

Proyecto de Grado Ingeniería Civil

Diseño de redes de drenaje urbano: comparación de diseños
tradicionales versus diseños futuros

Presentado por:
Carlos Iván Rivera González

Asesor:
Juan Guillermo Saldarriaga Valderrama



Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Bogotá D.C
julio de 2013

A Dios principalmente,

A mi madre,hermana y padre que nunca dudaron
de mi ni de lo que era capaz de hacer.Para ellos
y para todos los que estuvieron apoyandome
incondicionalmente.

Gracias

*"Encomiéndate a Dios de todo corazón,
que muchas veces suele llover sus misericordias
en el tiempo que están más secas las esperanzas"*

Miguel de Cervantes Saavedra

Tabla de Contenidos

Índice de ilustraciones	IV
Índice de Tablas	IV
Índice de Ecuaciones	IV
Índice de Gráficas.....	V
1. Introducción y Objetivos.....	10
1.1 Introducción	10
1.2 Objetivos	11
1.2.1 Objetivo General	11
1.2.2 Objetivos Específicos	11
2. Marco teórico.....	12
2.1 Software para la modelación de alcantarillados	24
3. Metodología para realizar las modelaciones	33
4. Modelaciones en SewerGems de los modelos a diferentes pendientes mayoradas ..	36
4.1 Modelos Originales.....	37
4.1.1 Modelo Original de Prado-Medellín.....	37
4.1.2 Modelo Original Acacias – Girardot.....	43
4.2 Modelos mayorados un dos por ciento (2%).....	49
4.2.1 Modelo mayorado un dos por ciento (2%) Prado-Medellín.....	49
4.2.2 Modelo mayorado un dos por ciento (2%) Acacias-Girardot.....	54
4.3 Modelos mayorados un cinco por ciento (5%)	64
4.3.1 Modelo mayorado un cinco por ciento (5%) Prado-Medellín.....	64
4.3.1 Modelo mayorado un cinco por ciento (5%) Acacias-Girardot.....	70
4.4.1 Modelo mayorado un diez por ciento (10%) Prado-Medellín.	75
4.4.2 Modelo mayorado un diez por ciento (10%) Acacias-Girardot.....	82
4.5.1 Modelo mayorado un veinte por ciento (20%) Prado-Medellín.	90
4.5.1 Modelo mayorado un veinte por ciento (20%) Acacias-Girardot.....	98
5 Modelaciones con cañuelas profundas	106
6 Conclusiones y Recomendaciones.....	122
7 Bibliografía.....	125

Índice de ilustraciones

Ilustración 1 Características Propias tubería (Páez, 2010)	18
Ilustración 2 Cámara de inspección (KESSEL, 2012)	23
Ilustración 3 Cámara de inspección con cañuela profunda (ARECO, 2013)	30
Ilustración 4 Red de Acacias-Girardot.	31
Ilustración 5 Red de Prado- Medellín.....	32
Ilustración 6 Red de Prado- Medellín.....	34
Ilustración 7 Red de Acacias-Girardot.	35

Índice de Tablas

Tabla 1 Coeficientes de pérdidas menores (Bentley).....	26
Tabla 2 Factor corrección por el uso de cañuelas.....	29
Tabla 3 Factores de mayoración.....	33

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1 Esfuerzo Cortante.	12
Ecuación 2 Velocidad.	13
Ecuación 3 Número de Froude.	13
Ecuación 4 Caudal medio diario.	17
Ecuación 5 Número de Reynolds.....	19
Ecuación 6 Flujo Gradualmente Variado.	20
Ecuación 7 Flujo Gradualmente Variado Modificada.	20
Ecuación 8 Conservación de la Masa.....	21
Ecuación 9 Conservación del Momento	21
Ecuación 10 Ecuaciones de Saint Venant.....	22
Ecuación 11 Criterio Escogencia Tubería Dominante.....	24
Ecuación 12 Pérdidas Menores Método Estándar.	26
Ecuación 13 Pérdidas Menores Método Genérico.	27
Ecuación 14 Coeficiente de Pérdidas Menores Método HEC22.....	27
Ecuación 15 Coeficiente Inicial de Pérdidas Menores.	28
Ecuación 16 Factor de Corrección para el Diámetro de la Tubería.	28
Ecuación 17 Factor de Corrección para la profundidad de flujo en la Tubería.....	28
Ecuación 18 Factor de Corrección por Flujo Relativo.	29
Ecuación 19 Factor de Corrección por Inmersión en la Tubería.....	29
Ecuación 20 Pérdidas Menores Método HEC22	30

Índice de Gráficas

Gráfica 1 Variación de la velocidad con respecto a la relación de llenado	14
Gráfica 2 Variación del caudal base	18
Gráfica 3 Evento de Precipitación Prado-Medellín	36
Gráfica 4 Evento de precipitación Acacias-Girardot.....	37
Gráfica 5 Altura en Cámara C159D Comparación de Métodos	38
Gráfica 6 Velocidad en la Tubería TA16 Comparación de Métodos.....	38
Gráfica 7 Número de Froude en la Tubería TA16 Comparación de Métodos	39
Gráfica 8 Relación de llenado en la Tubería TA16 Comparación de Métodos.....	39
Gráfica 9 Altura en Cámara C93B Comparación de Métodos	40
Gráfica 10 Velocidad en la Tubería TA5 Comparación de Métodos.....	40
Gráfica 11 Número de Froude en la Tubería TA5 Comparación de Métodos	41
Gráfica 12 Relación de llenado en la Tubería TA5 Comparación de Métodos.....	41
Gráfica 13 Altura en Cámara C80A Comparación de Métodos	42
Gráfica 14 Velocidad en la Tubería T36 Comparación de Métodos	42
Gráfica 15 Número de Froude en la Tubería T36 Comparación de Métodos.....	42
Gráfica 16 Relación de llenado en la Tubería T36 Comparación de Métodos	43
Gráfica 17 Altura en cámara A3.11 Comparación de Métodos.....	43
Gráfica 18 Velocidad en la Tubería T20 Comparación de Métodos	44
Gráfica 19 Número de Froude en la Tubería T20 Comparación de Métodos.....	44
Gráfica 20 Relación de llenado en la Tubería T20 Comparación de Métodos	45
Gráfica 21 Altura en cámara A13.9 Comparación de Métodos.....	45
Gráfica 22 Velocidad en la Tubería T8 Comparación de Métodos	46
Gráfica 23 Número de Froude en la Tubería T8 Comparación de Métodos.....	46
Gráfica 24 Relación de llenado en la Tubería T8 Comparación de Métodos	47
Gráfica 25 Altura en cámara TA9 Comparación de Métodos.....	47
Gráfica 26 Velocidad en la Tubería T180 Comparación de Métodos	48
Gráfica 27 Número de Froude en la Tubería T180 Comparación de Métodos	48
Gráfica 28 Relación de llenado en la Tubería T180 Comparación de Métodos	48
Gráfica 29 Altura en cámara C159D Comparación de Métodos.....	49
Gráfica 30 Velocidad en la Tubería TA16 Comparación de Métodos.....	50
Gráfica 31 Número de Froude en la Tubería TA16 Comparación de Métodos	50
Gráfica 32 Relación de llenado en la Tubería TA16 Comparación de Métodos.....	51
Gráfica 33 Altura en cámara C93B Comparación de Métodos	51
Gráfica 34 Velocidad en la Tubería TA5 Comparación de Métodos.....	52
Gráfica 35 Número de Froude en la Tubería TA5 Comparación de Métodos	52
Gráfica 36 Relación de llenado en la Tubería TA5 Comparación de Métodos.....	52
Gráfica 37 Altura en cámara C80A Comparación de Métodos	53
Gráfica 38 Velocidad en la Tubería T36 Comparación de Métodos	53
Gráfica 39 Número de Froude en la Tubería T36 Comparación de Métodos.....	54

Gráfica 40 Relación de llenado en la Tubería T36 Comparación de Métodos	54
Gráfica 41 Altura en cámara A3.11 Comparación de Métodos.....	55
Gráfica 42 Altura en cámara A3.11 Comparación de Métodos (Detalle 1)	55
Gráfica 43 Altura en cámara A3.11 Comparación de Métodos (Detalle 2)	56
Gráfica 44 Velocidad en la Tubería T20 Comparación de Métodos	56
Gráfica 45 Relación de llenado en la Tubería T20 Comparación de Métodos	57
Gráfica 46 Relación de llenado en la Tubería T20 Comparación de Métodos (Detalle 1) .	57
Gráfica 47 Número de Froude en la Tubería T20 Comparación de Métodos.....	58
Gráfica 48 Altura en cámara A13.9 Comparación de Métodos.....	58
Gráfica 49 Altura en cámara A13.9 Comparación de Métodos (Detalle 1)	59
Gráfica 50 Velocidad en la Tubería T8 Comparación de Métodos	59
Gráfica 51 Relación de llenado en la Tubería T8 Comparación de Métodos	60
Gráfica 52 Relación de llenado en la Tubería T8 Comparación de Métodos (Detalle 1) ...	60
Gráfica 53 Número de Froude en la Tubería T8 Comparación de Métodos.....	61
Gráfica 54 Altura en cámara TA9 Comparación de Métodos.....	61
Gráfica 55 Altura en cámara TA9 Comparación de Métodos (Detalle1).....	62
Gráfica 56 Velocidad en la Tubería T180 Comparación de Métodos	62
Gráfica 57 Relación de llenado en la Tubería T180 Comparación de Métodos	63
Gráfica 58 Relación de llenado en la Tubería T180 Comparación de Métodos (Detalle 1)	
.....	63
Gráfica 59 Número de Froude en la Tubería T180 Comparación de Métodos	63
Gráfica 60 Altura en cámara C159D Comparación de Métodos.....	64
Gráfica 61 Velocidad en la Tubería TA16 Comparación de Métodos.....	65
Gráfica 62 Relación de llenado en la Tubería TA16 Comparación de Métodos.....	65
Gráfica 63 Número de Froude en la Tubería TA16 Comparación de Métodos	66
Gráfica 64 Altura en cámara C93B Comparación de Métodos.	66
Gráfica 65 Velocidad en la Tubería TA5 Comparación de Métodos.....	67
Gráfica 66 Número de Froude en la Tubería TA5 Comparación de Métodos	67
Gráfica 67 Relación de llenado en la Tubería TA5 Comparación de Métodos.....	67
Gráfica 68 Altura en cámara C80A Comparación de Métodos.	68
Gráfica 69 Velocidad en la Tubería T36 Comparación de Métodos	68
Gráfica 70 Número de Froude en la Tubería T36 Comparación de Métodos.....	69
Gráfica 71 Relación de llenado en la Tubería T36 Comparación de Métodos	69
Gráfica 72 Altura en cámara A3.11 Comparación de Métodos.....	70
Gráfica 73 Velocidad en la Tubería T20 Comparación de Métodos	70
Gráfica 74 Número de Froude en la Tubería T20 Comparación de Métodos.....	71
Gráfica 75 Relación de llenado en la Tubería T20 Comparación de Métodos	71
Gráfica 76 Altura en cámara A13.9 Comparación de Métodos.....	72
Gráfica 77 Velocidad en la Tubería T8 Comparación de Métodos	72
Gráfica 78 Número de Froude en la Tubería T8 Comparación de Métodos.....	73
Gráfica 79 Relación de llenado en la Tubería T8 Comparación de Métodos	73
Gráfica 80 Altura en cámara TA9 Comparación de Métodos.....	74
Gráfica 81 Velocidad en la Tubería T180 Comparación de Métodos	74

Gráfica 82 Número de Froude en la Tubería T180 Comparación de Métodos	74
Gráfica 83 Relación de llenado en la Tubería T180 Comparación de Métodos	75
Gráfica 84 Altura en cámara C159D Comparación de Métodos.....	75
Gráfica 85 Velocidad en la Tubería TA16 Comparación de Métodos.....	76
Gráfica 86 Número de Froude en la Tubería TA16 Comparación de Métodos	76
Gráfica 87 Relación de llenado en la Tubería TA16 Comparación de Métodos.....	77
Gráfica 88 Altura en cámara C93B Comparación de Métodos.	77
Gráfica 89 Velocidad en la Tubería TA5 Comparación de Métodos.....	78
Gráfica 90 Número de Froude en la Tubería TA5 Comparación de Métodos	78
Gráfica 91 Relación de llenado en la Tubería TA5 Comparación de Métodos.....	79
Gráfica 92 Altura en cámara C80A Comparación de Métodos.	79
Gráfica 93 Altura en cámara C80A Comparación de Métodos. (Detalle 1)	80
Gráfica 94 Altura en cámara C80A Comparación de Métodos. (Detalle 2)	80
Gráfica 95 Velocidad en la Tubería T36 Comparación de Métodos	81
Gráfica 96 Relación de llenado en la Tubería T36 Comparación de Métodos	81
Gráfica 97 Número de Froude en la Tubería T36 Comparación de Métodos.....	82
Gráfica 98 Altura en cámara A3.11 Comparación de Métodos.....	83
Gráfica 99 Altura en cámara A3.11 Comparación de Métodos. (Detalle 1)	83
Gráfica 100 Velocidad en la Tubería T20 Comparación de Métodos	84
Gráfica 101 Relación de llenado en la Tubería T20 Comparación de Métodos	84
Gráfica 102 Número de Froude en la Tubería T20 Comparación de Métodos	85
Gráfica 103 Altura en cámara A13.9 Comparación de Métodos.....	85
Gráfica 104 Altura en cámara A13.9 Comparación de Métodos.(Detalle 1)	86
Gráfica 105 Velocidad en la Tubería T8 Comparación de Métodos	86
Gráfica 106 Número de Froude en la Tubería T8 Comparación de Métodos.....	87
Gráfica 107 Relación de llenado en la Tubería T8 Comparación de Métodos	87
Gráfica 108 Altura en cámara TA9 Comparación de Métodos.....	88
Gráfica 109 Altura en cámara TA9 Comparación de Métodos.(Detalle 1)	88
Gráfica 110 Velocidad en la Tubería T180 Comparación de Métodos	89
Gráfica 111 Número de Froude en la Tubería T180 Comparación de Métodos	89
Gráfica 112 Relación de llenado en la Tubería T180 Comparación de Métodos	89
Gráfica 113 Altura en cámara C159D Comparación de Métodos.	90
Gráfica 114 Altura en cámara C159D Comparación de Métodos. (Detalle 1)	91
Gráfica 115 Velocidad en la Tubería TA16 Comparación de Métodos.....	91
Gráfica 116 Número de Froude en la Tubería TA16 Comparación de Métodos	92
Gráfica 117 Relación de llenado en la Tubería TA16 Comparación de Métodos.....	92
Gráfica 118 Altura en cámara C93B Comparación de Métodos.	93
Gráfica 119 Altura en cámara C93B Comparación de Métodos (Detalle 1)	93
Gráfica 120 Altura en cámara C93B Comparación de Métodos (Detalle 2)	93
Gráfica 121 Velocidad en la Tubería TA5 Comparación de Métodos.....	94
Gráfica 122 Relación de llenado en la Tubería TA5 Comparación de Métodos.....	94
Gráfica 123 Número de Froude en la Tubería TA5 Comparación de Métodos	95
Gráfica 124 Altura en cámara C80A Comparación de Métodos.	95

Gráfica 125 Altura en cámara C93B Comparación de Métodos (Detalle 1)	96
Gráfica 126 Altura en cámara C93B Comparación de Métodos (Detalle 2)	96
Gráfica 127 Velocidad en la Tubería T36 Comparación de Métodos	97
Gráfica 128 Número de Froude en la Tubería T36 Comparación de Métodos	97
Gráfica 129 Relación de llenado en la Tubería T36 Comparación de Métodos	97
Gráfica 130 Altura en cámara A3.11 Comparación de Métodos.....	98
Gráfica 131 Altura en cámara A3.11 Comparación de Métodos (Detalle 1).....	99
Gráfica 132 Velocidad en la Tubería T20 Comparación de Métodos	99
Gráfica 133 Relación de llenado en la Tubería T20 Comparación de Métodos	100
Gráfica 134 Número de Froude en la Tubería T20 Comparación de Métodos	100
Gráfica 135 Altura en cámara A13.9 Comparación de Métodos.....	101
Gráfica 136 Altura en cámara A13.9 Comparación de Métodos (Detalle 1).....	101
Gráfica 137 Altura en cámara A13.9 Comparación de Métodos (Detalle 2).....	101
Gráfica 138 Velocidad en la Tubería T8 Comparación de Métodos	102
Gráfica 139 Relación de llenado en la Tubería T8 Comparación de Métodos	102
Gráfica 140 Número de Froude en la Tubería T8 Comparación de Métodos.....	103
Gráfica 141 Altura en cámara TA9 Comparación de Métodos.....	103
Gráfica 142 Altura en cámara TA9 Comparación de Métodos (Detalle 1).....	104
Gráfica 143 Velocidad en la Tubería T180 Comparación de Métodos	104
Gráfica 144 Relación de llenado en la Tubería T180 Comparación de Métodos	105
Gráfica 145 Número de Froude en la Tubería T180 Comparación de Métodos	105
Gráfica 146 Altura en cámara C159D Comparación de Métodos	106
Gráfica 147 Velocidad en la Tubería TA16 Comparación de Métodos.....	107
Gráfica 148 Velocidad en la Tubería TA16 Comparación de Métodos (Detalle 1).....	107
Gráfica 149 Relación de llenado en la Tubería TA16 Comparación de Métodos.....	108
Gráfica 150 Número de Froude en la Tubería TA16 Comparación de Métodos	108
Gráfica 151 Altura en cámara C93B Comparación de Métodos	109
Gráfica 152 Altura en cámara C93B Comparación de Métodos (Detalle 1)	109
Gráfica 153 Altura en cámara C93B Comparación de Métodos (Detalle 2)	110
Gráfica 154 Velocidad en la Tubería TA5 Comparación de Métodos.....	110
Gráfica 155 Número de Froude en la Tubería TA5 Comparación de Métodos	111
Gráfica 156 Relación de llenado en la Tubería TA5 Comparación de Métodos.....	111
Gráfica 157 Relación de llenado en la Tubería TA5 Comparación de Métodos (Detalle 1)	112
Gráfica 158 Altura en cámara C80A Comparación de Métodos	112
Gráfica 159 Altura en cámara C80A Comparación de Métodos (Detalle 1)	113
Gráfica 160 Altura en cámara C80A Comparación de Métodos (Detalle 2)	113
Gráfica 161 Velocidad en la Tubería T36 Comparación de Métodos	114
Gráfica 162 Número de Froude en la Tubería T36 Comparación de Métodos	114
Gráfica 163 Relación de llenado en la Tubería T36 Comparación de Métodos	114
Gráfica 164 Relación de llenado en la Tubería T36 Comparación de Métodos (Detalle 1)	115
Gráfica 165 Altura en cámara A3.11 Comparación de Métodos.....	115

Gráfica 166 Velocidad en la Tubería T20 Comparación de Métodos	116
Gráfica 167 Relación de llenado en la Tubería T20 Comparación de Métodos	116
Gráfica 168 Número de Froude en la Tubería T20 Comparación de Métodos	117
Gráfica 169 Altura en cámara A13.9 Comparación de Métodos.....	117
Gráfica 170 Velocidad en la Tubería T8 Comparación de Métodos	118
Gráfica 171 Número de Froude en la Tubería T8 Comparación de Métodos.....	118
Gráfica 172 Relación de llenado en la Tubería T8 Comparación de Métodos	119
Gráfica 173 Altura en cámara TA9 Comparación de Métodos.....	119
Gráfica 174 Velocidad en la Tubería T180 Comparación de Métodos	120
Gráfica 175 Relación de llenado en la Tubería T180 Comparación de Métodos	120
Gráfica 176 Número de Froude en la Tubería T180 Comparación de Métodos	121

1. Introducción y Objetivos

1.1 Introducción

A través de la historia se puede ver cómo diferentes civilizaciones han suplido la necesidad de transportar recursos hídricos con el fin dar un beneficio a la comunidad; el ejemplo cumbre de esto es la civilización greco-romana. La Cloaca Máxima, construida en el año 600.A.C, fue de gran apoyo para el desarrollo de esta civilización, (Gowers, 1995). Teniendo esto como referencia, se puede evidenciar que sin importar el momento en la historia o su ubicación, la humanidad refleja a través de sus esfuerzos el interés de manejar el medio ambiente para su beneficio.

Así mismo, a través del desarrollo de artefactos y de su perfeccionamiento se ha logrado resolver problemas o mejorar las condiciones en ese instante. Por ejemplo, la serrería de Hierápolis creada en el siglo III, fue un mecanismo para impulsar el agua que impulsó el uso de la biela (Grewe, 2009).

Al observar que mediante el entendimiento de determinados comportamientos (ciclos en el medio ambiente, por ejemplo) y la creación de elementos que permiten el manejo de diferentes recursos naturales, especialmente hídricos, la calidad de vida de una comunidad se logra mejorar, cobra importancia el hecho de permanecer en constante estudio y experimentación. Es por esto que el actual Proyecto de Grado se concentra en el alcantarillado urbano, específicamente se enfoca en la modelación de uno de sus principales componentes: cámaras de inspección. El trabajo consta de la modelación de estos elementos y de analizar cómo se puede llegar a obtener una segregación de los diferentes los métodos de caracterización de pérdidas de energía actualmente establecidos en la literatura.

Para el desarrollo de este proyecto se utilizan herramientas computacionales que ayudan a modelar dos (2) partes de sistemas de alcantarillados actuales ubicados estos en Medellín (Antioquia) y Girardot (Cundinamarca). A continuación, con estos modelos se observa cómo cambia el flujo de acuerdo al método de pérdidas menores que se escoge y a las características topológicas del sistema.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Modelar las redes de alcantarillado construidas en Prado (Medellín) y Acacias (Girardot, Cundinamarca) con el fin de caracterizar los métodos de pérdidas menores empleados hoy en día. Al caracterizar el flujo se conoce cuál método está subestimando o sobreestimando las pérdidas que ocurren en las cámaras de inspección del sistema.

1.2.2 Objetivos Específicos

Los siguientes objetivos específicos permiten cumplir el objetivo general de forma metódica y organizada:

- Utilizar el software desarrollado por la casa Bentley, SewerGems.
- Identificar patrones de pérdidas de energía en las cámaras de inspección.
- Analizar la sensibilidad de las redes de alcantarillado de acuerdo a variaciones topológicas del sistema
- Generar un documento en el que se registren los resultados obtenidos, así como un marco teórico de la bibliografía existente sobre el tema. Este constituye el Proyecto de Grado.

2. Marco teórico

En la literatura los sistemas de alcantarillado se han clasificado principalmente en tres tipos, cada uno con características propias. El primero de estos es el sistema de Alcantarillado Separado. En éste las aguas lluvias y las aguas residuales van por conductos diferentes. Las aguas lluvias son llevadas a cuerpos receptores sin ningún tratamiento ya que tienen una menor contaminación que las aguas residuales.

No obstante, este principio no es totalmente verídico. Se ha comprobado la existencia de un fenómeno llamado *Primer Lavado* y de sus efectos contaminantes. El Primer Lavado se presenta cuando en una ciudad llueve luego de no haber ocurrido un evento de precipitación, por lo menos, en los 3 días anteriores. Cuando ésta precipitación sucede los primeros 5 minutos de lluvia que entran al sistema de alcantarillado pluvial son más contaminantes que las mismas aguas residuales, debido a que estas llevan la contaminación contenida en la ciudad, siendo polvo, smog, basura, etc.

El segundo tipo de alcantarillado se denomina Alcantarillado Combinado. Este tipo de drenaje se caracteriza por el uso compartido de conductos y elementos que llevan tanto el agua lluvia como el agua residual. En éste sistema de alcantarillado toda el agua recolectada va a una planta de tratamiento de aguas residuales. Finalmente, el último sistema de alcantarillado es el Sistema de Alcantarillado Híbrido. Este es utilizado principalmente en zonas de desarrollo urbano o en diferentes proyectos de expansión urbanística. Es importante aclarar que la mayoría de diámetros en cualquier sistema de drenaje urbano está principalmente determinado por el caudal recibido por aguas lluvias. El Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) exige ciertas propiedades mínimas del flujo para garantizar un correcto funcionamiento de cualquier tipo de alcantarillado.

La primera de estas propiedades de flujo es: esfuerzo cortante mínimo en alcantarillados. Este esfuerzo cortante se puede fragmentar de acuerdo con el tipo de alcantarillado que se esté usando. En el caso de Alcantarillados Combinados es de 2 Pa y en Alcantarillado de Aguas Lluvias es de 3 Pa. Esta exigencia se hace con el fin de asegurar que haya autolimpieza en la tubería y evitar sedimentación. La manera de calcular este esfuerzo cortante es:

$$\tau = \rho gRS$$

Ecuación 1 Esfuerzo Cortante.

Siendo:

ρ = Densidad del fluido que se esté transportando por el ducto

g = Gravedad

R = Radio hidráulico de la tubería

S = Pendiente de la tubería

La siguiente característica que se debe asegurar es una velocidad mínima de 0.45 m/s en Alcantarillados Combinados y una velocidad mínima de 0.75 m/s en sistemas de aguas lluvias. La manera de calcular la velocidad en una tubería es.

$$V = \sqrt[2]{8gRS} - 2\log_{10} \left(\frac{k_s}{14.8R} + \frac{2.51\nu}{4R^2\sqrt{8gRS}} \right)$$

Ecuación 2 Velocidad.

Siendo:

g = Gravedad

R = Radio hidráulico de la tubería

S = Pendiente de la tubería

k_s = Rugosidad absoluta del material por el cual transita el agua

ν = Viscosidad cinemática del fluido

La velocidad máxima del sistema de drenaje no está regida por cual tipo de alcantarillado se tiene sino por el material que conforma la red. En el RAS se puede encontrar que si se utiliza concreto como material de tuberías la velocidad máxima que puede experimentar el flujo es de 5 m/s, a diferencia de si se utilizan materiales termoplásticos como el PVC o el GRP que permiten que el flujo experimente una velocidad de hasta 10 m/s.

Ahora bien, con respecto al Número de Froude se exige que éste no esté en el rango de $0.7 < Fr < 1.5$ ya que éste intervalo es conocido como la zona cuasi crítica y el flujo puede presentar resaltos hidráulicos que presuricen la tubería. La manera para calcular el Número de Froude en una tubería es:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt[2]{g * y}}$$

Ecuación 3 Número de Froude.

Siendo:

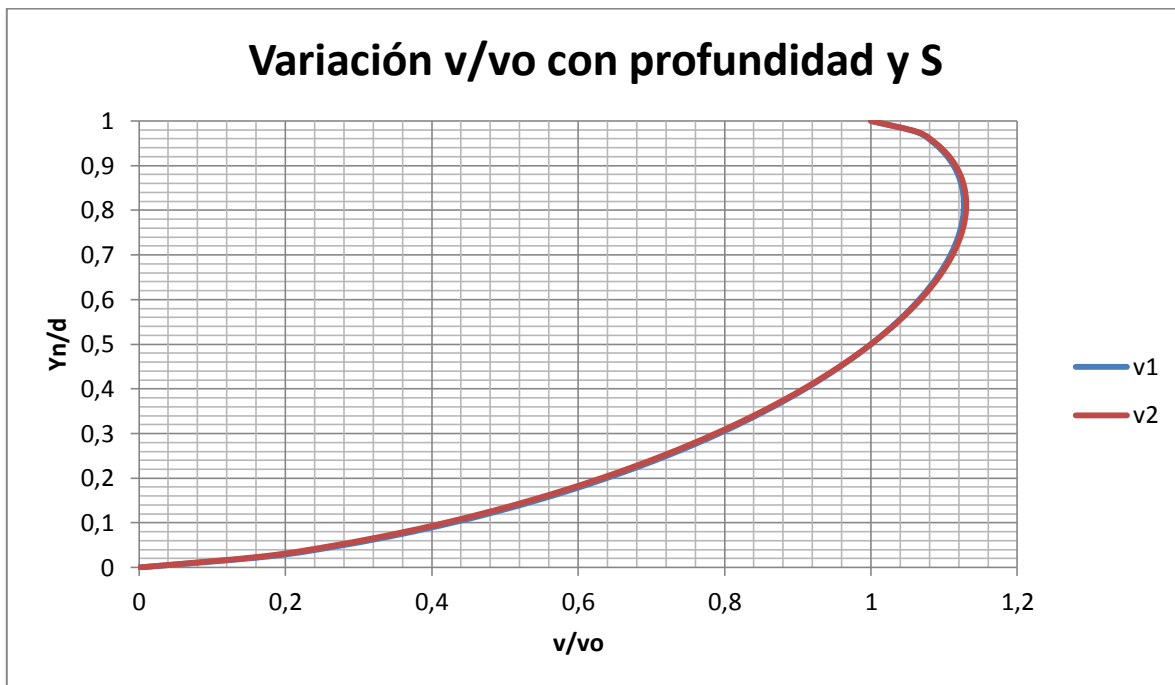
v = Velocidad que experimenta el flujo

g = Gravedad

y = Altura que tenga el flujo dentro de la tubería

Con respecto al diámetro mínimo, se especifica que para Alcantarillados Sanitarios o Combinados éste sea de ciento setenta (170) milímetros y para Alcantarillados de Aguas Lluvias sea de doscientos quince (215) milímetros, ésta restricción se hace por procesos netamente constructivos. De la misma manera, en referencia al diámetro existe otra exigencia. Si el diámetro excede los seiscientos (600) milímetros, se recomienda hacer un diseño verificando la condición de flujo gradualmente variado y si excede los novecientos (900) milímetros se exige hacer un diseño que tenga en cuenta la condición de flujo no permanente.

Finalmente, se recomienda que se tenga una relación de llenado máxima cercana al 85%, debido a que en esta relación de llenado se obtiene la velocidad máxima del flujo. De igual manera, al tener una relación de llenado menor al 100% se evita el riesgo de presurización de la tubería que podría provocar una sobrecarga del sistema poniendo en riesgo la salubridad pública. A continuación se muestra un perfil de velocidades en el cual se identifica como a relaciones de llenado cercanas al 85% se obtiene la velocidad máxima.



Gráfica 1 Variación de la velocidad con respecto a la relación de llenado.

Para la modelación de estos sistemas de alcantarillado es fundamental aclarar qué es un modelo y en qué consiste. Un modelo puede ser físico o virtual mas su objetivo principal es representar un fenómeno que sucede en la realidad. Para este caso en específico los modelos van a ser virtuales. Ésta representación se realiza mediante la utilización de múltiples parámetros que simulan las diferentes leyes físicas por las cuales el flujo se rige en variadas condiciones.

Por otra parte, si se tuviera un modelo físico se tendría que realizar la construcción de los sistemas de alcantarillado en menor escala para observar cómo se comporta el flujo. Tanto los modelos físicos como virtuales están compuestos de las mismas partes, siendo estos en éste caso específico: cámaras de inspección, tuberías, accesorios, cuencas, hidrogramas, caudales base, entre otros. A continuación, se explica en detalle cada uno de estos y por qué son fundamentales para la modelación.

Primero se analizan los elementos físicos de la red de drenaje.

Tuberías: Conductos por los cuales el agua fluye y va de un lugar determinado a un lugar de salida.

Cámaras de inspección: [definición en el RAS 2011 en el literal D.7.3] *“Estructuras de conexión y/o inspección de tuberías. Las cámaras de conexión y/o inspección son elementos integrales de todo sistema de recolección de aguas lluvias, que permiten la conexión en un punto de dos o más tramos de tuberías y la conexión al sistema de alcantarillado con la superficie, facilitando el acceso a la red, ya sea de personas o de equipos, para adelantar labores de inspección y/o mantenimiento”* (Ministerio de Desarrollo Económico, 2011)

Accesorios: Estos son diferentes elementos que tienen el fin de cambiar la dirección del flujo, codos, unir dos tuberías en una sola, uniones, entre otros elementos que no afectan la hidráulica de la red de drenaje.

Sumideros: estructuras que tienen como fin recolectar el agua que se presenta en un evento de precipitación.

Desembocadura: lugar al que llega toda el agua después de fluir por el sistema de drenaje. Usualmente ubicada en una planta de tratamiento de aguas residuales.

Teniendo en cuenta estos elementos físicos del sistema de drenaje se procede a explicar los elementos hidrológicos.

Cuenca: área previamente determinada que es drenada a través de un sistema de drenaje natural y por donde transita agua ya sea de manera subterránea o superficial. Ésta área se encuentra con un sistema recolector de agua del sistema de drenaje para entrar así a la red de drenaje urbano.

Hidrograma: gráfica en la cual se observa de manera clara cómo se distribuye el agua a través del tiempo en un lugar específico. Para la obtención de esta gráfica se necesita convertir el agua que llueve en agua efectiva sobre la red de alcantarillado. Es importante aclarar que estas gráficas son las que determinan cuánta agua entra al sistema de alcantarillado.

Infiltración: propiedad de la cuenca de absorber el agua que le llega en el evento de precipitación. Esta propiedad se basa en que aparte de fluir superficialmente, el agua fluye en la parte subterránea, y así sirve otros fines. Se tienen diferentes modelos para conocer cuál es la infiltración en una cuenca; entre estos está el modelo de infiltración de Horton, el de Green Ampt y el modelo de infiltración propuesto por el Soil Conservation Service (SCS).

Para este proyecto se tuvieron en cuenta dos fundamentos relevantes para la modelación de estos sistemas de alcantarillado. Primero, el aspecto hidrológico, y segundo, el criterio hidráulico. El aspecto hidrológico es primordial para el modelo ya que explica como fluye el agua desde un evento de precipitación hasta el momento justo antes de entrar a la red de alcantarillado. Mediante este fundamento se obtienen los diferentes hidrogramas que entran a la red de alcantarillado. Ahora bien, el criterio hidráulico hace uso de leyes de la mecánica de fluidos y de la hidráulica para lograr obtener una representación de cómo fluiría el fluido en la red de drenaje. A continuación se profundiza en cada uno de estos pilares. (Paez, 2010)

Desde el punto de la hidrología del sistema, lo que se tiene es un evento de precipitación con un periodo de retorno dado obtenido mediante el uso de funciones probabilísticas, y múltiples sub-cuencas, cada una de estas con características particulares dadas, tales como su pendiente o índice de rugosidad ya sea del terreno o de cualquier material llamado n de Manning. Con estas características se logran utilizar diferentes parámetros para conocer cómo es el hidrograma de precipitación en cada una estas sub-cuencas. De la misma manera, se cuenta con todos los parámetros para saber si se debe realizar un modelo de infiltración en la red tal como el de Green-Ampt o el de Horton. Para el caso específico de este Proyecto de Grado no se tiene en cuenta este parámetro.

Es importante aclarar que el pilar anterior es útil siempre y cuando se produzca un evento de precipitación, ya que éste es el que genera cambios considerables en el funcionamiento del sistema de drenaje urbano. En caso de contar con lluvia, en el sistema de drenaje de alcantarillado se procede a realizar el tránsito de creciente de onda dinámica para conocer así la cantidad de caudal que entra al sistema en cada instante. La manera en la cual se obtiene esta modelación es mediante la evaluación del flujo en condiciones no permanentes; se observa que las características de flujo varían con respecto al espacio y al tiempo. Más adelante se explican detalladamente las características especiales de éste flujo y como se utiliza para modelar la onda dinámica.

Ahora bien, cuando ya se tiene el fundamento hidrológico se procede con el criterio hidráulico.

En referencia al pilar hidráulico de manera a priori se debe tener en cuenta que a pesar de que no se produzcan eventos de precipitación el sistema siempre está llevando agua. Los diferentes caudales que transitan por el sistema de drenaje cuando no llueve son: caudales de aguas residuales industriales, caudales de aguas institucionales, caudales de aguas residuales de uso doméstico y caudales de aguas comerciales. La diferenciación de este tipo de caudales se hace según a su magnitud y su contaminación. La forma en la cual se calcula el caudal medio diario es mediante la suma de los caudales anteriores.

$$Q_{MD} = Q_D + Q_I + Q_c + Q_{IN}$$

Ecuación 4 Caudal medio diario.

donde;

Q_{MD} = Caudal medio diario.

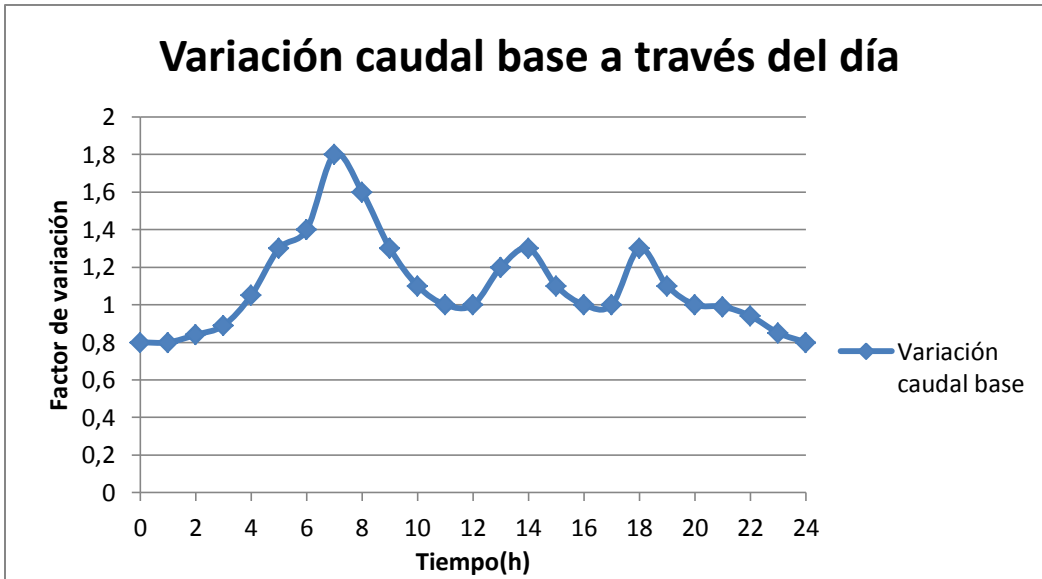
Q_D = Caudal de aguas residuales doméstico.

Q_I = Caudal de aguas residuales industriales.

Q_c = Caudal de aguas residuales comerciales.

Q_{IN} = Caudal de aguas residuales institucionales.

Vale la pena aclarar que siempre se realiza el cálculo con un caudal medio diario mayorado. Estos factores de mayoración son cambiantes de acuerdo con las variaciones normales de la población y su consumo. Este caudal medio diario es conocido como el caudal base del sistema de alcantarillado, variable respecto a la hora; tiene un pico usualmente entre las 6 y 7 de la mañana, debido al alto consumo por actividades de aseo personal, cocina, etc. A continuación se muestra un esquema típico de la distribución del caudal base.



Gráfica 2 Variación del caudal base (Empresas Públicas de Medellín, 2009).

Es necesario conocer las características propias de las tuberías para poder entender un elemento que es fundamental en cualquier tipo de sistema de alcantarillado urbano o que transporte cualquier tipo de caudal. En la siguiente ilustración se observarán todas las características geométricas que presenta el flujo en una tubería. Entre estas están el perímetro mojado, el área mojada, el radio hidráulico, etc. Al conocer estas variables se pueden conocer las características de flujo tales como velocidad, caudal, Número de Froude, entre otros.

