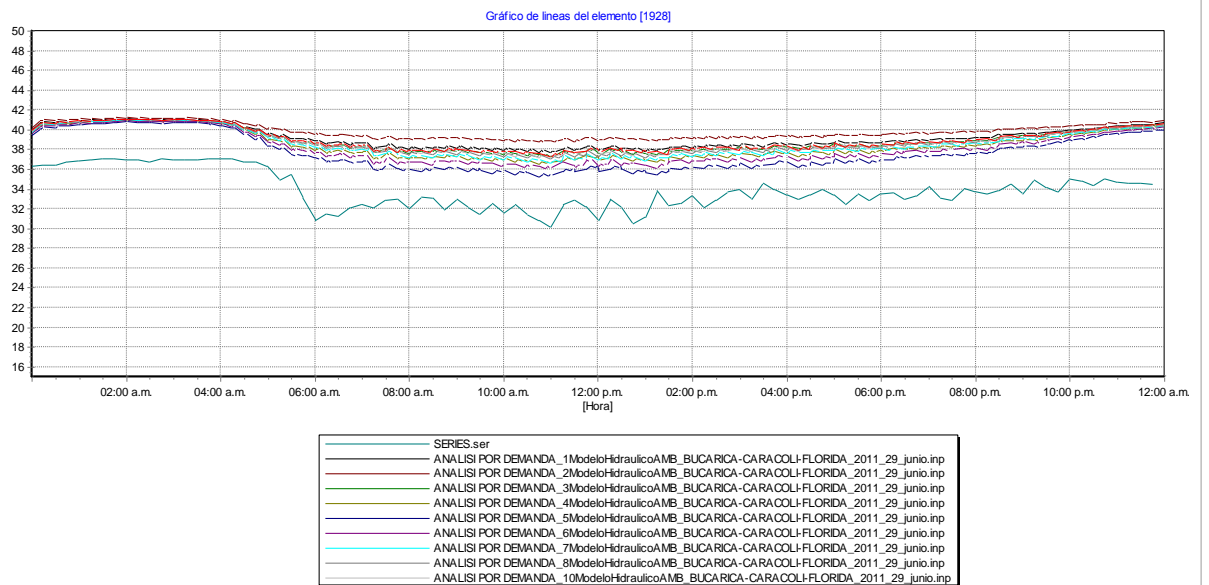
Fuente: archivo propio

ANEXO D. GRÁFICAS DE PRESIÓN POR ANÁLISIS DE DEMANDAS

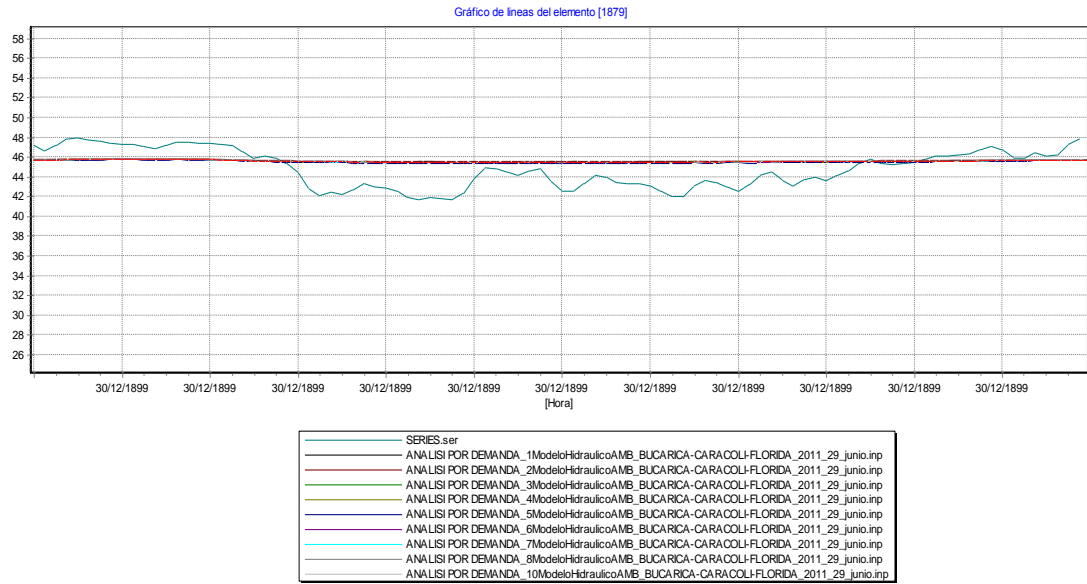
Nodo 7776



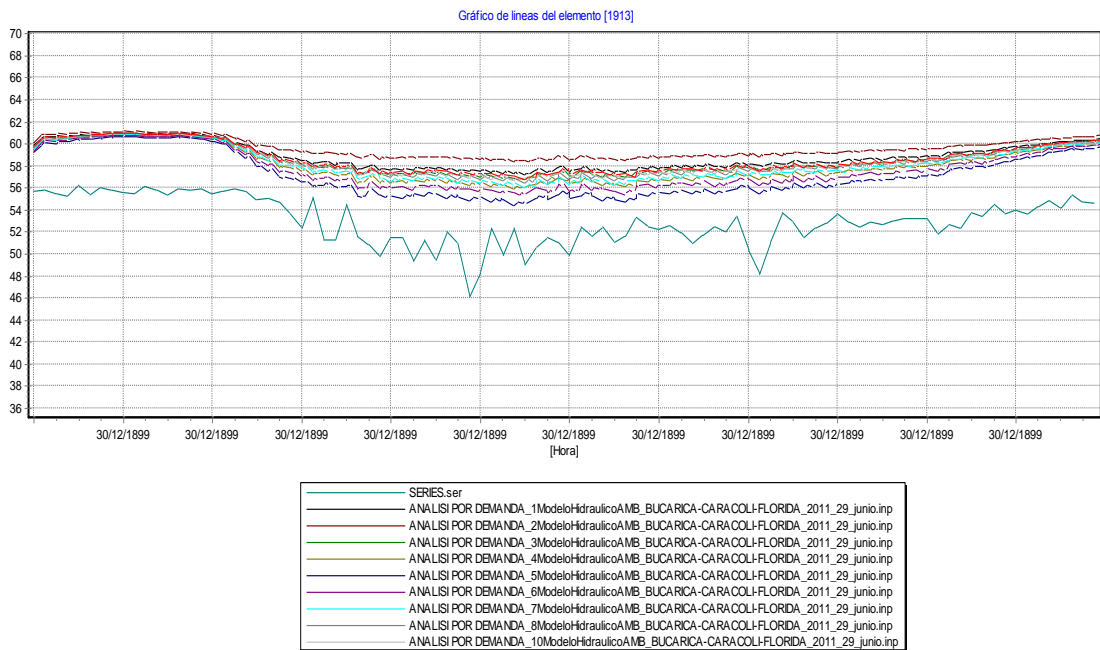
Nodo 1928



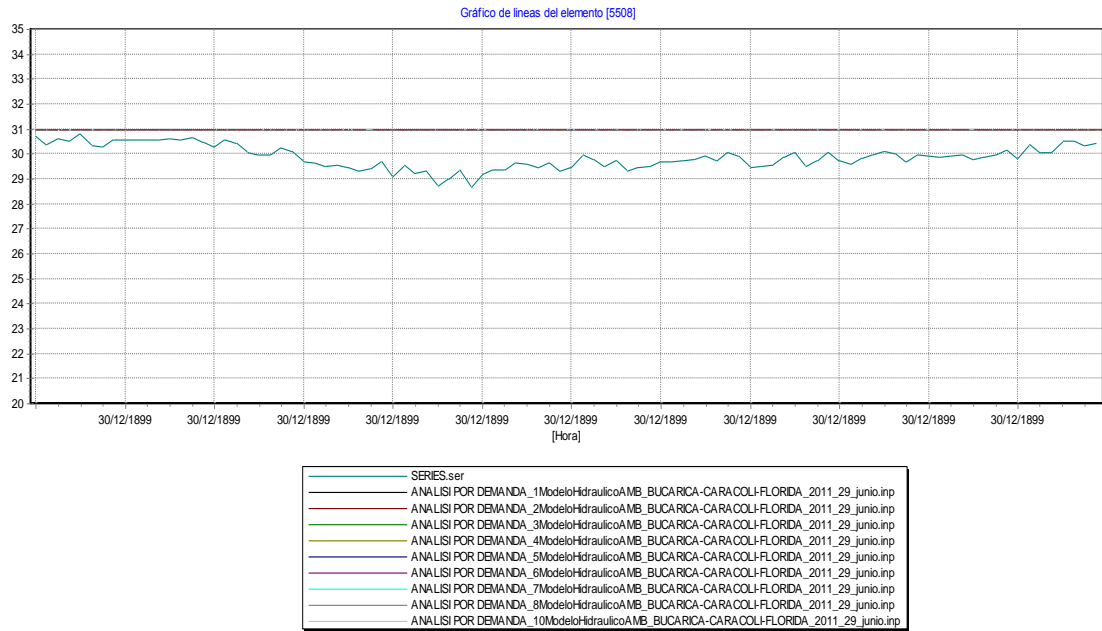
Nodo 1879



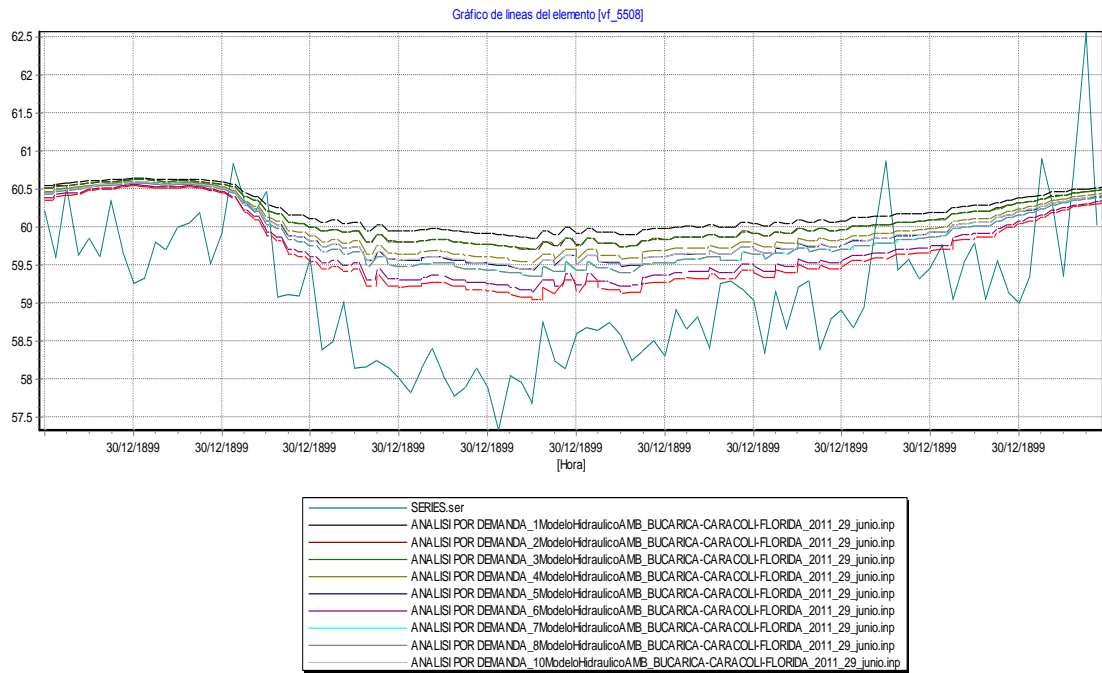
Nodo 1913



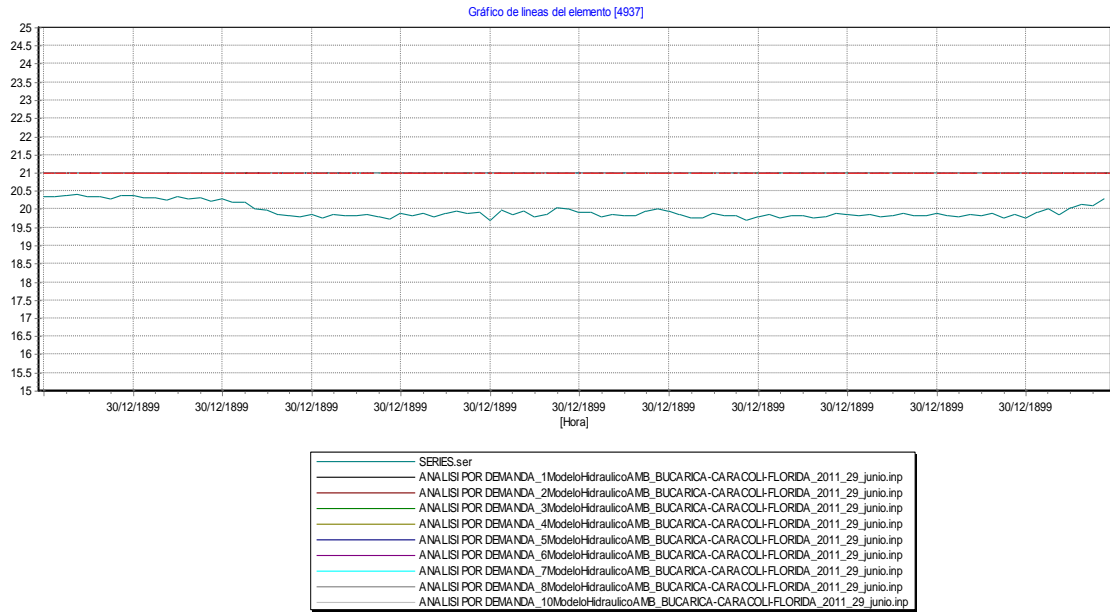
Nodo 5508



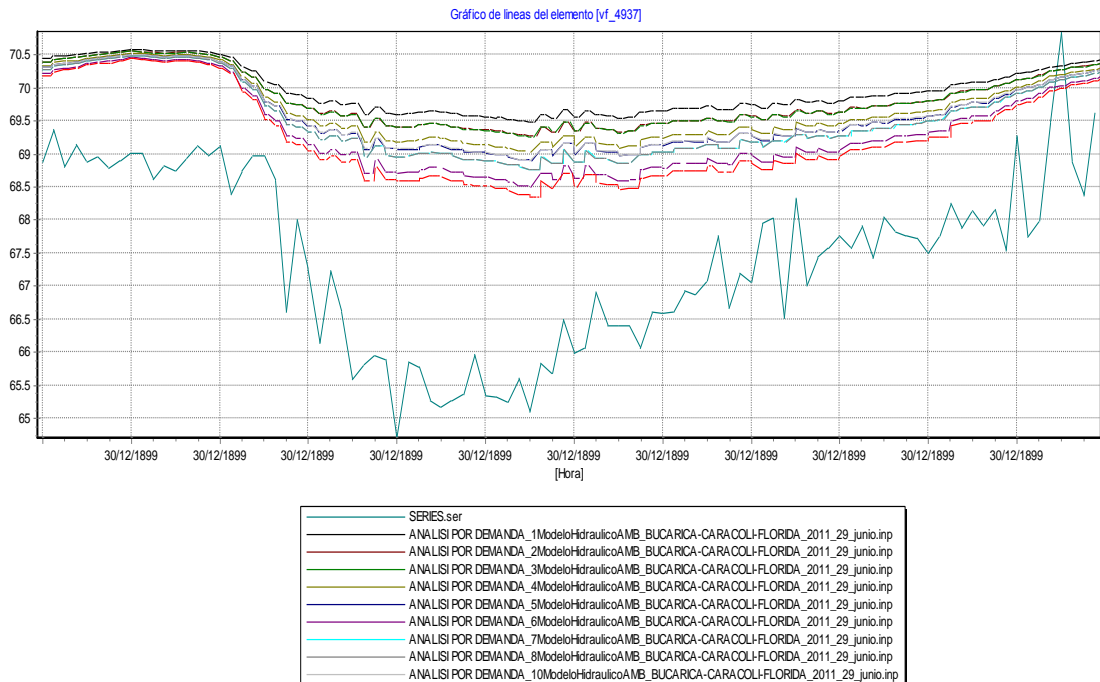
Vf_5508



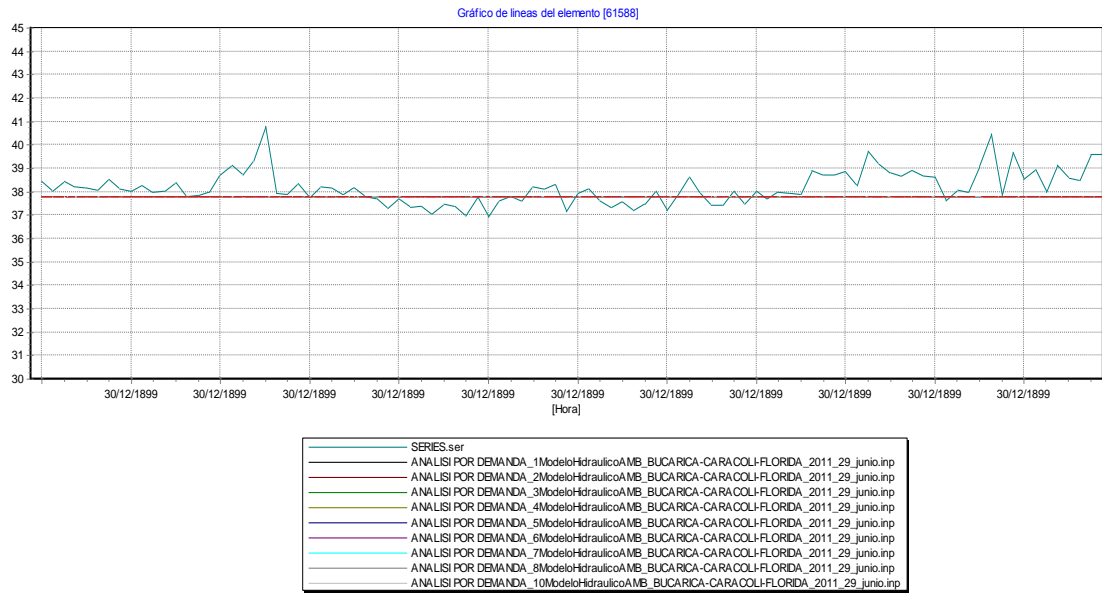
Nodo 4937



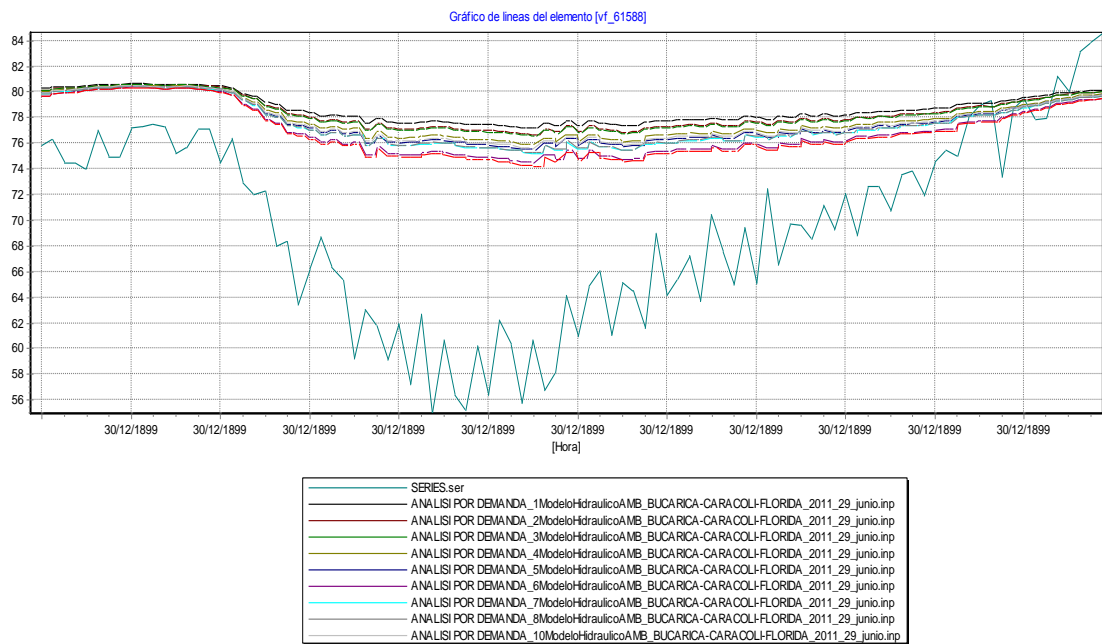
Nodo vf_4937



Nodo 61588

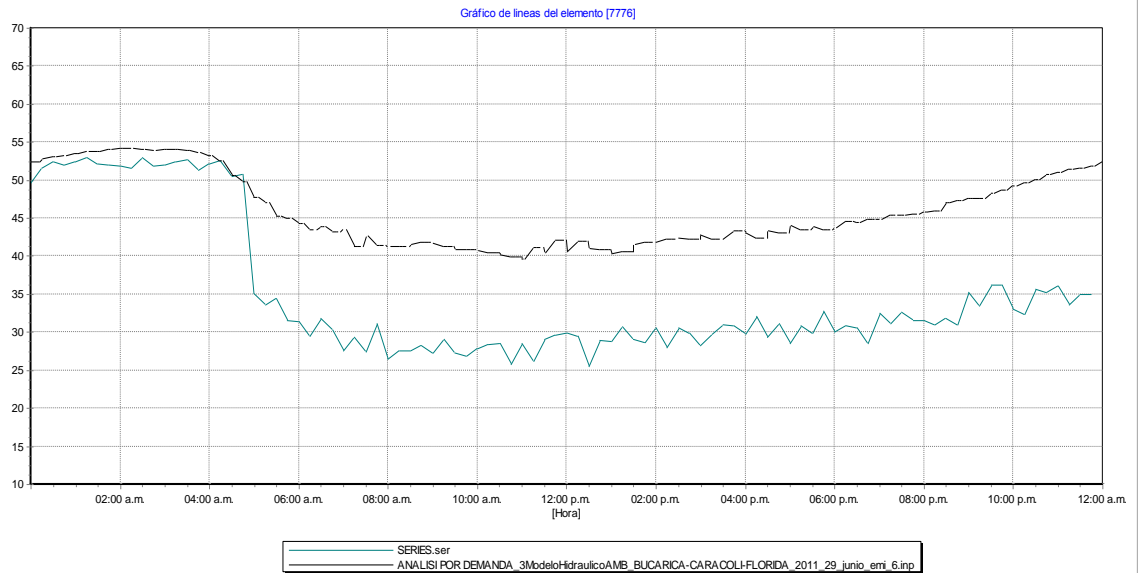


Nodo vf_61588

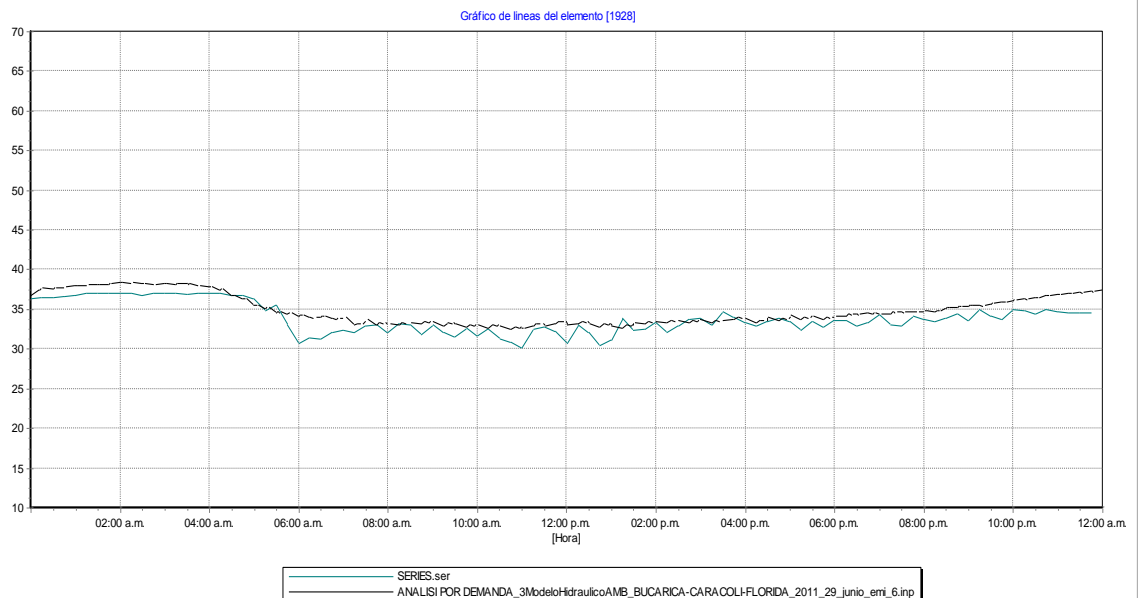


ANEXO E. GRAFICAS DE PRESIÓN OBTENIDAS DE LA LÍNEA BASE 2

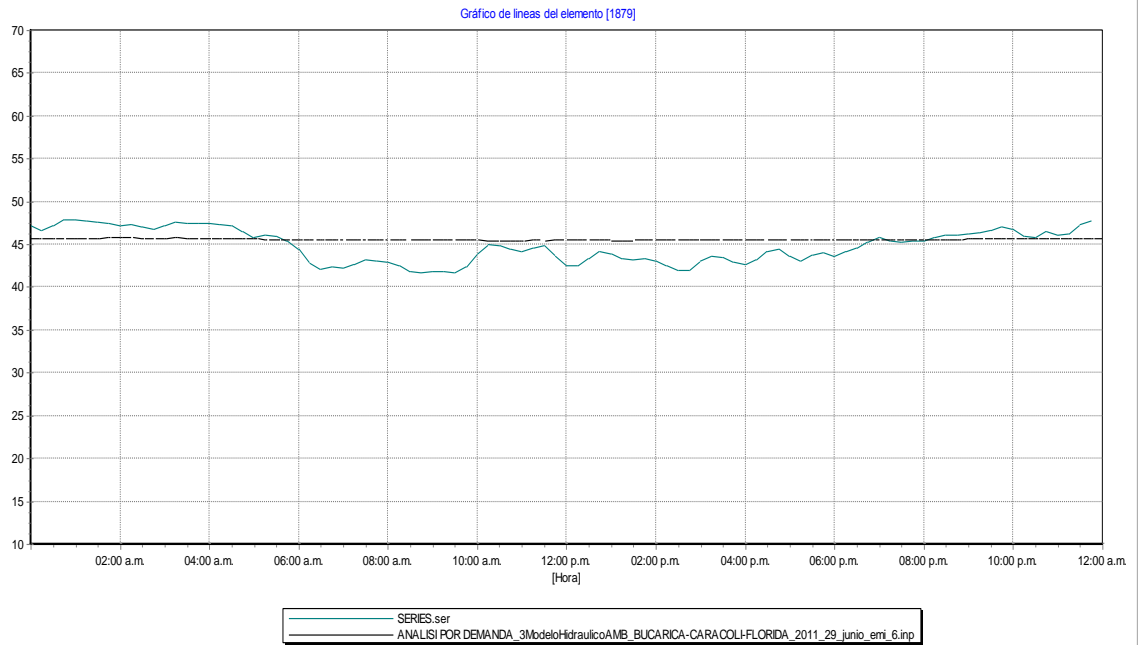
Nodo 7776



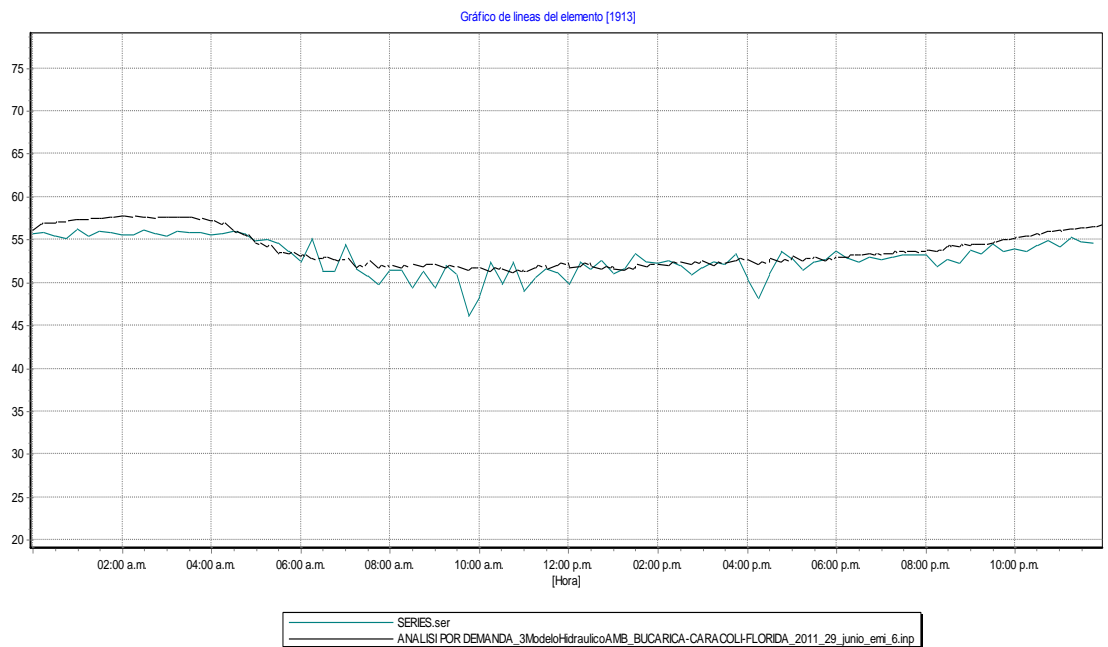
Nodo 1928



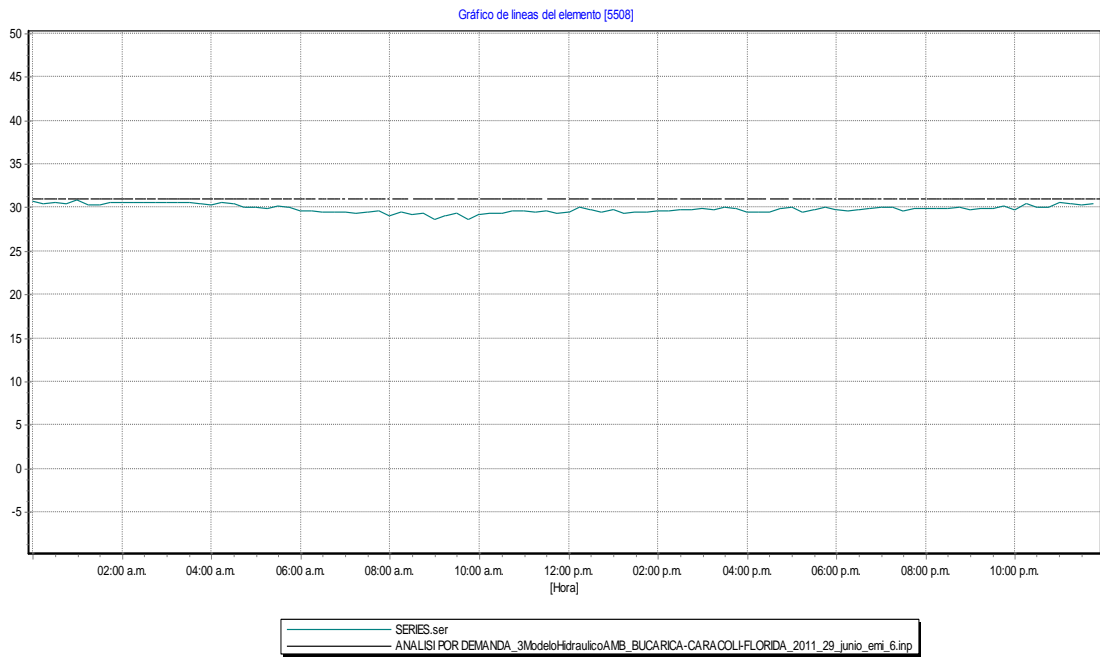
Nodo 1879