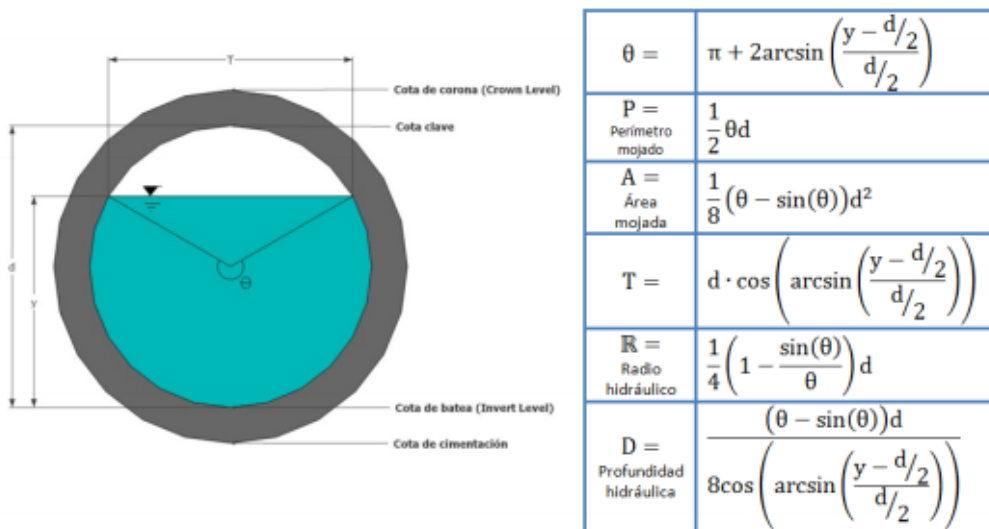


Ilustración 1 Características Propias tubería (Páez, 2010).

Ya teniendo estas características inherentes a la tubería se procede a explicar los tipos de flujo que ésta puede experimentar, siendo estos: flujo laminar, flujo turbulento o flujo transicional. El primero de estos es caracterizado porque las partículas sienten una fuerza inercial mayor que la fuerza de fricción haciendo así que las partículas se desplacen pero no roten, generando como resultado final un movimiento en la misma trayectoria de flujo. Las partículas del flujo turbulento, a diferencia de aquellas del flujo laminar, no siguen trayectorias definidas; la fuerza de fricción entre ellas es mucho mayor que la fuerza inercial. Esta fuerza de fricción hace que el fluido se mueva y rote a la misma vez. Finalmente, el flujo transicional es el que se encuentra entre el laminar y el turbulento, presentándose una contienda entre fuerzas inerciales y friccionantes haciendo así que el flujo no tenga un comportamiento definido. La manera en la cual se conoce que tipo de flujo se tiene es mediante el Número de Reynolds (Escuela de Ingeniería de Antioquia).

$$Re = \frac{\rho dv}{\mu}$$

Ecuación 5 Número de Reynolds.

donde:

Re: Número de Reynolds.

ρ = Densidad del fluido.

d = Diámetro de la tubería.

v = Velocidad de flujo en la tubería.

μ = Viscosidad.

Otra manera en la cual se pueden caracterizar los flujos es: uniforme y/o permanente. El flujo permanente se menciona en la literatura como un flujo constante respecto al tiempo, a diferencia del flujo uniforme que este es constante respecto al espacio. Existen dos casos en particular en los cuales se debe tener especial cuidado. El primero es un flujo no uniforme permanente, flujo gradualmente variado, y el segundo es uniforme no permanente. Con respecto al primero el RAS-2011 en el literal D.6.3.6 expresa claramente lo siguiente:

"En aquellos casos en los cuales alguno de los tramos que conforman el sistema de alcantarillado tenga un diámetro nominal mayor o igual a 600 mm y ninguna de las tuberías tenga un diámetro nominal superior a 900 mm, con el fin de verificar que no ocurran sobrecargas en el sistema de alcantarillado para ninguna de las condiciones de caudal establecidas para el cálculo del funcionamiento hidráulico de la red, el diseñador debe calcular la línea de gradiente hidráulico y la línea de energía total para todo el sistema ensamblado, bajo condiciones del flujo gradualmente variado." (Ministerio de Desarrollo Económico, 2011)

El flujo debe tener ciertas restricciones para lograr calcular Flujo Gradualmente Variado. Estas serán enumeradas a continuación, (Saldarriaga, 2013).

1. La pendiente del fondo del cada de los ductos debe ser menor que el 10%. Esto con el fin de poder utilizar la suposición de distribución hidrostática de presiones a través de la sección de cada ducto.
2. El flujo debe ser permanente.
3. El flujo debe ser de fase única, es decir, no puede haber aire atrapado en el flujo.
4. La rugosidad de cada uno de los conductos debe ser constantes a lo largo de perímetro mojado de cada uno de ellos.
5. Las pérdidas por fricción para flujos no permanentes se pueden modelar de acuerdo con las ecuaciones de resistencia utilizadas para flujo uniforme.
6. En todos los casos se debe utilizar los diámetros internos reales de las tuberías.

Si se cumplen todas las condiciones anteriores, la siguiente ecuación determina el nivel de agua con respecto a una distancia dada.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_f}{1 - Fr^2}$$

Ecuación 6 Flujo Gradualmente Variado.

donde:

S_0 = Pendiente del terreno.

S_f = Pendiente de fricción.

Fr = Número de Froude.

$\frac{dy}{dx}$ = Razón de cambio de nivel con respecto a la distancia.

Cabe la salvedad de que si alguno de los conductos tiene una pendiente mayor al 10% se debe hacer una modificación a la ecuación anterior.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 \cos \theta - S_f}{\cos \theta - Fr^2}$$

Ecuación 7 Flujo Gradualmente Variado Modificada.

Ahora bien, con respecto al segundo tipo de flujo, flujo no permanente, se hace la siguiente anotación en el Numeral D.6.3.7 del RAS 2011.

"En caso de que alguno de los ductos que forma parte de la red de alcantarillado objeto del diseño tenga un diámetro nominal mayor que 900 mm, el diseño debe incluir el análisis de flujo no permanente mediante el uso de las ecuaciones de Saint-Venant. El análisis de flujo no permanente tiene por objeto obtener un mejor conocimiento del

comportamiento hidráulico del sistema en redes de alcantarillado extensas y con diámetros grandes; para estos casos, la aproximación del flujo gradualmente variado puede invalidarse porque no tienen en cuenta los términos de almacenamiento temporal en los tramos en que se divide la red" (Ministerio de Desarrollo Económico, 2011)

Al igual que la condición de flujo gradualmente variado, para lograr resolver este tipo de flujo se tienen que tener ciertas suposiciones básicas que serán nombradas a continuación (Saldarriaga, 2013):

1. La superficie del flujo debe permanecer horizontal en sentido perpendicular a las líneas de corriente.
2. La pendiente de fondo debe ser menor al 10% para que así se siga teniendo presiones hidrostáticas en el flujo.
3. El fondo del canal debe ser capaz de no sufrir erosión, esto con el fin de que los efectos de sedimentación y socavación sean irrisorios.
4. El fluido que transita debe ser incompresible y homogéneo.
5. La dirección del flujo debe ser aproximadamente recta.
6. La variación del flujo debe ser gradual, esto con el fin de que no aparezcan aceleraciones verticales.
7. Se pueden utilizar las ecuaciones de resistencia fluida tales como la de Manning para poder así calcular pérdidas por fricción.
8. Se debe suponer flujo unidireccional. Si ésta suposición no se toma en cuenta ninguna de las siete suposiciones anteriores es relevante.

Si se cumplen todas las condiciones mencionadas anteriormente se pueden aplicar las ecuaciones de Saint-Venant. Estas resultan de la combinación de las ecuaciones de continuidad y conservación del momento, Es importante aclarar que cada una de estas ecuaciones es diferenciable parcialmente. La ecuación de masa o continuidad se presenta a continuación:

$$\frac{dA}{dt} + \frac{dQ}{dx} - q = 0$$

Ecuación 8 Conservación de la Masa.

La ecuación de conservación de momento es la siguiente:

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{d(\beta Q^2 / A)}{dx} + gA \left(\frac{dh}{dx} + S_f + S_m \right) - \beta v_x q + W_f B = 0$$

Ecuación 9 Conservación del Momento.

Al combinar las fórmulas mostradas anteriormente se llega al siguiente sistema de ecuaciones diferenciales parciales que modelan en su totalidad el flujo no permanente.

Las ecuaciones mostradas a continuación son las ecuaciones de Saint-Venant de tipo conservativo.

$$\begin{cases} \frac{1}{A} \frac{dQ}{dt} + \frac{1}{A} \frac{d}{dx} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{dy}{dx} - g(S_o - S_f) = 0 \\ \frac{dv}{dt} + v \frac{dv}{dx} + g \frac{dy}{dx} - g(S_o - S_f) = 0 \end{cases}$$

Ecuación 10 Ecuaciones de Saint Venant.

donde:

A= Área.

$\frac{dQ}{dt}$ = Razón de cambio de caudal con respecto al tiempo.

Q= Caudal.

g= Gravedad.

$\frac{dy}{dx}$ = Razón de cambio de nivel con respecto a la distancia.

S_o = Pendiente del terreno.

S_f = Pendiente de fricción

v= Velocidad

$\frac{dv}{dt}$ = Razón de cambio de caudal con respecto al tiempo.

Mediante estas ecuaciones es posible la modelación completa de un tránsito de creciente a través de la red. Lo que se traduce en la posibilidad de conocer a cada instante la hidráulica de cualquier punto de la red, cumpliendo así el objetivo planteado por el Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento Básico. Ahora bien, conociendo ya los diferentes tipos de flujos, diferenciaciones de caudales, características inherentes a las tuberías y sus materiales se procede a indagar específicamente en el tema central de este Proyecto de Grado, los métodos de pérdidas de energía en cámaras de inspección. A continuación se muestra una ilustración de una cámara de inspección moderna, hecha en materiales termoplásticos tales como PVC o GRP (para así obtener todos los beneficios de estos nuevos materiales).



Ilustración 2 Cámara de inspección (KESSEL, 2012).

La literatura presenta cinco diferentes métodos para obtener las pérdidas de energía en una cámara de inspección. Estos métodos son: Absoluto, ASSHTO, Genérico, HEC22 y Estándar. Cada uno tiene en cuenta diferentes factores, y como se observa más adelante, también un nivel de complejidad diferente. A continuación se muestra la definición de 2 métodos de pérdidas menores en cámaras de inspección por parte del Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento Básico, que a su vez recomienda dos métodos: Estándar y HEC22.

- *“Método Estándar. Este método incluye de manera directa las características geométricas de la cámara y las condiciones hidráulicas de la misma en el cálculo de las pérdidas menores de energía. El cálculo se lleva a cabo multiplicando la altura de velocidad en la tubería de salida de la cámara por un factor de pérdidas menores que depende de la conformación geométrica de la misma”* (Literal D.7.3.3.2.1 del RAS 2011).
- *“Método HEC22. El procedimiento de cálculo de pérdidas para la condición de flujo sub-crítico que se debe utilizar para determinar la línea de gradiente hidráulico del diseño definitivo es el método HEC-22. Este método consiste en multiplicar la altura de velocidad en la tubería de salida por un coeficiente de pérdidas menores. Está basado en investigaciones de laboratorio y no aplica cuando el fondo de la tubería de entrada está sobre el nivel de agua en la cámara”* (Literal D.7.3.3.2.2 del RAS 2011).

Cabe resaltar que, el Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento Básico especifica ciertos parámetros para diseñar apropiadamente estas cámaras. Estos lineamientos de diseño encontrados en el Literal D.7.3.2 del RAS 2011, son:

"Parámetros de diseño. Por lo menos, el diseñador debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- *No se debe permitir un ángulo de deflexión mayor que 90 grados de ninguna de las tuberías de entrada con respecto a la tubería de salida de la estructura.*
- *La geometría de la estructura debe perturbar al mínimo el flujo dentro del sistema, a menos que la proyección de la misma incluya algún mecanismo de disipación de energía.*
- *La estructura debe protegerse para operar bajo condiciones extremas, como altas velocidades de flujo y cambios bruscos del alineamiento horizontal y/o vertical de acuerdo con un análisis hidráulico del sistema.*
- *La geometría de la estructura debe permitir el eficiente mantenimiento de sí misma. Así como también las labores de inspección del sistema.*
- *El número máximo de tuberías que convergen a la cámara son cuatro (4)."*

Para retomar el último punto mencionado, en el cual se hace referencia a las diferentes tuberías que tiene una cámara, es necesario poder conocer cual tubería es la que domina el flujo y por lo tanto la que produce mayores pérdidas menores. Para esto se tienen tres criterios de selección diferentes (Saldarriaga, 2013):

1. La tubería que tenga un mayor valor al multiplicar el caudal que transporta por la velocidad que lleva.

$$\text{Criterio 1} = Q * v$$

Ecuación 11 Criterio Escogencia Tubería Dominante

2. La tubería que tenga el menor ángulo de deflexión con respecto a la tubería de salida en planta. Se recomienda que este criterio de selección solo se utilice cuando la tubería de salida transporte un caudal similar al de las otras tuberías conectadas a la cámara.
3. La tubería que tenga mayor velocidad. Se debe tener cuidado al utilizar este criterio ya que puede quedar como tubería dominante una que tenga un caudal inferior al de las otras que estén conectadas en la cámara.

2.1 Software para la modelación de alcantarillados

En el mercado actual se tienen diferentes programas que logran obtener la modelación de diferentes redes de alcantarillado, mas es importante recalcar que sólo existe un programa que logra diseñar estos sistemas, siendo este Sedal Plus. Todos los demás programas de alcantarillados, incluyendo el que se utilizó para las modelaciones de este proyecto, realizan comprobaciones de diseño. Lo que significa esto es que la mayoría de programas de alcantarillados sólo entregan al usuario el comportamiento detallado de la

red de drenaje, es decir, no diseñan el sistema. Dependiendo de la complejidad del software escogido se pueden obtener más o menos características de la red. Los programas actuales en el mercado son:

- EPA-SWMM
- SewerGems
- SewerCad
- CivilStorm

La escogencia del programa para este proyecto de grado fue debido a tres parámetros principalmente. El primero de estos es que el programa en cuestión pudiera modelar el flujo bajo un régimen de análisis extendido; el siguiente parámetro era que el software escogido pudiera presentar la mayor cantidad de características de flujo para un instante de tiempo determinado; y el tercer parámetro era que el programa tuviera la mayor cantidad de métodos de pérdidas menores en cámaras de inspección posibles.

Teniendo en cuenta los parámetros anteriores el programa escogido fue el software desarrollado por la casa Bentley: SewerGems. Éste software es el único capaz de modelar cualquier red de drenaje bajo los siguientes métodos de pérdidas menores: Absoluto, Genérico, HEC-22 y Estándar.

SewerGems explica sus métodos de pérdidas menores de la siguiente manera.

- Método Absoluto: Es el método más simple de los diferentes métodos de pérdidas menores. La estructura de pérdidas menores no termina siendo nada más que un valor editable, que luego es usado durante los cálculos. No se necesitan cálculos relacionados con velocidad, ángulo de deflexión u otros factores.
- Método Estándar: el método estándar calcula las pérdidas menores basado en la velocidad de la tubería de salida. Esta velocidad de salida es multiplicada por un coeficiente que el usuario otorga para determinar las pérdidas en la cámara. Estos coeficientes dependen de la conformación geométrica de ésta. A continuación se muestra cuáles son los valores recomendados según SewerGems.

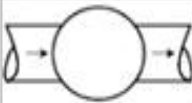
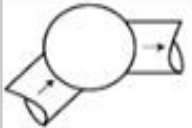
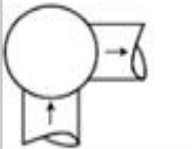
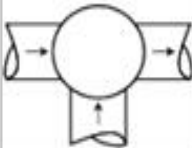
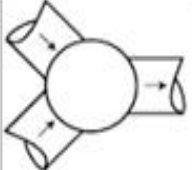
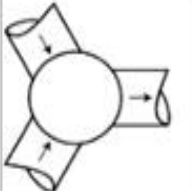
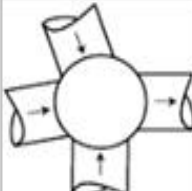
Type of Manhole	Diagram	Headloss Coefficient
Trunkline only with no bend at the junction		0.5
Trunkline only with 45° bend at the junction		0.6
Trunkline only with 90° bend at the junction		0.8
Trunkline with one lateral		Small 0.6 Large 0.7
Two roughly equivalent entrance lines with angle < 90° between lines		0.8
Two roughly equivalent entrance lines with angle > 90° between lines		0.9
Three or more entrance lines		1.0

Tabla 1 Coeficientes de pérdidas menores (Bentley, 2013).

La manera en la cual se calcula el valor de pérdidas menores está dado en la siguiente fórmula.

$$h_{cámara} = k \frac{V_o^2}{2g}$$

Ecuación 12 Pérdidas Menores Método Estándar.

donde:

k = Coeficiente de pérdidas menores

V_o = Velocidad en la tubería de salida

Método Genérico: El método genérico calcula las pérdidas menores de la cámara multiplicando la altura de velocidad de la tubería de salida por el coeficiente de pérdidas menores de esta cámara aguas abajo. Luego, se resta la altura de velocidad de la tubería que gobierna el flujo aguas arriba multiplicada por el coeficiente de pérdidas menores de la cámara aguas arriba. A continuación se mostrara la fórmula utilizada por este método:

$$h_{cámara} = K_0 * \frac{V_o^2}{2g} - K_1 * \frac{V_1^2}{2g}$$

Ecuación 13 Pérdidas Menores Método Genérico.

donde:

k_o = Coeficiente de pérdidas menores aguas abajo

V_o = Velocidad en la tubería de salida

k_1 = Coeficiente de pérdidas menores aguas arriba

V_1 = Velocidad en la tubería dominante de entrada

Para la escogencia del ducto dominante el programa sugiere los mismos criterios de selección mencionados anteriormente.

- Método HEC-22: similar al método estándar; el método HEC 22 correlaciona la estructura de pérdidas menores con la velocidad de la tubería de salida. Varios estudios experimentales han determinado que el coeficiente de pérdidas menores se calcula de la siguiente manera:

$$K = K_0 C_D C_d C_Q C_p C_B$$

Ecuación 14 Coeficiente de Pérdidas Menores Método HEC22.

donde:

k_o = Coeficiente inicial de pérdidas menores

C_D = Factor de corrección para el diámetro de la tubería

C_d = Factor de corrección para la profundidad de flujo en la tubería

C_Q = Factor de corrección por flujo relativo

C_P = Factor de corrección por inmersión en la tubería

C_B = Factor de corrección por el uso de cañuelas en las cámaras de inspección

Es importante aclarar que cada uno de estos factores tiene a su vez una fórmula propia. Para la obtención de este valor se presentan a continuación estas fórmulas, (Saldarriaga, 2013):

$$K_0 = \left[0.1 * \frac{b}{d_s} * (1 - \sin \Delta) \right] + \left[1.4 * \left(\frac{b}{d_s} \right)^{0.15} * \sin \Delta \right]$$

Ecuación 15 Coeficiente Inicial de Pérdidas Menores.

donde:

b = Diámetro real interno de la cámara

d_s = Diámetro real interno del ducto de salida

Δ = Ángulo entre la tubería de salida y la tubería de entrada dominante

$$C_D = \left(\frac{d_s}{d_e} \right)^3$$

Ecuación 16 Factor de Corrección para el Diámetro de la Tubería.

donde:

d_s = Diámetro real interno del ducto de salida

d_e = Diámetro real interno del ducto de entrada dominante

La escogencia del ducto dominante sigue los mismos criterios de selección mencionados anteriormente.

$$C_d = 0.5 * \left(\frac{y}{d_s} \right)^{0.6}$$

Ecuación 17 Factor de Corrección para la profundidad de flujo en la Tubería.

donde:

d_s = Diámetro real interno del ducto de salida

y = Elevación del nivel de agua

$$C_Q = (1 - 2 \sin \Delta) * \left[1 - \frac{Q_1}{Q_0} \right]^{0.75} + 1$$

Ecuación 18 Factor de Corrección por Flujo Relativo.

donde:

Δ = Ángulo entre la tubería de salida y la tubería de entrada dominante

Q_1 = Caudal de flujos diferentes al de la tubería dominante

Q_0 = Caudal en la tubería de salida

$$C_P = 1 + 0.2 * \left(\frac{h}{d_s} \right) * \left(\frac{h - y}{d_s} \right)$$

Ecuación 19 Factor de Corrección por Inmersión en la Tubería.

donde:

d_s = Diámetro real interno del ducto de salida

y = Elevación del nivel de agua

h = Distancia entre la línea de flujo de la tubería que descarga y el centro de la tubería de salida

Finalmente para el último parámetro se debe referenciar a la siguiente tabla.

Tipo de Cañuela	Flujo sumergido	Flujo libre
Banca plana o deprimida	1	1
Media banca	0,95	0,15
Banca llena	0,75	0,07

Tabla 2 Factor corrección por el uso de cañuelas.

Nota: para que sea flujo sumergido se debe tener que la relación entre la elevación del nivel de agua y el diámetro real interno del ducto de salida sea mayor a 3.2 ($y/d_s > 3.2$) Para que sea flujo libre se debe tener que la relación entre la elevación del nivel de agua y el diámetro real interno del ducto de salida sea menor a 1 ($y/d_s < 1$).

Ya al haber obtenido este coeficiente de pérdidas menores ajustado se procede a calcular la pérdida de energía en la cámara de inspección:

$$h_{\text{cámara}} = k \frac{V_o^2}{2g}$$

Ecuación 20 Pérdidas Menores Método HEC22.

donde:

V_o = Velocidad en la Tubería de Salida

k = Coeficiente de pérdidas menores ajustado

Es importante recalcar que cuando se utilizan cañuelas profundas en las cámaras de inspección es como si se tuvieran pérdidas menores cercanas a cero. Esto sucede debido a que cuando se usan este tipo de cañuelas el flujo no siente transición alguna entre la tubería y la cámara de inspección. A continuación se muestra una gráfica de una cámara con cañuela profunda para flujo supercrítico.



Ilustración 3 Cámara de inspección con cañuela profunda (ARECO, 2013).

Ahora bien, al haber ya especificado todas las características inherentes al flujo y los componentes de un sistema de drenaje urbano se presentarán a continuación los dos sistemas de alcantarillado a trabajar en este proyecto de grado. El primero de estos está ubicado en un barrio de Girardot llamado Acacias y el segundo de estos es una parte de la red de drenaje del barrio Prado en Medellín.

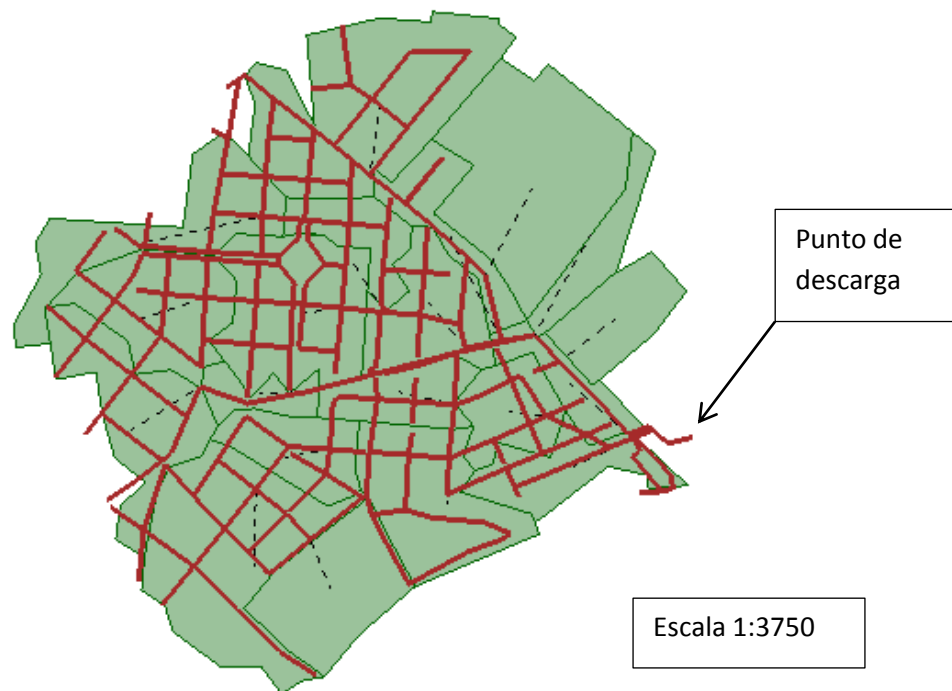


Ilustración 4 Red de Acacias-Girardot. (Paez, 2010)

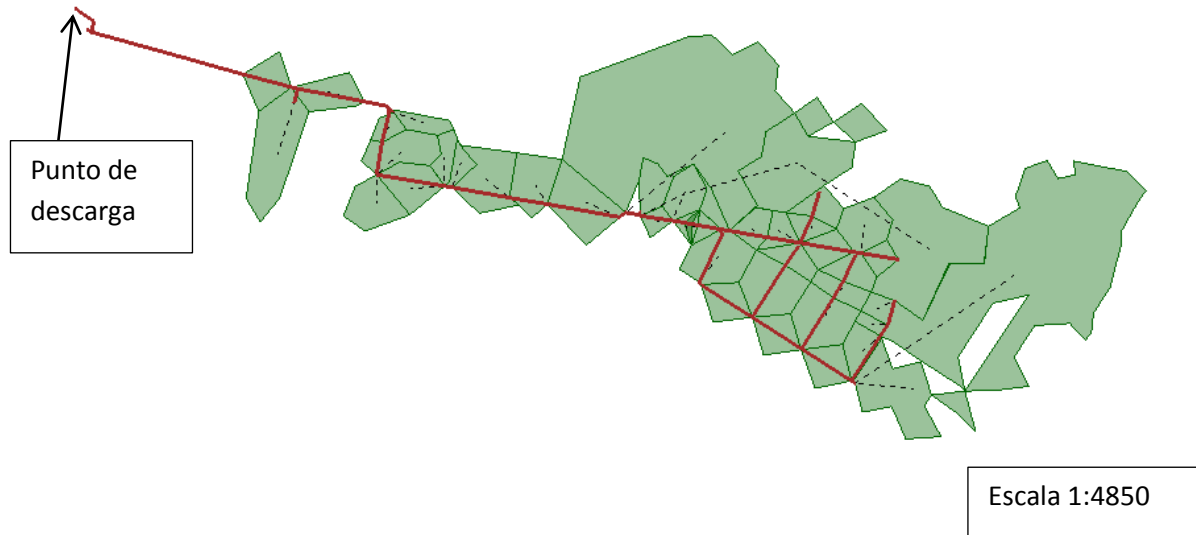


Ilustración 5 Red de Prado- Medellín. (Paez, 2010).

3. Metodología para realizar las modelaciones

Para comprender cómo se comportan las cámaras de inspección bajo diferentes regímenes de flujo se decidió que cada modelo tendría un cierto aumento en las pendientes de sus tuberías. El motivo por el cual se realizó este cambio de pendiente en las tuberías es el de facilitar la observación del comportamiento del flujo en diferentes condiciones. Fue así como para cada uno de los modelos se optó por mayorar la pendiente en un dos, cinco, diez y veinte por ciento (2%, 5%, 10%, 20%). Cabe aclarar que cuando en este Proyecto de Grado se haga referencia a *mayorar la pendiente* cierto porcentaje, lo que se indica es que se va a multiplicar la pendiente por uno más el porcentaje deseado.

$$Pendiente\ Mayorada = Pendiente\ Original * \left(1 + \frac{valor\ de\ mayoración}{100}\right)$$

Teniendo en cuenta esta especificación, en la tabla 3 se muestran los valores de mayoración utilizados para este estudio.

Valor de mayoración	Factor de mayoración
2	1,02
5	1,05
10	1,1
20	1,2

Tabla 3 Factores de mayoración.

Ya teniendo estos modelos con características topológicas distintas, se procedió a calcular cómo variaban las características del flujo en toda la red de acuerdo con el método de cálculo de pérdidas de energía en cámaras de inspección. En otras palabras, para cada modelo se observó cómo cambiaba el flujo de acuerdo con el método de cálculo de pérdidas menores escogido, esto se hacía para todos los modelos obtenidos, siendo estos los mayorados así como el original. Los parámetros que se observaron en cada modelación con respecto a las tuberías aguas abajo de la cámara son: relación de llenado, Número de Froude y velocidad de flujo en la tubería. Con respecto a las cámaras de inspección el único comportamiento que se observó fue el cambio del nivel freático. Al obtener los resultados de la totalidad de las tuberías y cámaras de inspección se prosigue a compararlos de forma cualitativa y cuantitativa.

No sobra mencionar, que para todas las modelaciones se utilizó el mismo evento de precipitación con el objetivo de que las diferentes redes en SewerGems tuvieran un caudal de entrada igual. Otro factor común en la totalidad de las modelaciones es su

realización bajo un régimen de análisis en periodo extendido, lo que significa, que el evento de precipitación que se tiene varía con respecto al tiempo, dando así una mayor confiabilidad a los resultados que se obtienen. Esto debido a que se logra una mejor imitación de la realidad y que éste análisis se realiza para cierta cantidad de tiempo considerable, en el caso específico del proyecto fueron veinticuatro horas (24 h).

Ahora bien, con respecto a las cámaras de inspección se varían los coeficientes de pérdidas menores (k_m) con el fin de simular cada modelo en dos condiciones específicas: condiciones actuales y condiciones mejoradas de las cámaras utilizando cañuelas profundas. El objetivo de realizar varias modelaciones es mostrar la importancia que ejerce la tecnología de materiales en las características que presenta un flujo, ya que se va a mostrar claramente como el modelo con cañuelas profundas tiene un funcionamiento hidráulico mejor en comparación a las cámaras que no utilizan cañuelas profundas. De la misma manera, es importante recalcar cómo también se pueden aprovechar los avances tecnológicos en las piezas del sistema de drenaje urbano; por ejemplo en el uso de cañuelas profundas, para mejorar las propiedades hidráulicas del sistema.

Las cámaras de inspección analizadas en la red de Prado-Medellín son: C159D, C80A y C93B. Las tuberías analizadas son las inmediatamente aguas abajo de las cámaras analizadas. Esto se puede ver de una manera más clara en la siguiente imagen.

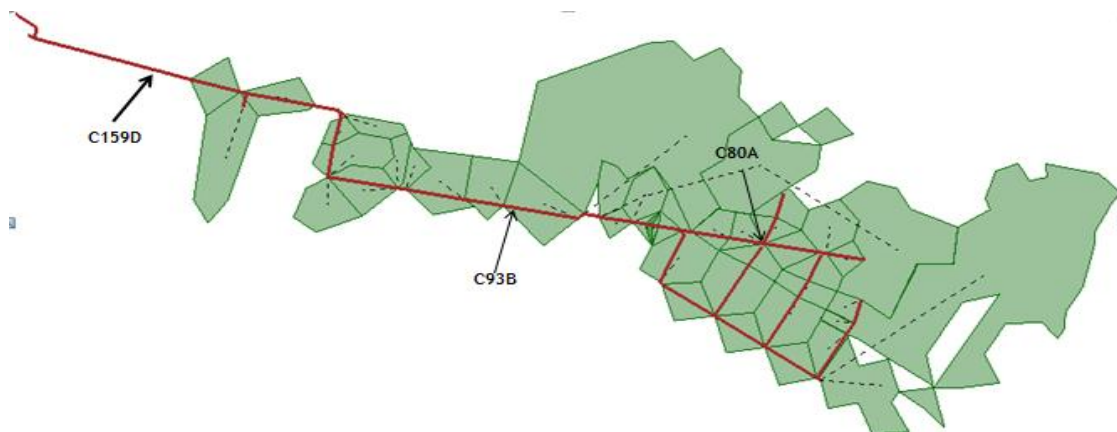


Ilustración 6 Red de Prado- Medellín.

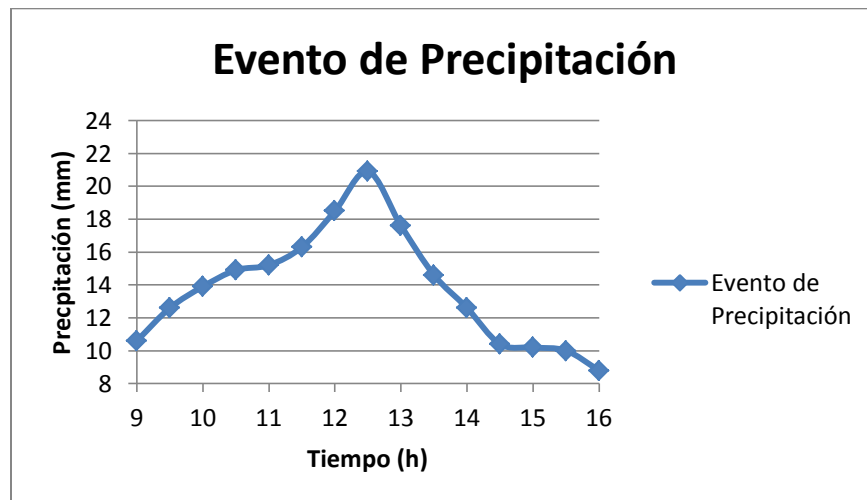
Y con respecto a la red de Acacias- Girardot las cámaras analizadas fueron: A13.9, TA.9 y A3.11. Estas serán mostradas a continuación.



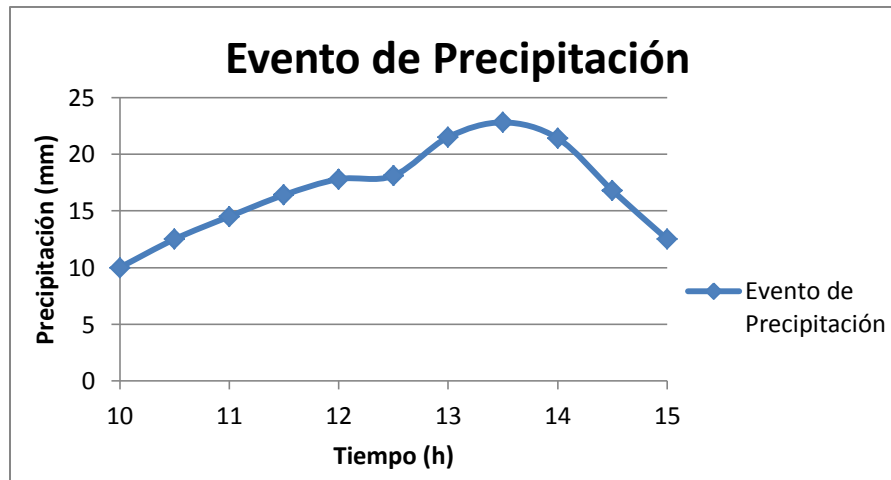
Ilustración 7 Red de Acacias-Girardot.

4. Modelaciones en SewerGems de los modelos a diferentes pendientes mayoradas

Como primera medida se va a mostrar la situación del modelo original, tanto de Prado-Medellín como de Acacias-Girardot, y se detallará como cambian las propiedades de flujo y de las cámaras seleccionadas de acuerdo con el método de pérdidas menores que se utilice. Primeramente se mostrarán las modelaciones de la red de Prado-Medellín e inmediatamente se ilustrarán las modelaciones de la red de Acacias-Girardot. No obstante es fundamental conocer en primera medida los eventos de precipitación que van a afectar los modelos, ya que estos van a ser fijos para todas las modelaciones. A continuación se mostraran estos eventos de precipitación.



Gráfica 3 Evento de Precipitación Prado-Medellín.



Gráfica 4 Evento de precipitación Acacias-Girardot.

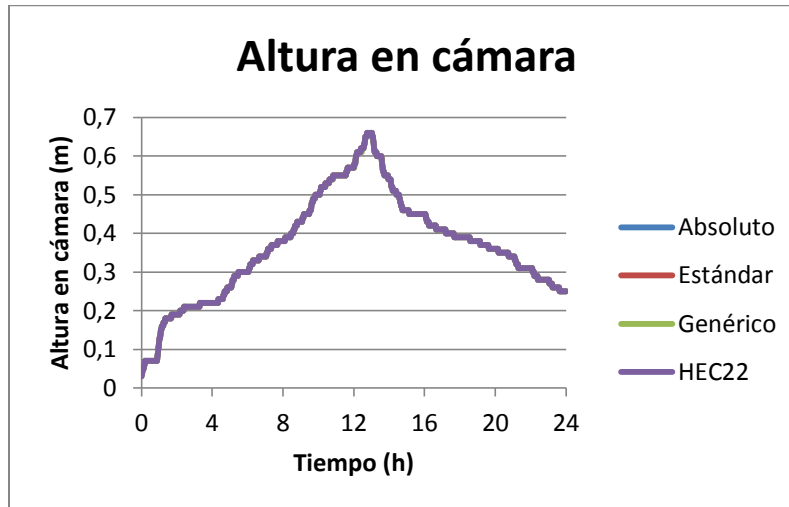
4.1 Modelos Originales

Para ésta primera modelación se utilizarán los modelos con pendientes originales y se compararán los niveles en las cámaras de inspección seleccionadas. Con respecto a las características de flujo: Velocidad, Relación de llenado y Número de Froude estas estarán analizadas también en cada una de las siguientes secciones.

4.1.1 Modelo Original de Prado-Medellín

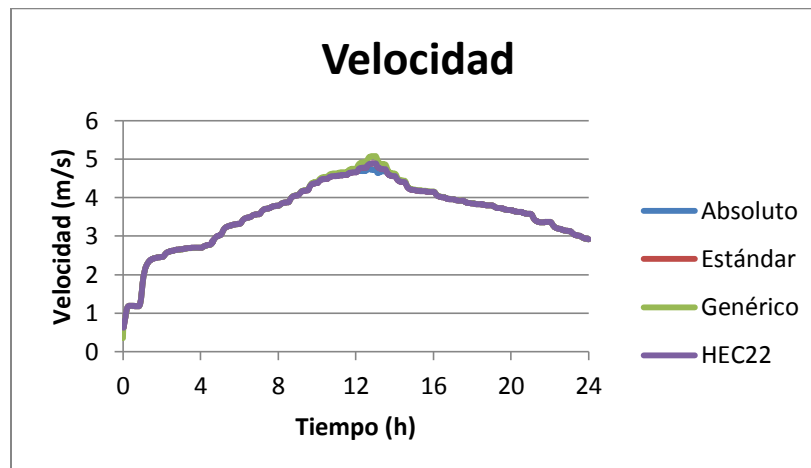
Para esta modelación primero se ilustrará el nivel en la cámara de inspección analizada y como varía éste dependiendo al método analizado. Cabe recalcar que éste nivel va a ir variando con respecto al tiempo debido al evento de precipitación que soportó la red de drenaje como a su vez por el caudal base que tiene la red de manera inherente. Inmediatamente a esto estarán las características de flujo de la tubería aguas abajo de la cámara de inspección.

Primeramente se ilustrarán los resultados de la cámara C159D y los de su tubería inmediatamente aguas abajo TA16.



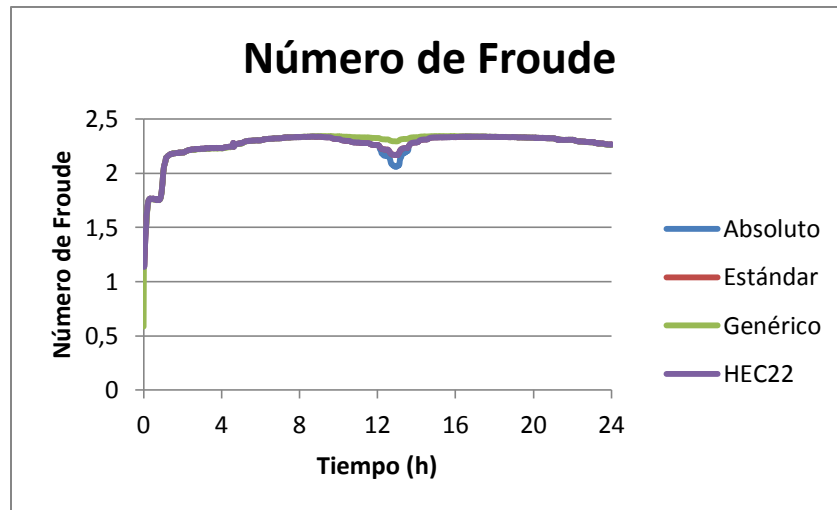
Gráfica 5 Altura en Cámara C159D. Comparación de Métodos.

Se puede observar como para ésta red en éste caso específico no afecta la manera en la cual se calculen las pérdidas menores. A continuación se ilustrarán las características de flujo de la tubería aguas abajo.



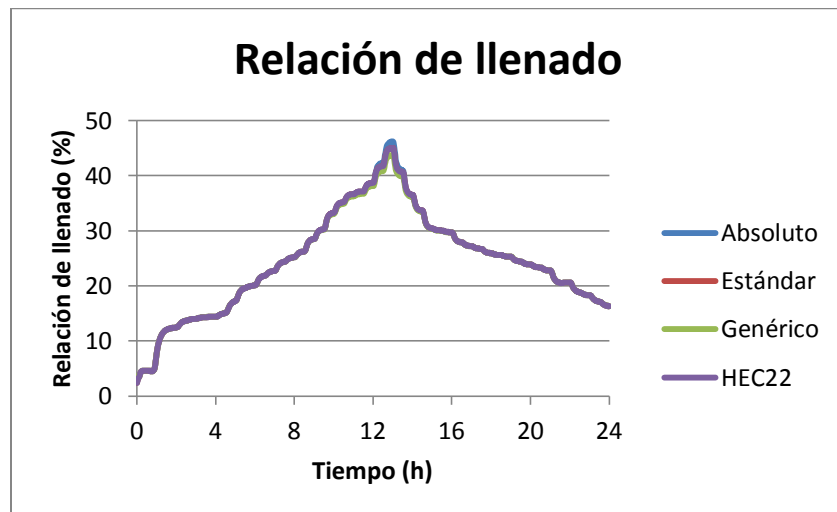
Gráfica 6 Velocidad en la Tubería TA16. Comparación de Métodos.

De esta gráfica se puede apreciar como el método Genérico presenta una mayor velocidad en el pico; no obstante, esta diferencia es mínima así que no se puede concluir nada de este resultado preliminar. Es importante recalcar que el material de las tuberías de la red es termoplástico implicando esto que pueden llegar a una velocidad máxima de 10 m/s.



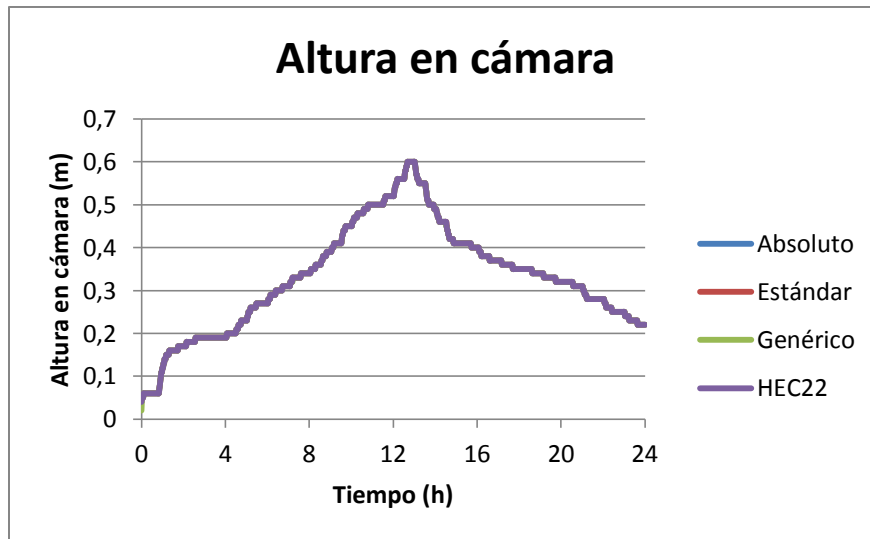
Gráfica 7 Número de Froude en la Tubería TA16. Comparación de Métodos.

El Número de Froude varía de una manera proporcional a la velocidad, motivo por el cual el método Genérico es ligermanente mayor que sus otros métodos homólogos.



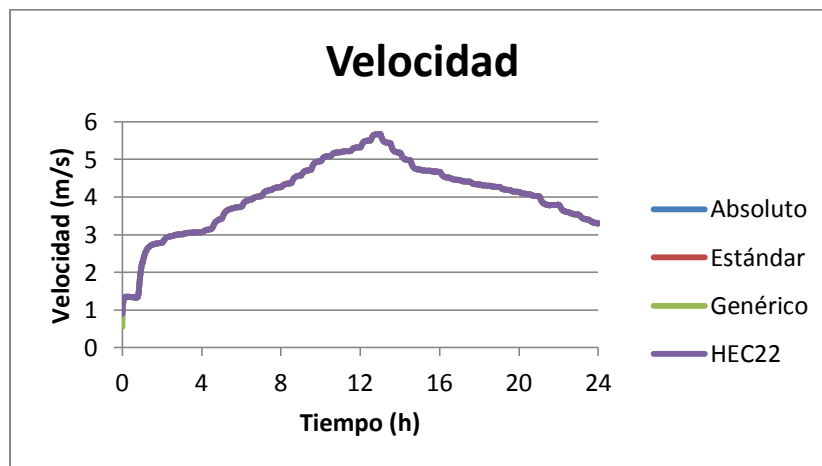
Gráfica 8 Relación de llenado en la Tubería TA16. Comparación de Métodos.

Ahora se mostrarán los resultados de la siguiente cámara de inspección, C93B, y su tubería correspondiente, TA5.

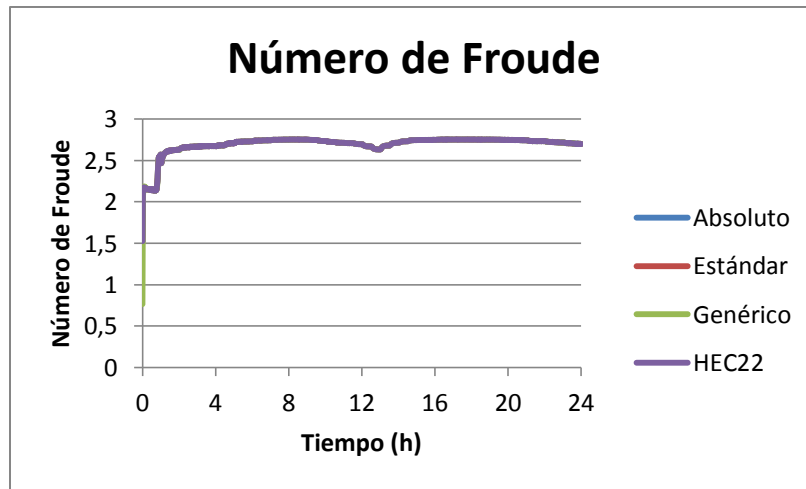


Gráfica 9 Altura en Cámara C93B. Comparación de Métodos.

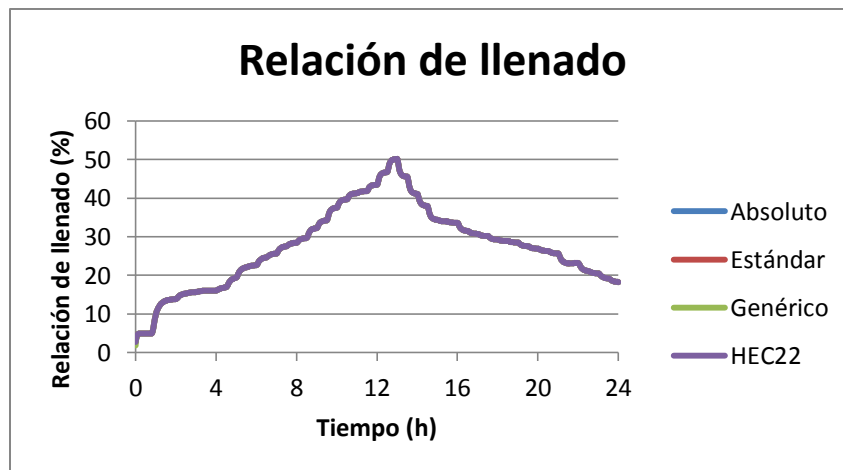
En la gráfica mostrada anteriormente no se presenta diferencia alguna con cualquiera de los métodos utilizados para calcular las pérdidas menores en las cámaras de inspección.



Gráfica 10 Velocidad en la Tubería TA5. Comparación de Métodos.

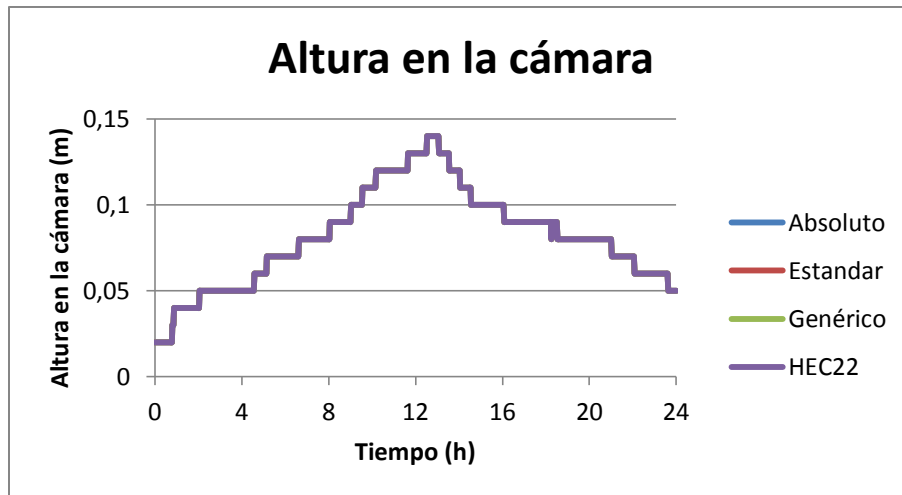


Gráfica 11 Número de Froude en la Tubería TA5. Comparación de Métodos.

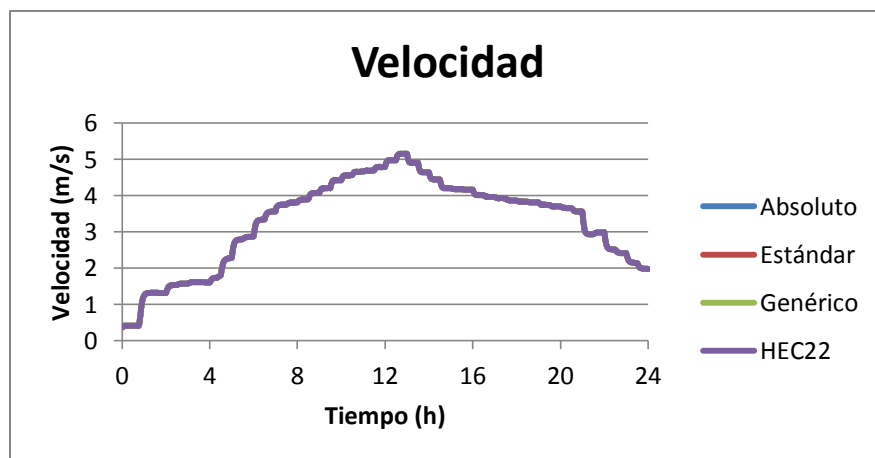


Gráfica 12 Relación de llenado en la Tubería TA5. Comparación de Métodos.

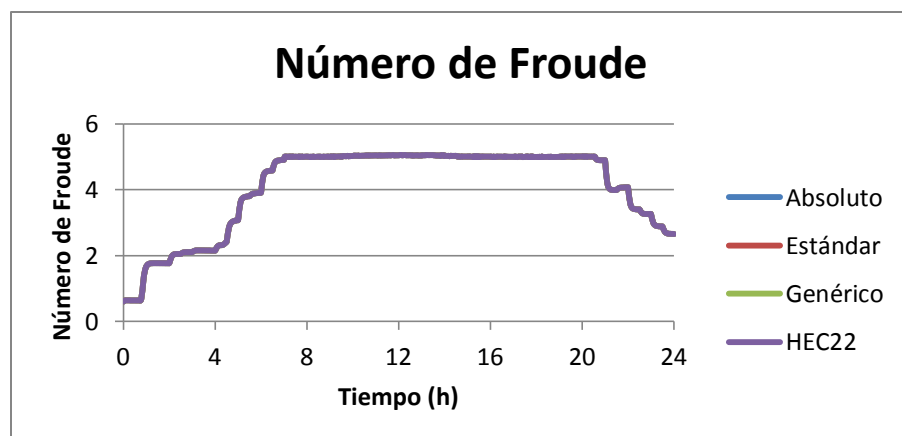
Con respecto a las gráficas anteriores se puede observar como todavía no se presenta una diferenciación clara entre métodos. No obstante, estas gráficas son fundamentales para éste proyecto ya que van a ser punto de comparación para los modelos con pendiente modificada. Ahora, se procederá a comparar la altura de la cámara C80A de acuerdo con el método de pérdidas menores escogido.



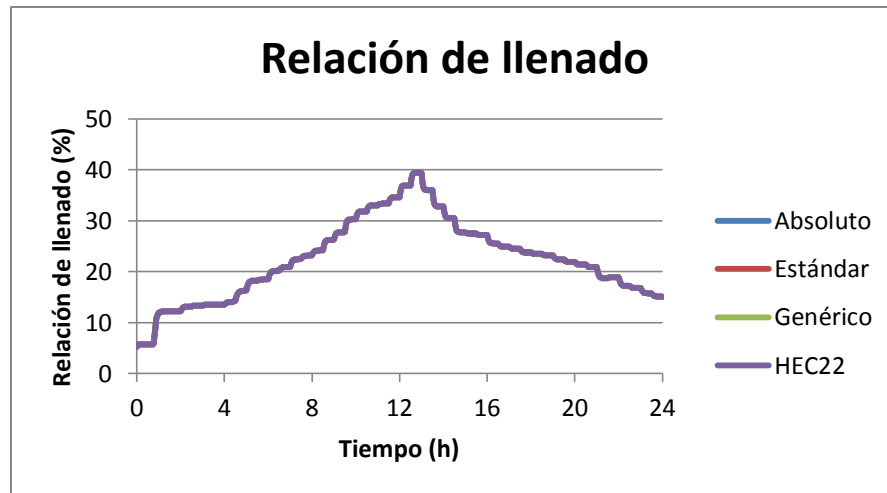
Gráfica 13 Altura en Cámara C80A. Comparación de Métodos.



Gráfica 14 Velocidad en la Tubería T36. Comparación de Métodos.



Gráfica 15 Número de Froude en la Tubería T36. Comparación de Métodos.

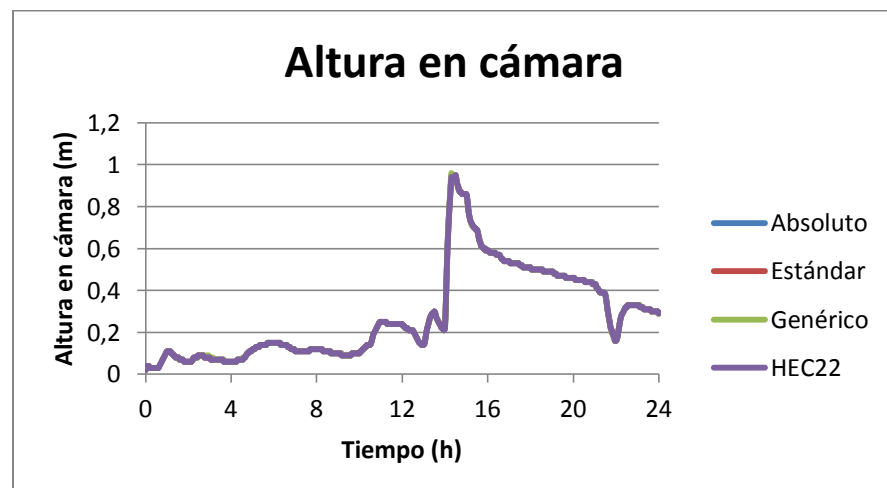


Gráfica 16 Relación de llenado en la Tubería T36. Comparación de Métodos.

Al igual que en la cámara de inspección anterior todavía no se presenta diferenciación alguna entre los métodos de pérdidas menores. A continuación se analizará la siguiente red de alcantarillado urbano.

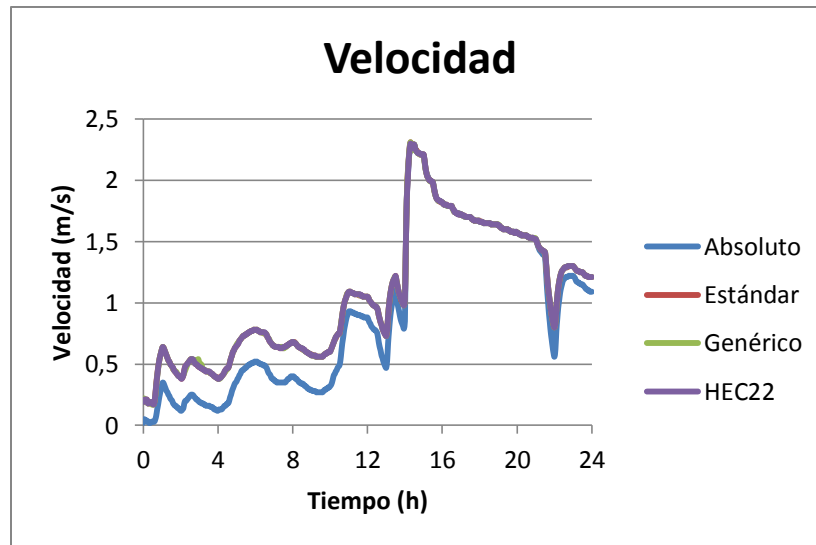
4.1.2 Modelo Original Acacias – Girardot

Al igual que en la red pasada se va a ir ilustrando cómo cambia el nivel de las cámaras de inspección analizadas de acuerdo con el método de pérdidas de energía escogido. De la misma manera se encontrarán las propiedades de las tuberías aguas abajo de las cámaras de inspección. Las cámaras a estudiar en la red de Acacias-Girardot son: A3.11, A13.9 y TA9.



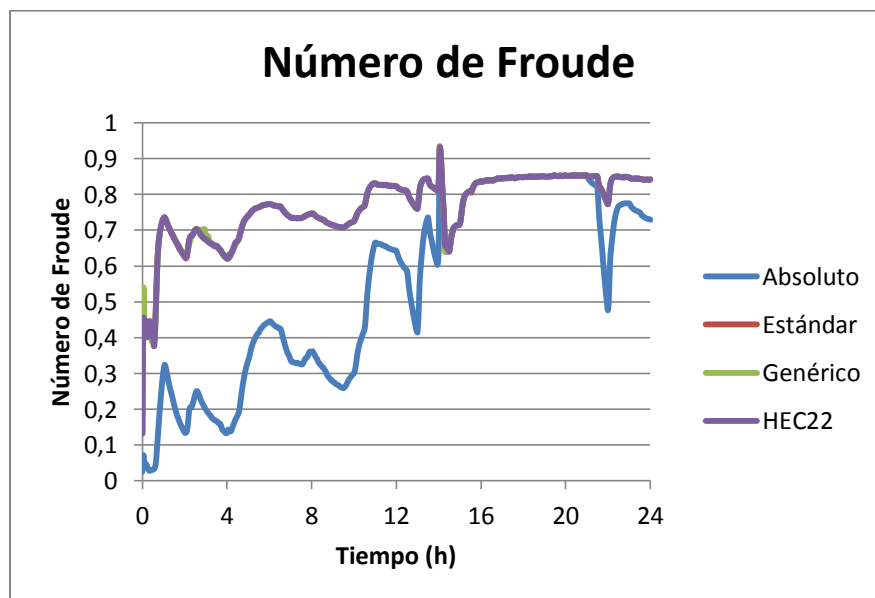
Gráfica 17 Altura en cámara A3.11. Comparación de Métodos.

Se logra observar como para esta cámara todavía no afecta el método de pérdidas menores utilizado.

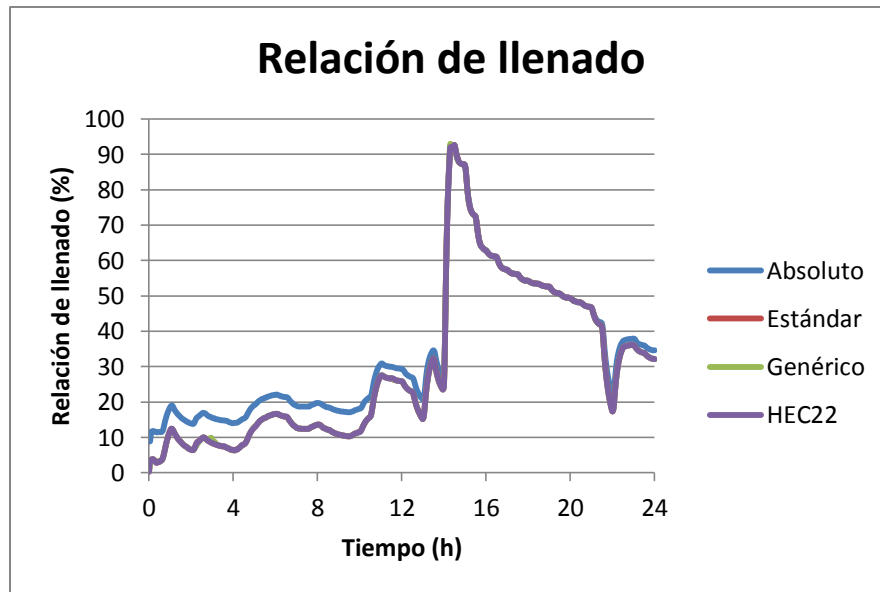


Gráfica 18 Velocidad en la Tubería T20. Comparación de Métodos.

Se puede notar en la gráfica anterior como el método Absoluto repercutió en la tubería aguas abajo en su propiedad de velocidad. A través de todo el tiempo de modelación éste método hizo que el flujo tuviera una velocidad menor comparada con la de los otros métodos. A continuación se observará como esta diferencia en velocidad afecta el Número de Froude y la relación de llenado.

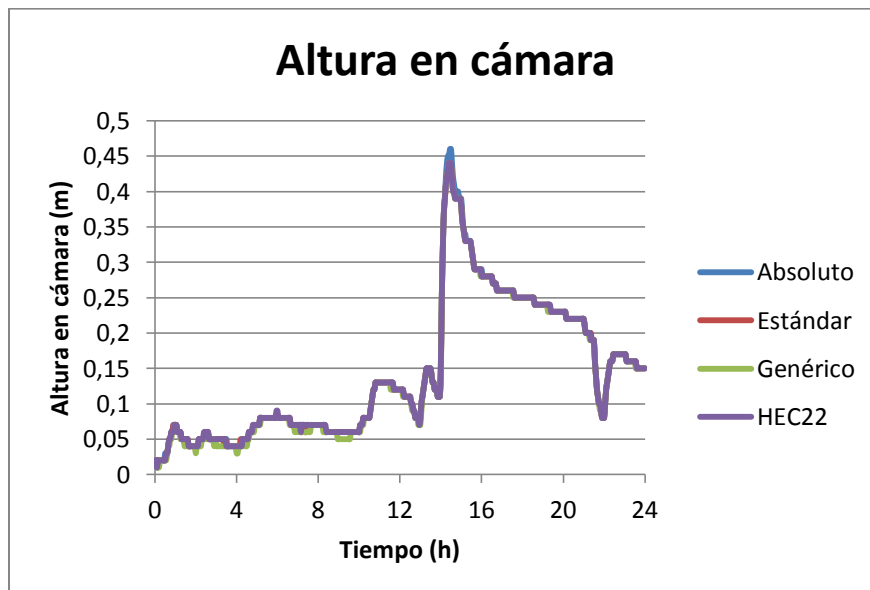


Gráfica 19 Número de Froude en la Tubería T20. Comparación de Métodos.



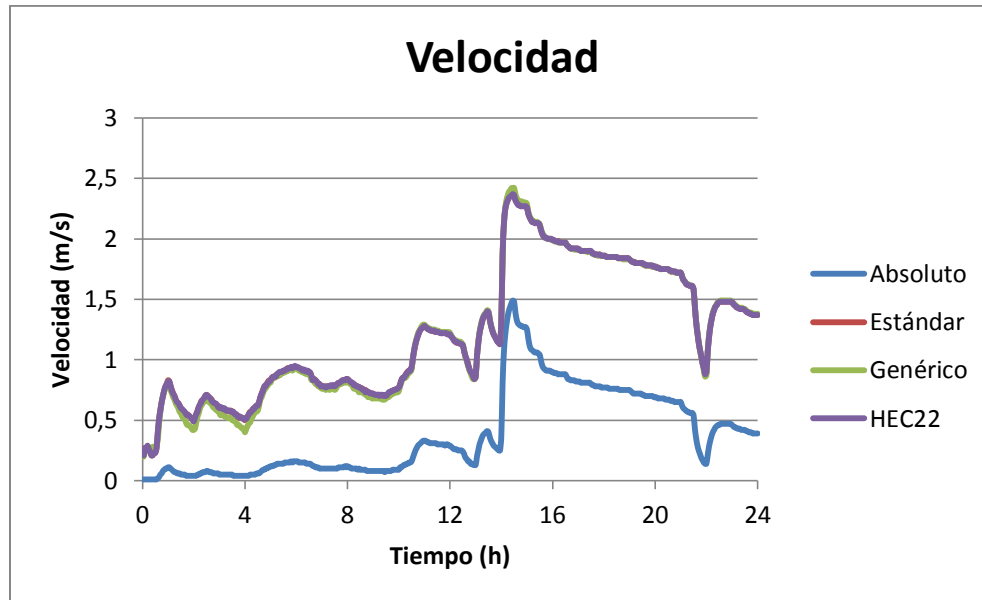
Gráfica 20 Relación de llenado en la Tubería T20. Comparación de Métodos.

De esta modelación se puede observar como todavía no se tienen diferenciaciones considerables entre métodos; no obstante, éstas serán utilizadas como punto de comparación con las modelaciones de pendiente modificada. A continuación se mostrarán los resultados de otra cámara de inspección en esta red de drenaje urbano, la cámara A13.9.

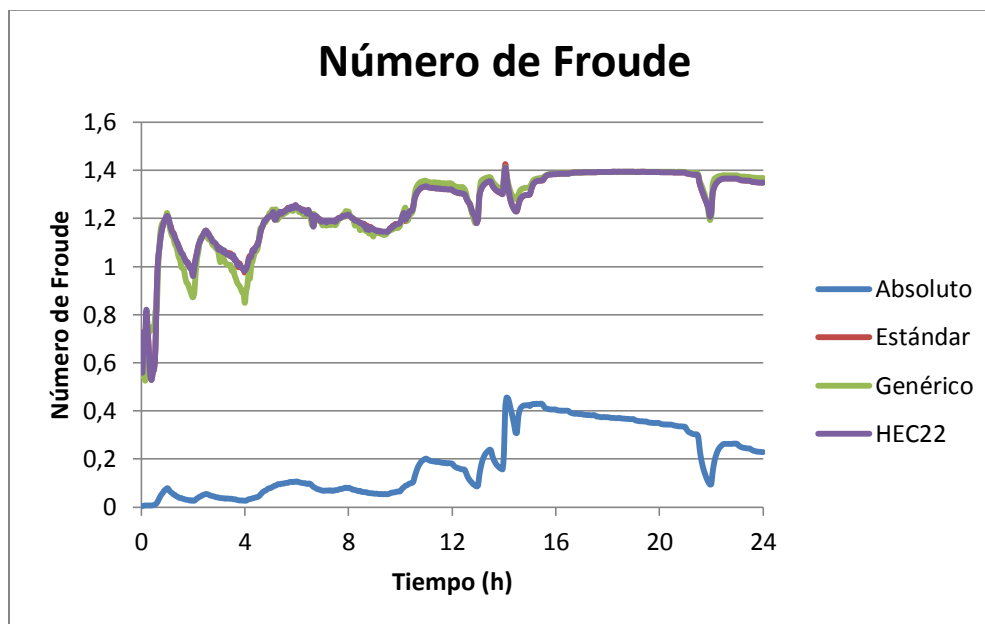


Gráfica 21 Altura en cámara A13.9. Comparación de Métodos.

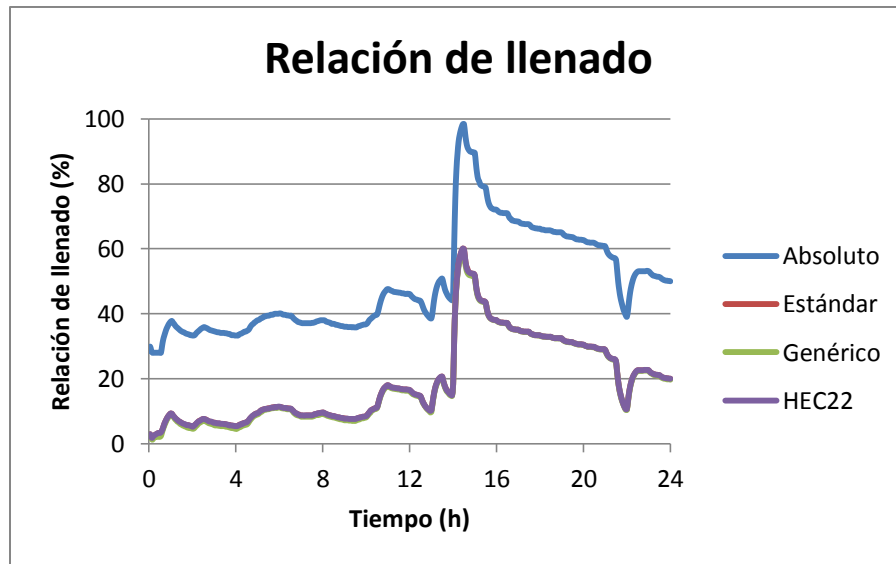
En esta cámara de inspección se ve como ligeramente el método Absoluto tiene una altura mayor que los otros métodos de pérdidas menores; no obstante, esta diferencia no es considerable.



Gráfica 22 Velocidad en la Tubería T8. Comparación de Métodos.

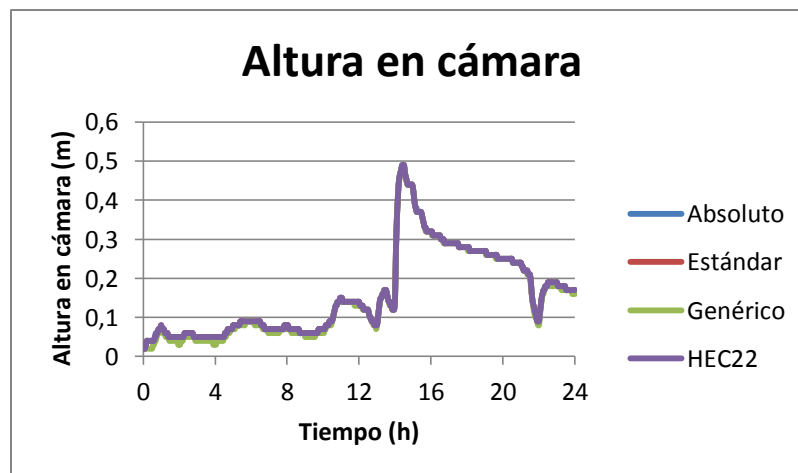


Gráfica 23 Número de Froude en la Tubería T8. Comparación de Métodos.

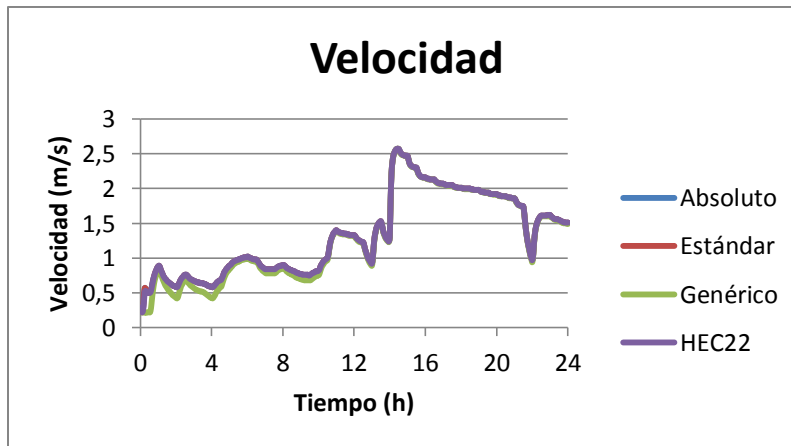


Gráfica 24 Relación de llenado en la Tubería T8. Comparación de Métodos.

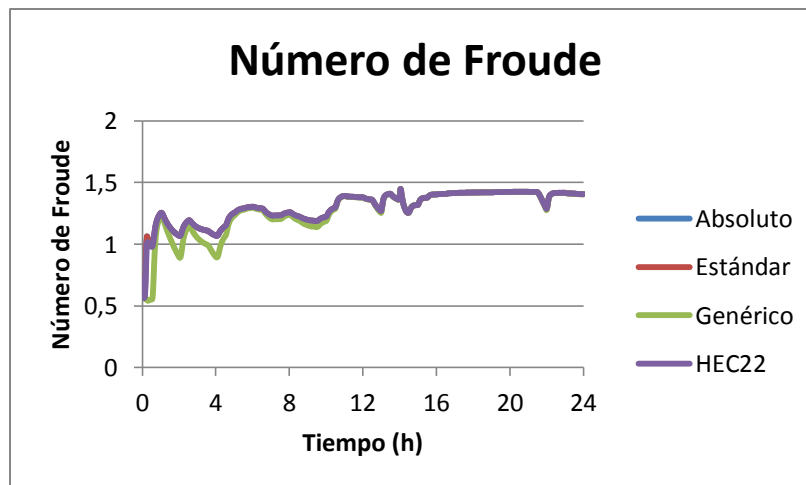
Como se nota en las modelaciones anteriores ese pico ligeramente mayor en la cámara de inspección, Gráfica 21, repercutió considerablemente en las características de la tubería aguas abajo de la cámara. Se puede observar como la relación de llenado es mayor cuando se utiliza el método Absoluto. Esto genera una menor velocidad en la tubería y un número de Froude menor. Finalmente se mostrarán los resultados de la última cámara de inspección, TA9.



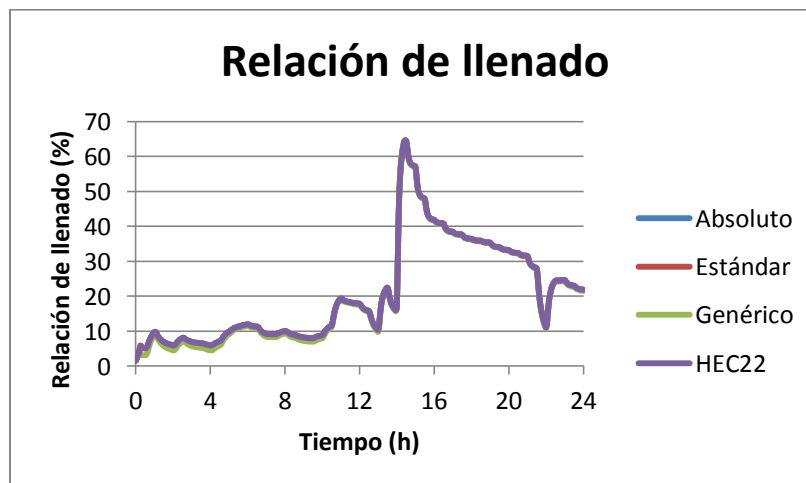
Gráfica 25 Altura en cámara TA9. Comparación de Métodos.



Gráfica 26 Velocidad en la Tubería T180. Comparación de Métodos.



Gráfica 27 Número de Froude en la Tubería T180. Comparación de Métodos.



Gráfica 28 Relación de llenado en la Tubería T180. Comparación de Métodos.

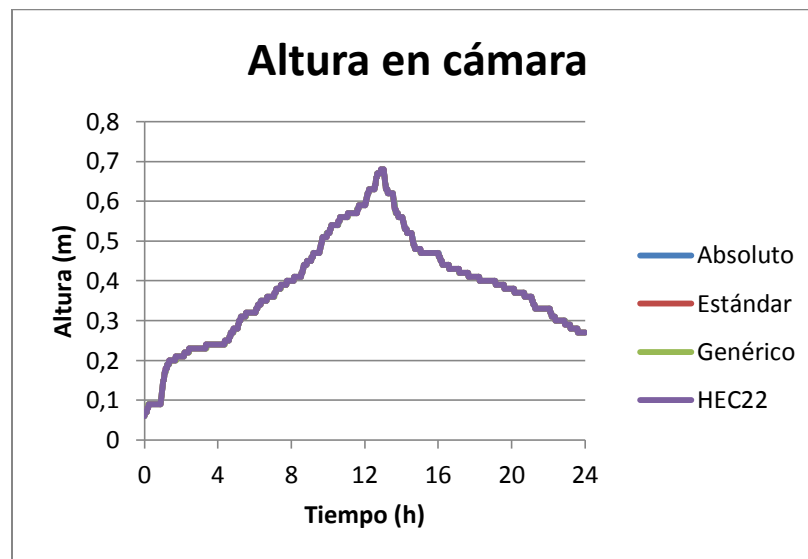
De estas modelaciones pasadas se puede observar como ningún método parece diferenciarse. No obstante, estos resultados serán fundamentales para el desarrollo del proyecto ya que serán punto de comparación. Teniendo ya todas las modelaciones originales se irá mayorando la pendiente de las tuberías de las redes de drenaje para observar el comportamiento de estas. Al hacer estos cambios se verá cómo se incrementan las diferencias entre estos métodos de pérdidas energía en cámaras de inspección.

4.2 Modelos mayorados un dos por ciento (2%)

Para las siguientes modelaciones fueron modificadas las pendientes de ambas redes de drenaje urbano un dos por ciento, como fue especificado en la sección de metodología. Al igual que los resultados mostrados anteriormente, en ésta sección se ilustrarán como cambian los niveles en las cámaras de inspección de acuerdo con el método de pérdidas menores escogido. A su vez se ilustrará que tanto cambian los modelos con respecto al modelo original presentados en la Sección 4.1. Con respecto a cómo varían las propiedades de flujo (velocidad, relación de llenado y número de Froude) en la tubería aguas abajo de la cámara de inspección estos resultados serán presentados inmediatamente después a la gráfica del nivel en la cámara.

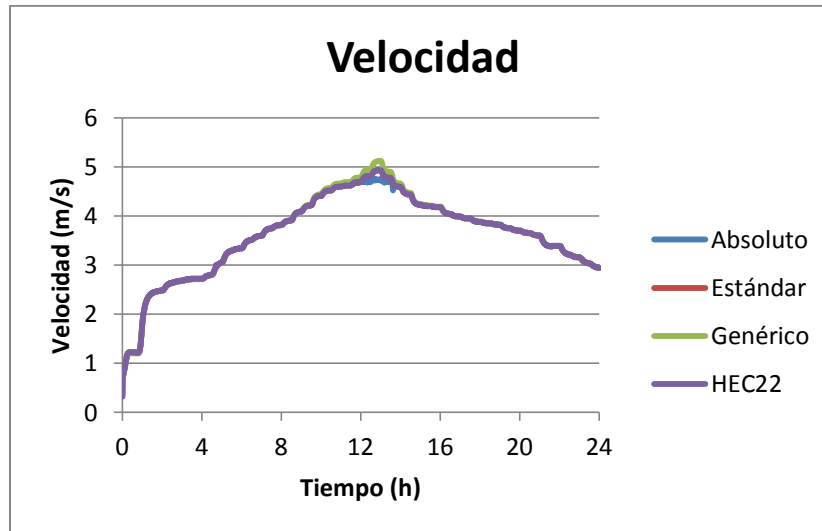
4.2.1 Modelo mayorado un dos por ciento (2%) Prado-Medellín.