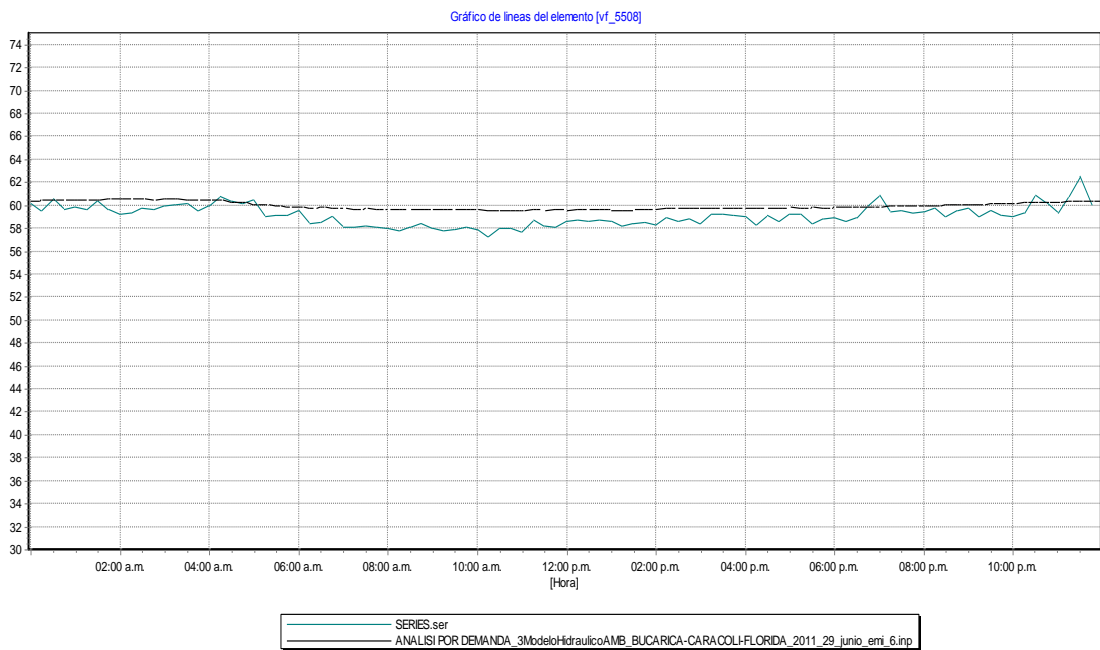
Nodo 1913



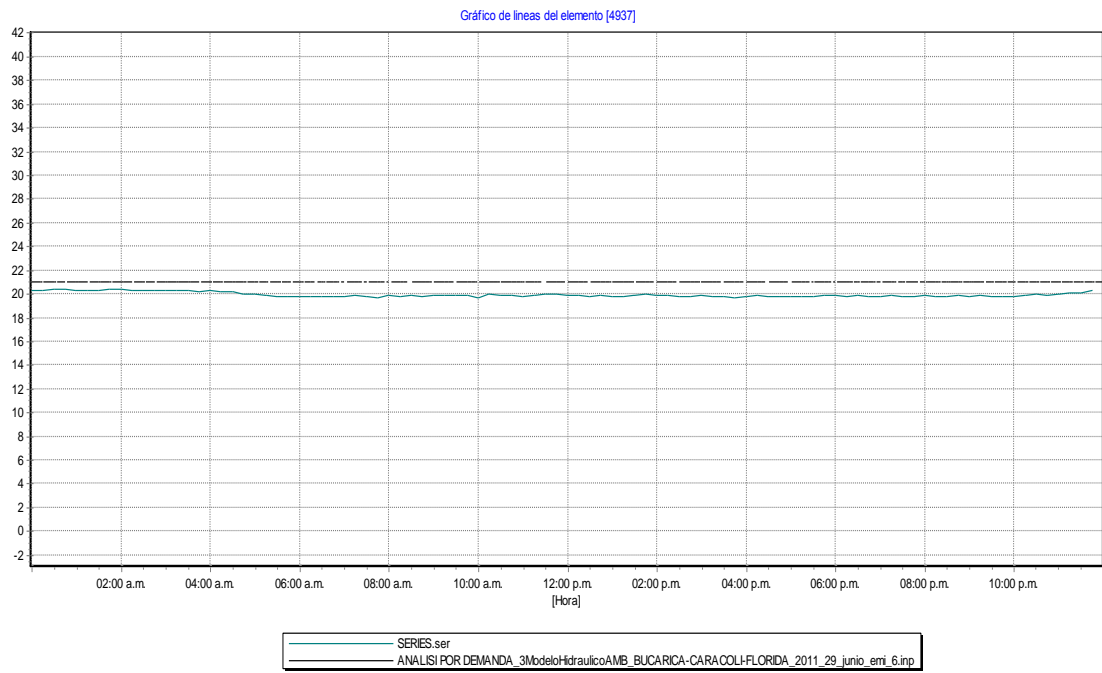
Nodo 5508



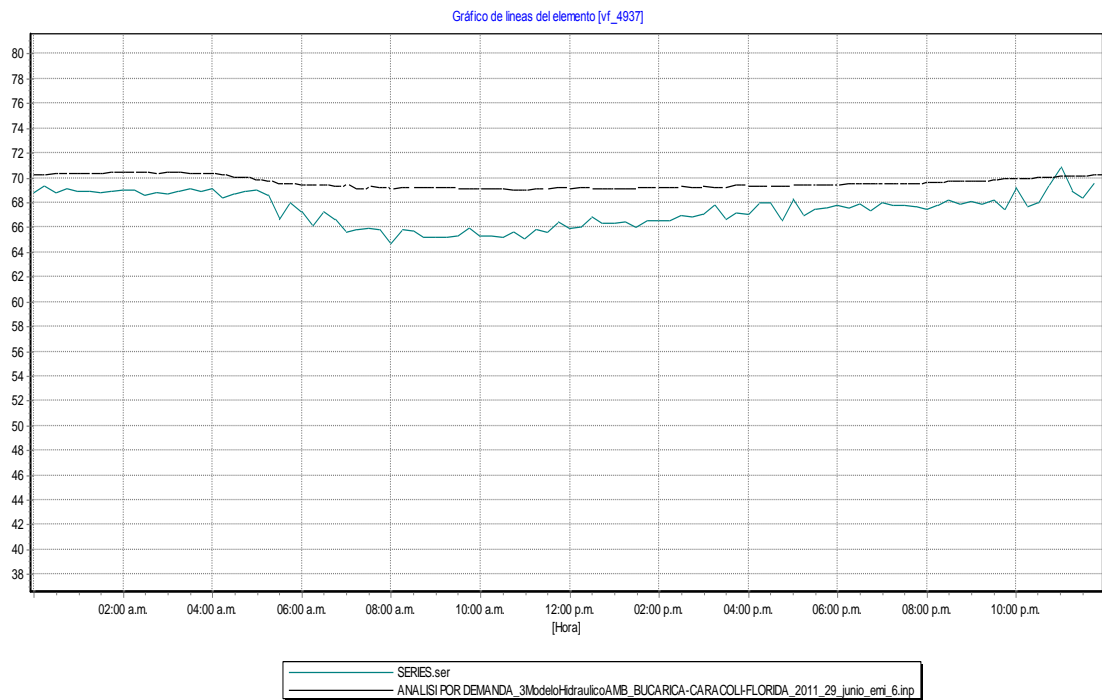
Nodo vf_5508



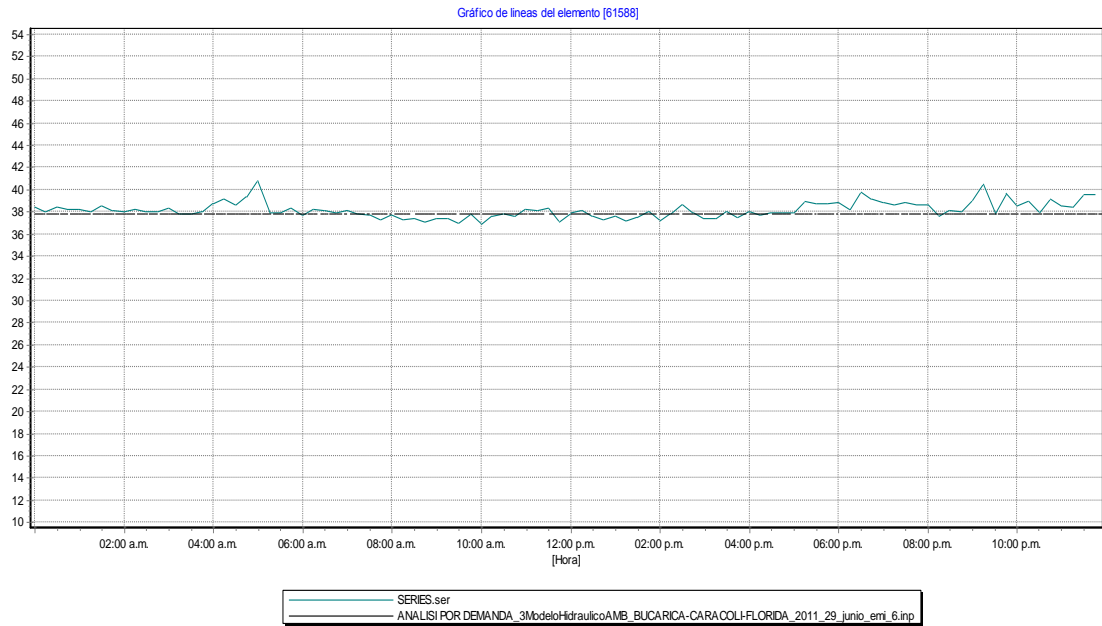
Nodos 4937



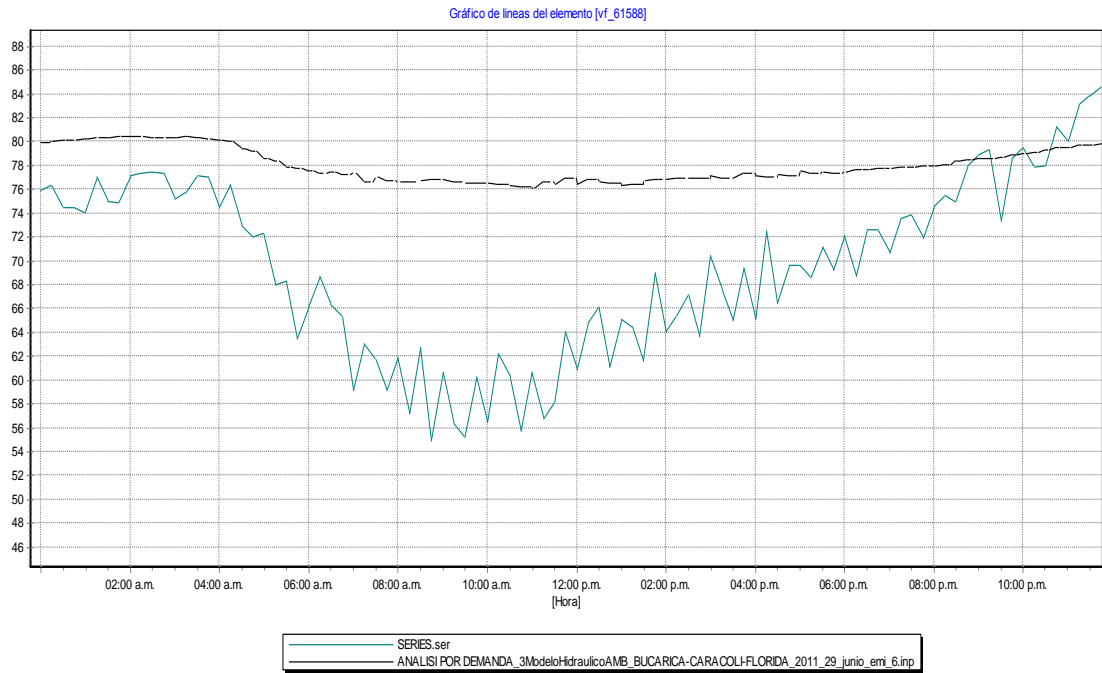
Nodo vf_4937



Nodo 61588

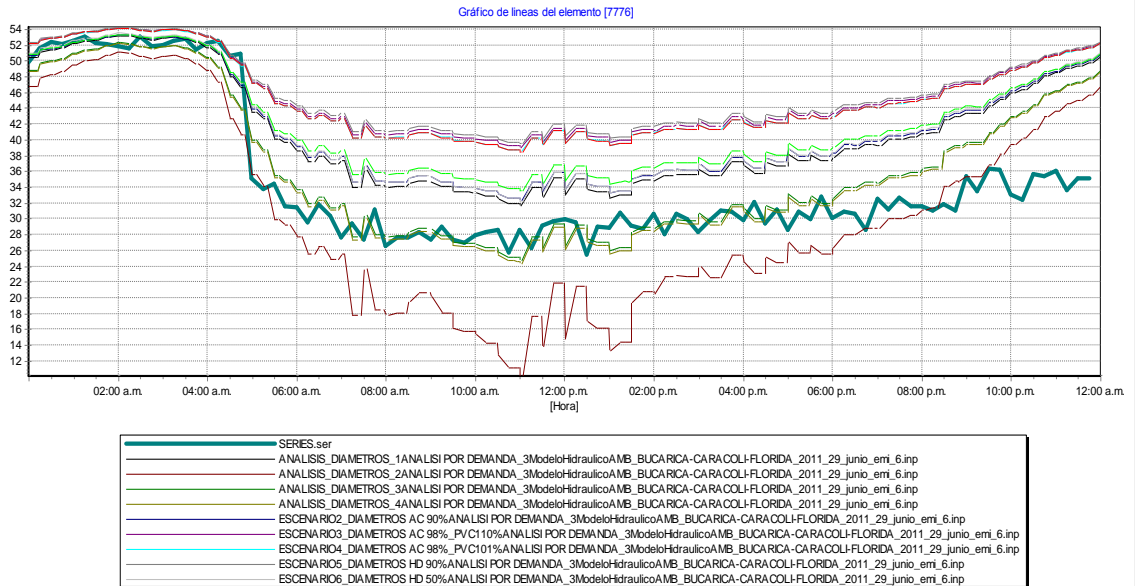


Nodo vf_61588

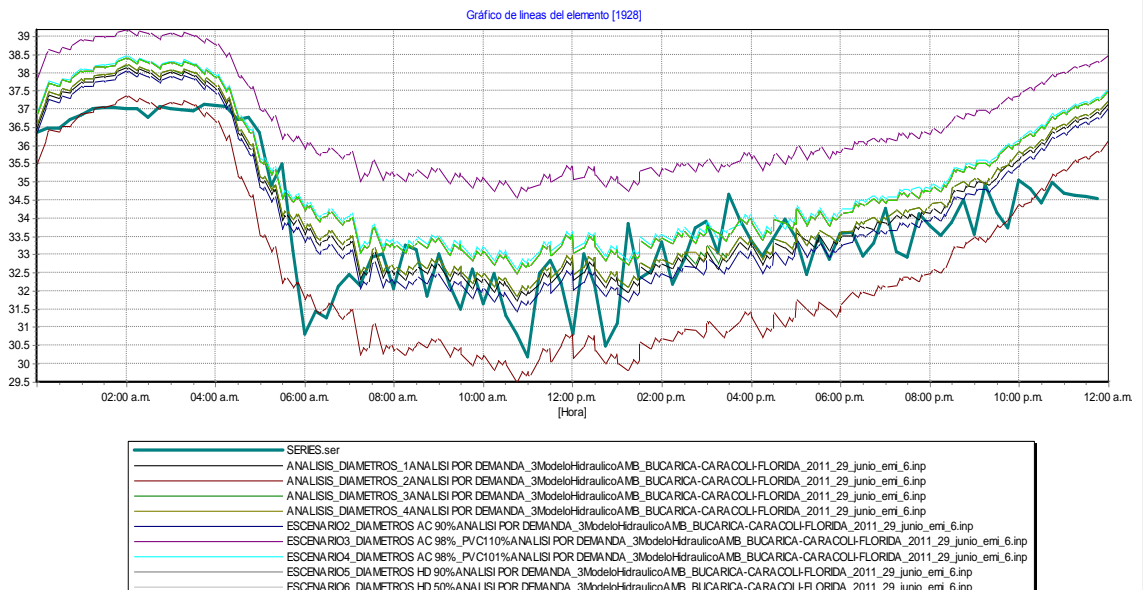


ANEXO F. GRÁFICAS DE PRESIÓN POR ANÁLISIS DE DIÁMETROS EN LA LÍNEA BASE 2

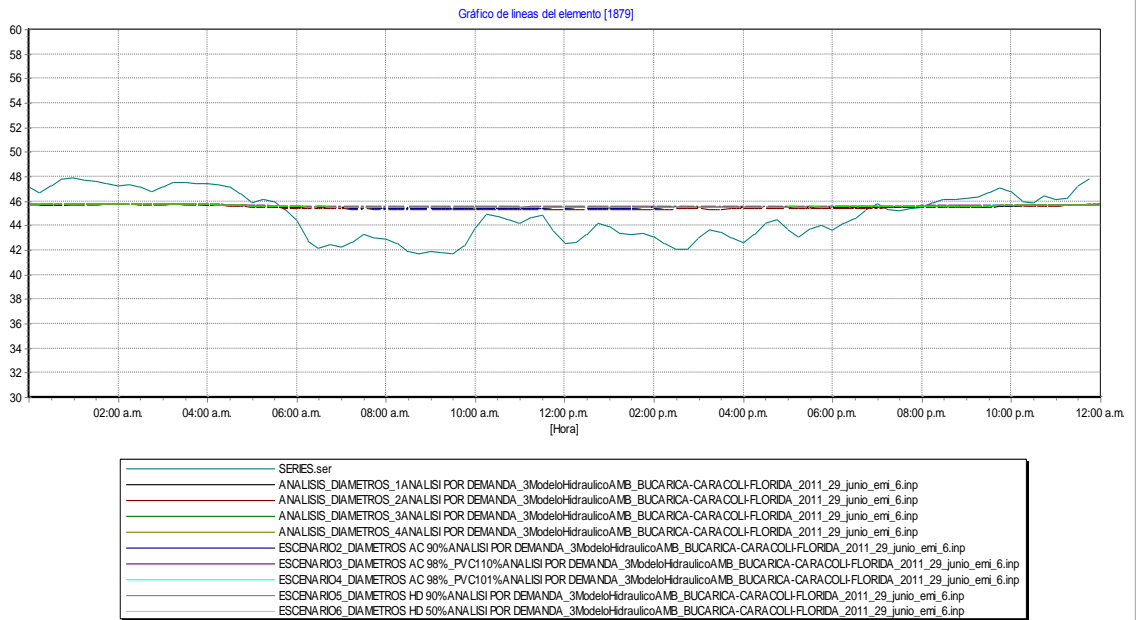
Nodo 7776



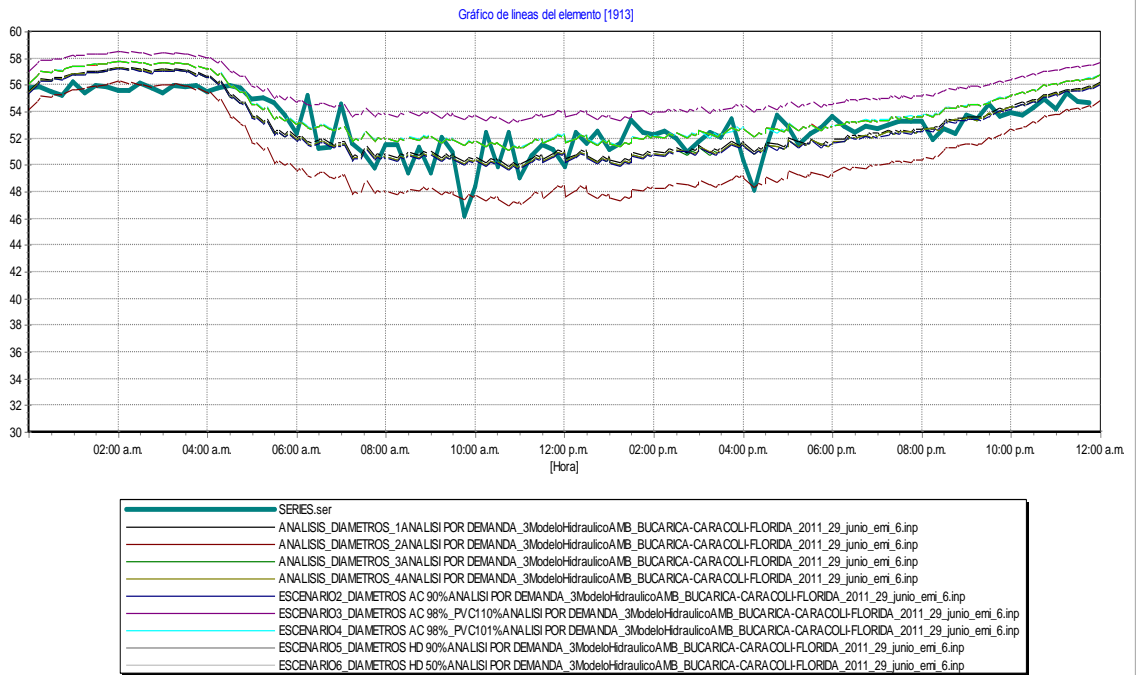
Nodo 1928



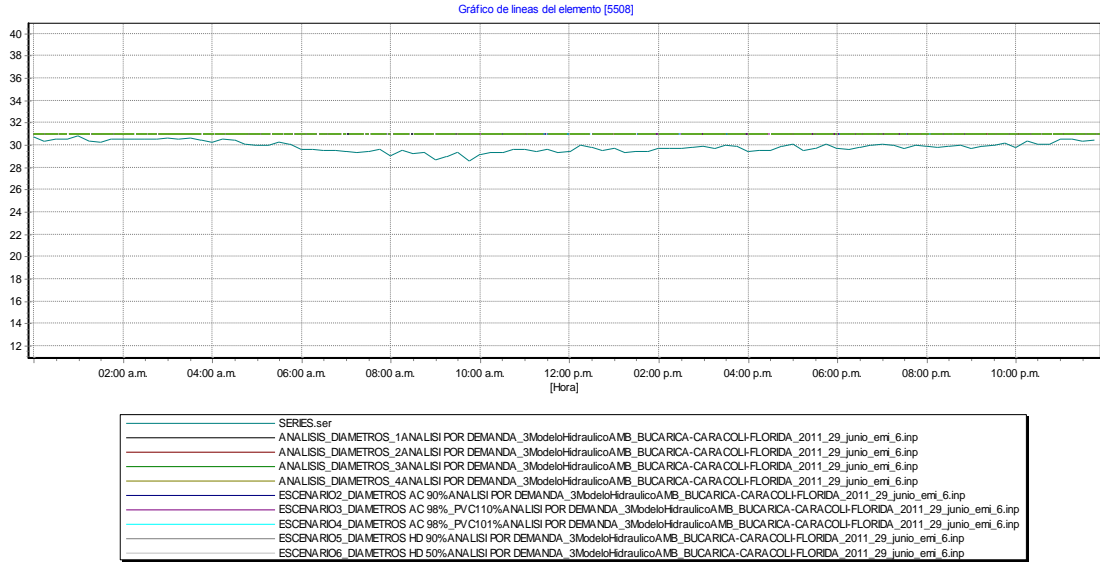
Nodo 1879



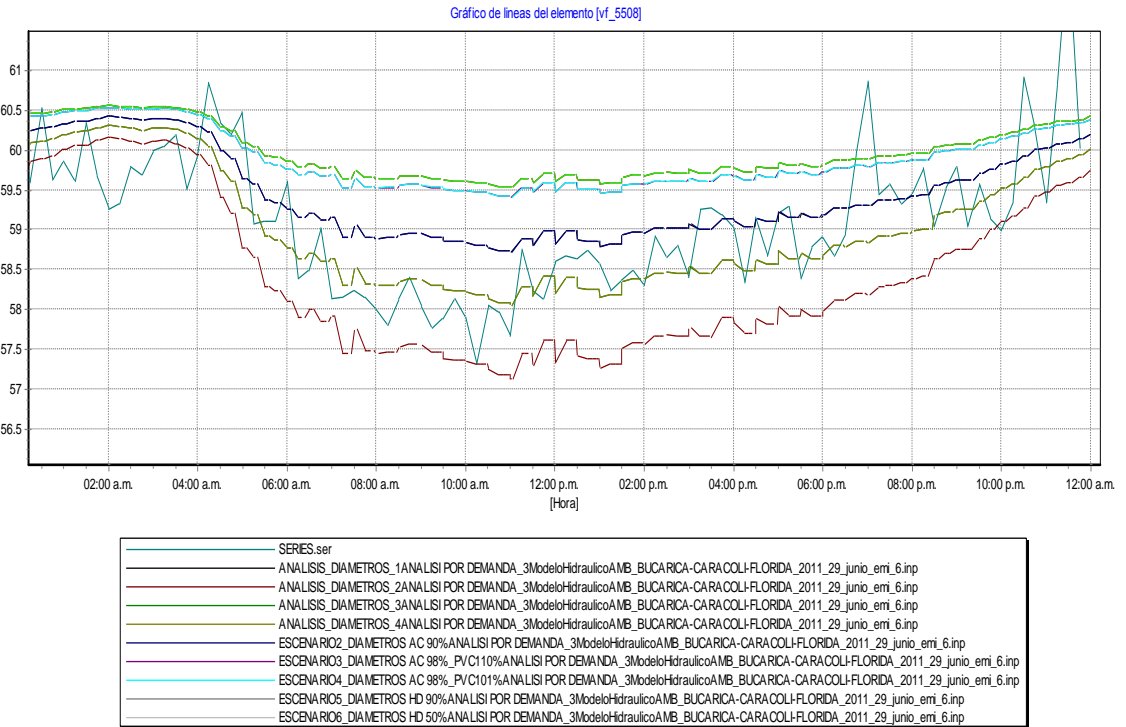
Nodo 1913



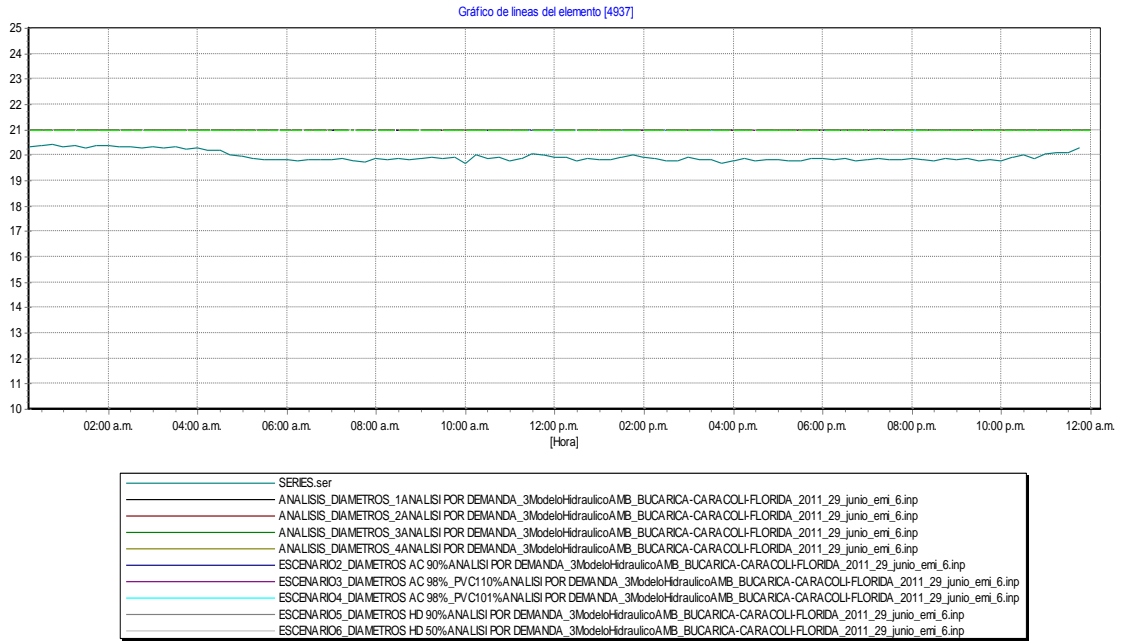
Nodo 5508



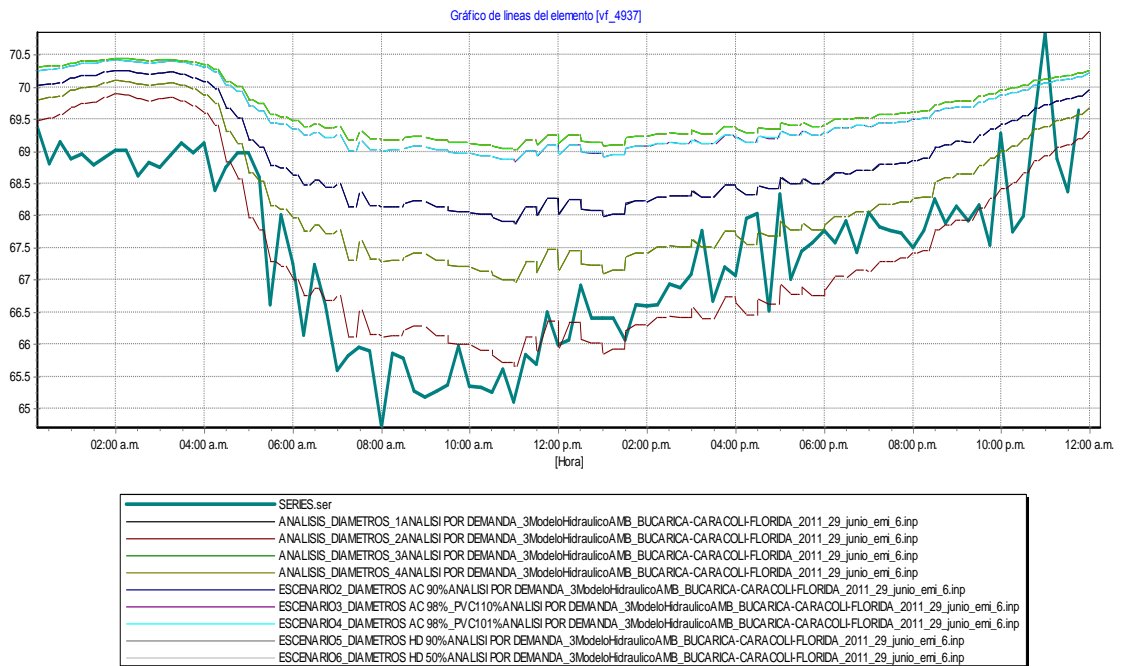
Nodo vf_5508



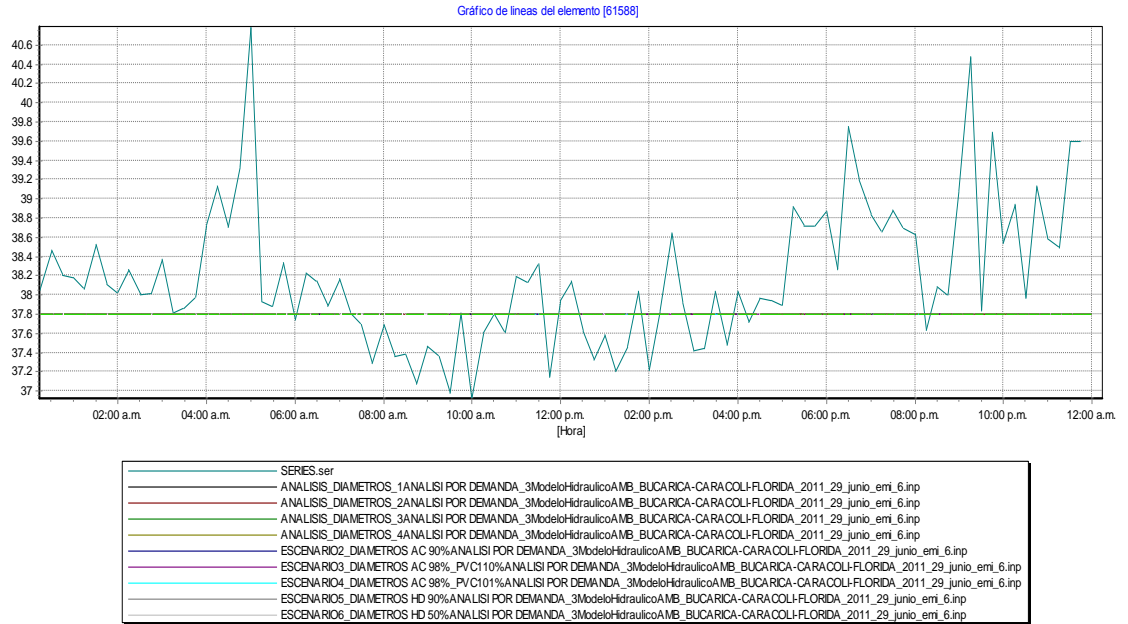
Nodo 4937



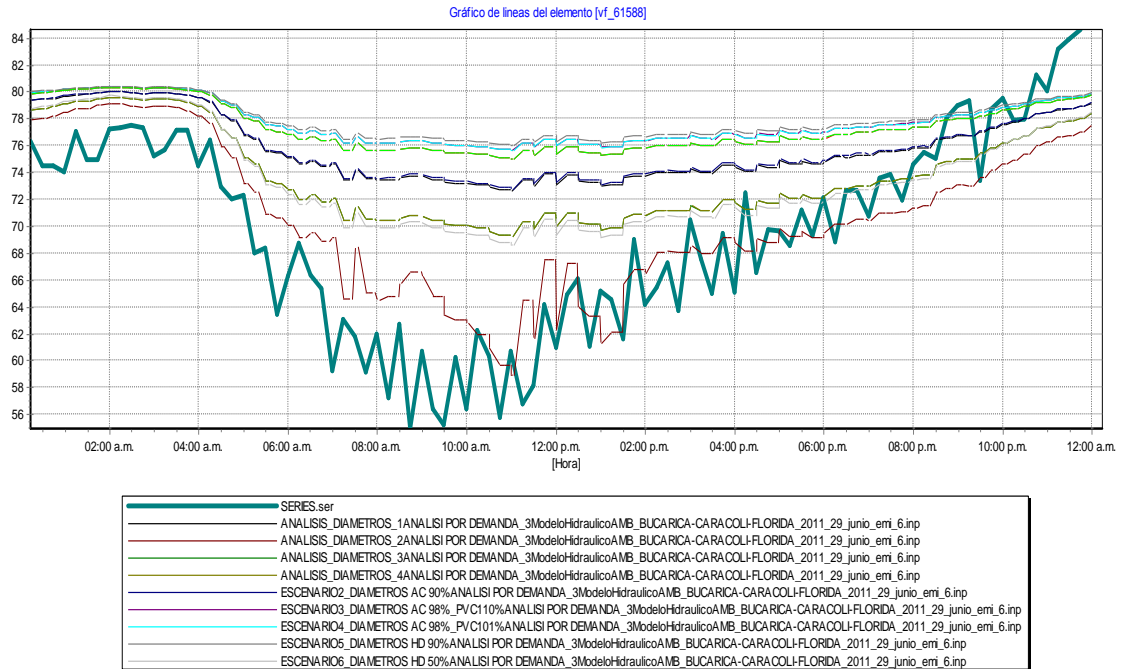
Nodo vf_4937



Nodo 61588

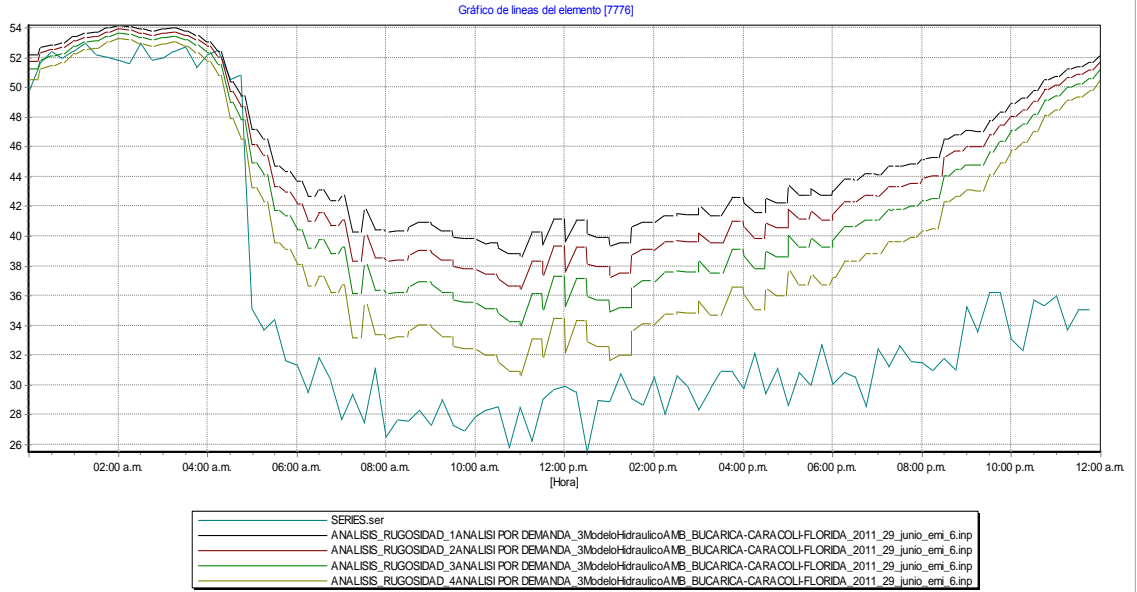


Nodo vf_61588

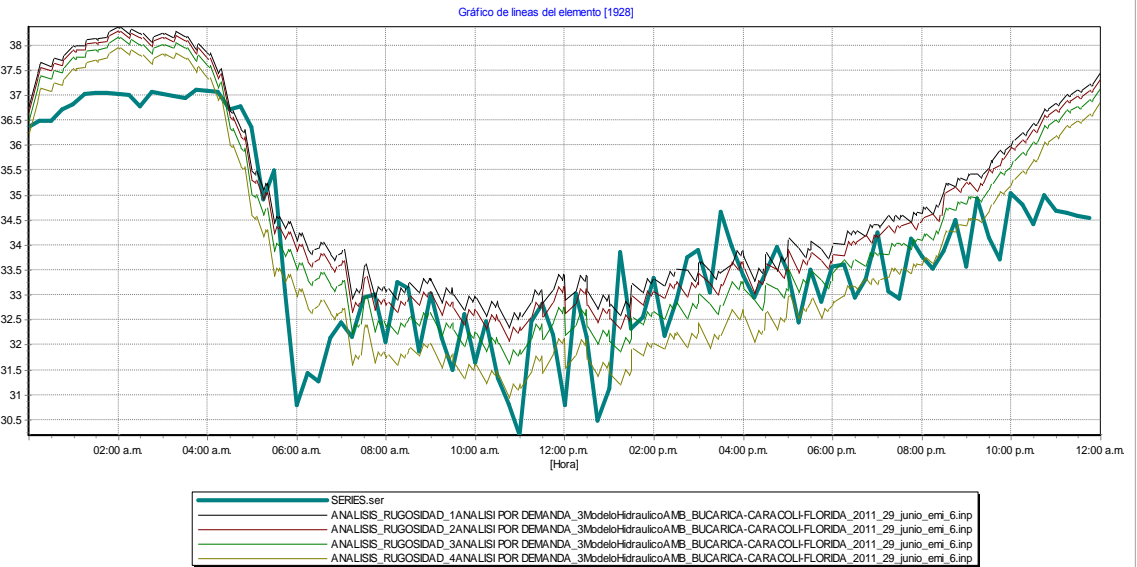


ANEXO G. GRAFICAS DE PRESIÓN POR ANÁLISIS DE RUGOSIDADES EN LA LÍNEA BASE 2

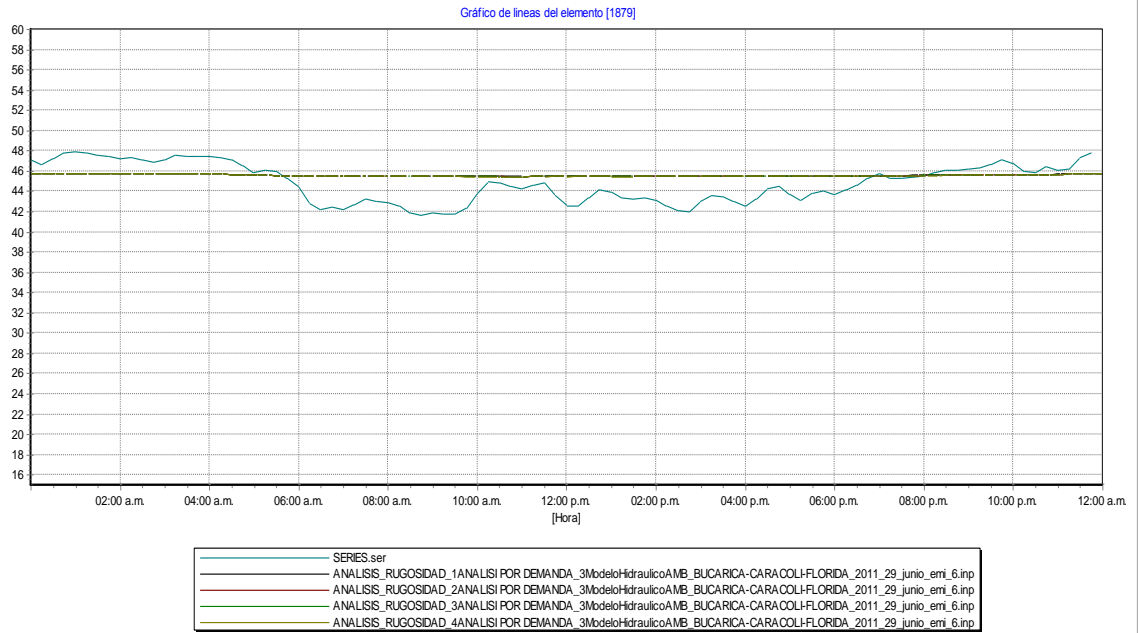
Nodo 7776



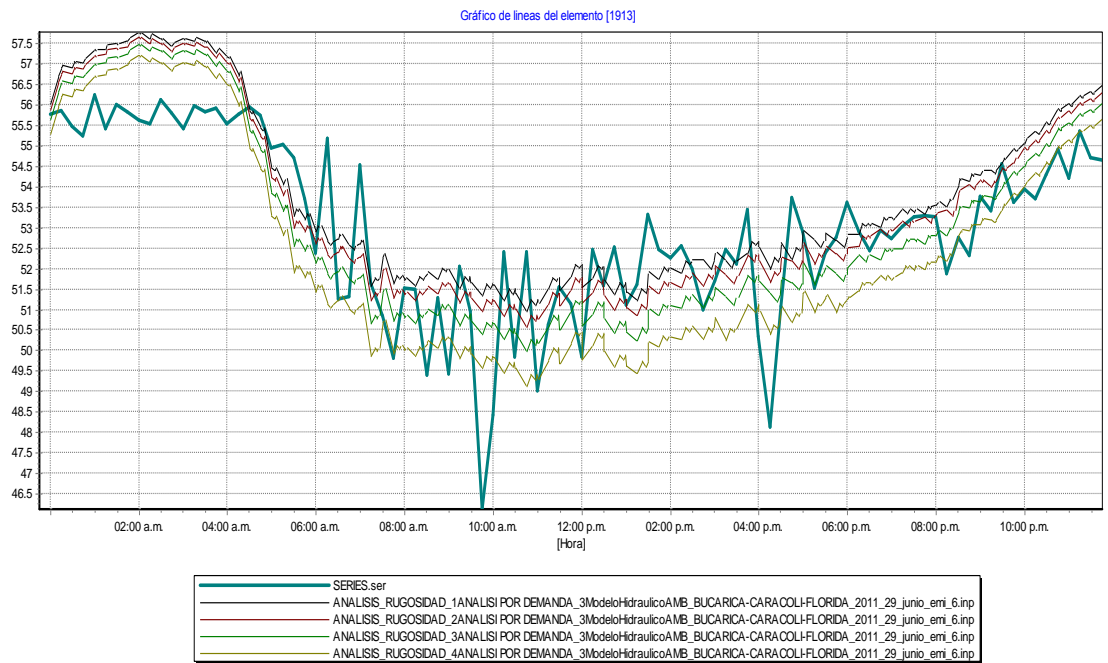
Nodo 1928



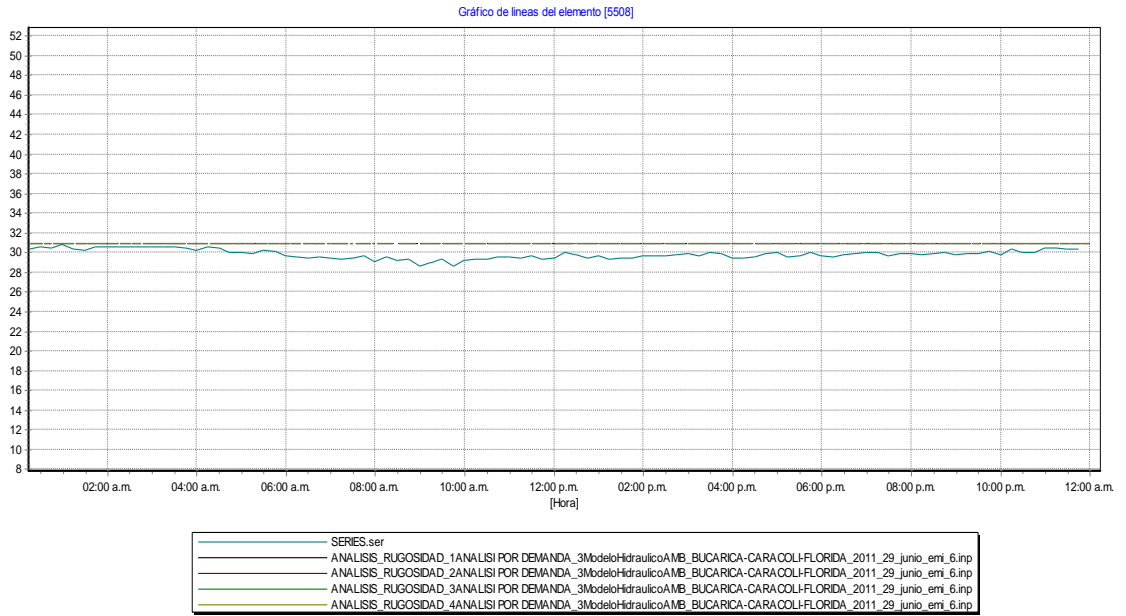
Nodo 1879



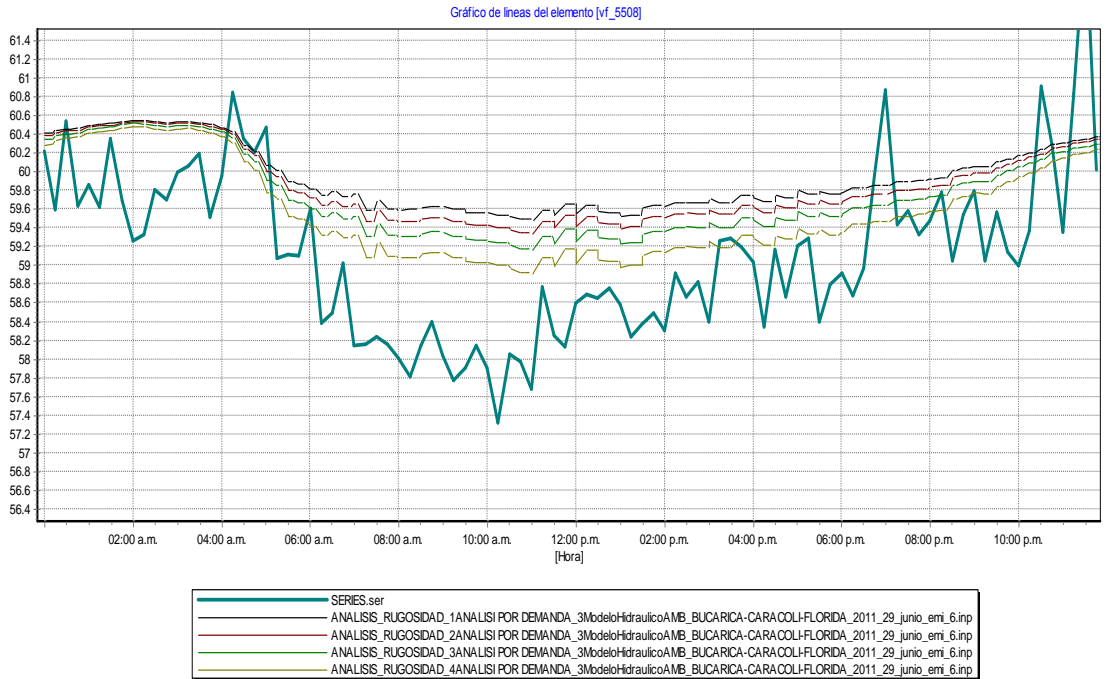
Nodo 1913



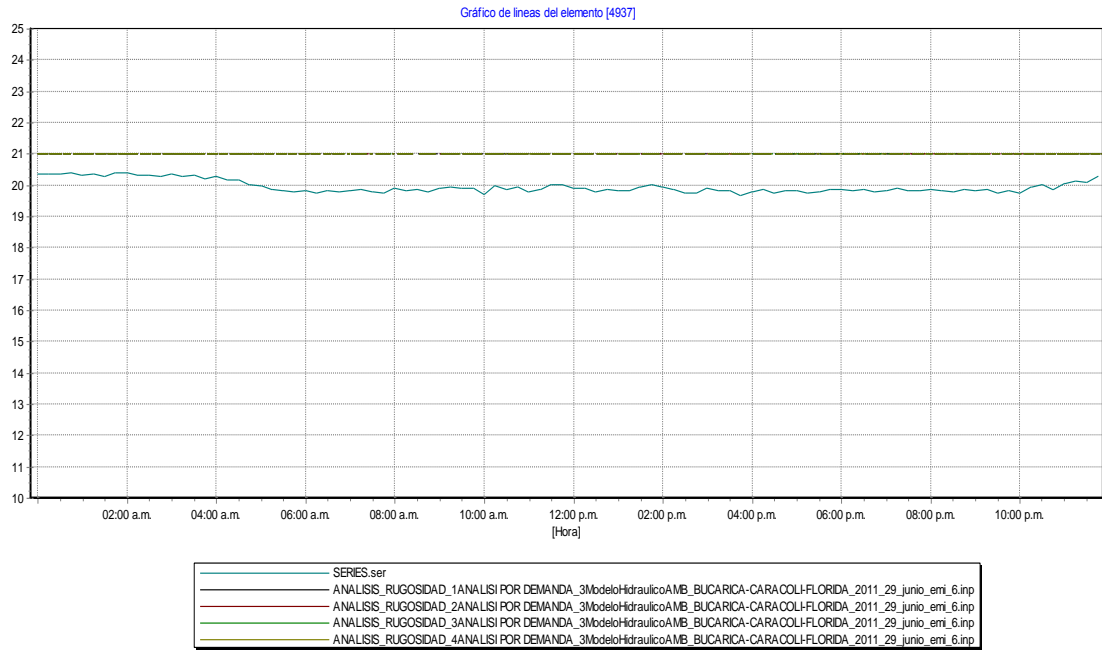
Nodo 5508



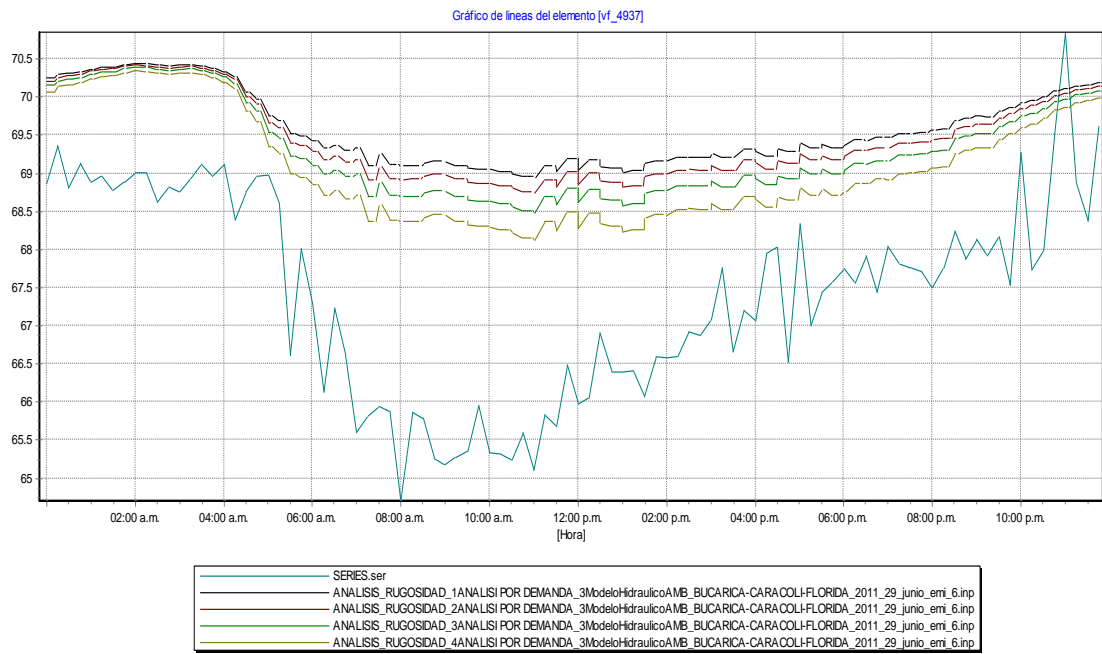
Nodo vf_5508



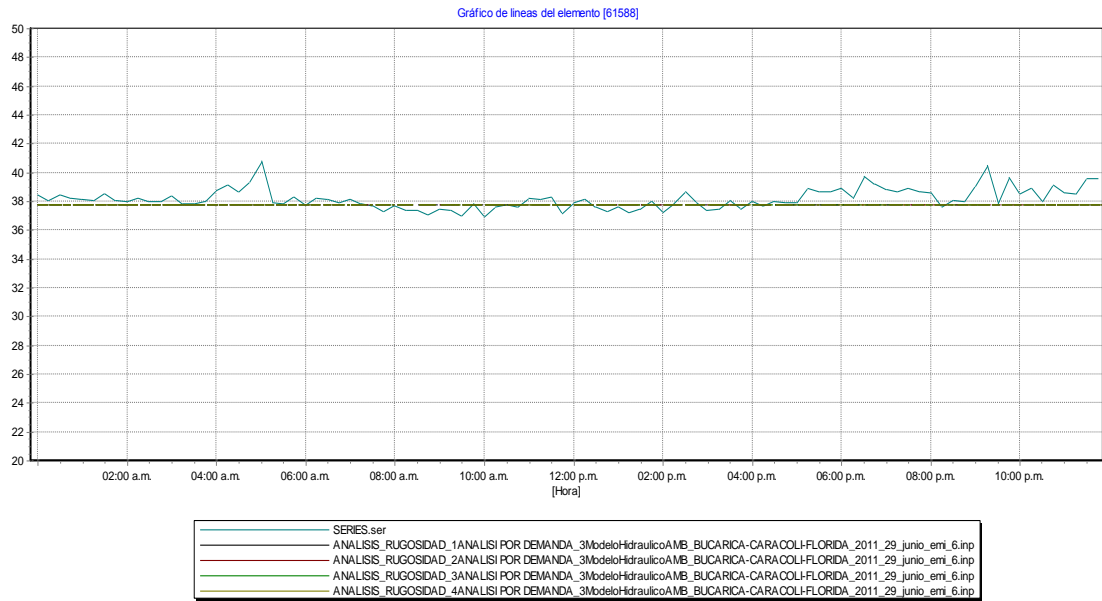
Nodo 4937



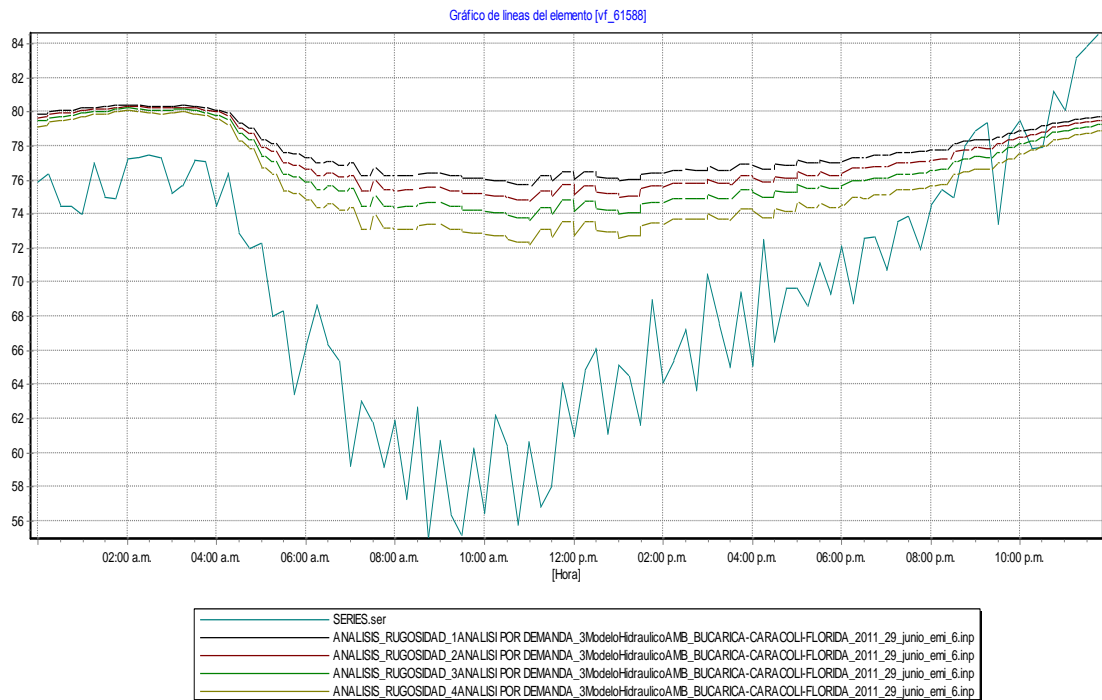
Nodo vf_4937



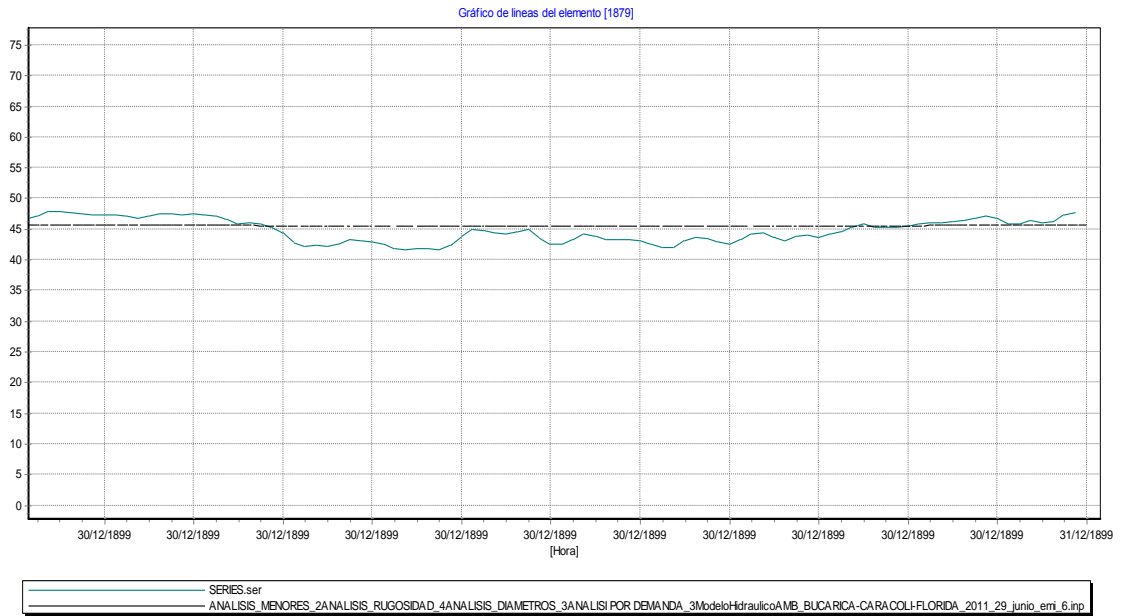
Nodo 61588



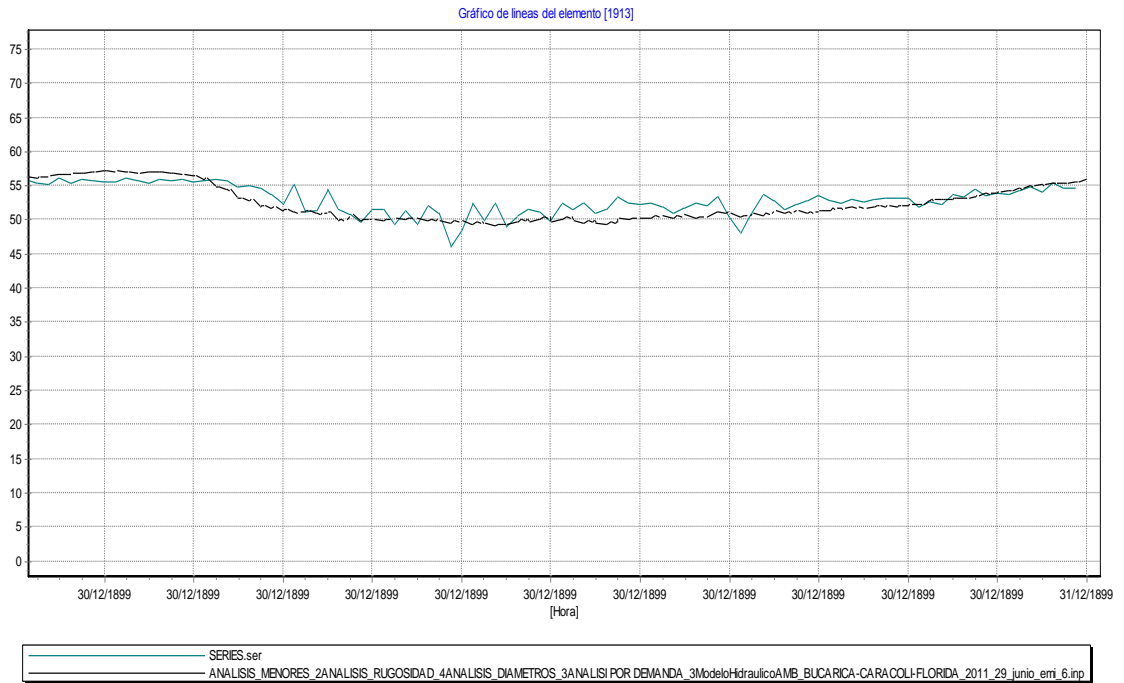
Nodo vf_61588



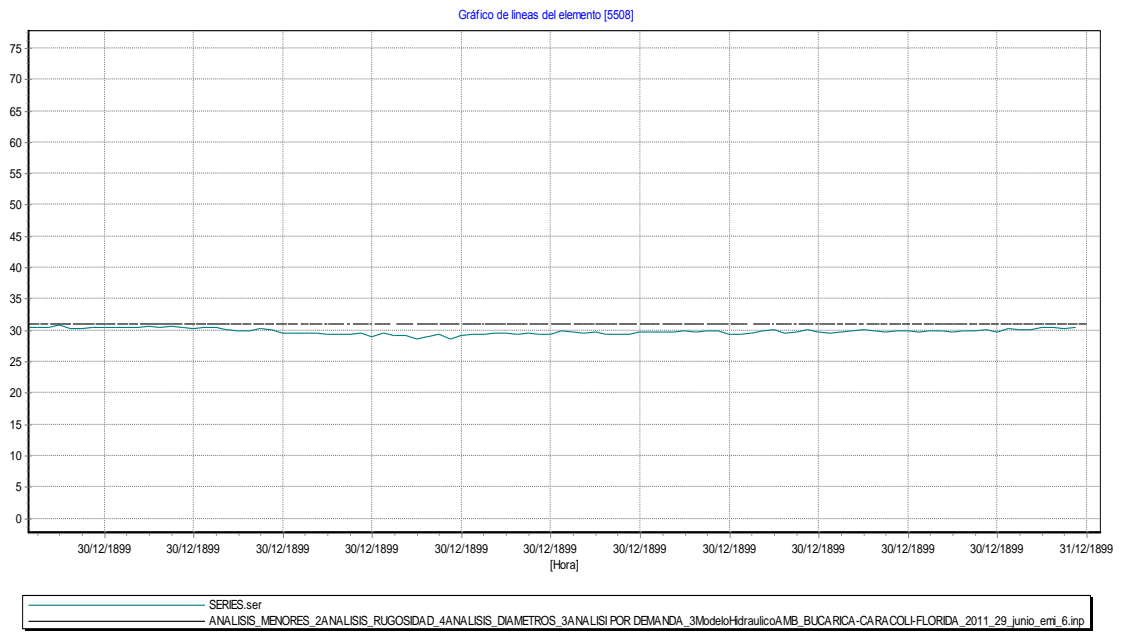
Nodo 1879



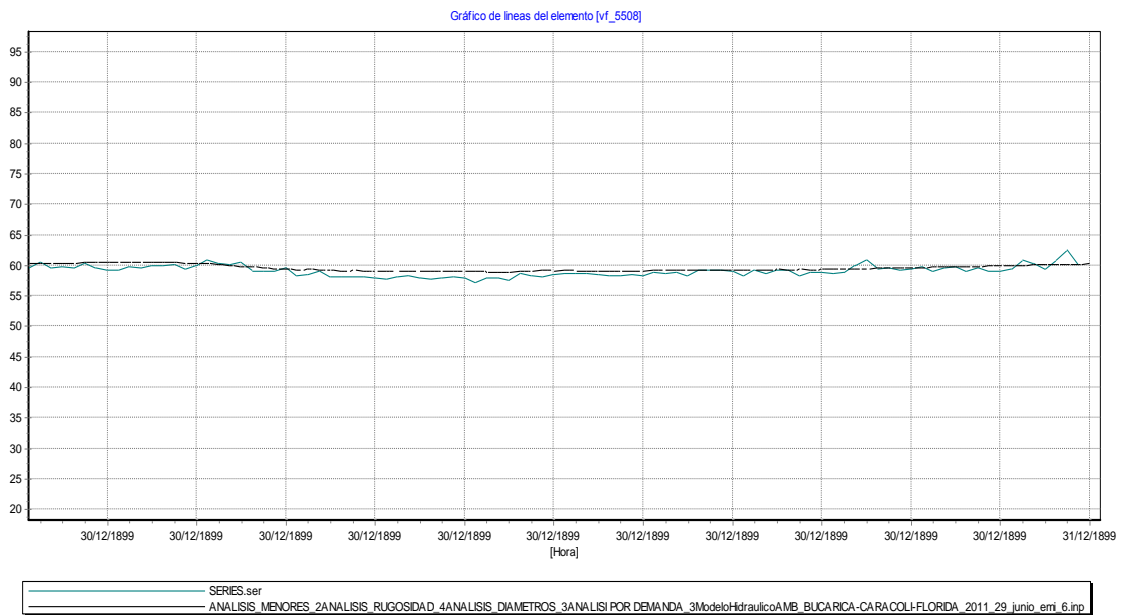
Nodo 1913