Para esta modelación se ilustrará como varía el nivel en la cámara de inspección de acuerdo con el método de pérdidas menores escogido. Cabe recalcar que se debe observar también como cambia el nivel de las cámaras de inspección con respecto a la modelación original. Al igual que en las secciones pasadas estarán presentes las características de flujo de la tubería inmediatamente inferior a la cámara de inspección.



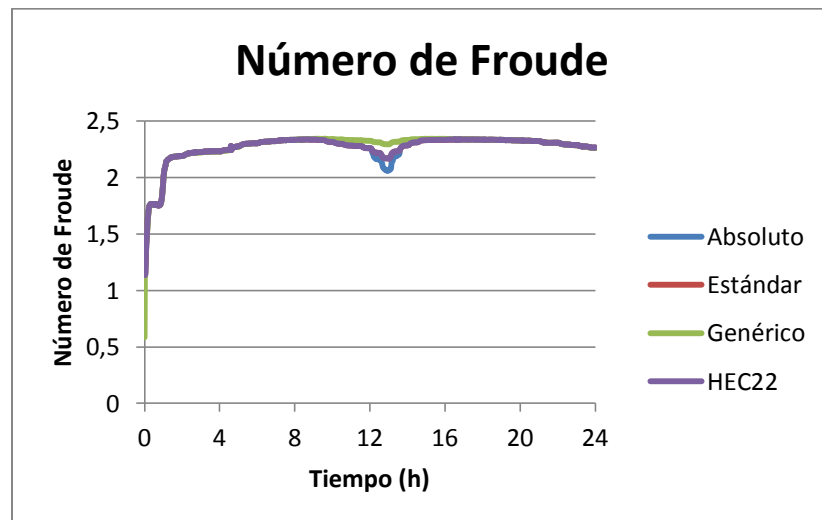
Gráfica 29 Altura en cámara C159D. Comparación de Métodos.

De la misma manera que en modelaciones pasadas todavía no se presentan diferenciaciones entre los métodos de pérdidas de energía. El nivel en la cámara incrementó centímetros, así que no presenta diferencias considerables cuando se mayor la pendiente un dos por ciento.

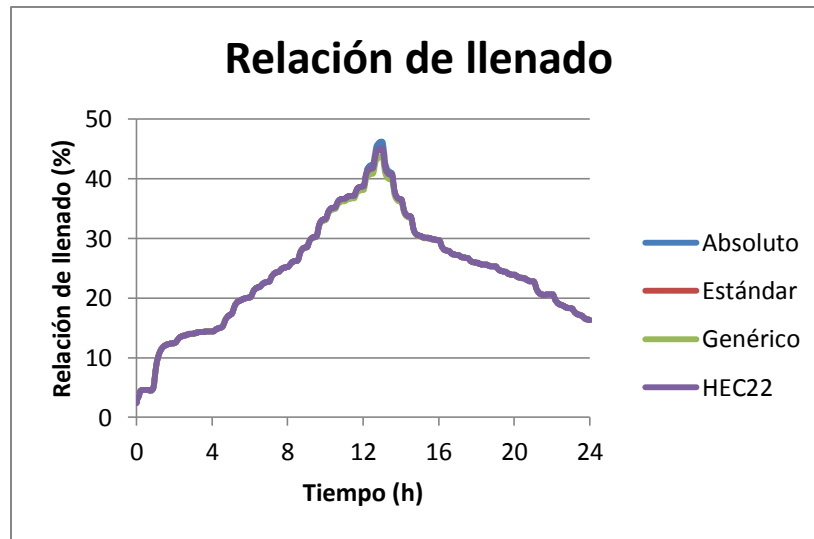


Gráfica 30 Velocidad en la Tubería TA16. Comparación de Métodos.

En la gráfica anterior se presenta en el pico una segregación de métodos. La velocidad mayor está dada por el método Genérico y la velocidad menor está dada por el método Absoluto. El método Absoluto tiene un comportamiento renuente de presentar velocidades menores que sus métodos homólogos.

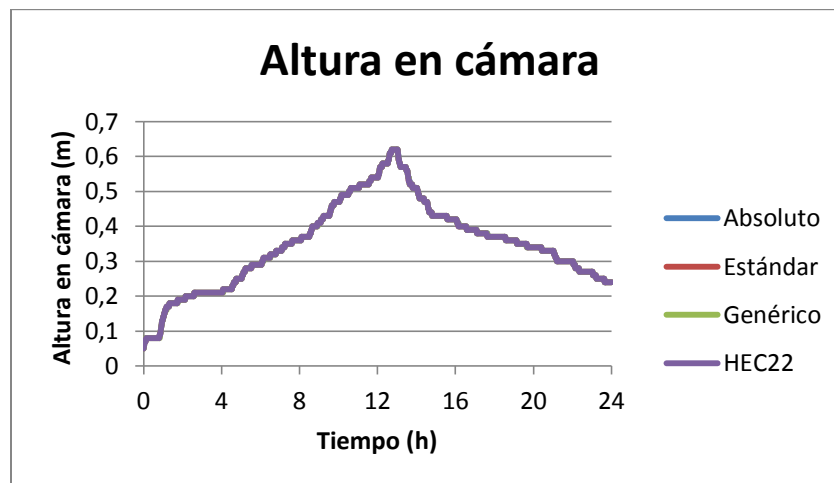


Gráfica 31 Número de Froude en la Tubería TA16. Comparación de Métodos.

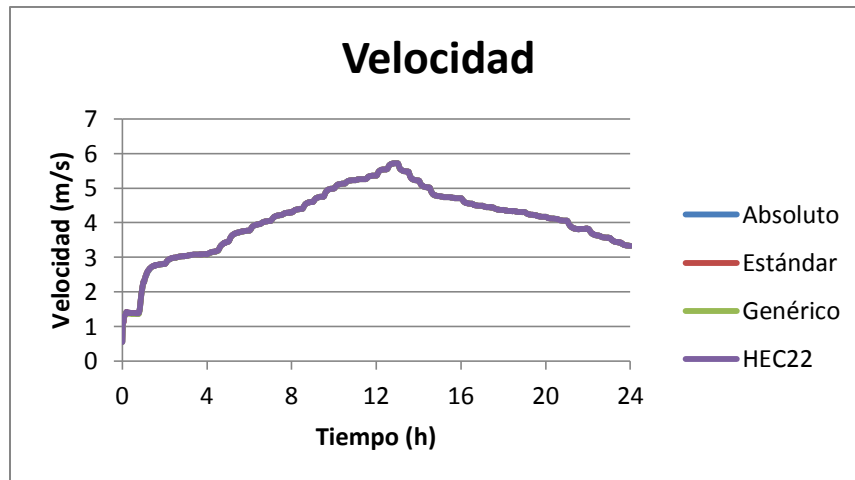


Gráfica 32 Relación de llenado en la Tubería TA16. Comparación de Métodos.

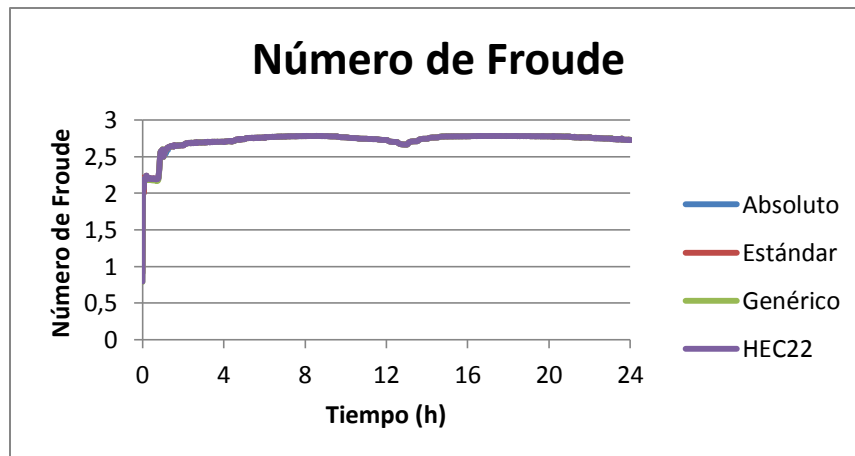
Como era de esperarse el método Absoluto presenta una mayor relación de llenado generando esto una velocidad menor que sus métodos homólogos. De la misma forma en ésta gráfica se observa como el método Genérico tiene una velocidad mayor, relación de llenado menor y mayor número de Froude. Parece comenzar a existir una diferenciación en los métodos de pérdidas menores a pesar de que no sea expresamente en el nivel de la cámara mas si en las propiedades del flujo en la tubería aguas abajo. A continuación se muestran los resultados de la cámara C93B.



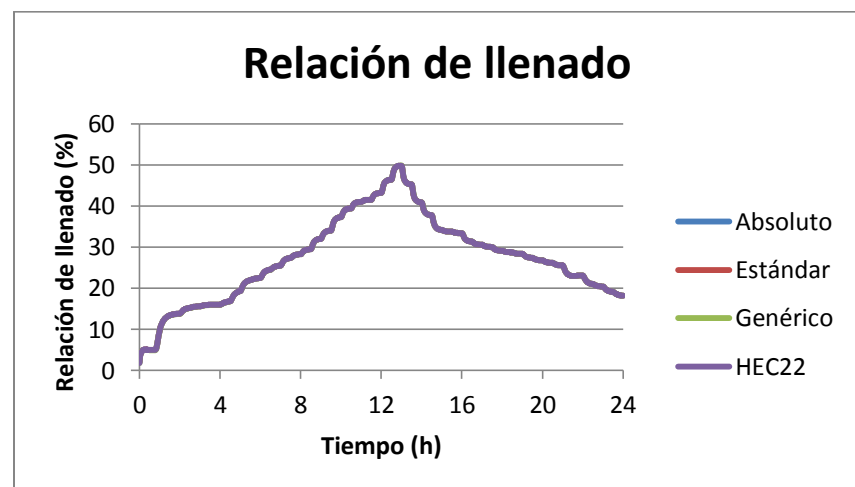
Gráfica 33 Altura en cámara C93B. Comparación de Métodos.



Gráfica 34 Velocidad en la Tubería TA5. Comparación de Métodos.

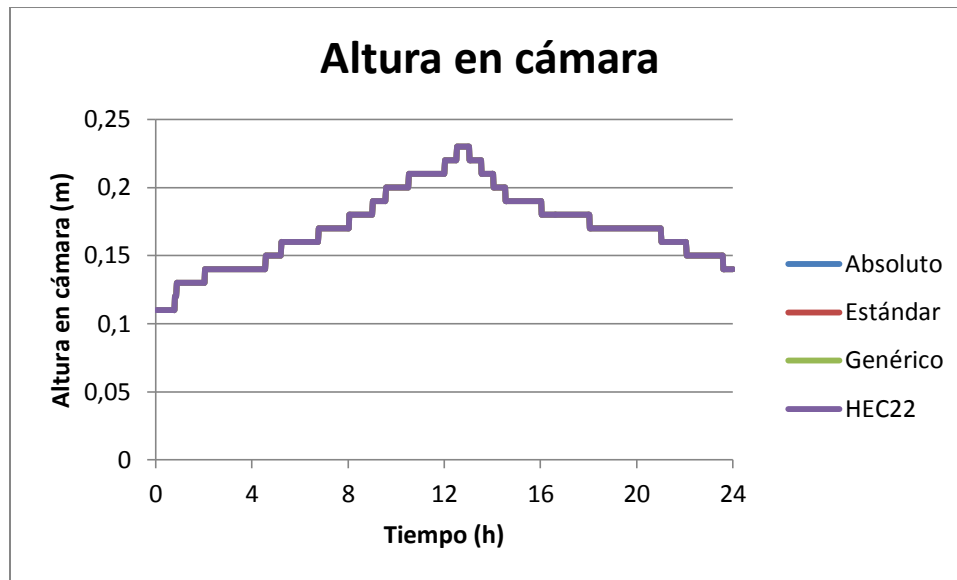


Gráfica 35 Número de Froude en la Tubería TA5. Comparación de Métodos.

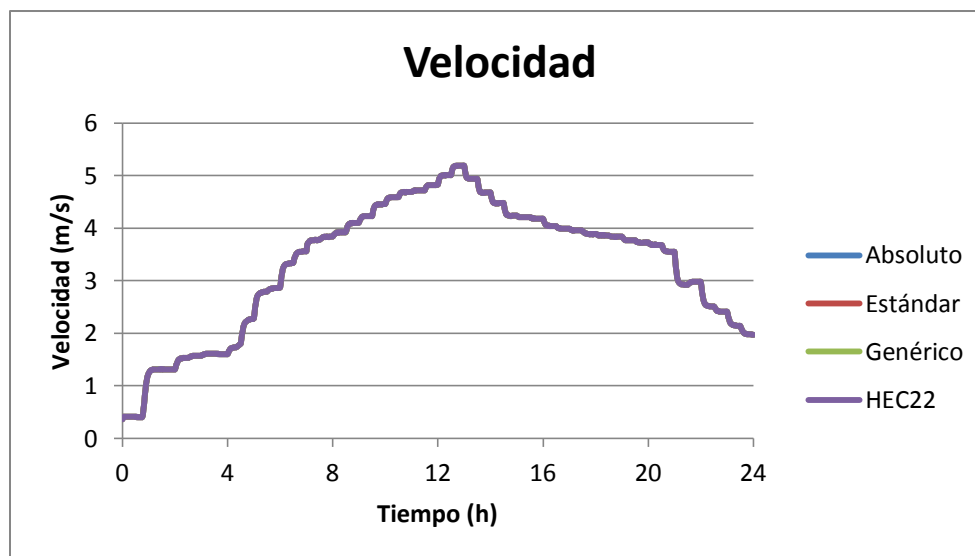


Gráfica 36 Relación de llenado en la Tubería TA5. Comparación de Métodos.

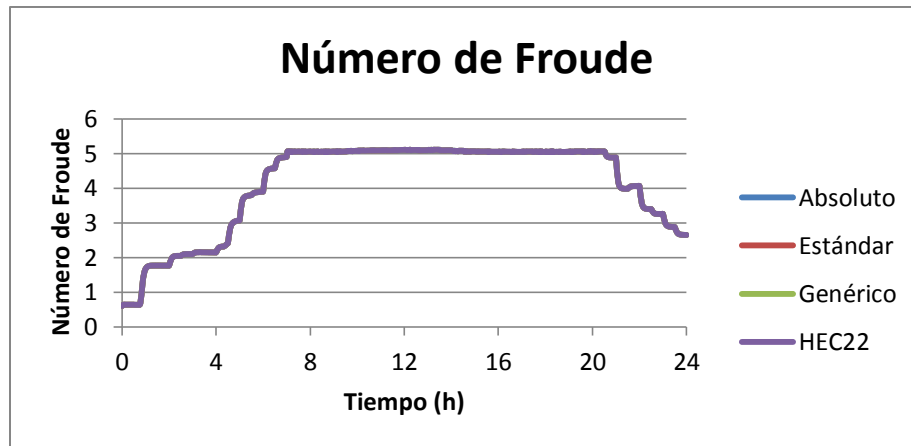
En esta cámara al igual que en el modelo original todavía no se presentan cambios significativos. Todas las características de flujo aumentaron, mas este cambio fue poco significativo. A continuación se mostrará la siguiente cámara de inspección, C80A.



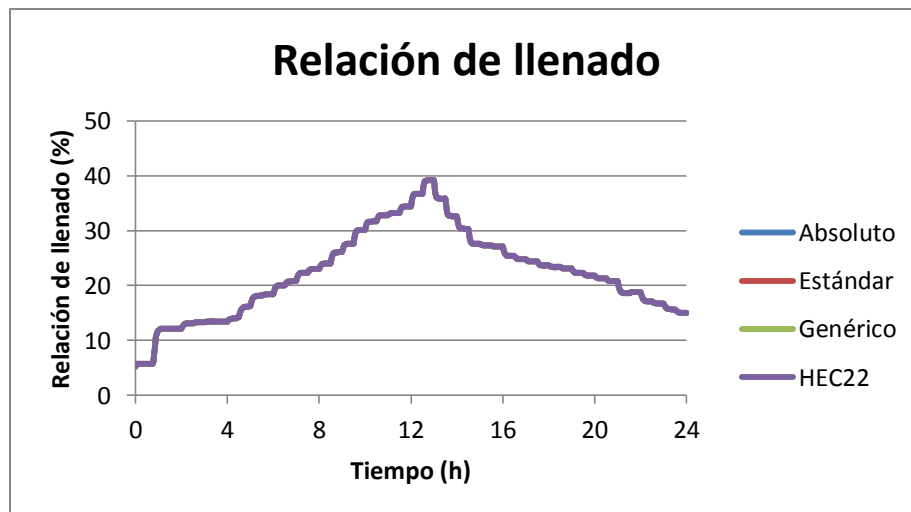
Gráfica 37 Altura en cámara C80A. Comparación de Métodos.



Gráfica 38 Velocidad en la Tubería T36. Comparación de Métodos.



Gráfica 39 Número de Froude en la Tubería T36. Comparación de Métodos.



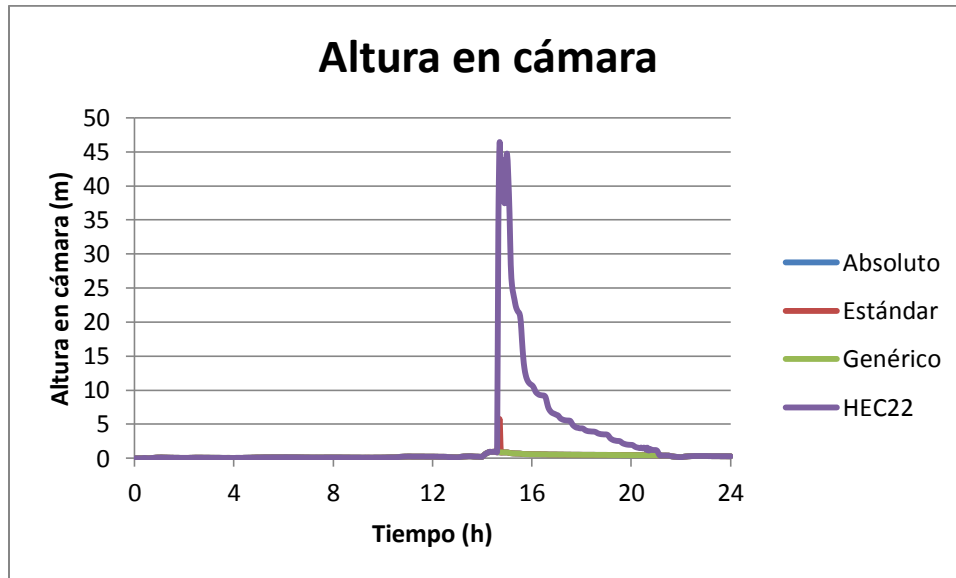
Gráfica 40 Relación de llenado en la Tubería T36. Comparación de Métodos.

Como se ha visto en las últimas dos modelaciones el mayoramiento del dos por ciento en la pendiente de la red no genera cambios significativos. Estos cambios no logran segregar de manera clara los métodos de pérdidas de energía y aparte de esto los cambios entre modelos originales y aumentados son mínimos. No obstante, en este modelo mayorado pareció existir un indicio de segregación de métodos; aun así; cuando se aumente la pendiente un porcentaje mayor se observaran diferencias más claras.

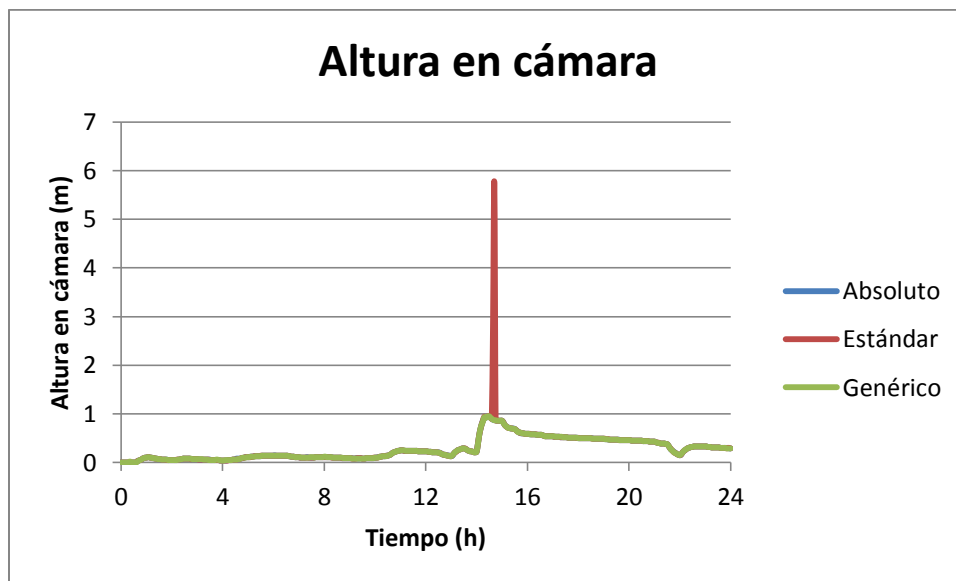
4.2.2 Modelo mayorado un dos por ciento (2%) Acacias-Girardot.

Para esta modelación se ilustrará como varía el nivel en la cámara de inspección de acuerdo con el método de pérdidas menores escogido. Para este modelo se mayorará la

pendiente en un dos por ciento tal como fue descrito en la sección de metodología. Al igual que en las secciones pasadas estarán presentes las características de flujo de la tubería aguas abajo de la cámara de inspección. A continuación se muestra el nivel en la cámara A3.11.



Gráfica 41 Altura en cámara A3.11. Comparación de Métodos.

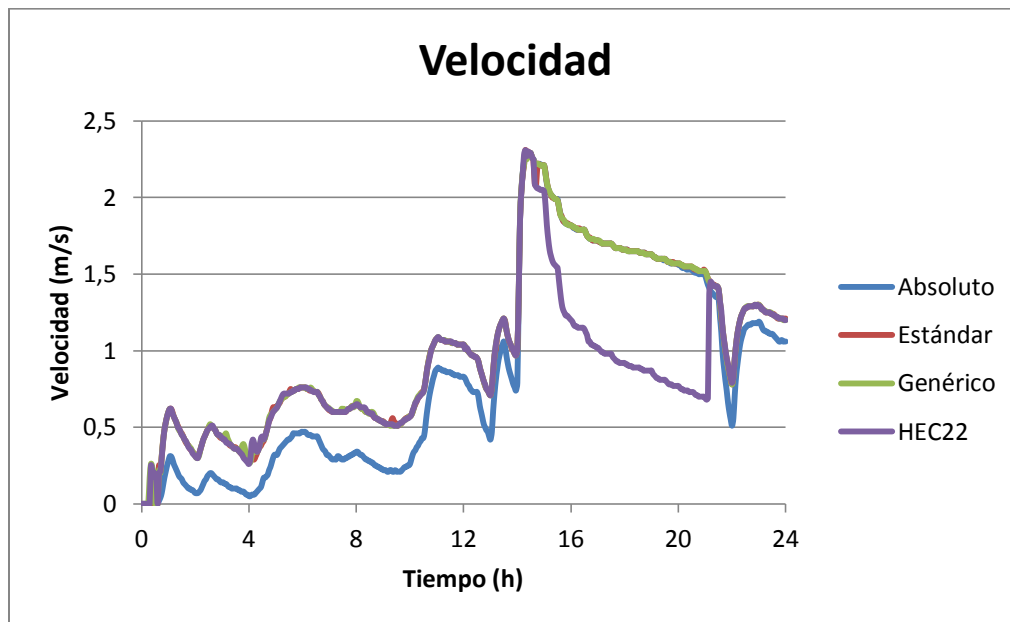


Gráfica 42 Altura en cámara A3.11. Comparación de Métodos (Detalle 1).



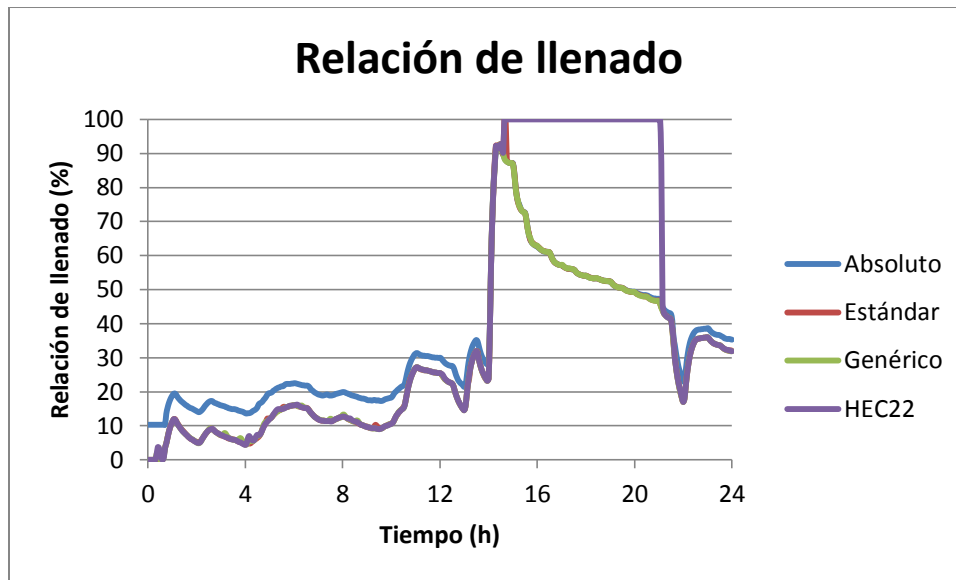
Gráfica 43 Altura en cámara A3.11. Comparación de Métodos (Detalle 2).

En esta cámara se muestra como únicamente para dos métodos se genera una sobrecarga en el sistema, Estándar y HEC22. Esto muestra claramente como estos métodos hacen perder más energía al flujo haciendo así que se generen resaltos hidráulicos que terminan finalmente en una sobrecarga a la cámara. A continuación se mostraran las características de flujo en la tubería inmediatamente aguas abajo.

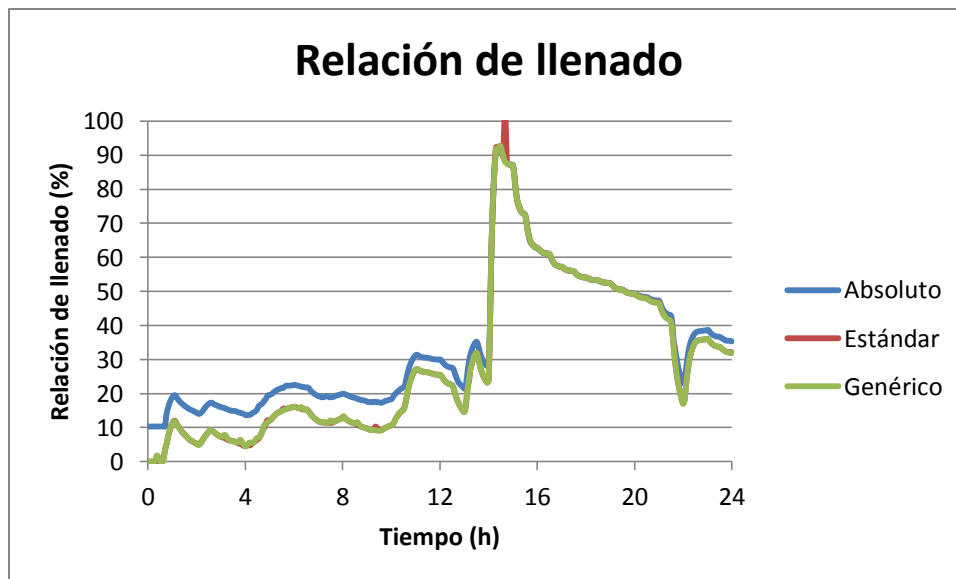


Gráfica 44 Velocidad en la Tubería T20. Comparación de Métodos.

En la gráfica anterior se logra apreciar una diferenciación de métodos, especialmente entre el método HEC22 y todos los otros métodos utilizados para obtener las pérdidas menores en la red. Esta diferenciación se verá nuevamente en las siguientes gráficas.

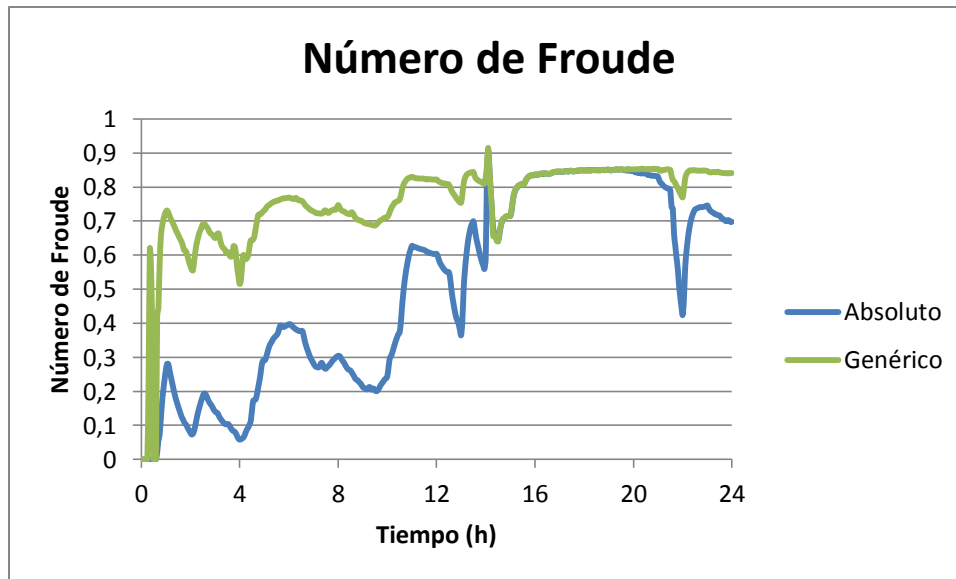


Gráfica 45 Relación de llenado en la Tubería T20. Comparación de Métodos.



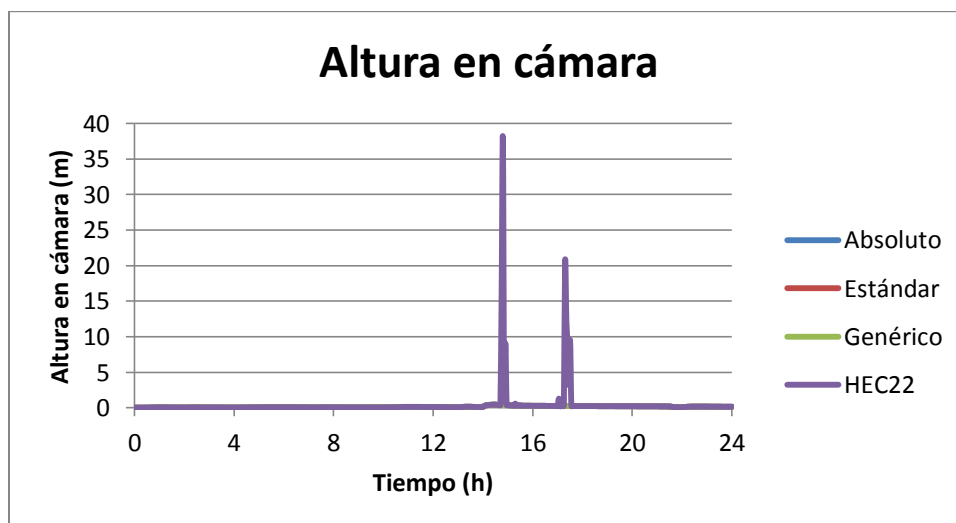
Gráfica 46 Relación de llenado en la Tubería T20. Comparación de Métodos (Detalle 1).

En estas gráficas se puede observar como el método HEC22 y método Estándar llevan a la tubería de aguas abajo a correr bajo presión, a diferencia del método Absoluto y Genérico. Con respecto al Número de Froude solo se realizará con el método Absoluto y Genérico ya que con los otros métodos la tubería en algún momento fluye bajo presión.



Gráfica 47 Número de Froude en la Tubería T20. Comparación de Métodos.

La diferencia entre estos métodos en la gráfica del Número de Froude radica en que el método Genérico tiene una mayor velocidad que el método Absoluto. Esta modelación anterior se puede diferenciar en dos grupos; el primero de estos está conformado por los métodos Absoluto y Genérico que hacen que la red de drenaje no se sobrecargue en ningún momento a diferencia del segundo grupo en el cual la red se sobrecarga. Este último grupo está conformado por el método Estándar y HEC22. A continuación se mostrarán los resultados de la cámara A13.9.

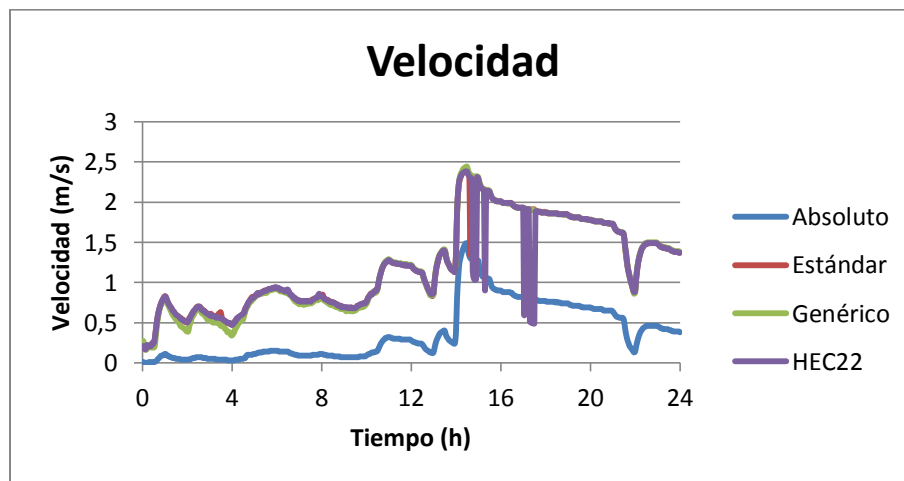


Gráfica 48 Altura en cámara A13.9. Comparación de Métodos.

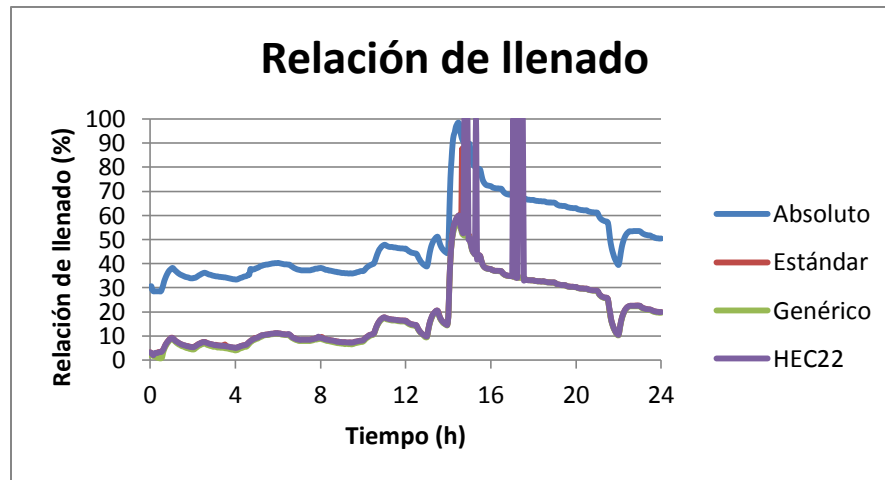


Gráfica 49 Altura en cámara A13.9. Comparación de Métodos (Detalle 1).

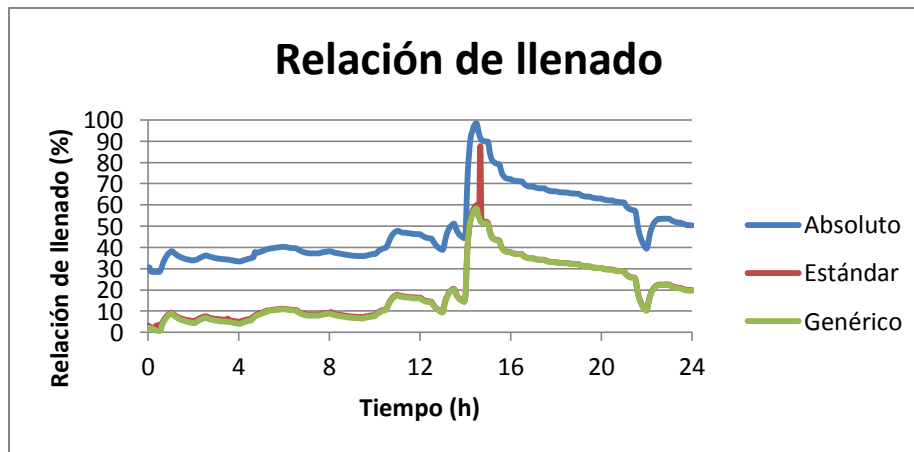
De esta modelación se logra observar como el único método en el cual se presenta sobrecarga en la cámara es el método HEC22. Al analizar estos resultados y los obtenidos anteriormente se puede afirmar que el método HEC22 es el que hace perder mayor energía al flujo. A continuación se mostrarán las propiedades de flujo de la tubería aguas abajo de la cámara.



Gráfica 50 Velocidad en la Tubería T8. Comparación de Métodos.

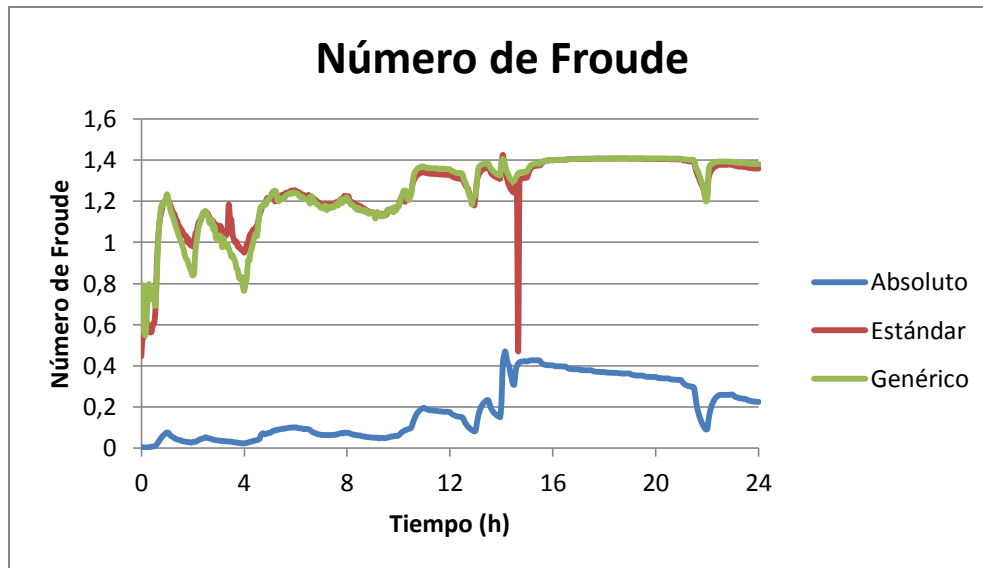


Gráfica 51 Relación de llenado en la Tubería T8. Comparación de Métodos.



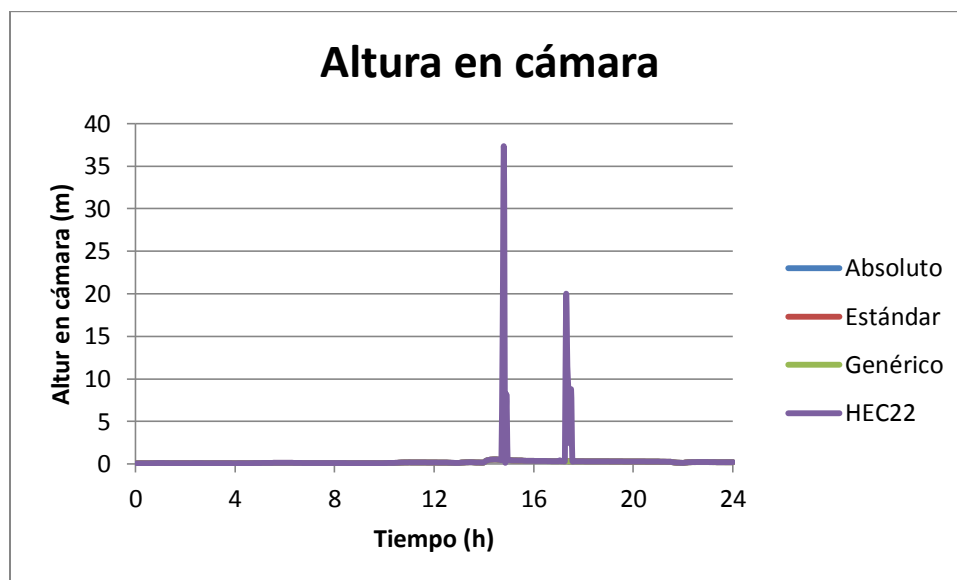
Gráfica 52 Relación de llenado en la Tubería T8. Comparación de Métodos (Detalle 1).

En estas gráficas se puede observar como el método HEC22 hace que se sobrecargue la tubería aguas abajo, a diferencia de los otros métodos utilizados. El hecho que el método Absoluto tenga un menor valor en la velocidad repercutió en que se tuviera una relación de llenado mayor que la presentada por sus métodos homólogos. Ahora bien, para el Número de Froude éste se analizará para todos los métodos excepto el HEC22 debido a que con éste la tubería fluye a presión en ciertos momentos de la modelación.



Gráfica 53 Número de Froude en la Tubería T8. Comparación de Métodos.

En la gráfica anterior se puede notar claramente el efecto que tiene la velocidad en el Número de Froude. Con respecto a los resultados obtenidos en el modelo original se puede observar que al mayorar la pendiente un dos por ciento en los métodos Genérico y Absoluto estos datos no cambian de una manera drástica; no obstante, con el método HEC22 y Estándar se observó como la red tendía a sobrecargarse. Esto es el primer indicio de diferenciación de los métodos de pérdidas menores en la red. Finalmente se mostrarán los resultados de la cámara TA9.

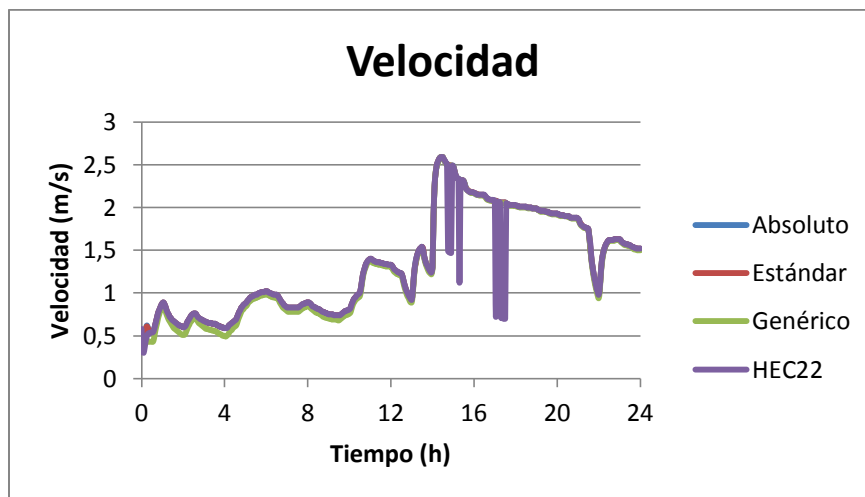


Gráfica 54 Altura en cámara TA9. Comparación de Métodos.

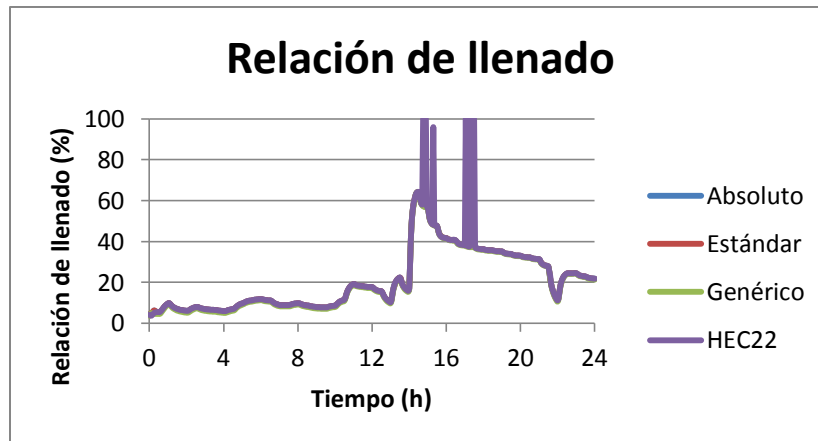


Gráfica 55 Altura en cámara TA9. Comparación de Métodos (Detalle1).

Al igual que en la modelación pasada se puede observar como el método HEC22 es el cual hace perder más energía al flujo cuando éste pasa a través de una cámara de inspección. A continuación se ilustrarán las características de flujo en la tubería aguas abajo de la cámara.



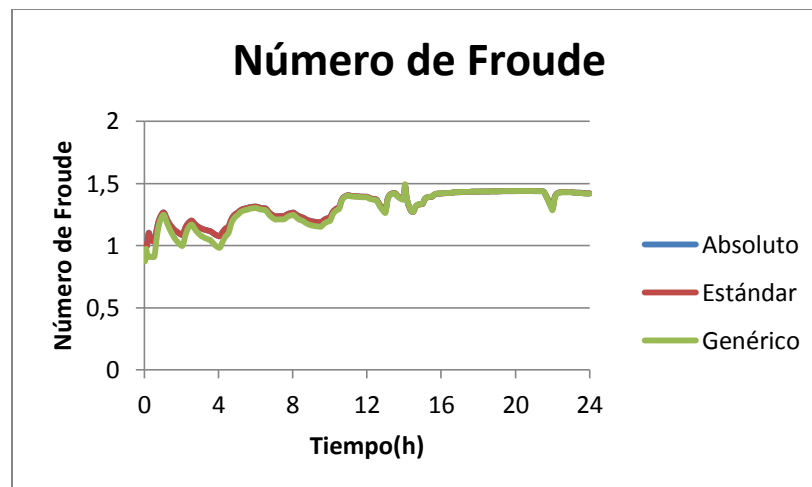
Gráfica 56 Velocidad en la Tubería T180. Comparación de Métodos.



Gráfica 57 Relación de llenado en la Tubería T180. Comparación de Métodos.



Gráfica 58 Relación de llenado en la Tubería T180. Comparación de Métodos (Detalle 1).



Gráfica 59 Número de Froude en la Tubería T180. Comparación de Métodos.

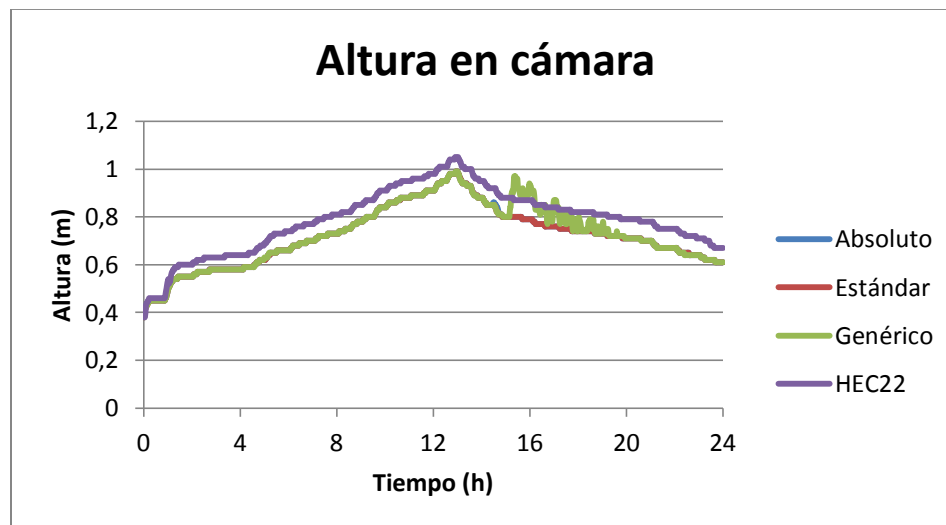
De este grupo de modelaciones se ha podido observar claramente como el método HEC22 es el que afecta más al flujo cuando este pasa a través de una cámara de inspección; el siguiente método que remueve la mayor energía al flujo es el método Estándar. Esto se pudo observar en la Cámara A3.11 específicamente en las Gráficas 41, 42 y 43. Se ha podido notar como al ir mayorando la pendiente se han comenzado a diferenciar los métodos de pérdidas de energía en cámaras de inspección.

4.3 Modelos mayorados un cinco por ciento (5%)

Para este grupo de modelaciones fueron modificadas ambas redes de drenaje urbano un cinco por ciento, tal como fue especificado en la sección de metodología. En esta sección se ilustrarán como cambian los niveles en las cámaras de inspección de acuerdo con el método de pérdidas menores escogido. De igual manera se ilustrará qué tanto cambia el modelo con respecto al modelo original presentado en la Sección 4.1. Ahora bien, con respecto a cómo varían las propiedades de flujo (velocidad, relación de llenado y número de Froude) en la tubería aguas abajo de la cámara de inspección, estos resultados se encontrarán justo debajo de la modelación del nivel de la cámara.

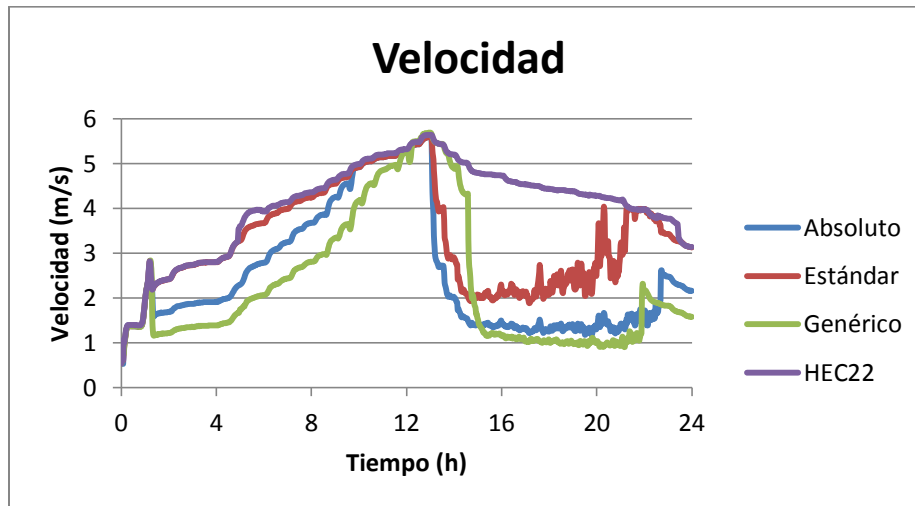
4.3.1 Modelo mayorado un cinco por ciento (5%) Prado-Medellín.

Para esta modelación se mostrará como varía el nivel en la cámara de inspección de acuerdo con el método de pérdidas menores escogido. Se espera que en las próximas modelaciones se genere una mayor diferenciación entre métodos debido a que el cambio de pendiente cada vez va a ser más considerable. Al igual que en las secciones pasadas estarán las características de flujo de la tubería inmediatamente inferior a la cámara de inspección. A continuación se observa el nivel en la cámara C159D.



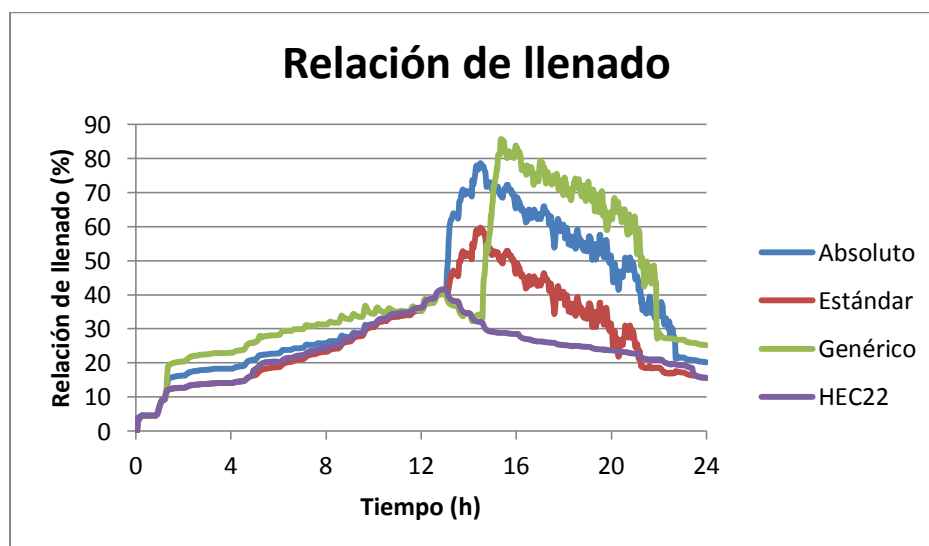
Gráfica 60 Altura en cámara C159D. Comparación de Métodos.

Se nota claramente en esta gráfica como para todo el tiempo de modelación el método HEC22 tiene una altura mayor en la cámara de inspección. Esto comprueba la afirmación hecha en la sección pasada en la cual se mencionó que el método HEC22 hace perder al flujo la mayor cantidad de energía. A continuación se mostrarán los resultados de la tubería aguas abajo.

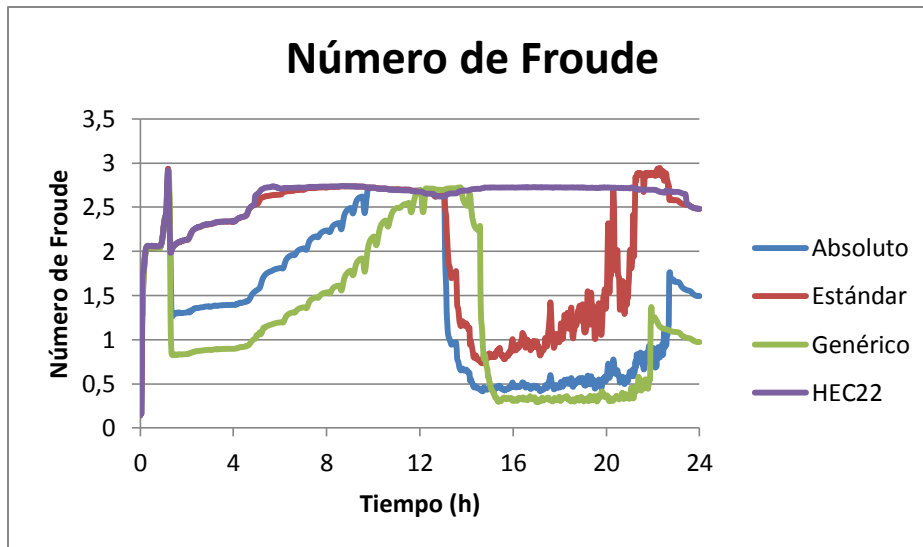


Gráfica 61 Velocidad en la Tubería TA16. Comparación de Métodos.

En esta gráfica se nota una segregación clara de cómo afecta el método escogido de pérdidas menores a las tuberías inmediatamente aguas abajo de estas. Se logra ver cómo el método HEC 22 hace que el flujo tenga la mayor velocidad seguido por el método Estándar después por el método Absoluto y terminando finalmente con el método Genérico.

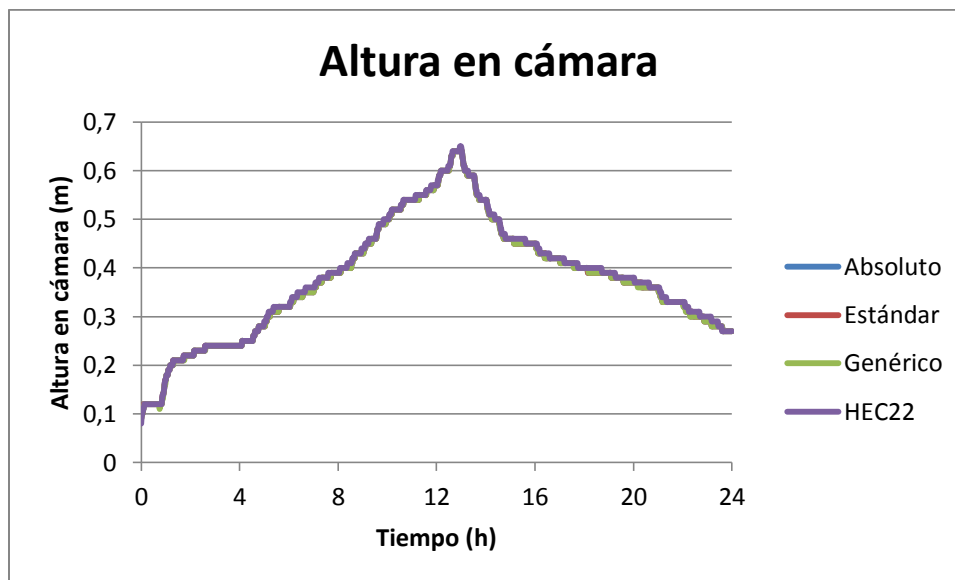


Gráfica 62 Relación de llenado en la Tubería TA16. Comparación de Métodos.



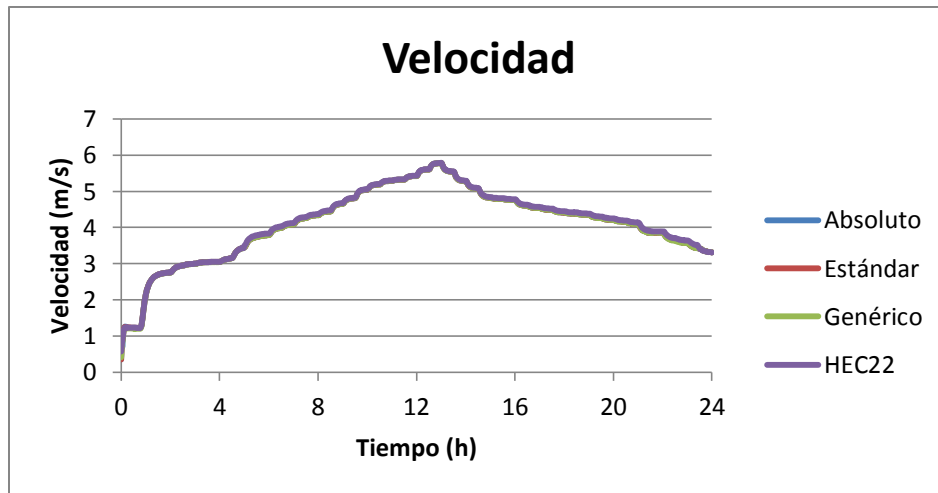
Gráfica 63 Número de Froude en la Tubería TA16. Comparación de Métodos.

En estas gráficas se logra observar cómo el flujo en todos los métodos excepto el HEC 22 sufre un resalto hidráulico, entre la hora 12 de la modelación y la hora 16, al ocurrir esto la velocidad del flujo disminuye drásticamente, la relación de llenado aumenta y el Número de Froude disminuye. A continuación se mostraran los resultados de la cámara C93B.

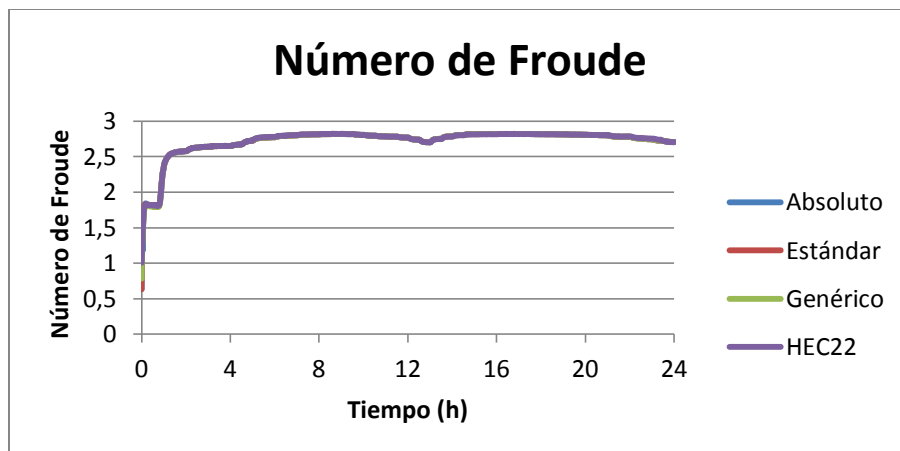


Gráfica 64 Altura en cámara C93B. Comparación de Métodos.

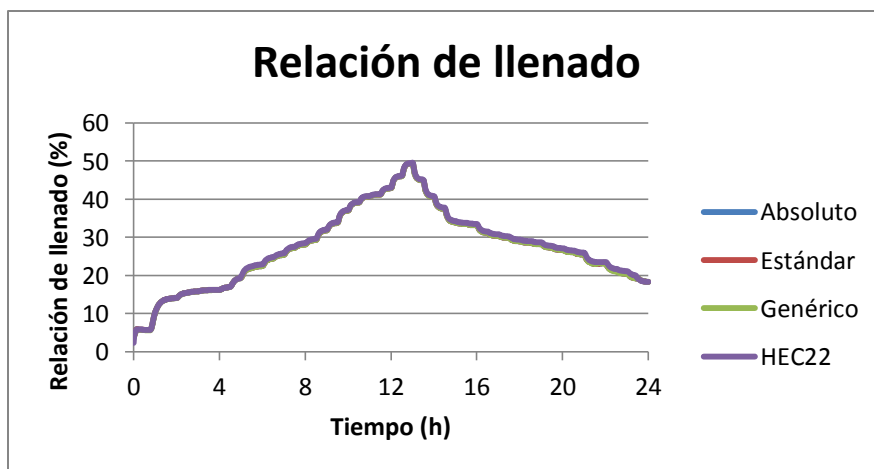
En la cámara se nota como todavía no se presenta diferenciación alguna entre métodos. A continuación se mostrarán los resultados obtenidos de las características de flujo de la tubería aguas abajo.



Gráfica 65 Velocidad en la Tubería TA5. Comparación de Métodos.

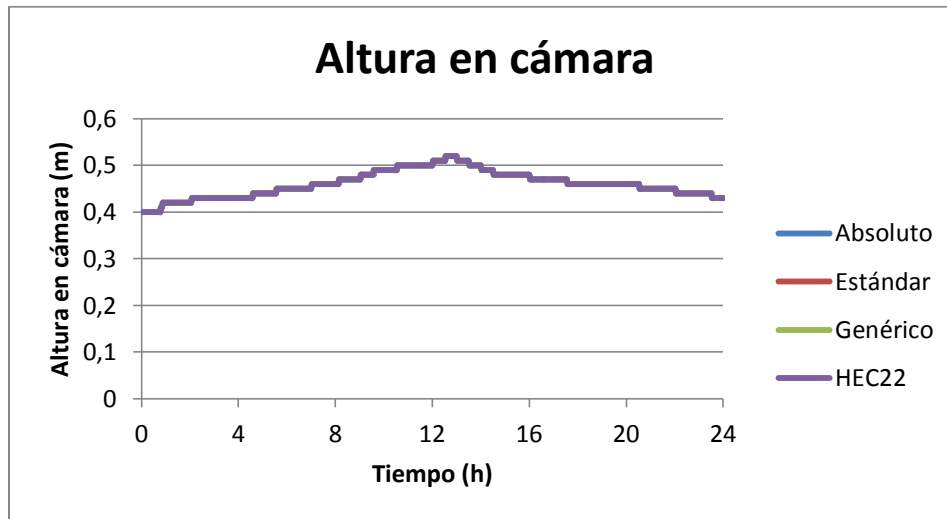


Gráfica 66 Número de Froude en la Tubería TA5. Comparación de Métodos.



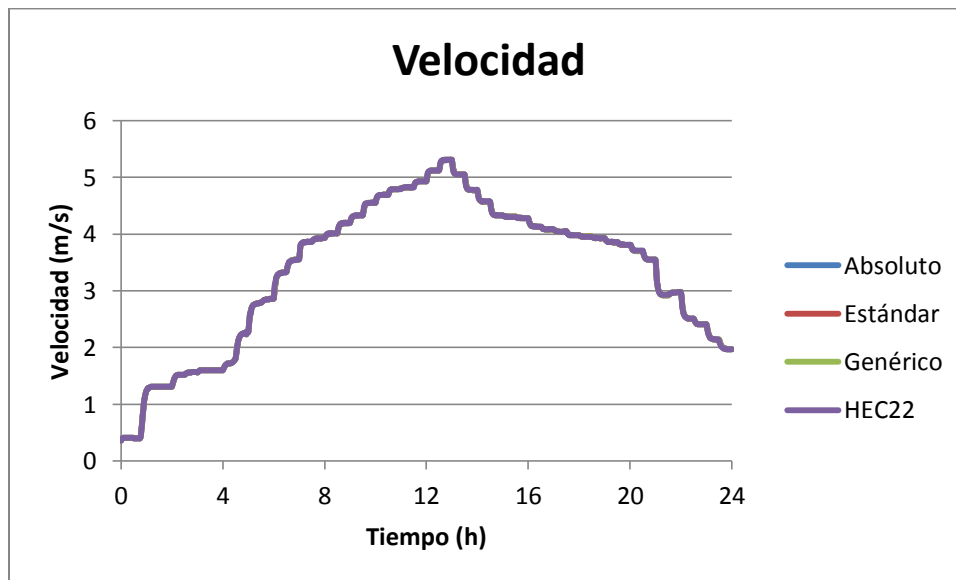
Gráfica 67 Relación de llenado en la Tubería TA5. Comparación de Métodos.

Al igual que el nivel en la cámara de inspección las características de flujo todavía no se ven perturbadas por el método escogido de pérdidas menores. No obstante, como se ha notado en las modelaciones anteriores, al mayorar la pendiente los métodos comienzan a diferenciarse de una manera más diciente. A continuación se muestran los resultados de la cámara de inspección C80A.

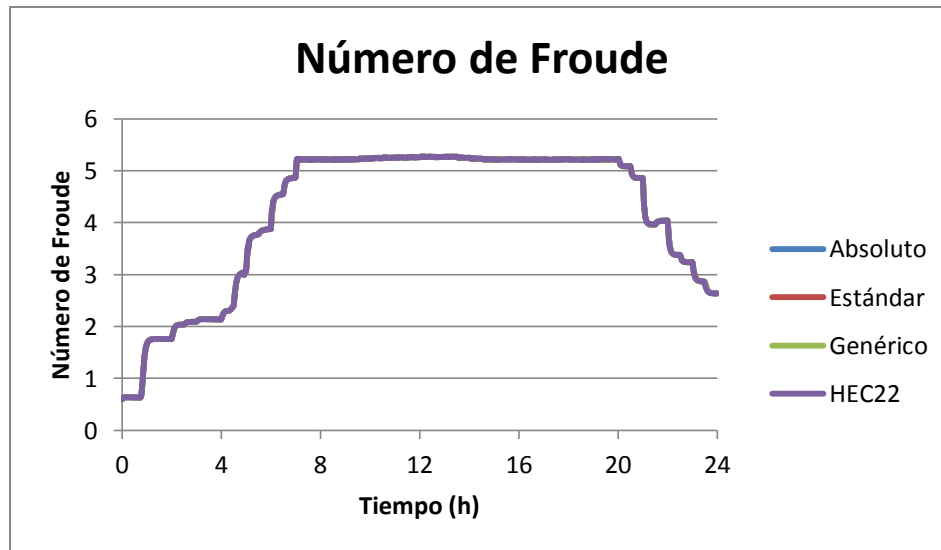


Gráfica 68 Altura en cámara C80A. Comparación de Métodos.

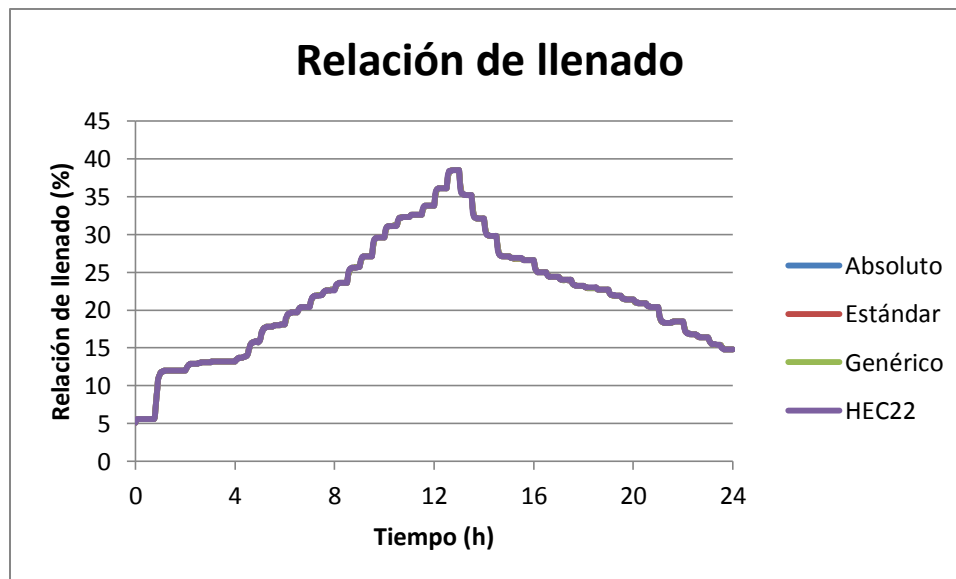
En la cámara de inspección anteriormente analizada ésta no presenta diferenciación alguna entre los métodos escogidos de pérdidas menores. El nivel en la cámara con respecto a la modelación mayorada un dos por ciento dobló su valor. A continuación se mostrarán los resultados de la tubería inmediatamente aguas abajo de la cámara: T36.



Gráfica 69 Velocidad en la Tubería T36. Comparación de Métodos.



Gráfica 70 Número de Froude en la Tubería T36. Comparación de Métodos.



Gráfica 71 Relación de llenado en la Tubería T36. Comparación de Métodos.

No se presentó diferencia alguna entre métodos de pérdidas de energía en cámaras de inspección. Más aun así se pudo ver en la primera cámara analizada, Gráficas 60, 61,62 y 63 una diferenciación de métodos. Ya se ha podido observar cómo el método HEC 22 afecta más al flujo cuando éste pasa a través de una cámara de inspección seleccionada. El siguiente método que remueve la mayor energía al flujo es el método Estándar; esto se puede afirmar debido a los resultados obtenidos en la mayoración del dos por ciento en la red de Acacias-Girardot. Aun así esto todavía es una hipótesis que se comprobará o rechazará cuando se mayoré más la pendiente. A continuación se ilustrarán los resultados de la otra red de drenaje analizada: Acacias-Girardot.

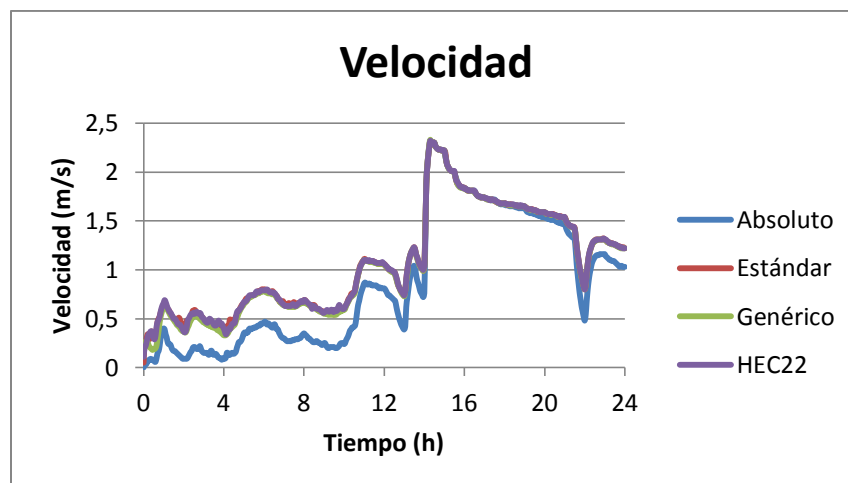
4.3.1 Modelo mayorado un cinco por ciento (5%) Acacias-Girardot.

Para esta modelación se mostrará como varía el nivel en la cámara de inspección de acuerdo con el método de pérdidas menores escogido. Al igual que en las secciones pasadas estarán las características de flujo de la tubería inmediatamente inferior a la cámara de inspección. Se espera poder confirmar la hipótesis que el método Estándar es el segundo método en afectar más el flujo al pasar a través de una cámara de inspección. A continuación se mostrarán los resultados de la cámara A3.11 y de su tubería aguas abajo, T20.

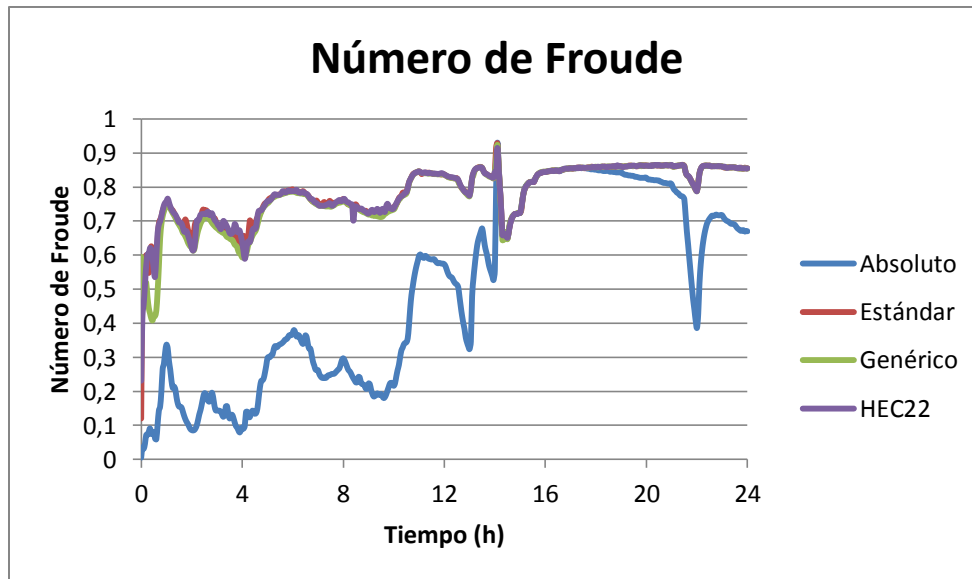


Gráfica 72 Altura en cámara A3.11. Comparación de Métodos.

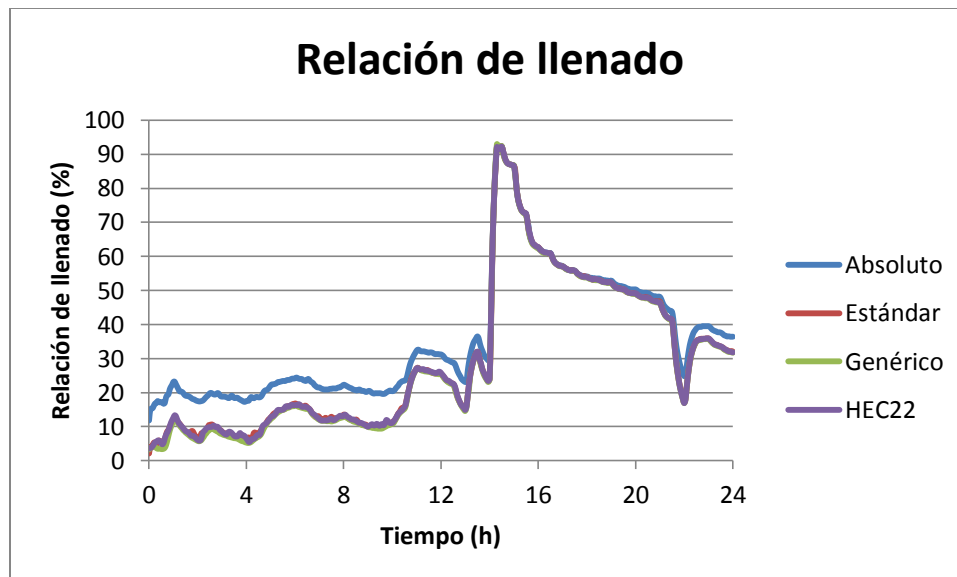
Esta cámara no presenta diferenciación alguna de los métodos utilizados al aumentar la pendiente un cinco por ciento. A continuación se mostrarán los resultados de la tubería aguas abajo de la cámara analizada.



Gráfica 73 Velocidad en la Tubería T20. Comparación de Métodos.

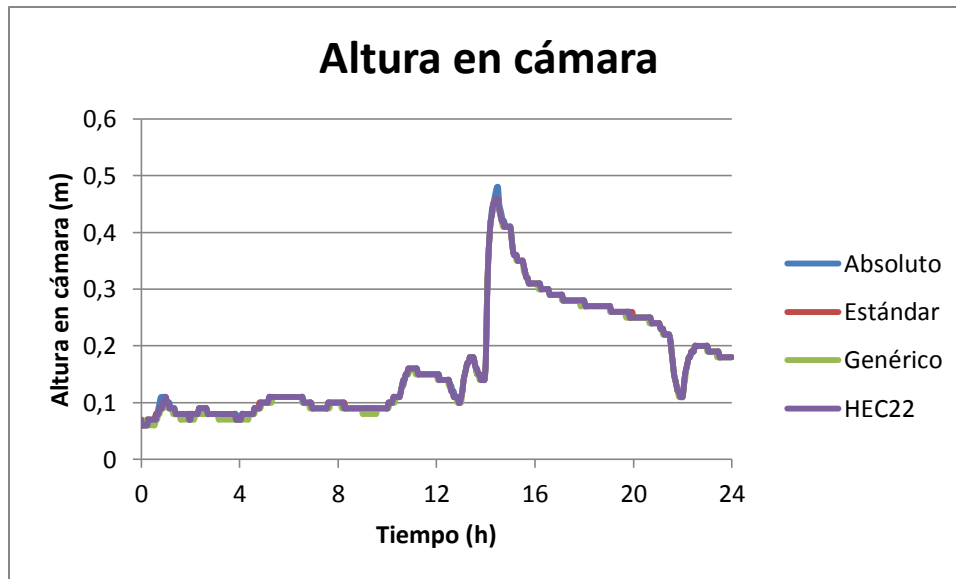


Gráfica 74 Número de Froude en la Tubería T20. Comparación de Métodos.