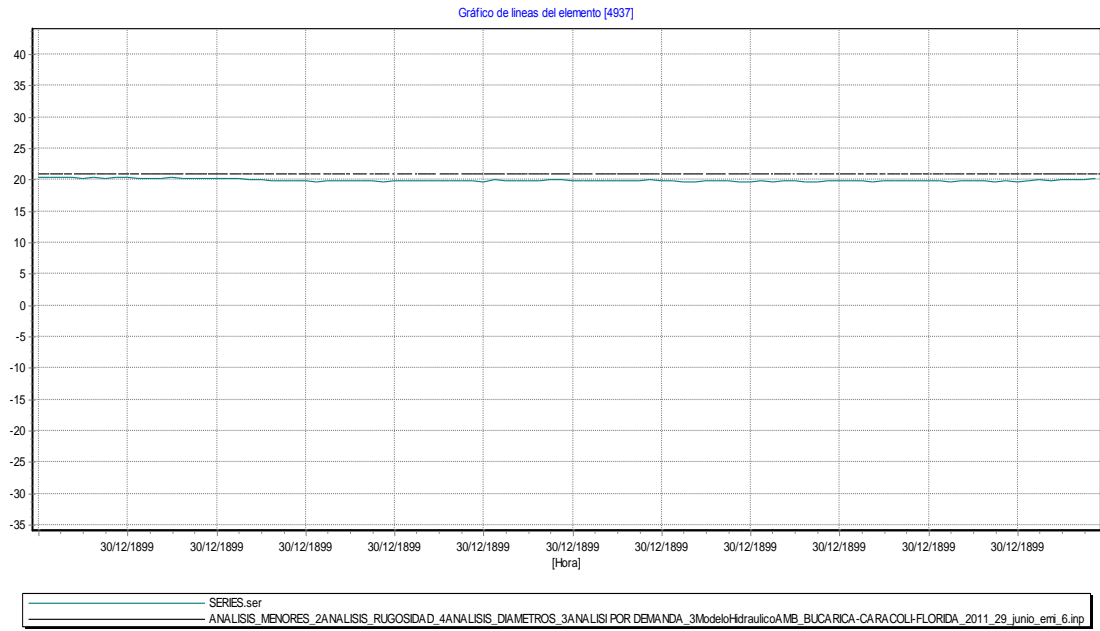
Nodo 5508



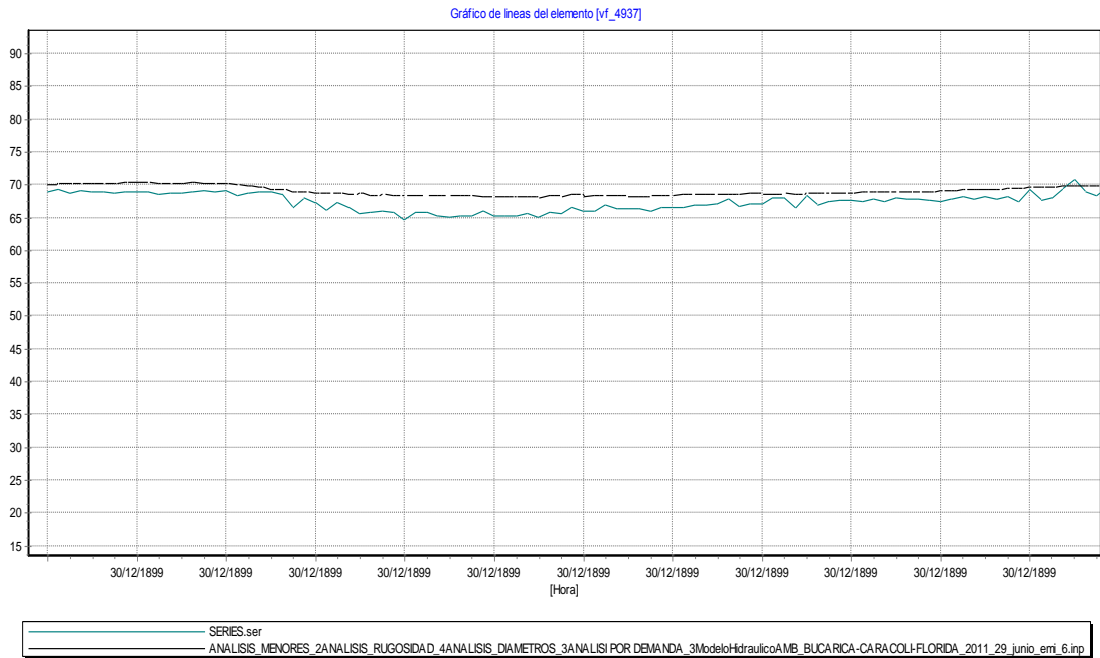
Nodo vf_5508



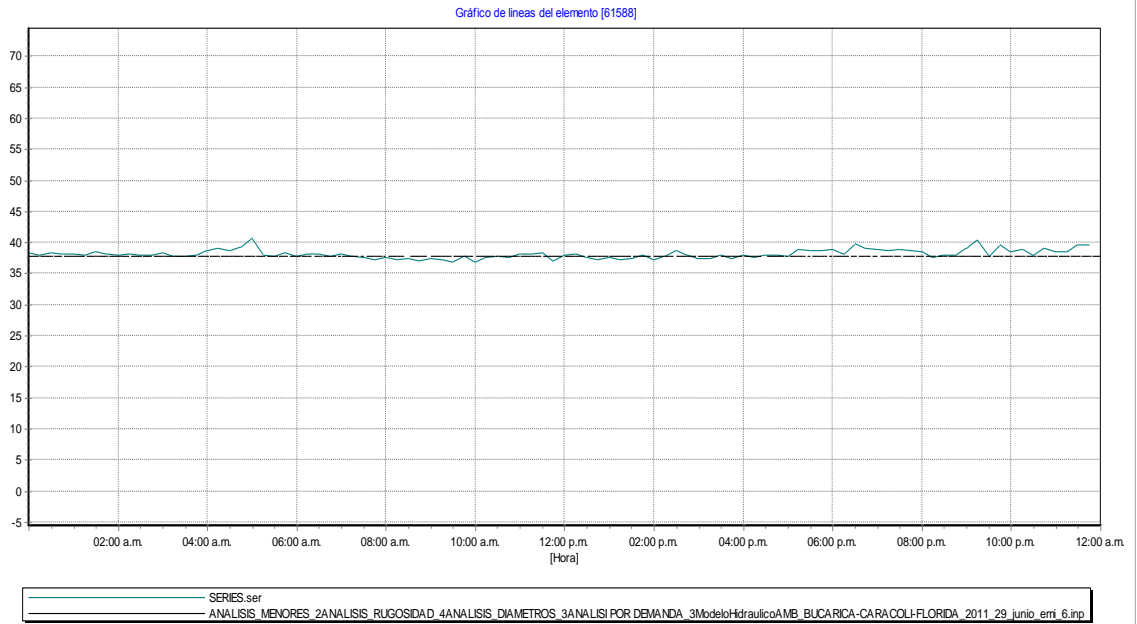
Nodo 4937



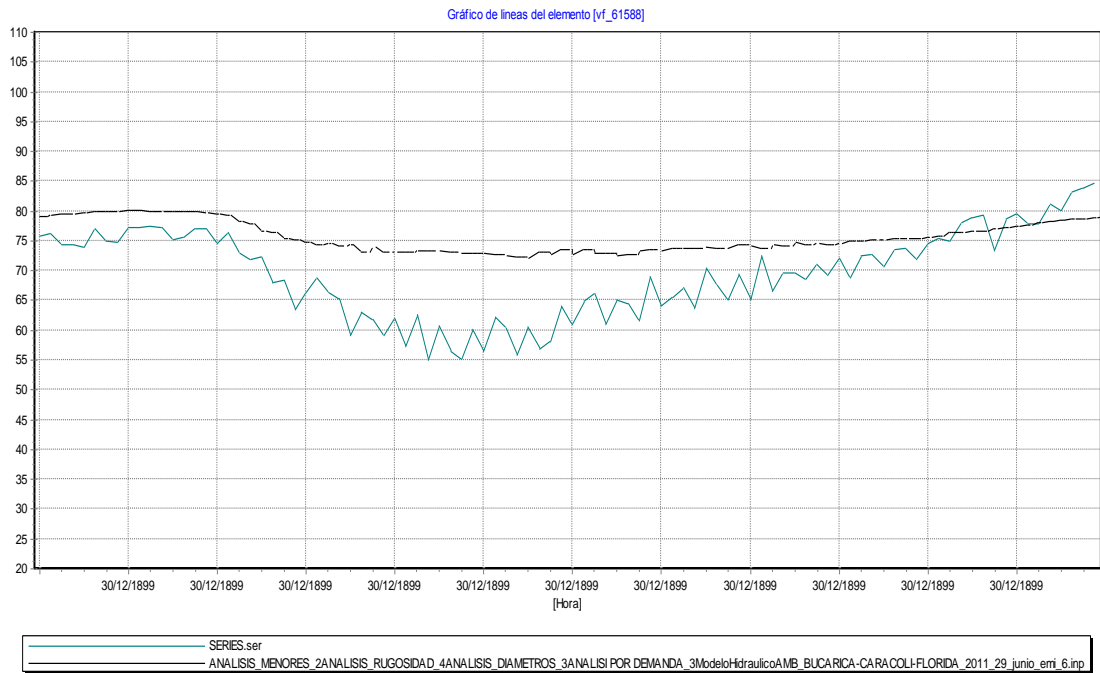
Nodo vf_4937



Nodo 61508



Nodo vf_61508



ANEXO I. CAUDALES DE SALIDA Y VOLUMEN DE PLANTA Y MODELO

| CAUDAL DE MODELO | VOLUMEN |
|------------------|---------|
| 25.52 | |
| 24.43 | 21987 |
| 23.38 | 21514.5 |
| 22.96 | 20853 |
| 22.63 | 20515.5 |
| 21.68 | 19939.5 |
| 21.09 | 19246.5 |
| 20.97 | 18927 |
| 20.23 | 18540 |
| 19.74 | 17986.5 |
| 19.93 | 17851.5 |
| 20.42 | 18157.5 |
| 20.78 | 18540 |
| 20.41 | 18535.5 |
| 20.24 | 18292.5 |
| 20.75 | 18445.5 |
| 21.5 | 19012.5 |
| 22.48 | 19791 |
| 23.97 | 20902.5 |
| 27.98 | 23377.5 |
| 29.61 | 25915.5 |
| 33.17 | 28251 |
| 34.15 | 30294 |
| 36.72 | 31891.5 |
| 37.12 | 33228 |
| 38.04 | 33822 |
| 39.28 | 34794 |
| 38.71 | 35095.5 |