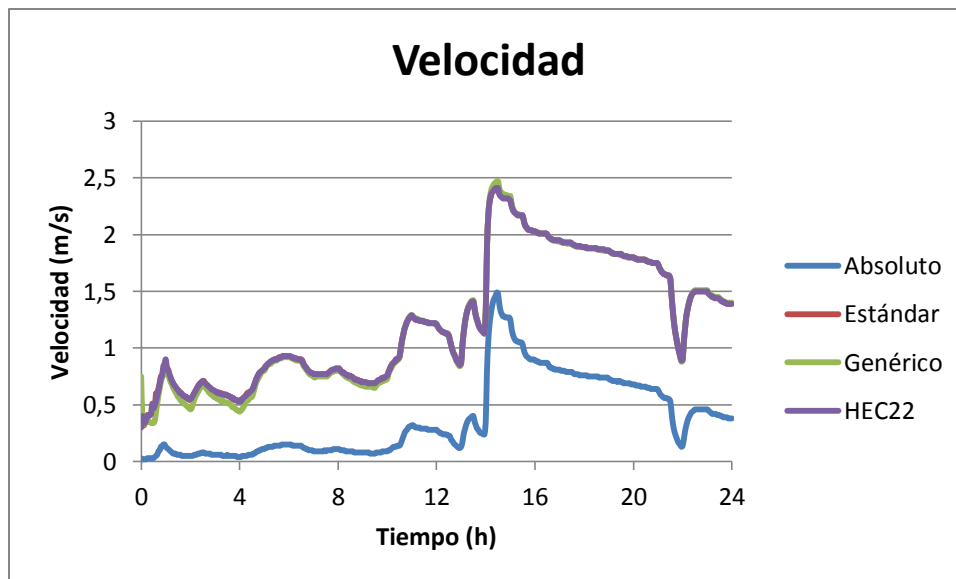
Gráfica 75 Relación de llenado en la Tubería T20. Comparación de Métodos.

Las gráficas anteriores muestran cómo el flujo sufre un resalto hidráulico cuando llega a un Número de Froude cercano a 0.9. De la misma manera se observa como el método Absoluto al tener una relación de llenado mayor, su velocidad es menor al igual que su Número de Froude. Se mostrará a continuación los resultados de la cámara de inspección A13.9.



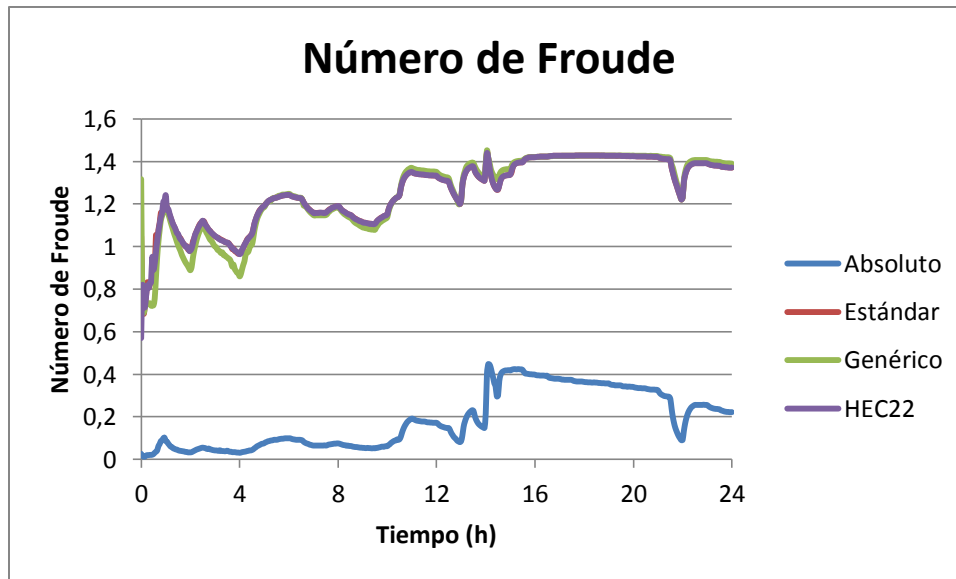
Gráfica 76 Altura en cámara A13.9. Comparación de Métodos.

En esta cámara se observa como no se presenta todavía una diferenciación clara entre métodos de pérdidas menores. Se presentan a continuación los resultados de la tubería aguas abajo de esta cámara.

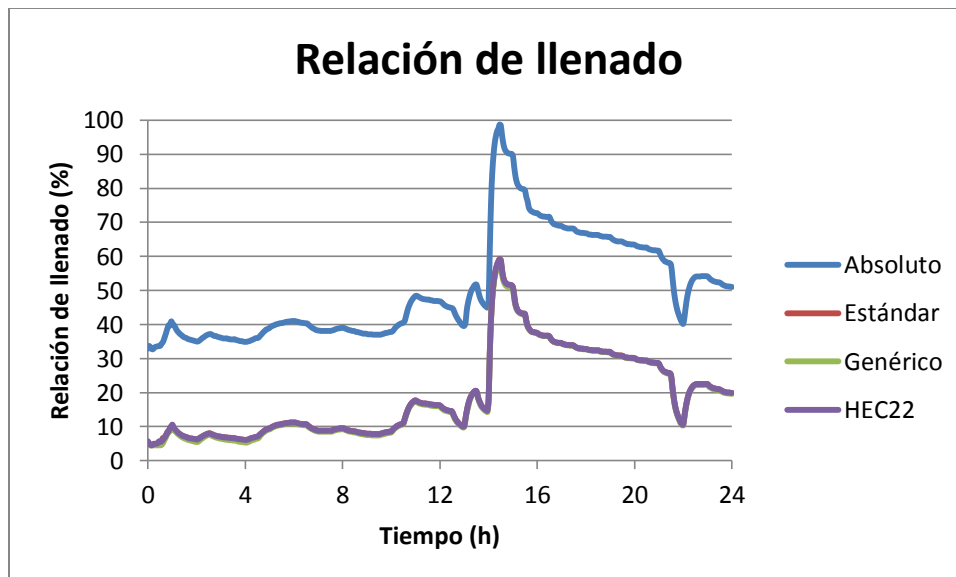


Gráfica 77 Velocidad en la Tubería T8. Comparación de Métodos.

En esta gráfica se logra observar la clara incidencia que tiene el método de pérdidas menores escogido en la velocidad de la tubería aguas abajo. A continuación se mostrarán los efectos que esto tiene en las otras propiedades de flujo: Número de Froude y Relación de Llenado.

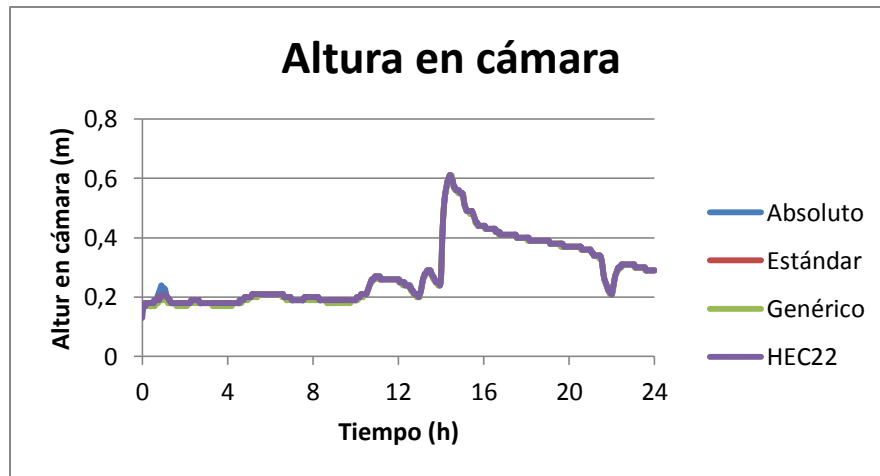


Gráfica 78 Número de Froude en la Tubería T8. Comparación de Métodos.

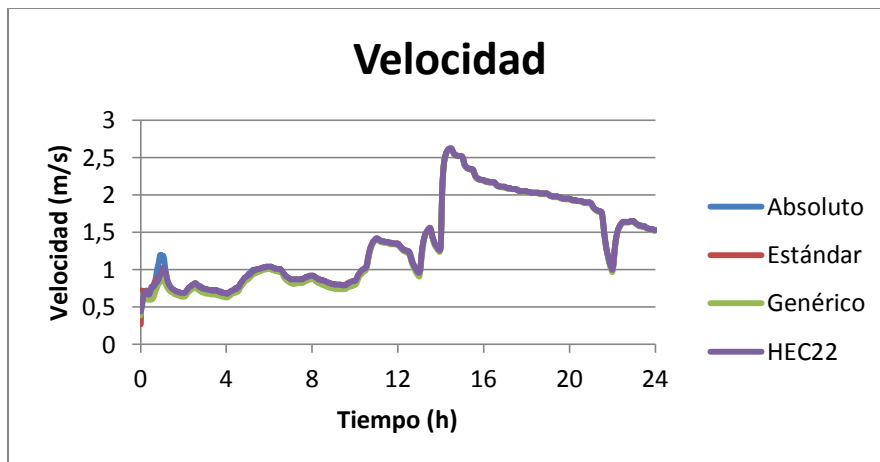


Gráfica 79 Relación de llenado en la Tubería T8. Comparación de Métodos.

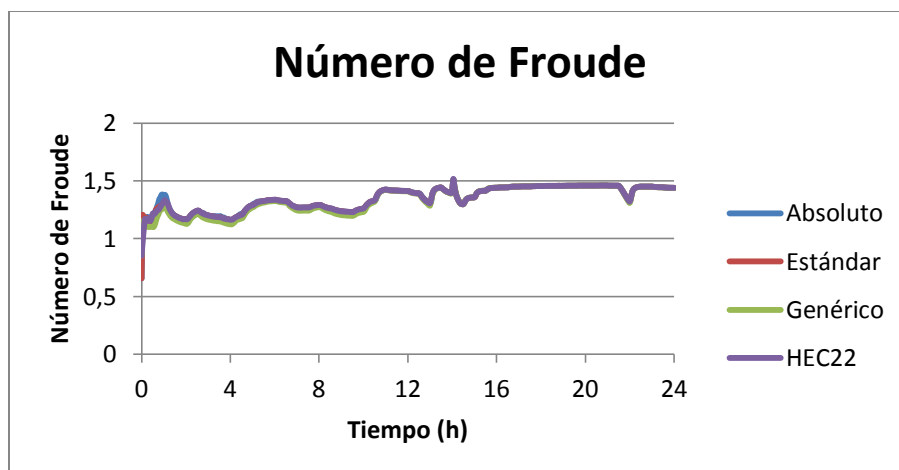
Como se ha podido observar en las modelaciones anteriores, a pesar de que no se tenga una diferenciación en los métodos de pérdidas menores con respecto al nivel de la cámara si se ha llegado a tener una separación clara en las características del flujo. El método Absoluto siempre tiene una velocidad menor con respecto a sus otros métodos homólogos. Se enseñarán a continuación lo resultados de la última cámara de inspección: TA9.



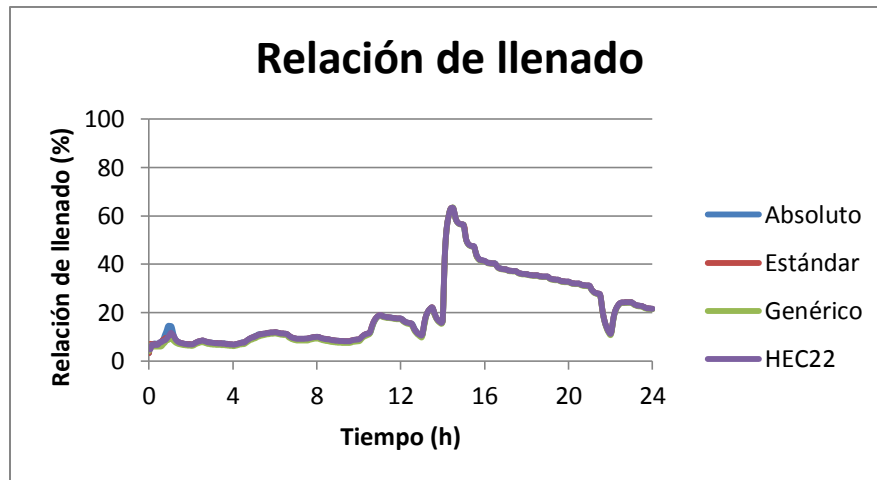
Gráfica 80 Altura en cámara TA9. Comparación de Métodos.



Gráfica 81 Velocidad en la Tubería T180. Comparación de Métodos.



Gráfica 82 Número de Froude en la Tubería T180. Comparación de Métodos.

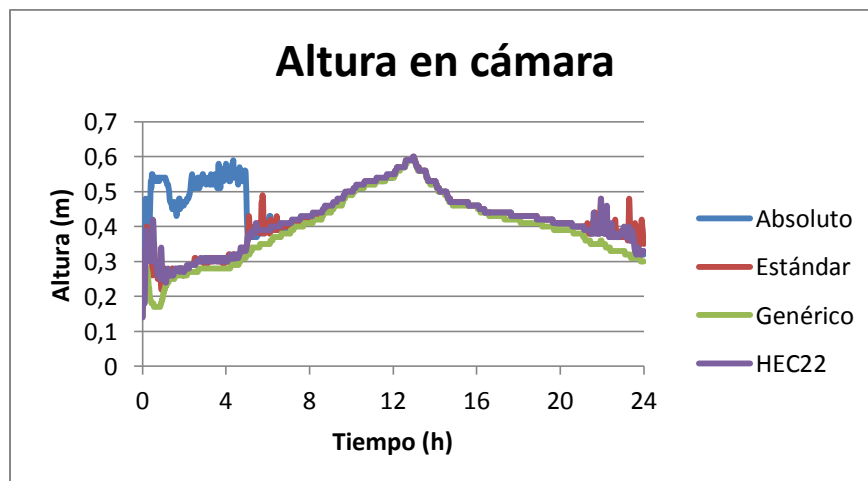


Gráfica 83 Relación de llenado en la Tubería T180. Comparación de Métodos.

En esta última cámara se observa como al mayorar la pendiente no genera ninguna diferenciación entre métodos a diferencia de lo que sucedía cuando se mayoraba la pendiente un dos por ciento. La razón por la cual sucedió esto es que al mayorar la pendiente un cinco por ciento el nivel en la cámara aumentaba, no más de siete centímetros, generando así que el Número de Froude se alejara del flujo crítico, $Fr=1$, y así evitar que se produjeran resaltos hidráulicos que lograrán segregar los métodos de pérdidas menores.

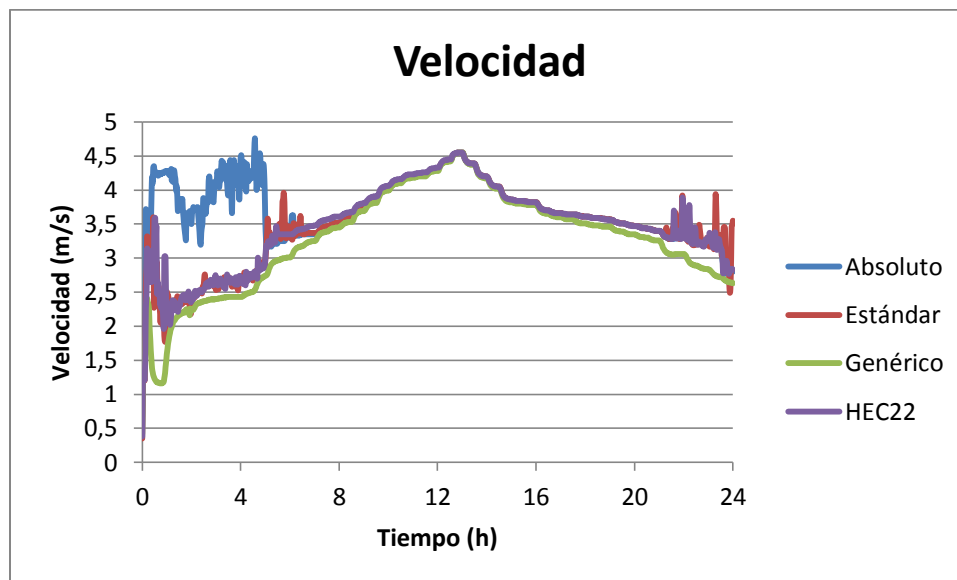
4.4.1 Modelo mayorado un diez por ciento (10%) Prado-Medellín.

Para estas modelaciones lo que se realizará es mayorar el diez por ciento las pendientes del modelo original, tal como fue descrito en la sección de metodología. En estos resultados se verá una diferenciación mayor entre métodos debido a que cada vez se va mayorando más la pendiente.

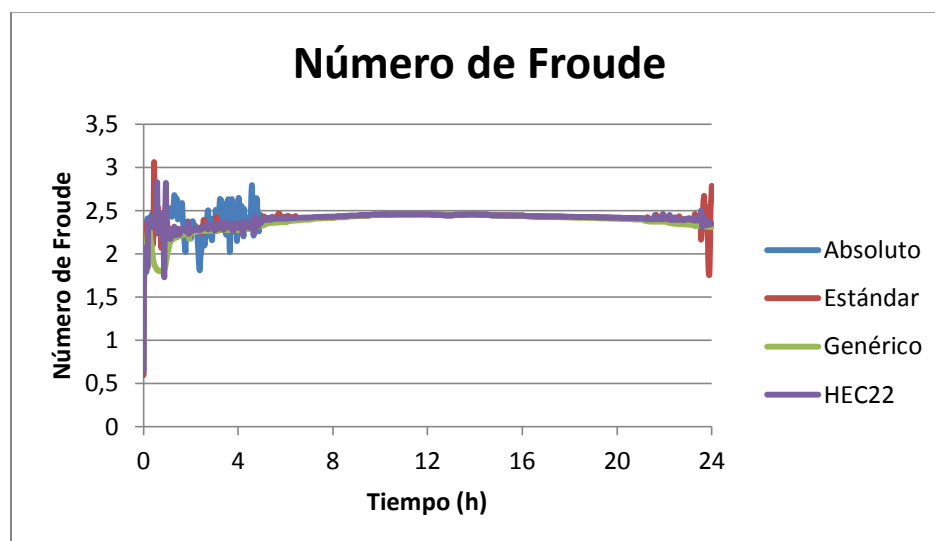


Gráfica 84 Altura en cámara C159D. Comparación de Métodos.

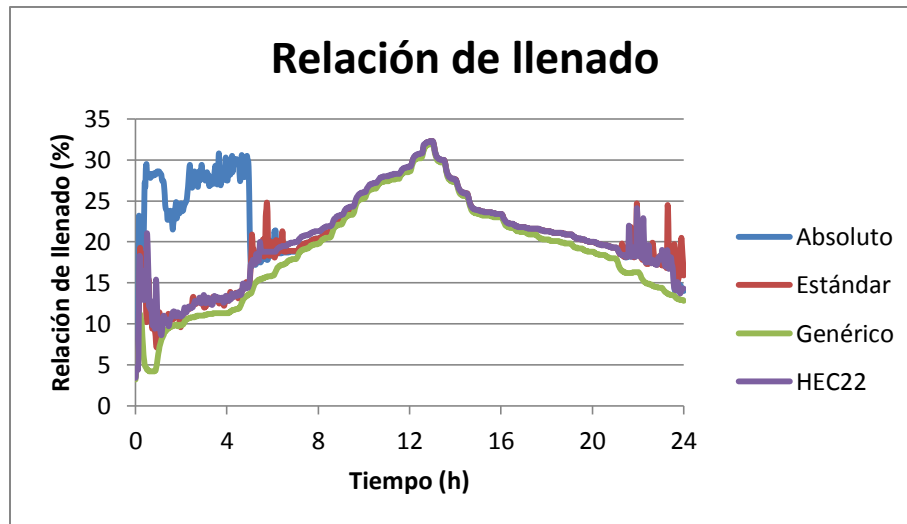
En esta gráfica se logra observar como todos los métodos siguen el mismo parámetro, mas aun así las primeras y últimas cuatro horas de modelación muestran una diferenciación no clara entre estos métodos. Al comienzo de la modelación el método Absoluto genera un mayor nivel en la cámara de inspección mas al final de esta no se muestra claramente cual de los siguientes métodos tiene una altura mayor, método HEC22 y método Estándar. Con respecto a la modelación mayorada un cinco por ciento se observa como ésta tiene un nivel considerablemente menor, 40 centímetros menor en el pico. A continuación se mostrarán los resultados de la tubería aguas abajo de la cámara.



Gráfica 85 Velocidad en la Tubería TA16. Comparación de Métodos.

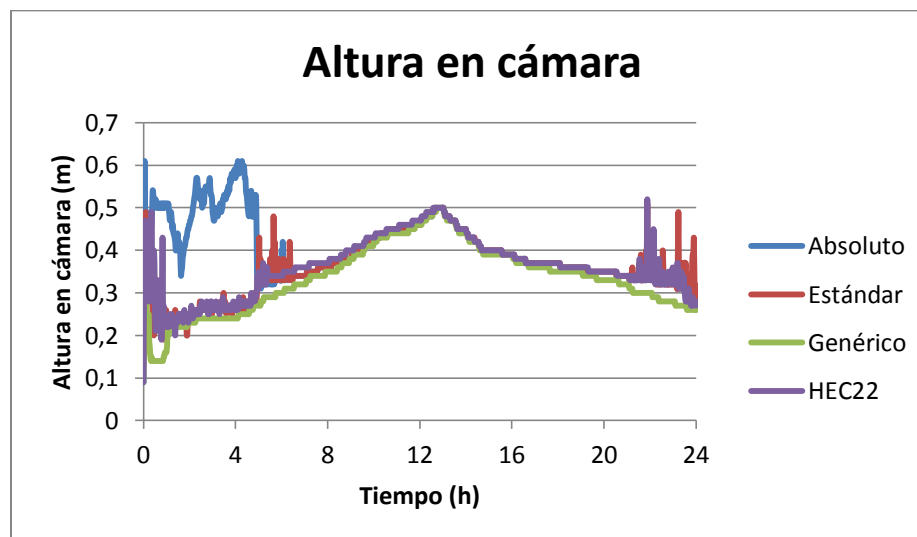


Gráfica 86 Número de Froude en la Tubería TA16. Comparación de Métodos.



Gráfica 87 Relación de llenado en la Tubería TA16. Comparación de Métodos.

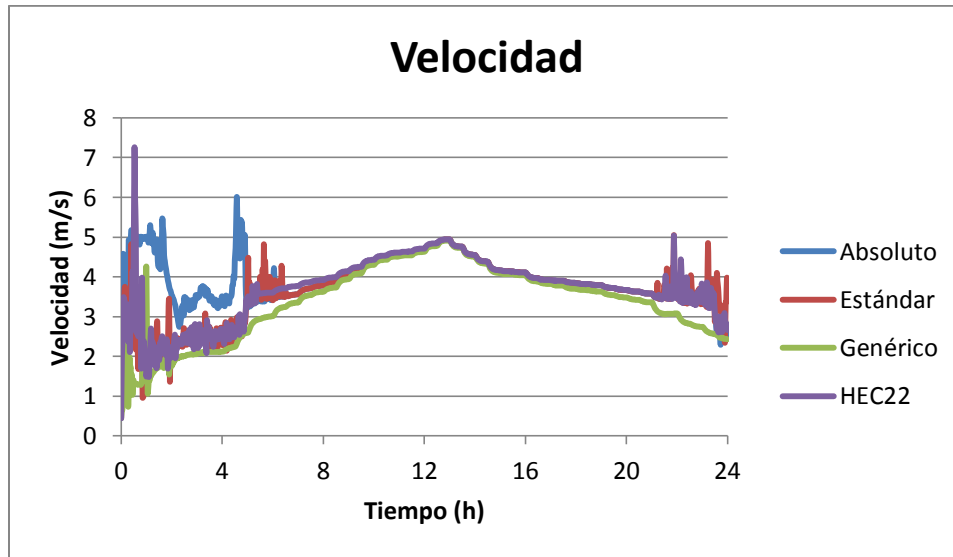
A través de las últimas tres gráficas se logra observar como todos los métodos se comportan de la misma manera exceptuando el principio y final de las modelaciones. En comparación a las modelaciones mayoradas un cinco por ciento en éstas se tiene un flujo súper-crítico a través de toda la modelación y no se genera nunca un resalto hidráulico, motivo por el cual la relación de llenado máxima es del 32%. En las siguientes gráficas se ilustrará la cámara de inspección C93B.



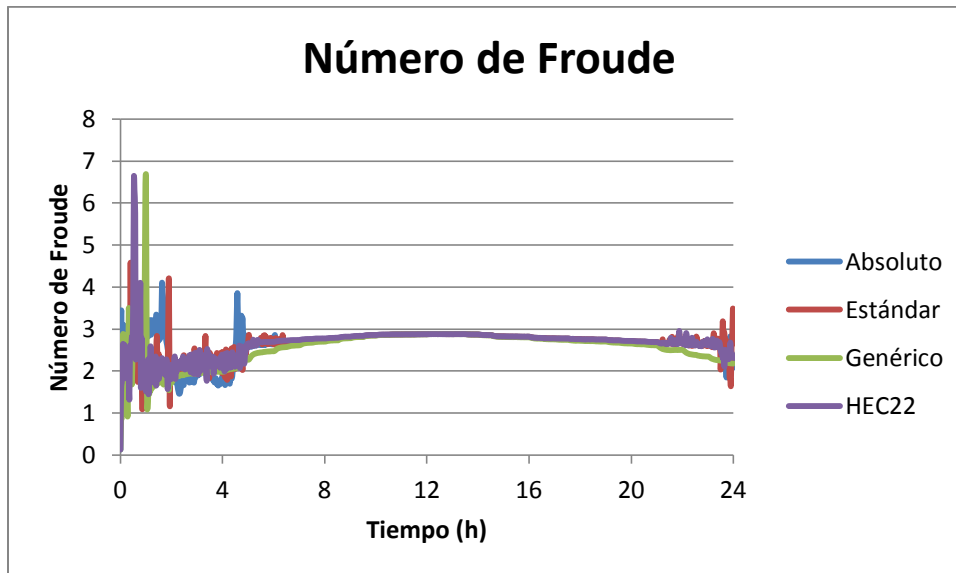
Gráfica 88 Altura en cámara C93B. Comparación de Métodos.

En la gráfica anterior se logra observar como los métodos de pérdidas menores siguen el mismo comportamiento cuando llegan a cierto tiempo en específico, cercano a las 8 horas; antes de este tiempo lo que se tiene es lo observado en modelaciones pasadas en las cuales el método Absoluto genera un mayor nivel en la cámara analizada, pero aun

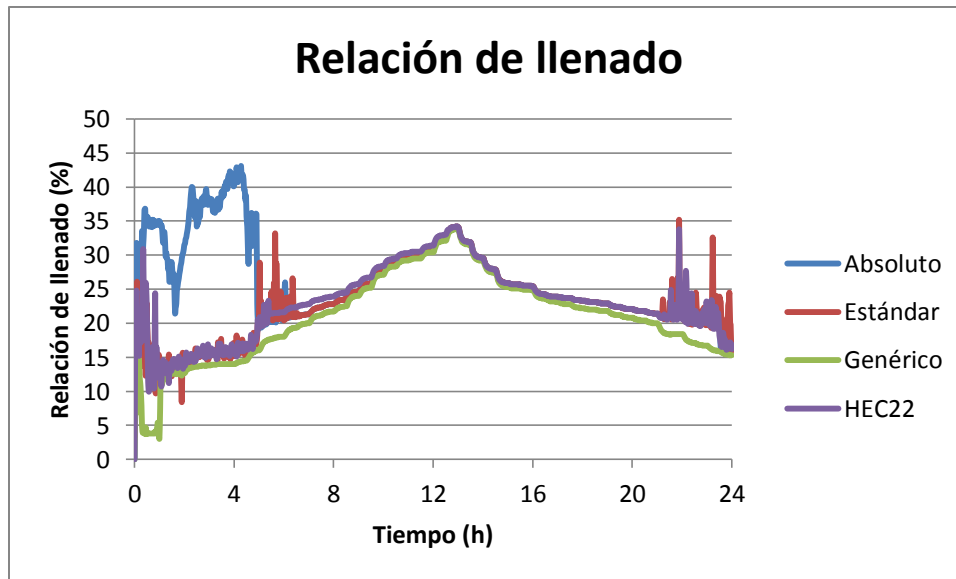
así éste nunca genera una sobrecarga en la red. En comparación a la modelación mayorada un 5% la modelación actual logra mostrar una diferencia entre métodos de pérdidas menores, Gráfica 64. A continuación se mostrarán las características del flujo en la tubería aguas abajo.



Gráfica 89 Velocidad en la Tubería TA5. Comparación de Métodos.



Gráfica 90 Número de Froude en la Tubería TA5. Comparación de Métodos.



Gráfica 91 Relación de llenado en la Tubería TA5. Comparación de Métodos.

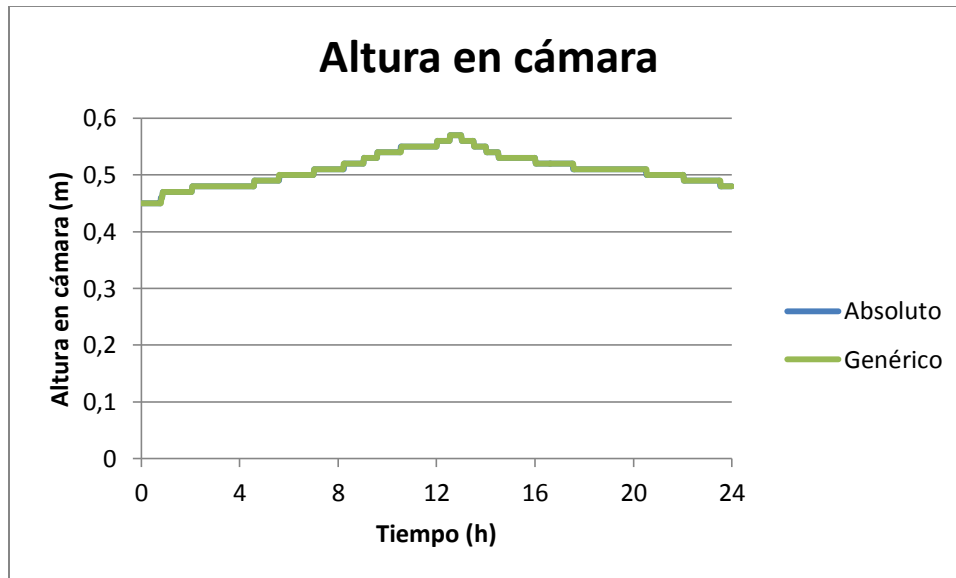
Se observa cómo el sistema se comporta de la misma manera entre la octava y vigésima hora de la modelación. Se nota a la vez cómo en el intervalo de tiempo entre que comienza y la hora octava de la modelación el método Absoluto tiene una mayor relación de llenado y mayor velocidad. Esto debido a que se tiene un mayor nivel en la cámara de inspección aguas arriba. En comparación al modelo mayorado un 5% en éste si se logra ver diferencias entre métodos de pérdidas menores, Gráficas 65,66 ,67. Finalmente se mostrarán los resultados de la última cámara de inspección, C80A.



Gráfica 92 Altura en cámara C80A. Comparación de Métodos.

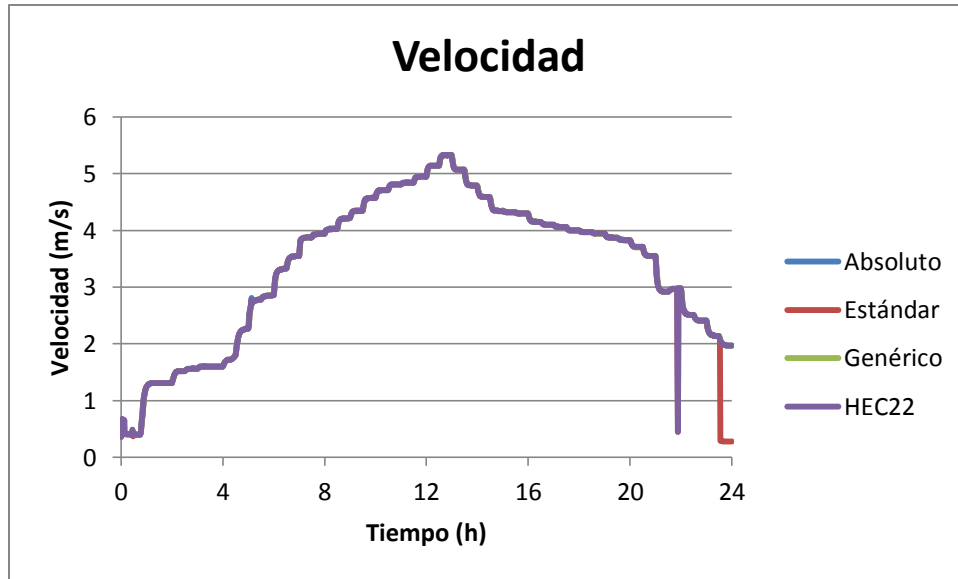


Gráfica 93 Altura en cámara C80A. Comparación de Métodos (Detalle 1).



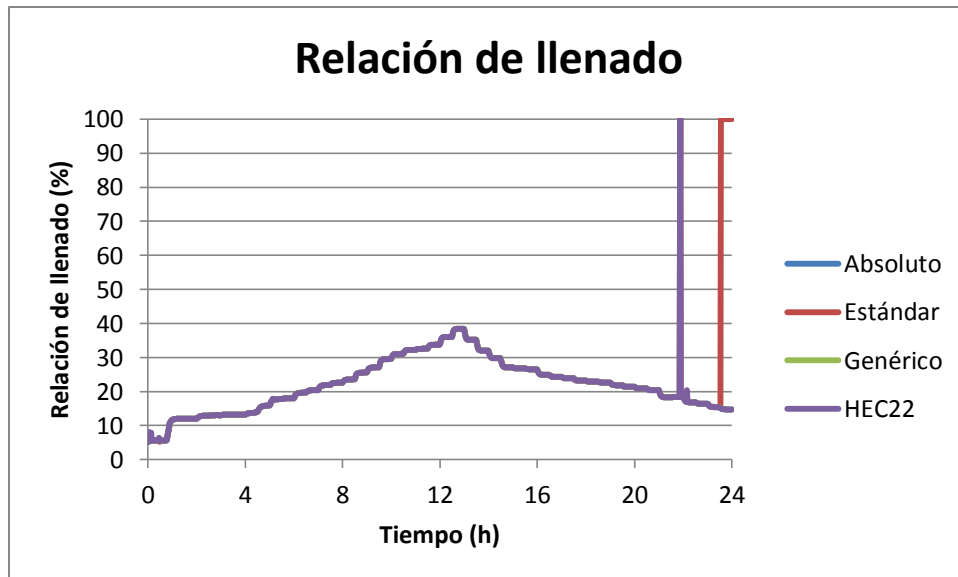
Gráfica 94 Altura en cámara C80A. Comparación de Métodos (Detalle 2).

En estas tres gráficas anteriores se logra observar como los métodos HEC22 y Estándar hacen que la red presente un tipo de sobrecarga, a diferencia de los métodos Absoluto y Genérico en los cuales el nivel máximo al cual llega la cámara es 0,57 metros. A continuación se ilustrarán las características del flujo en la tubería aguas abajo de la cámara.

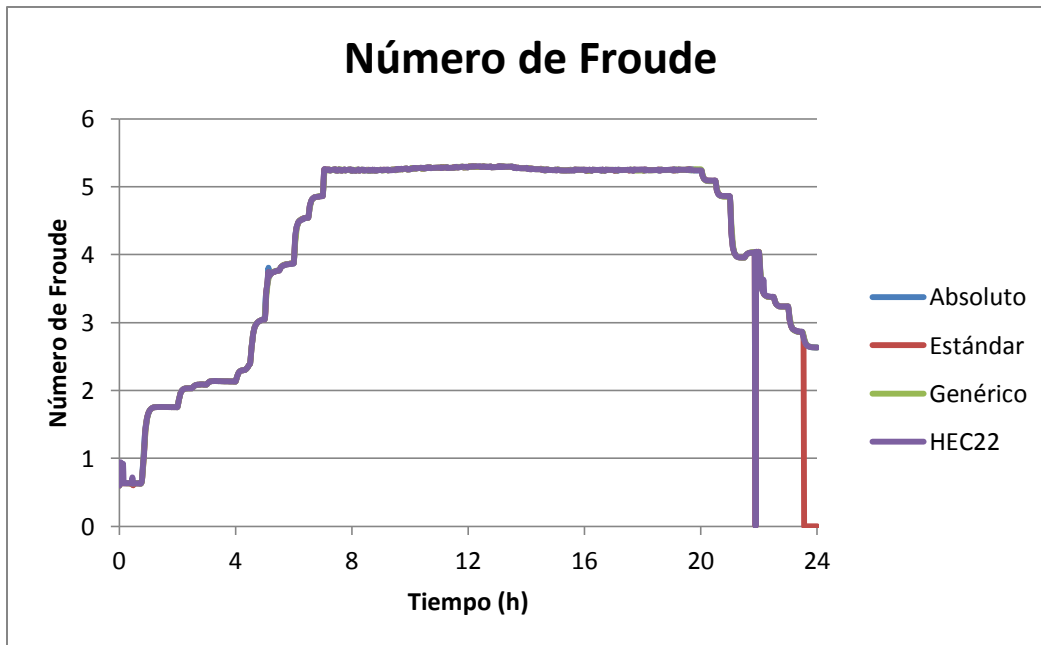


Gráfica 95 Velocidad en la Tubería T36. Comparación de Métodos.

Esta gráfica muestra cómo se tienen cambios de velocidad en los métodos HEC 22 y Estándar. Ésta caída súbita de velocidad es traducida en la sobrecarga del sistema de drenaje cuando se modela con estos métodos.



Gráfica 96 Relación de llenado en la Tubería T36. Comparación de Métodos.

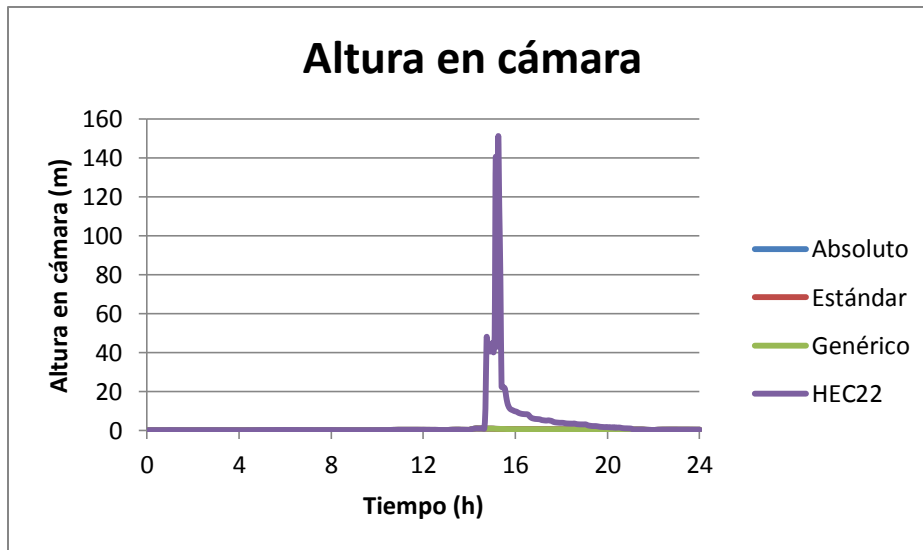


Gráfica 97 Número de Froude en la Tubería T36. Comparación de Métodos.