| 39.61 | 35244 |
| 39.24 | 35482.5 |
| 42.1 | 36603 |
| 40.31 | 37084.5 |
| 41.94 | 37012.5 |
| 42.11 | 37822.5 |
| 42.05 | 37872 |
| 41.68 | 37678.5 |

| CAUDAL SALIDA DE PLANTA | VOLUMEN |
|-------------------------|----------|
| 36.95 | |
| 34.94 | 32352.23 |
| 34.00 | 31023.50 |
| 33.22 | 30246.31 |
| 32.60 | 29617.86 |
| 30.84 | 28547.48 |
| 29.77 | 27273.20 |
| 30.54 | 27141.05 |
| 29.17 | 26871.08 |
| 28.26 | 25844.05 |
| 28.61 | 25594.50 |
| 29.51 | 26157.93 |
| 29.17 | 26408.65 |
| 29.50 | 26400.95 |
| 29.18 | 26403.17 |
| 29.13 | 26236.18 |
| 29.50 | 26383.16 |
| 32.32 | 27822.05 |
| 34.70 | 30158.42 |
| 36.50 | 32036.03 |
| 39.54 | 34215.35 |
| 46.12 | 38546.29 |
| 47.93 | 42320.21 |
| 52.68 | 45272.96 |
| 53.42 | 47746.46 |
| 55.14 | 48851.13 |
| 57.43 | 50654.85 |
| 56.37 | 51211.92 |
| 58.04 | 51485.43 |
| 57.34 | 51919.46 |
| 62.65 | 53992.88 |