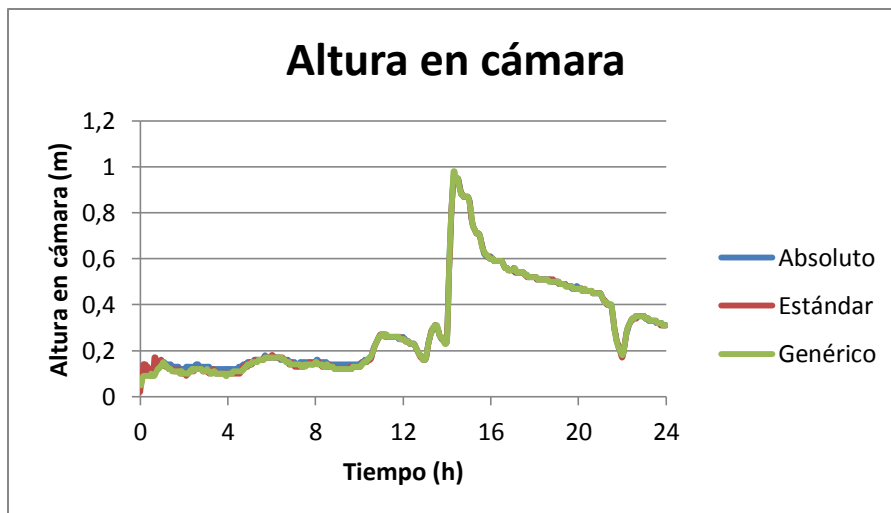
Se puede observar, como para todas las modelaciones hechas en esta sección, el hecho que se generen sobrecargas en la red cuando se utilizan específicamente dos de sus métodos de pérdidas menores generan diferenciaciones claras entre los métodos. Estos dos métodos mencionados anteriormente son el HEC22 y Estándar. Esta afirmación se puede observar en las Gráficas 92 y 93, en las cuales se ve como los métodos nombrados anteriormente sobreestiman las pérdidas menores en el flujo y hacen que se sobrecargue el sistema.

4.4.2 Modelo mayorado un diez por ciento (10%) Acacias-Girardot.

Para las modelaciones próximas lo que se realizará es incrementar en un 10% las pendientes del modelo original, como fue descrito en la sección de metodología. En estas modelaciones se observará una diferenciación más clara entre los métodos de pérdidas menores.

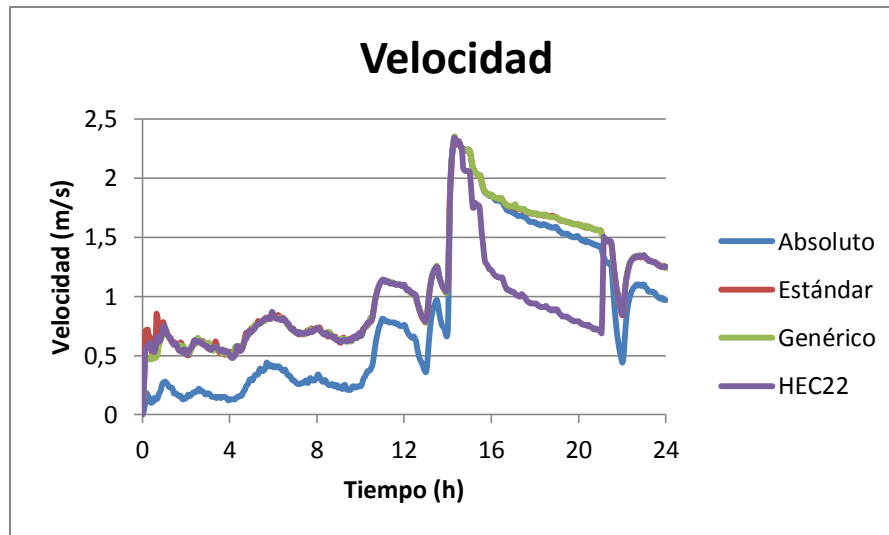


Gráfica 98 Altura en cámara A3.11. Comparación de Métodos.



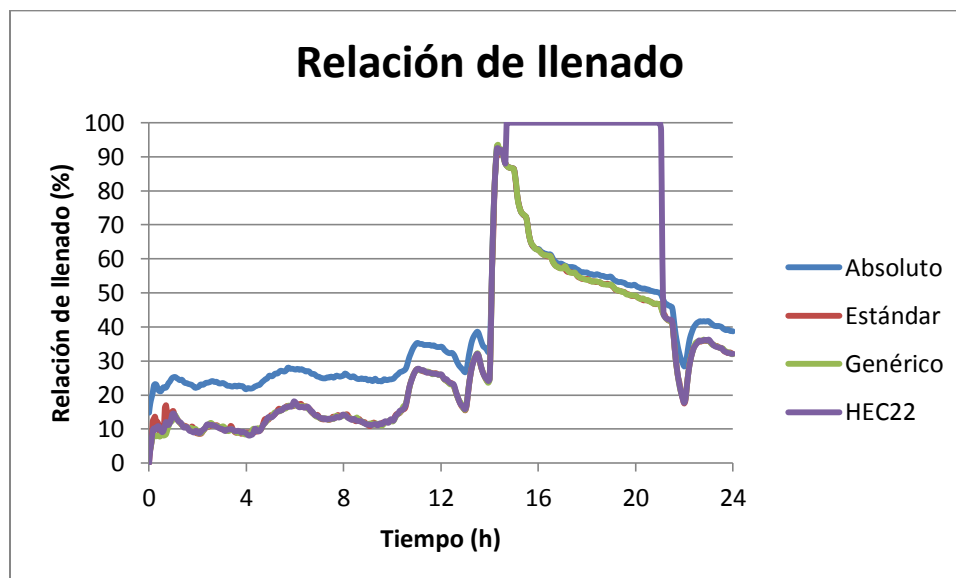
Gráfica 99 Altura en cámara A3.11. Comparación de Métodos (Detalle 1).

Esta modelación anterior muestra claramente cómo el método HEC 22 sobreestima las pérdidas menores en la cámara de inspección. A continuación se mostrarán las propiedades de flujo de la tubería inmediatamente aguas abajo y como éstas varían de acuerdo con el método de pérdidas menores utilizado.

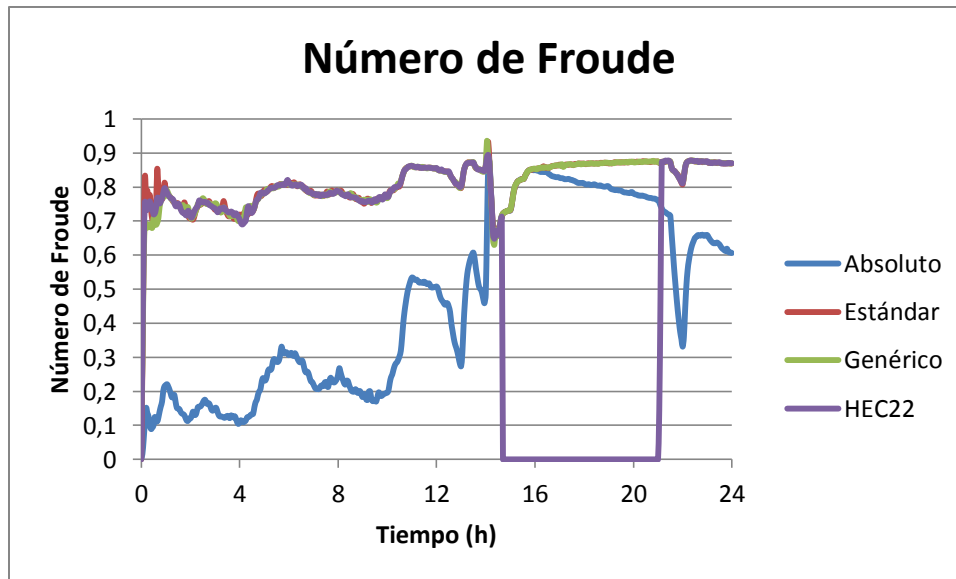


Gráfica 100 Velocidad en la Tubería T20. Comparación de Métodos.

Se logra observar como en el momento que se sobrecarga la red en el método HEC22 la velocidad en la tubería aguas abajo disminuye más rápido que en la forma que lo hacen sus métodos homólogos. De la misma manera se logra observar claramente como el método Absoluto siempre subestima la velocidad en la tubería aguas abajo de la cámara seleccionada y como el método Genérico produce mayor velocidad en la tubería aguas abajo.

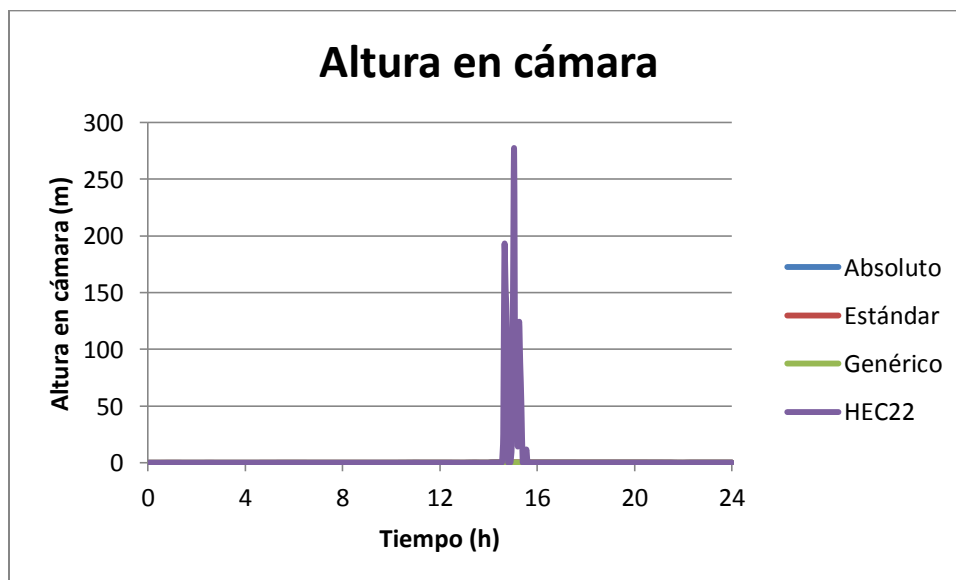


Gráfica 101 Relación de llenado en la Tubería T20. Comparación de Métodos.



Gráfica 102 Número de Froude en la Tubería T20. Comparación de Métodos.

Como se puede observar en las dos gráficas anteriores cuando se genera la disminución abrupta en la velocidad la tubería comienza a fluir bajo presión, relación de llenado=100%. De esta modelación se pudo observar de nuevo cómo el método HEC22 sobreestima las pérdidas menores en la cámara y cómo el método Absoluto subestima la velocidad en la tubería inmediatamente aguas abajo. A continuación se muestran los resultados de la Cámara A13.9.

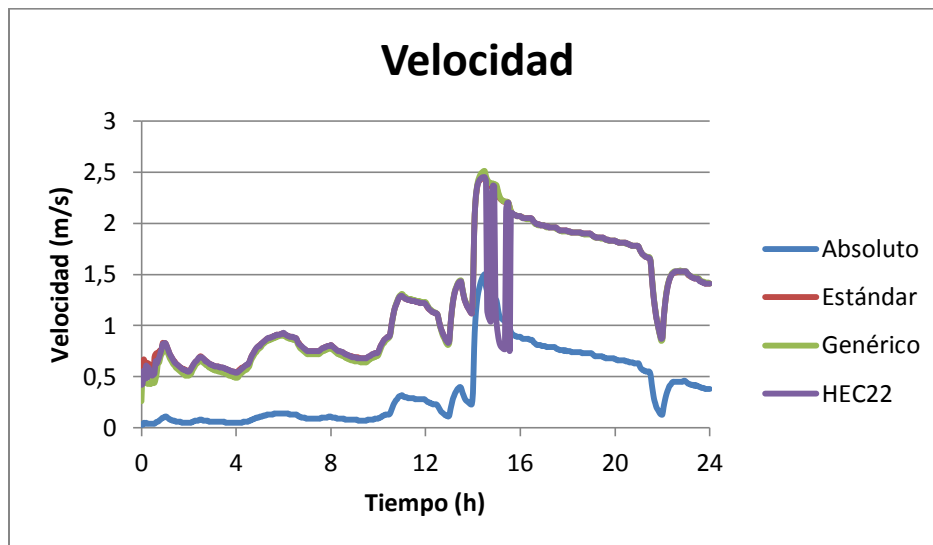


Gráfica 103 Altura en cámara A13.9. Comparación de Métodos.

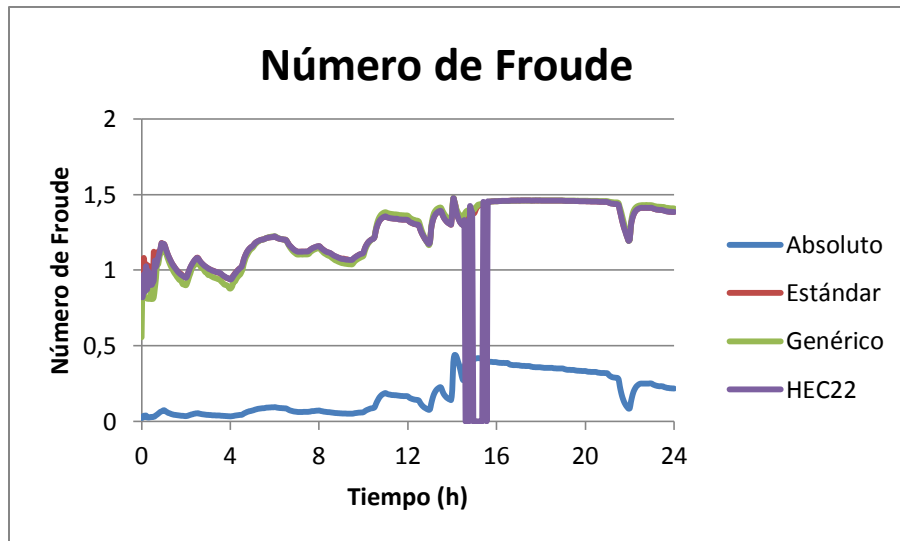


Gráfica 104 Altura en cámara A13.9. Comparación de Métodos (Detalle 1).

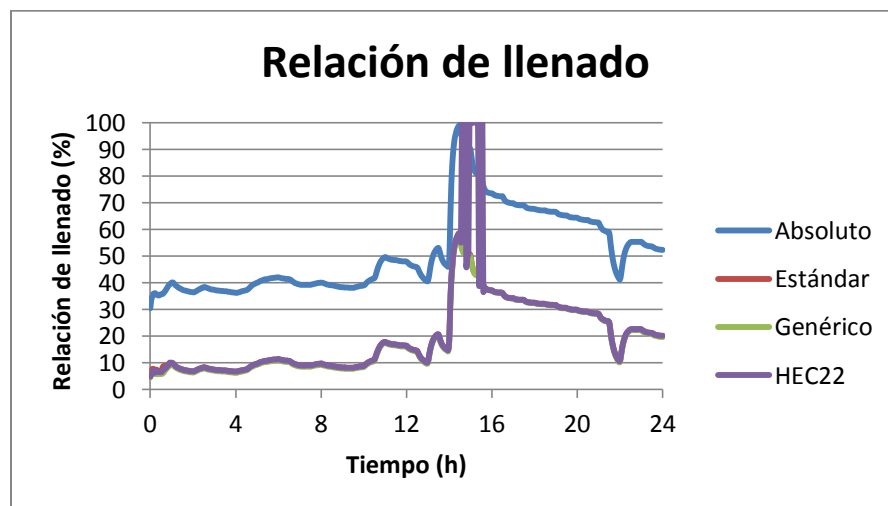
Al igual que la cámara de inspección anterior el método HEC22 es el único método en el cual se genera una sobrecarga en la red de drenaje. Se puede observar cómo el nivel en la cámara de inspección es similar al modelo mayorado un cinco por ciento. Esto sucede debido a que el software utilizado tiene un nivel mínimo de agua en las cámaras de inspección para que se tenga consistencia en los cálculos hechos internamente.



Gráfica 105 Velocidad en la Tubería T8. Comparación de Métodos.



Gráfica 106 Número de Froude en la Tubería T8. Comparación de Métodos.



Gráfica 107 Relación de llenado en la Tubería T8. Comparación de Métodos.

En la cámara de inspección pasada se puede observar claramente cómo el método HEC 22 sobreestima las pérdidas de energía en la red de alcantarillado. De igual forma se logra observar como el método Absoluto influye fuertemente en la tubería aguas abajo; este método genera una mayor relación de llenado poniendo así en riesgo a la tubería y que ésta fluya bajo presión. Por último se ilustrarán los resultados de la cámara de inspección TA9.

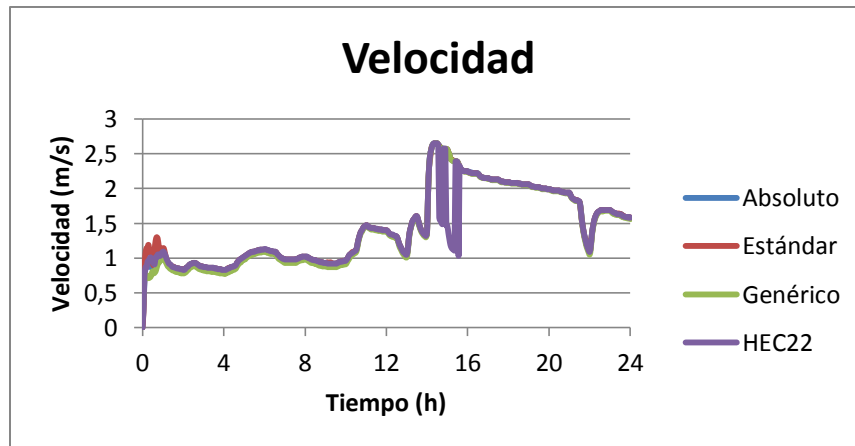


Gráfica 108 Altura en cámara TA9. Comparación de Métodos.

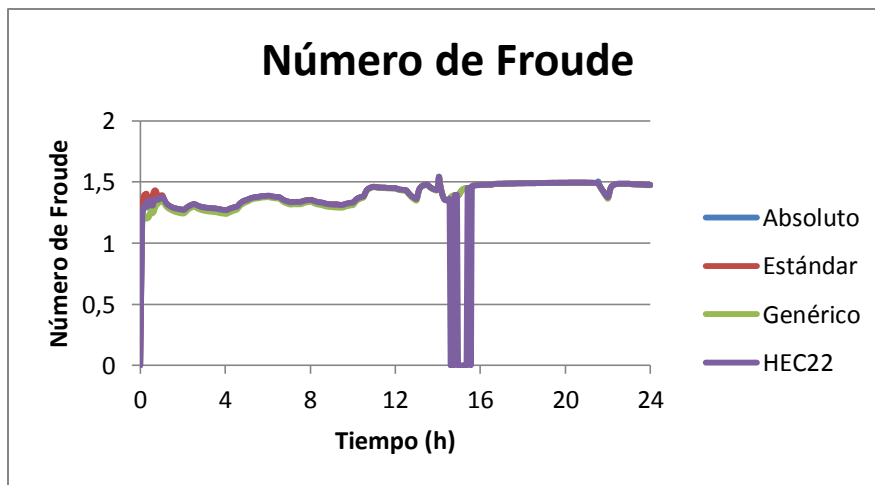


Gráfica 109 Altura en cámara TA9. Comparación de Métodos (Detalle 1).

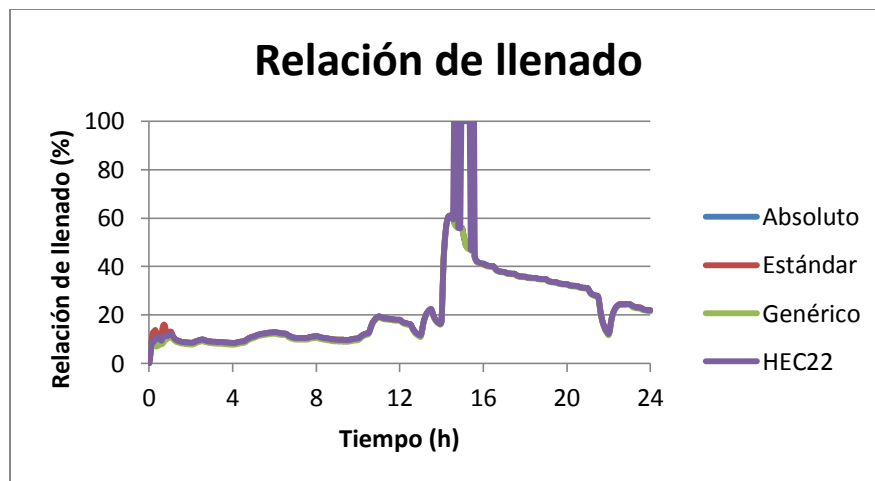
Al igual que en todas las cámaras de inspección analizadas para esta red de Acacias-Girardot se ha visto cómo el método HEC 22 sobreestima las pérdidas menores. Esto se ha observado debido a que únicamente con ese método todas las cámaras han sufrido sobrecarga a diferencia que si se utilizara cualquier otro método de pérdidas menores. A continuación se mostrarán las propiedades del flujo en la tubería aguas abajo de la cámara analizada.



Gráfica 110 Velocidad en la Tubería T180. Comparación de Métodos.



Gráfica 111 Número de Froude en la Tubería T180. Comparación de Métodos.

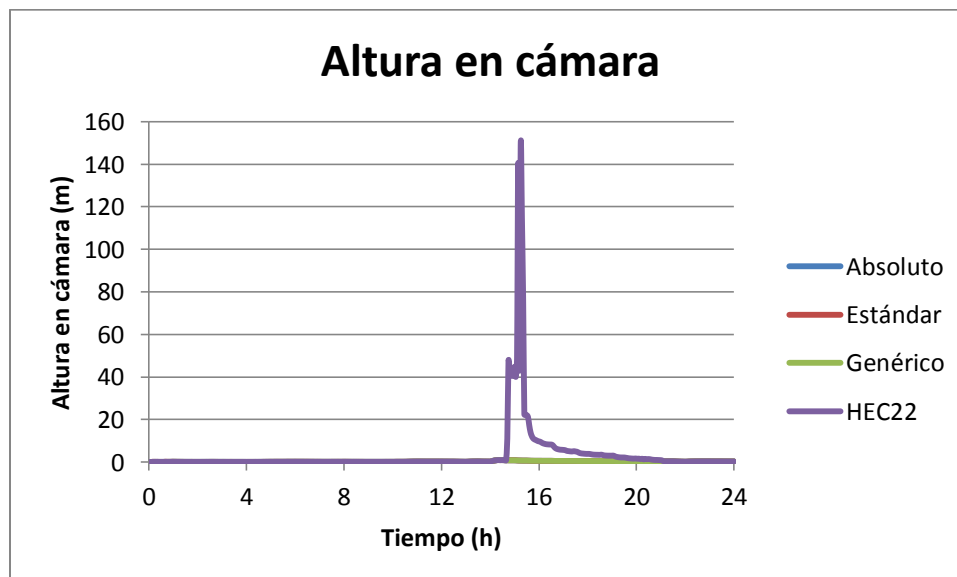


Gráfica 112 Relación de llenado en la Tubería T180. Comparación de Métodos.

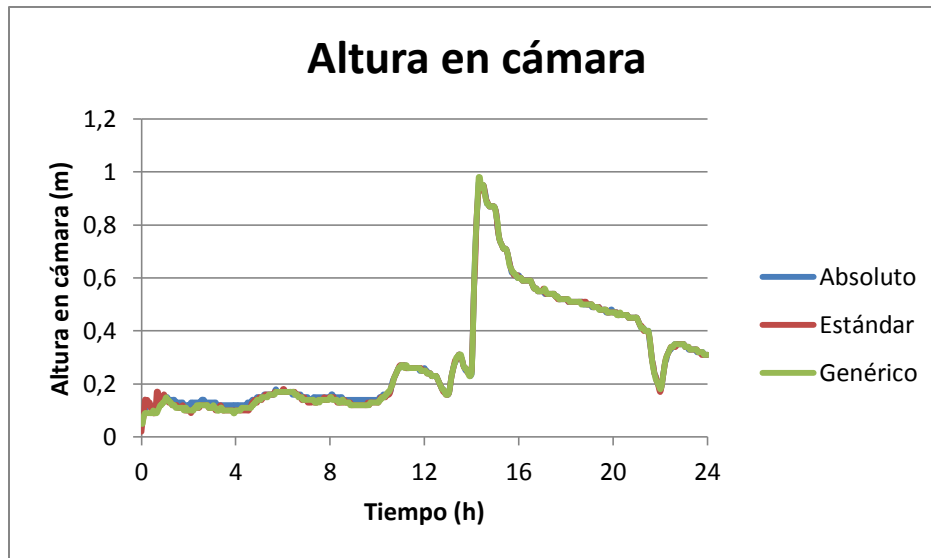
De esta modelación al igual que en las dos cámaras de inspección pasadas se observa cómo el método HEC22 sobreestima las pérdidas menores en las cámaras de inspección, motivo por el cual sólo éste método genera sobrecargas en la red. En contraposición con la modelación mayorada un 5% la actual modelación mostró diferenciación alguna entre métodos de pérdidas menores, especialmente el método HEC22 en las cámaras de inspección y el método Absoluto en la tubería inmediatamente aguas abajo de la cámara analizada.

4.5.1 Modelo mayorado un veinte por ciento (20%) Prado-Medellín.

Para este último grupo de modelaciones lo que se realizará es mayorar la pendiente un 20%. Esto con el fin de obligar al flujo que transite bajo condiciones extremas haciendo así que los métodos de pérdidas menores se diferencien cada vez más. Cómo se ha venido observando a través de los resultados previos se tiene claro que el método que afecta más al flujo al pasar a través de una cámara es el HEC22 seguido por el método Estándar mas todavía no es claro el orden entre el método Absoluto y el método Genérico. A continuación se mostrarán los resultados de la cámara de inspección C159D.

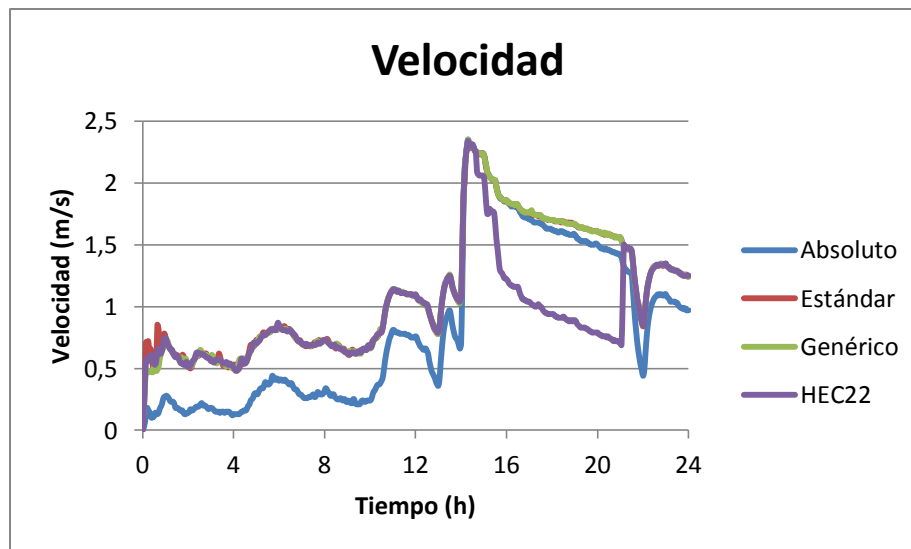


Gráfica 113 Altura en cámara C159D. Comparación de Métodos.



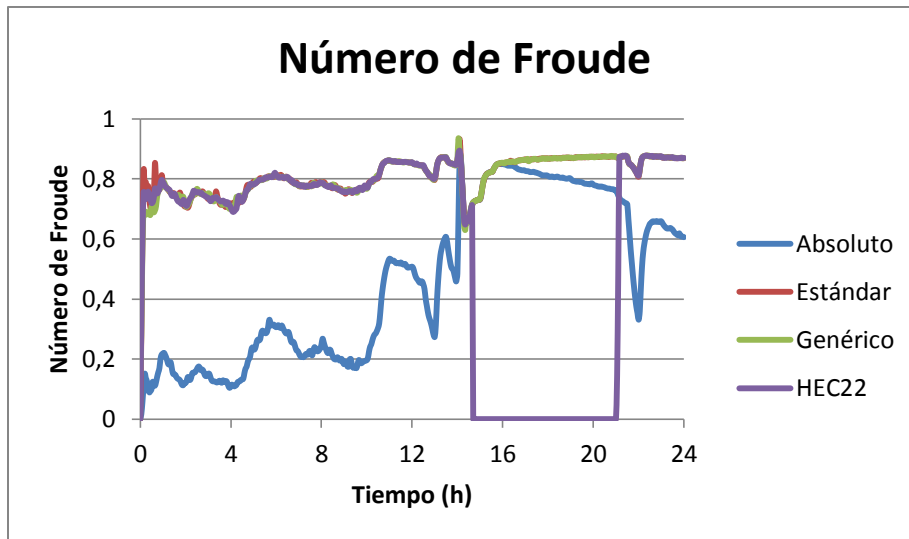
Gráfica 114 Altura en cámara C159D. Comparación de Métodos (Detalle 1).

En las gráficas pasadas se reitera lo visto en modelaciones anteriores, siendo esto que el método HEC22 sobreestima las pérdidas menores en la cámara de inspección analizada. A continuación se mostrarán los resultados de la tubería inmediatamente aguas abajo.

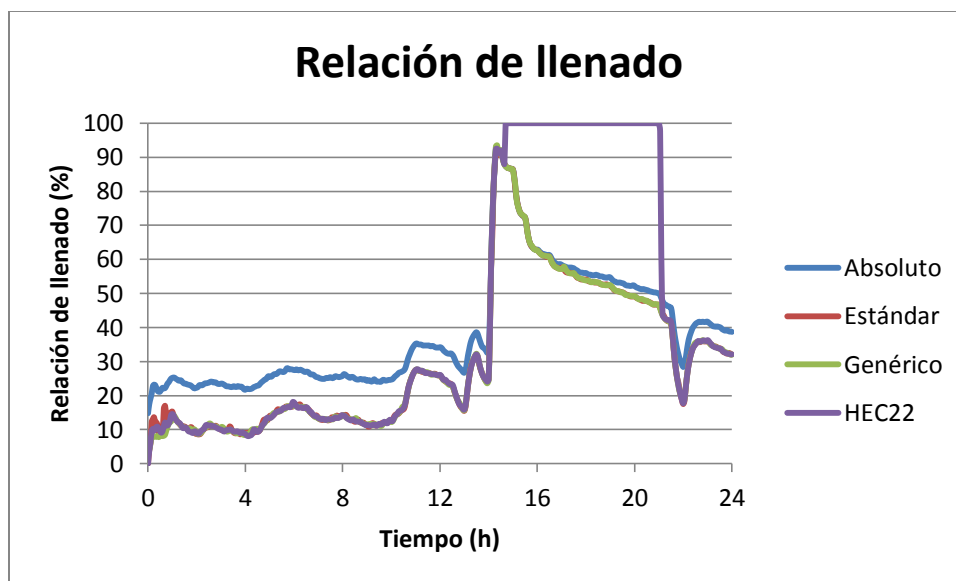


Gráfica 115 Velocidad en la Tubería TA16. Comparación de Métodos.

Al igual que como se observó en la Gráfica 102 en el momento que se sobrecarga la red el método HEC22 hace que la velocidad baje más rápido que en los otros métodos de pérdidas menores. De la misma manera se logra observar como el método Genérico es el que produce una mayor velocidad en la tubería aguas abajo y como el método Absoluto subestima la velocidad con respecto a sus métodos homólogos. A continuación se ilustrarán las otras dos características del flujo: Número de Froude y Relación de Llenado.



Gráfica 116 Número de Froude en la Tubería TA16. Comparación de Métodos.



Gráfica 117 Relación de llenado en la Tubería TA16. Comparación de Métodos.

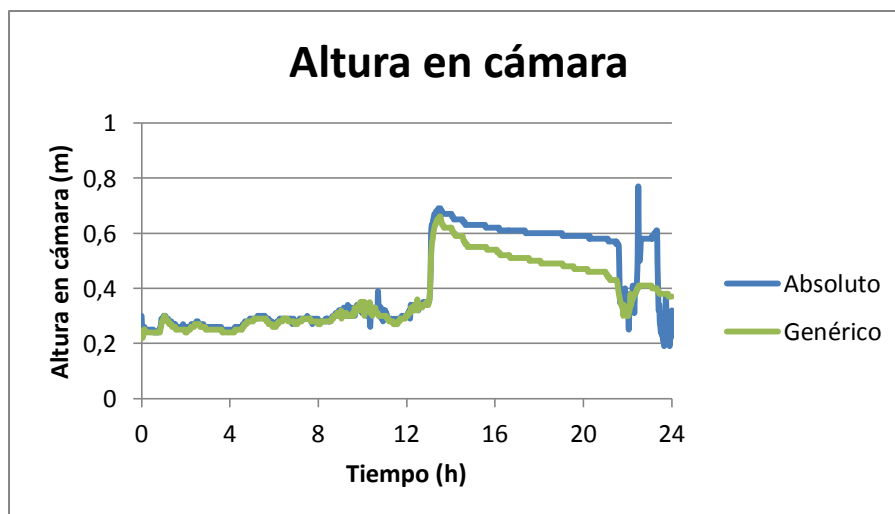
Se puede observar como el método HEC22 genera que la tubería aguas abajo fluya bajo presión después del evento de sobrecarga. De igual forma se observa cómo el método Absoluto genera una mayor relación de llenado que los otros métodos de pérdidas menores. A continuación se mostrará la siguiente cámara de inspección: C93B.



Gráfica 118 Altura en cámara C93B. Comparación de Métodos.

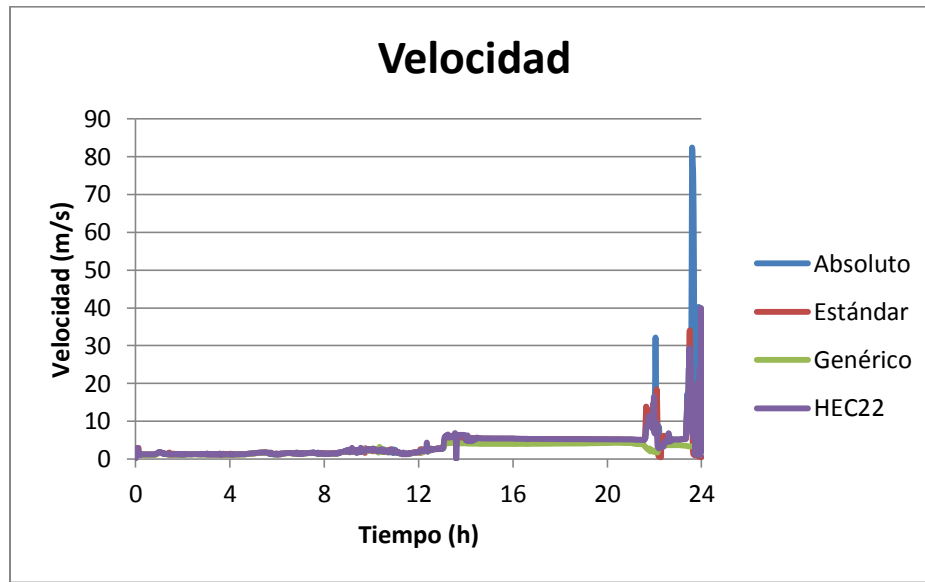


Gráfica 119 Altura en cámara C93B. Comparación de Métodos (Detalle 1).

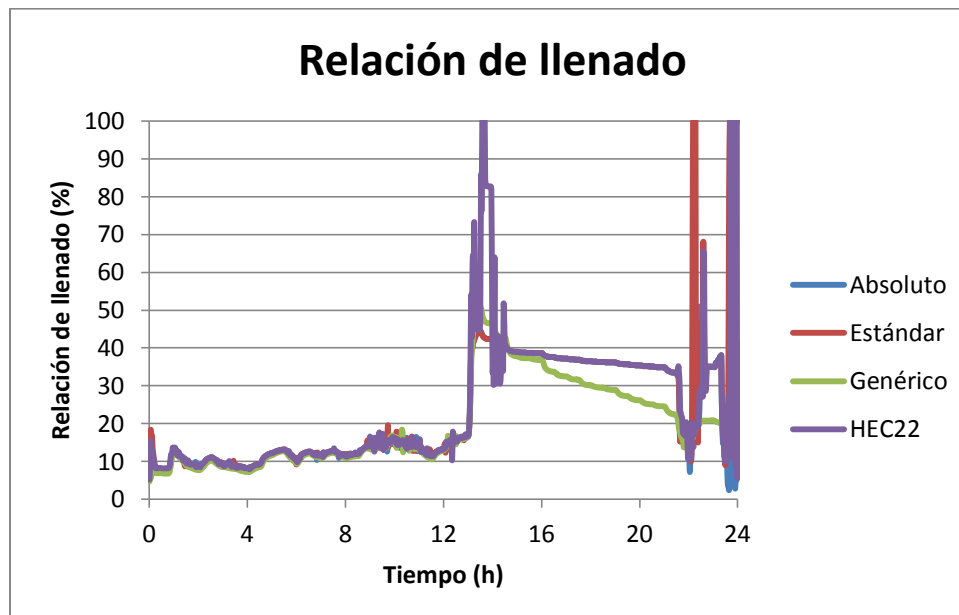


Gráfica 120 Altura en cámara C93B. Comparación de Métodos (Detalle 2).

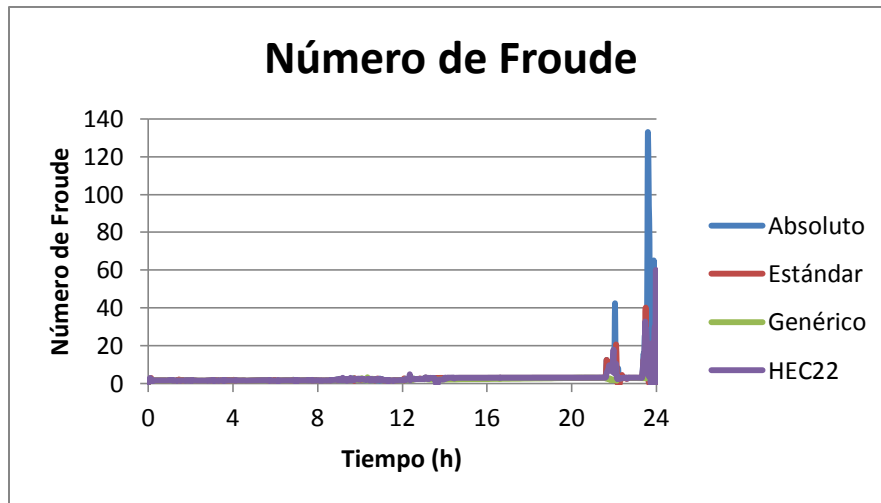
En estas gráficas mostradas anteriormente se puede observar de manera clara como se diferencian todos los métodos de pérdidas menores. Se observa como el método que hace perder más energía al flujo es el método HEC22 seguido por el método Estándar continuado este por el método Absoluto y finalmente el método Genérico. A continuación se mostrarán las propiedades del flujo en la tubería aguas abajo.