| 59.31 | 54880.62 |
| 62.34 | 54743.11 |
| 62.68 | 56257.64 |
| 62.53 | 56344.42 |
| 61.86 | 55975.00 |

| | |
|-------|---------|
| 41.4 | 37386 |
| 41.51 | 37309.5 |
| 42.05 | 37602 |
| 42.52 | 38056.5 |
| 42.63 | 38317.5 |
| 42.73 | 38412 |
| 43 | 38578.5 |
| 43.35 | 38857.5 |
| 43.79 | 39213 |
| 44.04 | 39523.5 |
| 42.14 | 38781 |
| 43.1 | 38358 |
| 41.08 | 37881 |
| 42.87 | 37777.5 |
| 41.18 | 37822.5 |
| 42.33 | 37579.5 |
| 42.53 | 38187 |
| 43.23 | 38592 |
| 42.96 | 38785.5 |
| 41.71 | 38101.5 |
| 41.34 | 37372.5 |
| 41.41 | 37237.5 |
| 40.82 | 37003.5 |
| 40.72 | 36693 |
| 40.79 | 36679.5 |
| 40.14 | 36418.5 |
| 40.85 | 36445.5 |
| 40.89 | 36783 |
| 39.33 | 36099 |
| 39.79 | 35604 |
| 40.6 | 36175.5 |
| 39.47 | 36031.5 |
| 39.82 | 35680.5 |
| 38.41 | 35203.5 |
| 39.19 | 34920 |
| 38.63 | 35019 |
| 39.23 | 35037 |
| 38.78 | 35104.5 |
| 37.84 | 34479 |
| 37.87 | 34069.5 |

| | |
|-------|----------|
| 61.34 | 55439.21 |
| 61.55 | 55302.10 |
| 62.53 | 55838.64 |
| 63.41 | 56676.83 |
| 63.62 | 57164.69 |
| 63.80 | 57340.24 |
| 64.31 | 57649.28 |
| 64.97 | 58172.59 |
| 65.76 | 58826.19 |
| 66.22 | 59389.14 |
| 62.72 | 58021.33 |
| 64.49 | 57243.36 |
| 60.75 | 56358.74 |
| 64.07 | 56172.15 |
| 60.93 | 56253.94 |
| 63.07 | 55801.25 |
| 63.43 | 56924.63 |
| 64.73 | 57672.25 |
| 64.23 | 58032.47 |
| 61.91 | 56763.07 |
| 61.23 | 55414.45 |
| 61.37 | 55170.88 |
| 60.27 | 54738.38 |
| 60.09 | 54161.98 |
| 60.21 | 54135.93 |
| 59.02 | 53656.07 |
| 60.34 | 53710.14 |
| 60.40 | 54330.91 |
| 57.52 | 53062.98 |
| 58.36 | 52147.04 |
| 59.86 | 53203.14 |
| 57.77 | 52936.49 |
| 58.42 | 52288.06 |
| 55.82 | 51411.76 |
| 57.25 | 50885.39 |
| 56.22 | 51061.77 |
| 57.33 | 51097.82 |
| 56.50 | 51227.06 |
| 54.75 | 50065.68 |
| 54.80 | 49299.04 |

| | |
|-------|---------|
| 37.37 | 33858 |
| 37.43 | 33660 |
| 36.69 | 33354 |
| 36.67 | 33012 |
| 36.45 | 32904 |
| 36.04 | 32620.5 |
| 35.86 | 32355 |
| 34.18 | 31518 |
| 33.75 | 30568.5 |
| 33.36 | 30199.5 |
| 33.39 | 30037.5 |
| 32.3 | 29560.5 |
| 31.43 | 28678.5 |
| 30.53 | 27882 |
| 29.92 | 27202.5 |
| 29.07 | 26545.5 |
| 27.76 | 25573.5 |
| 27.3 | 24777 |
| 26.44 | 24183 |
| 26.11 | 23647.5 |
| 25.52 | 23233.5 |

| | |
|-------|----------|
| 53.90 | 48913.33 |
| 53.99 | 48548.41 |
| 52.63 | 47978.67 |
| 52.60 | 47351.92 |
| 52.18 | 47147.81 |
| 51.43 | 46621.00 |
| 51.09 | 46131.21 |
| 47.98 | 44580.15 |
| 47.19 | 42827.43 |
| 46.46 | 42144.41 |
| 46.53 | 41845.88 |
| 44.52 | 40971.97 |
| 42.90 | 39338.38 |
| 41.22 | 37853.53 |
| 40.11 | 36596.69 |
| 38.52 | 35380.35 |
| 36.11 | 33580.32 |
| 35.25 | 32109.00 |
| 33.65 | 31004.33 |
| 33.06 | 30021.30 |
| 34.06 | 30206.39 |