Gráfica 121 Velocidad en la Tubería TA5. Comparación de Métodos.



Gráfica 122 Relación de llenado en la Tubería TA5. Comparación de Métodos.

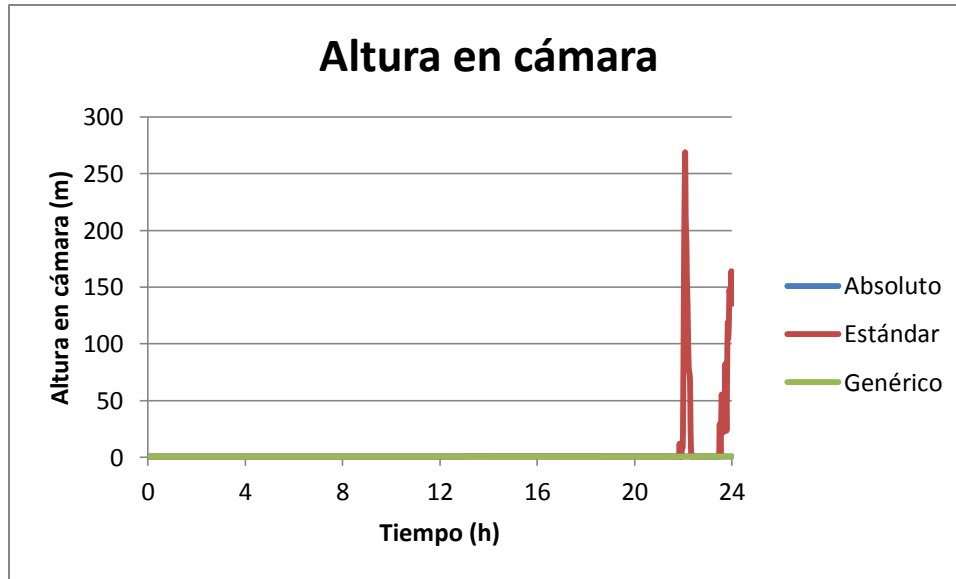


Gráfica 123 Número de Froude en la Tubería TA5. Comparación de Métodos.

De estas gráficas mostradas anteriormente se logra observar cómo tanto el método Estándar como el método HEC22 tienen sus picos cuando el sistema sufre una sobrecarga. No obstante, el método Absoluto tiene un pico en su velocidad al igual que en su número de Froude. El motivo por el cual sucede esto es debido a que la relación de llenado en ese instante es del 2.8% haciendo así que todo el flujo fluya a velocidades muy altas. A continuación se ilustrarán los resultados de la última cámara de inspección C80A.



Gráfica 124 Altura en cámara C80A. Comparación de Métodos.

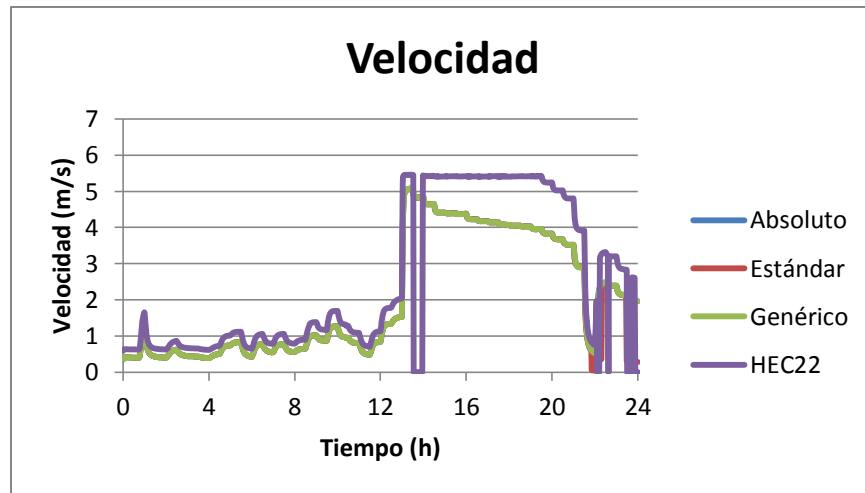


Gráfica 125 Altura en cámara C93B. Comparación de Métodos (Detalle 1).

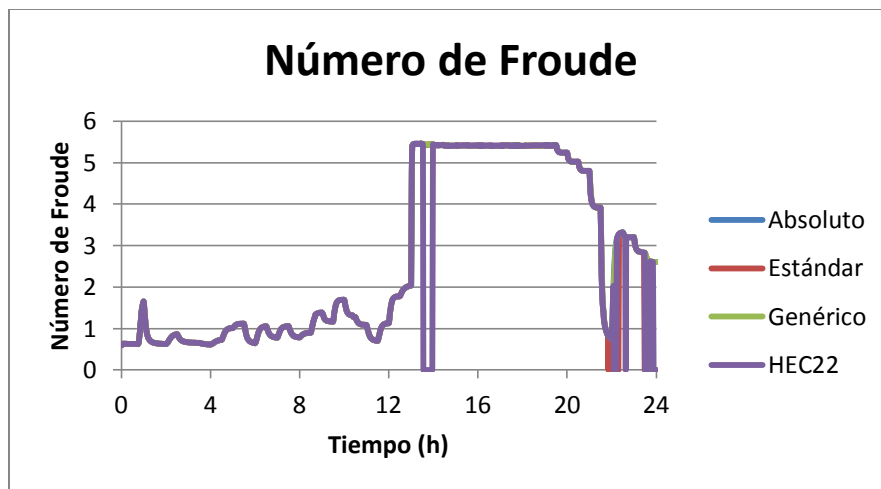


Gráfica 126 Altura en cámara C93B. Comparación de Métodos (Detalle 2).

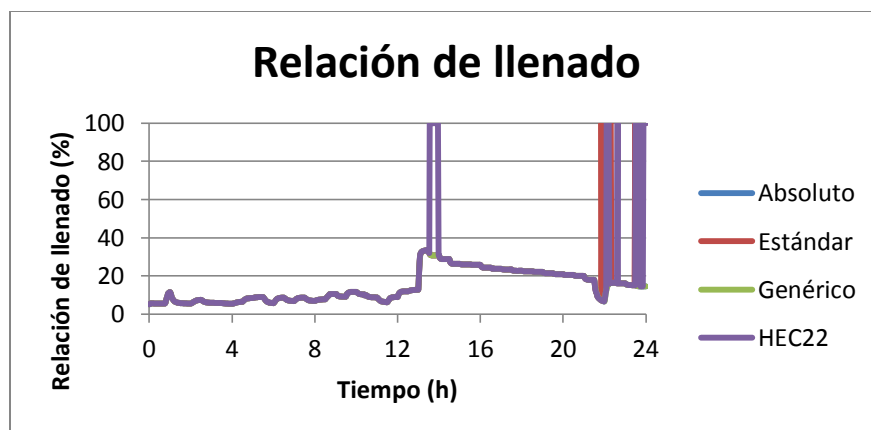
Al igual que en ciertas modelaciones pasadas se logra observar cómo el método HEC22 y el método Estándar son los métodos que sobreestiman las pérdidas menores en la cámara de inspección provocando así el fenómeno de sobrecarga en la red de drenaje. A continuación se mostrarán los resultados de la tubería inmediatamente aguas abajo.



Gráfica 127 Velocidad en la Tubería T36. Comparación de Métodos.



Gráfica 128 Número de Froude en la Tubería T36. Comparación de Métodos.



Gráfica 129 Relación de llenado en la Tubería T36. Comparación de Métodos.

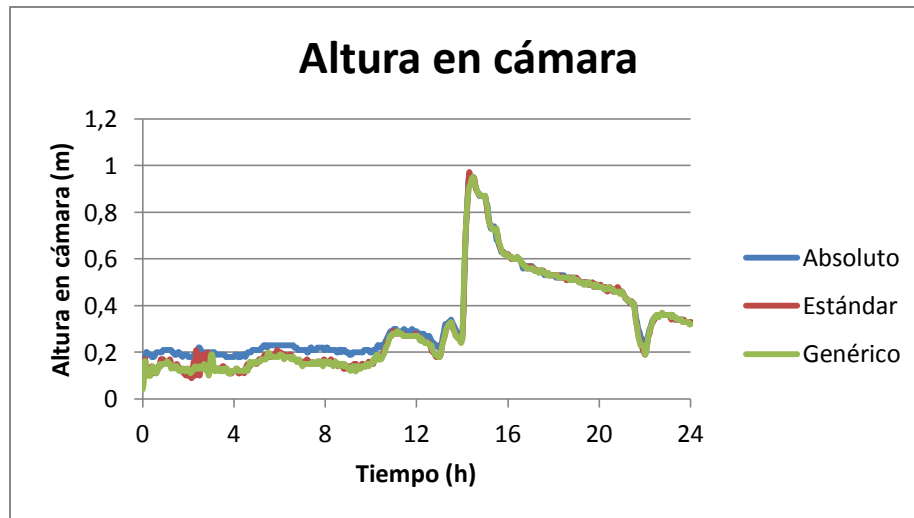
Se observa cómo el método HEC22 y el método Estándar, debido al fenómeno de sobrecarga de la red de drenaje, hacen que la tubería de aguas abajo fluya bajo presión en ciertos momentos de la modelación. A través de estas tres cámaras de inspección se logró hacer la diferenciación total de los métodos de pérdidas menores en las cámaras de inspección, Gráficas 118, 119 y 120. Se pudo determinar cómo es el orden de afectación al flujo debido a pérdidas menores en cámaras de inspección: HEC22, Estándar, Absoluto y Genérico.

4.5.1 Modelo mayorado un veinte por ciento (20%) Acacias-Girardot.

Para este último grupo de modelaciones se realizará una mayoración de pendiente un 20%, tal como fue descrito en la sección de metodología. La razón por la cual se mayoró la pendiente tanto fue para obligar al flujo a transitar bajo condiciones extremas haciendo así que los métodos de pérdidas menores se diferenciaron cada vez más. En estas modelaciones se desea comprobar el orden obtenido en la sección anterior en la cual ya se tenía una diferenciación completa de los métodos de pérdidas menores en cámaras de inspección. A continuación se mostrarán los resultados de la cámara de inspección A3.11.

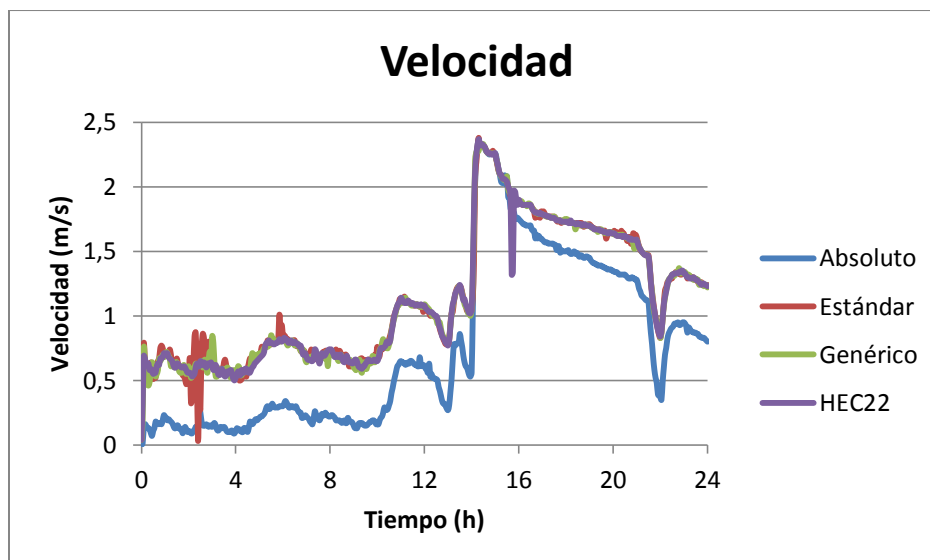


Gráfica 130 Altura en cámara A3.11. Comparación de Métodos.

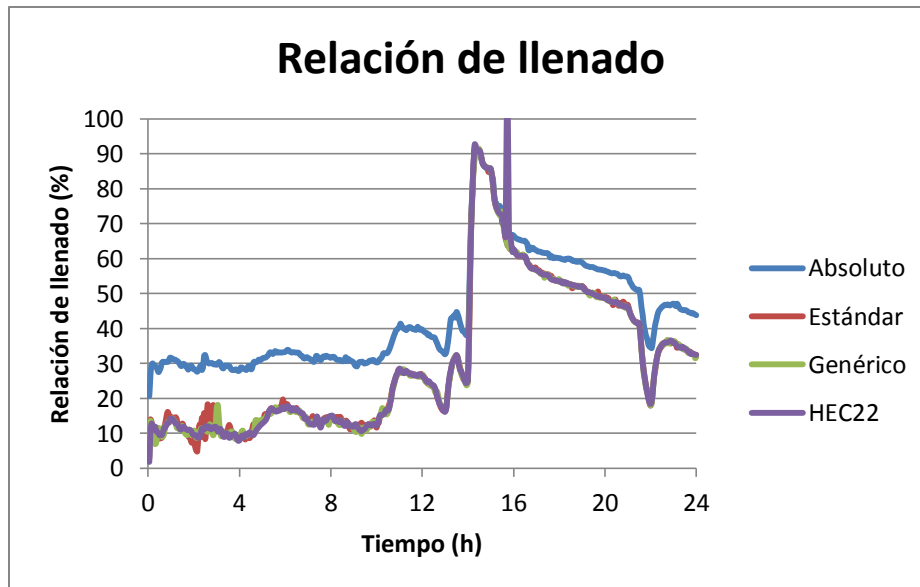


Gráfica 131 Altura en cámara A3.11. Comparación de Métodos (Detalle 1).

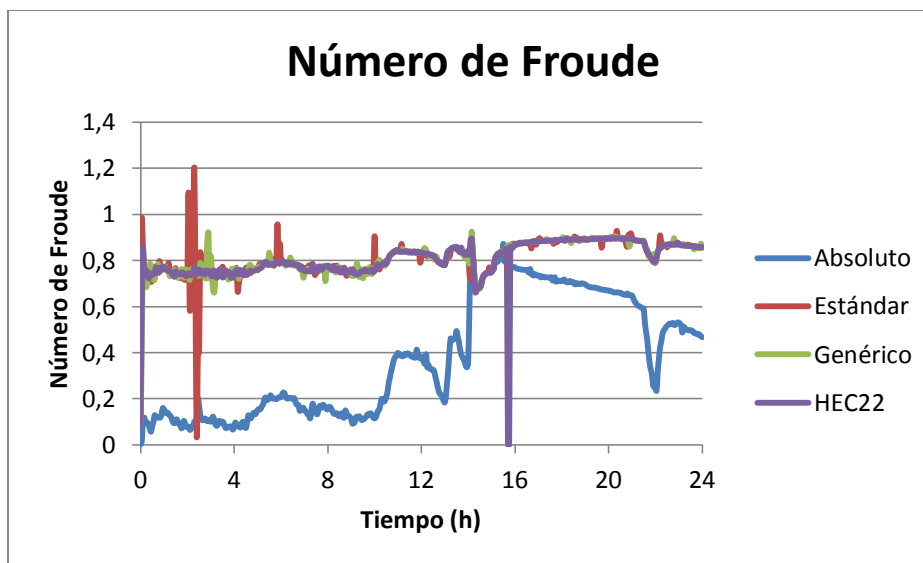
Se puede observar de nuevo cómo el método HEC22 sobreestima las pérdidas menores en el flujo haciendo así que se presente sobrecarga en la red de drenaje. De la misma manera también se puede notar cómo el método Absoluto tiene una altura ligeramente mayor las doce primeras horas de modelación. A continuación se mostrarán las características de flujo de la tubería aguas abajo.



Gráfica 132 Velocidad en la Tubería T20. Comparación de Métodos.



Gráfica 133 Relación de llenado en la Tubería T20. Comparación de Métodos.



Gráfica 134 Número de Froude en la Tubería T20. Comparación de Métodos.

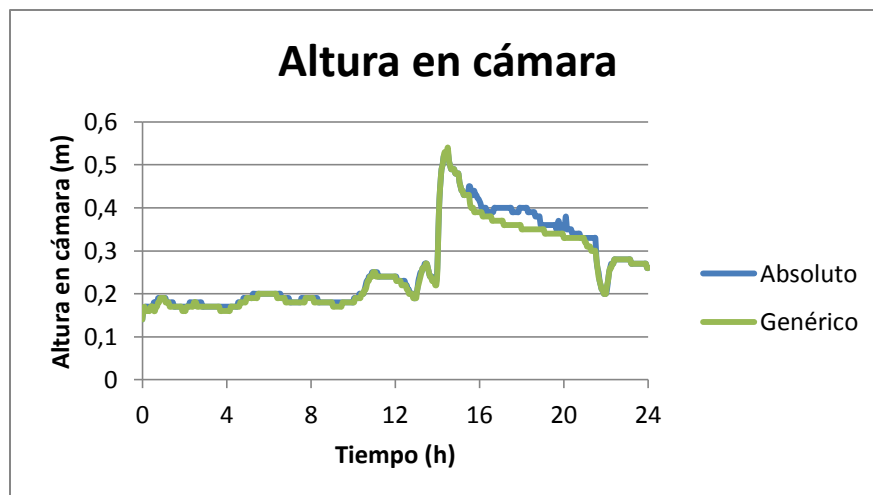
Se nota claramente cómo cuando el método HEC22 genera una sobrecarga en la cámara de inspección la tubería aguas abajo fluye bajo presión y la velocidad sufre un cambio drástico. Al presentar un mayor nivel en la cámara cuando se utiliza el método Absoluto se genera en la tubería aguas abajo una mayor relación de llenado, menor velocidad y menor Número de Froude. A continuación se mostrarán los resultados de la siguiente cámara de inspección A13.9.



Gráfica 135 Altura en cámara A13.9. Comparación de Métodos.

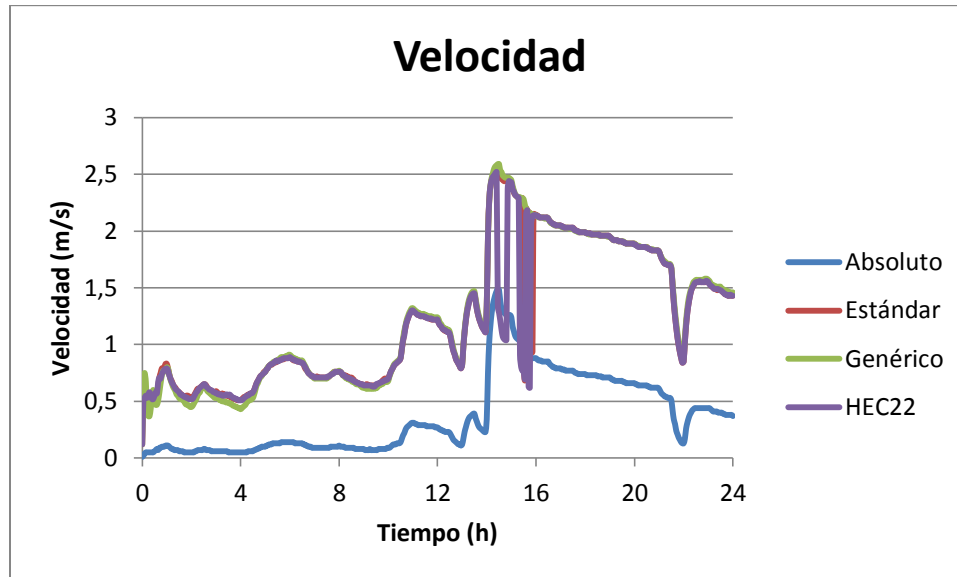


Gráfica 136 Altura en cámara A13.9. Comparación de Métodos (Detalle 1).

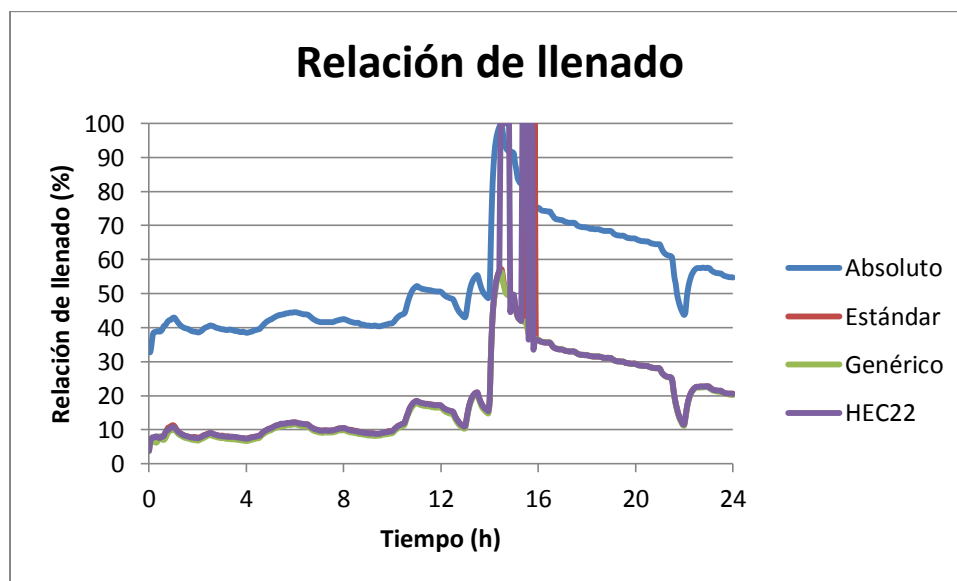


Gráfica 137 Altura en cámara A13.9. Comparación de Métodos (Detalle 2).

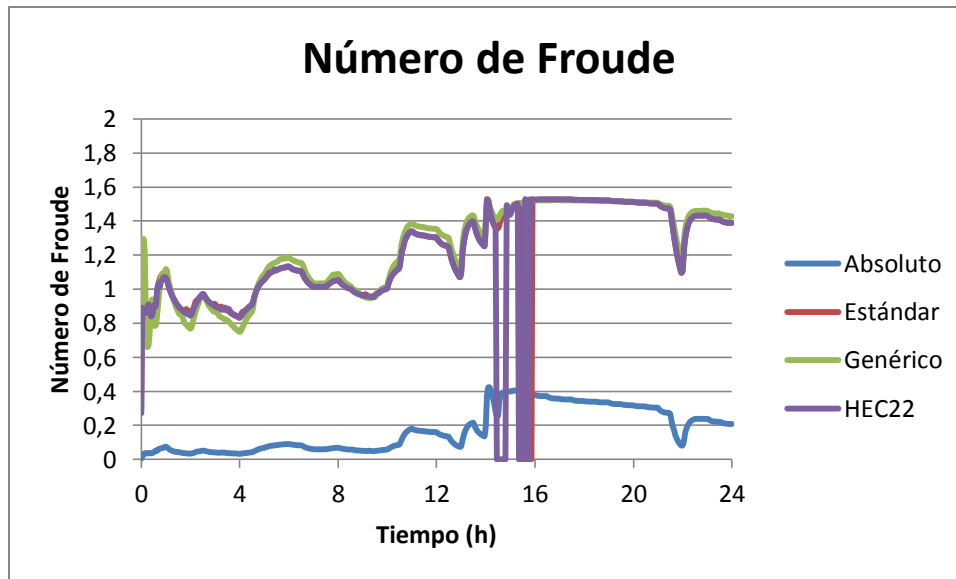
En estas gráficas se puede observar de nuevo una diferenciación completa de los métodos de pérdidas de energía en la cámara de inspección analizada. Se analiza cómo el método que hace perder mayor energía al flujo es el HEC22 seguido por el método Estándar y este a su vez seguido por el método Absoluto y finalizando con el método Genérico. Esta diferenciación total de métodos ya se había obtenido en las Gráficas 118,119 y 120. A continuación se ilustrarán las propiedades del flujo en la tubería aguas abajo.



Gráfica 138 Velocidad en la Tubería T8. Comparación de Métodos.

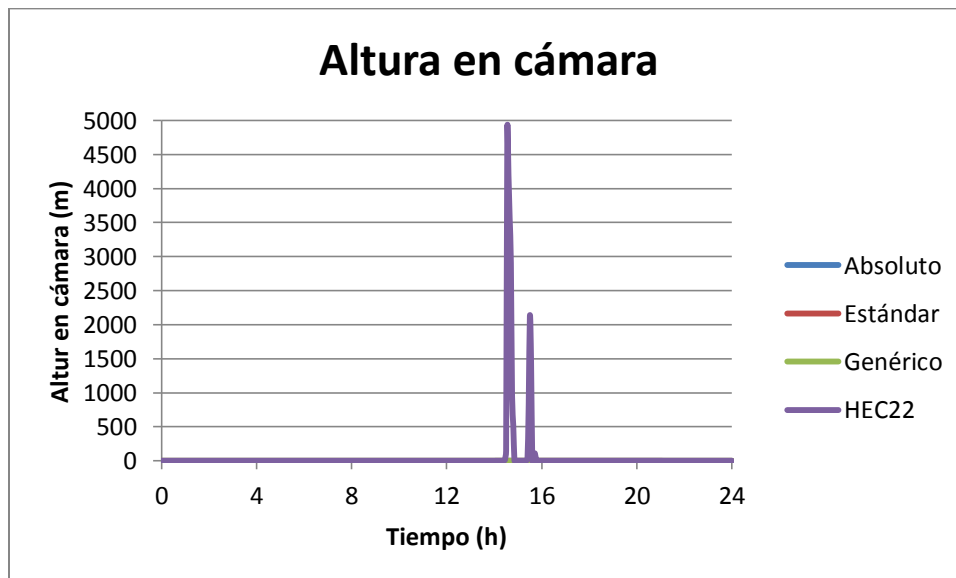


Gráfica 139 Relación de llenado en la Tubería T8. Comparación de Métodos.



Gráfica 140 Número de Froude en la Tubería T8. Comparación de Métodos.

Se puede observar en las gráficas anteriores como cuando sufre una sobrecarga el sistema la tubería inmediatamente aguas abajo de la cámara analizada fluye bajo presión, la velocidad baja súbitamente al igual que su Número de Froude. De la misma manera se puede observar cómo el método Absoluto genera en la tubería de aguas abajo una velocidad inferior a la de sus métodos homólogos. A continuación se mostrará la última cámara de inspección, TA9.

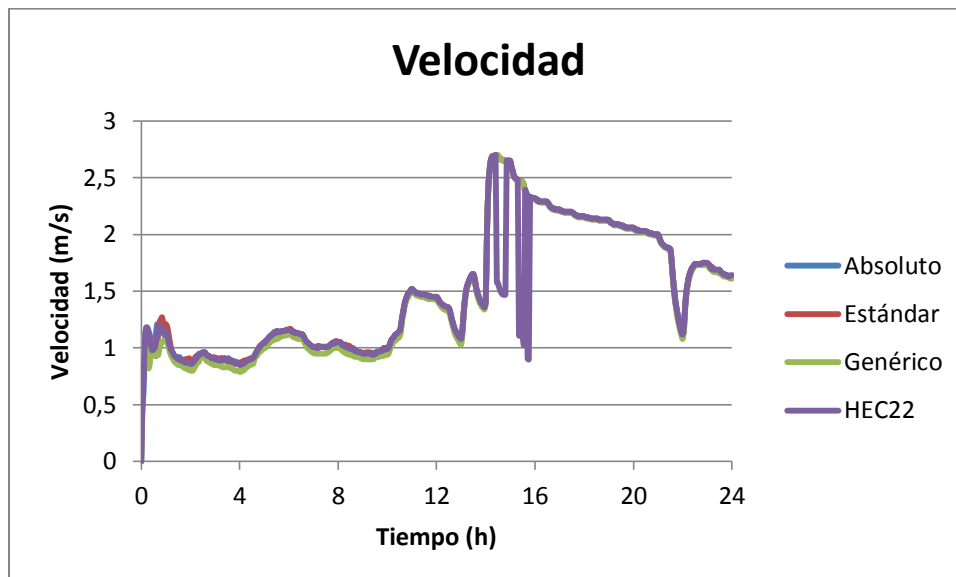


Gráfica 141 Altura en cámara TA9. Comparación de Métodos.

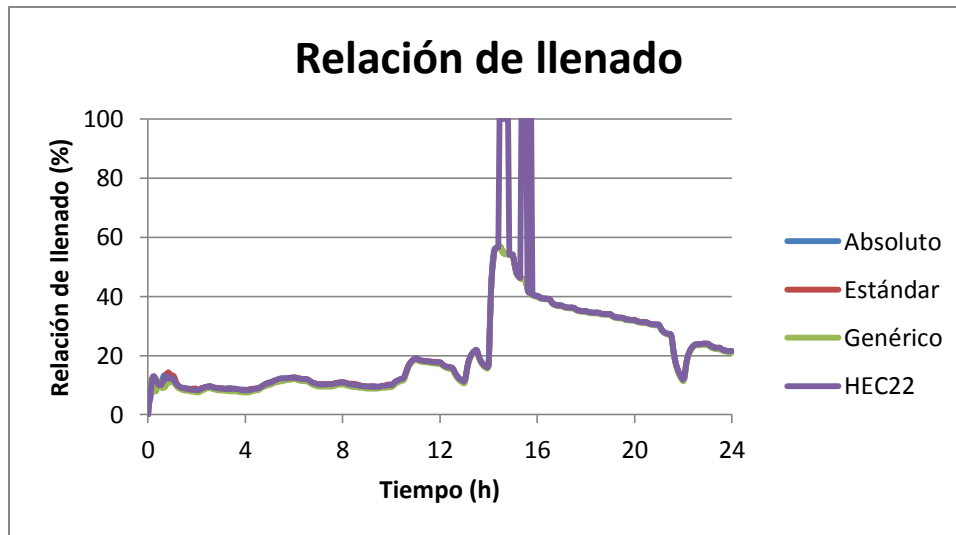


Gráfica 142 Altura en cámara TA9. Comparación de Métodos (Detalle 1).

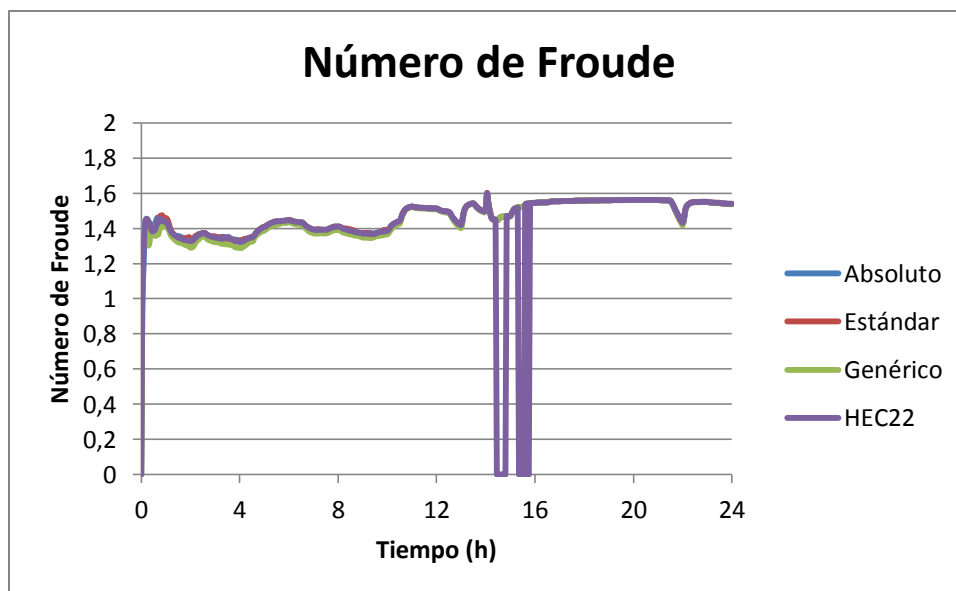
Se muestra como en esta modelación el único método que hace que la red sufra un fenómeno de sobrecarga es el HEC22. Se puede observar claramente a través de las modelaciones pasadas como el método HEC22 sobreestima las pérdidas de energía en la red de alcantarillado. A continuación se ilustraran las características de flujo en la tubería aguas abajo.



Gráfica 143 Velocidad en la Tubería T180. Comparación de Métodos.



Gráfica 144 Relación de llenado en la Tubería T180. Comparación de Métodos.



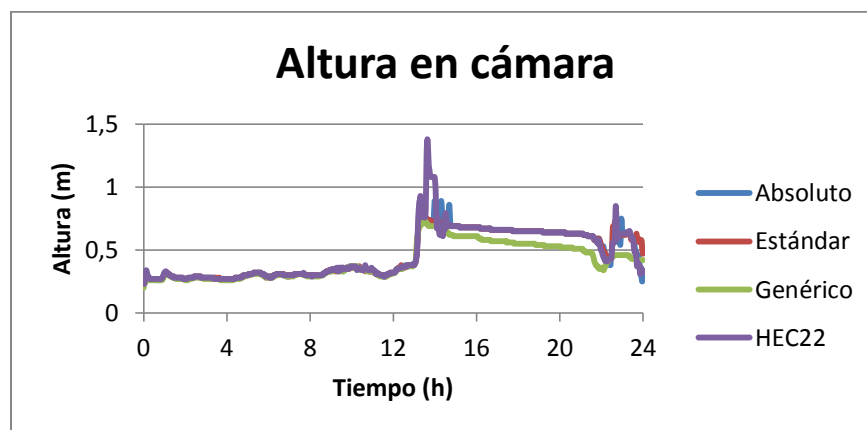
Gráfica 145 Número de Froude en la Tubería T180. Comparación de Métodos.

Se puede observar en las gráficas anteriores, al igual que en las modelaciones pasadas, como cuando sufre una sobrecarga la cámara, la tubería inmediatamente aguas abajo reduce su velocidad, fluye bajo presión y su número de Froude no está definido para esa condición de flujo. Se pudo observar claramente en las Gráficas 135, 136 y 137 cómo se obtuvieron los mismos resultados de diferenciación de métodos de pérdidas menores que en la red de Prado- Medellín. Ésta modelación permitió tener claro cuál método sobreestima y subestima las pérdidas menores en cámaras de inspección y como estos métodos afectan a las propiedades de flujo en la tubería inmediatamente aguas abajo de la cámara analizada.

5 Modelaciones con cañuelas profundas

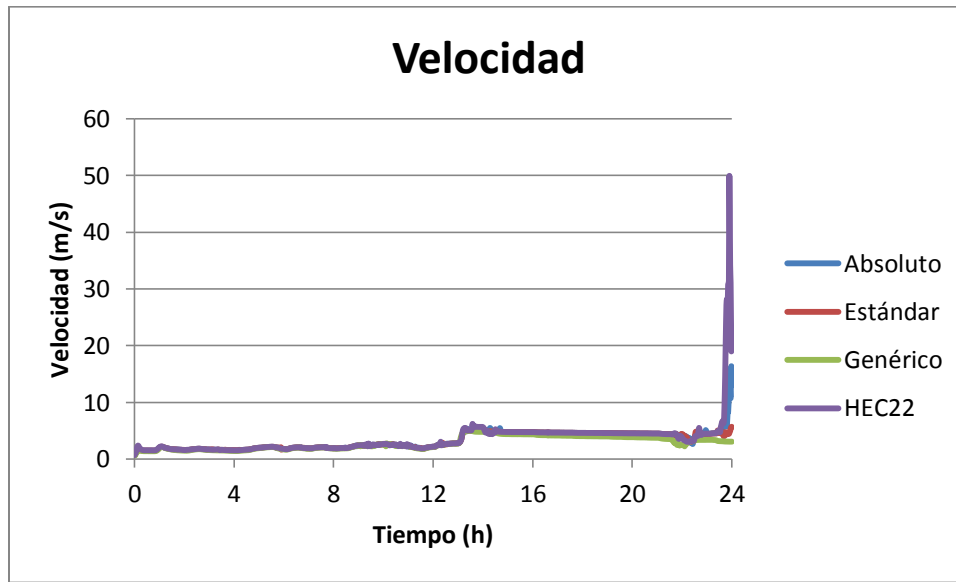
Para estas nuevas modelaciones sólo se realizará una mayoración de pendiente del 20%. Esto tiene como fin lograr comparar los casos más críticos de las modelaciones pasadas con estos nuevos resultados. Como se explicó en la sección de Marco Teórico una cañuela profunda genera pérdidas menores en el flujo cercanas a cero. Para el flujo esto significa que éste no va a sentir una transición brusca entre tuberías aguas arriba, cámara de inspección con cañuela profunda y tubería aguas abajo. Es importante recalcar lo fundamental de esta sección del presente Documento de Grado ya que desde hace un tiempo con la evolución de los materiales termoplásticos en el mercado se han tenido avances en cómo se construyen estas cámaras de inspección y los efectos hidráulicos que tienen. Hace unos años la totalidad de las cámaras de inspección eran construidas en concreto y mampostería provocando así que cuando el flujo rozara con esa superficie rugosa éste cambiara totalmente sus características hidráulicas. Un ejemplo claro es que el cambio de flujo turbulento hidráulicamente liso a un flujo turbulento hidráulicamente cambia totalmente las características de flujo.

Debido a las razones mencionadas anteriormente se comenzó a trabajar en la idea de tener cámaras de inspección que no produjeran cambios bruscos en las características de flujo. Esto se logró mediante la elaboración de cámaras de inspección con materiales termoplásticos tales como el PVC. Posterior a esto se decidió que la idea misma de una cámara de inspección afectaba más al flujo de lo que lo beneficiaba, a pesar de que éstas son necesarias para el mantenimiento de la red, así que se pensó en generar las menores perturbaciones al flujo posibles. Al unir todos estos factores se obtuvo la idea de la cañuela profunda. A continuación se mostrará la modelación de Prado-Medellín con cañuelas profundas mayorada un 20%.

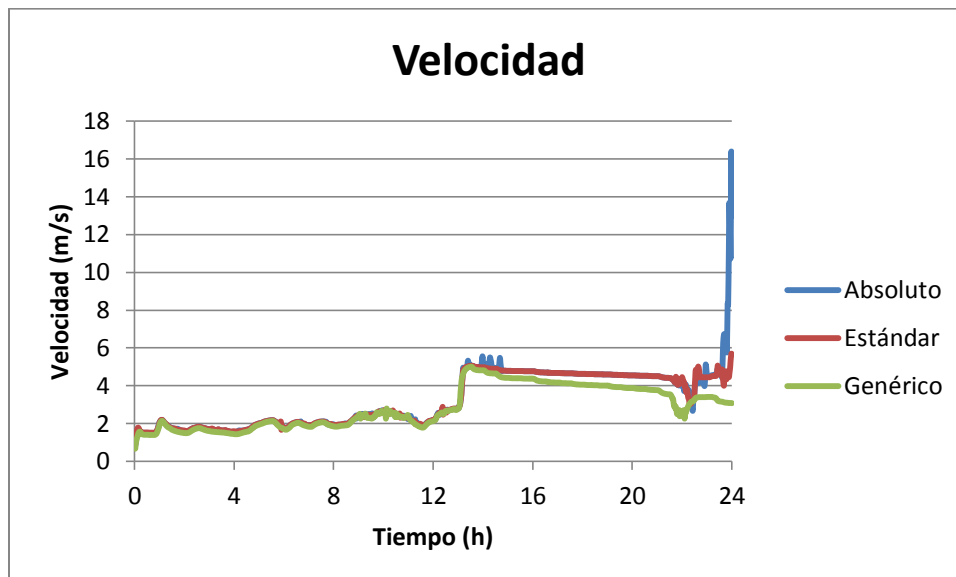


Gráfica 146 Altura en cámara C159D. Comparación de Métodos.

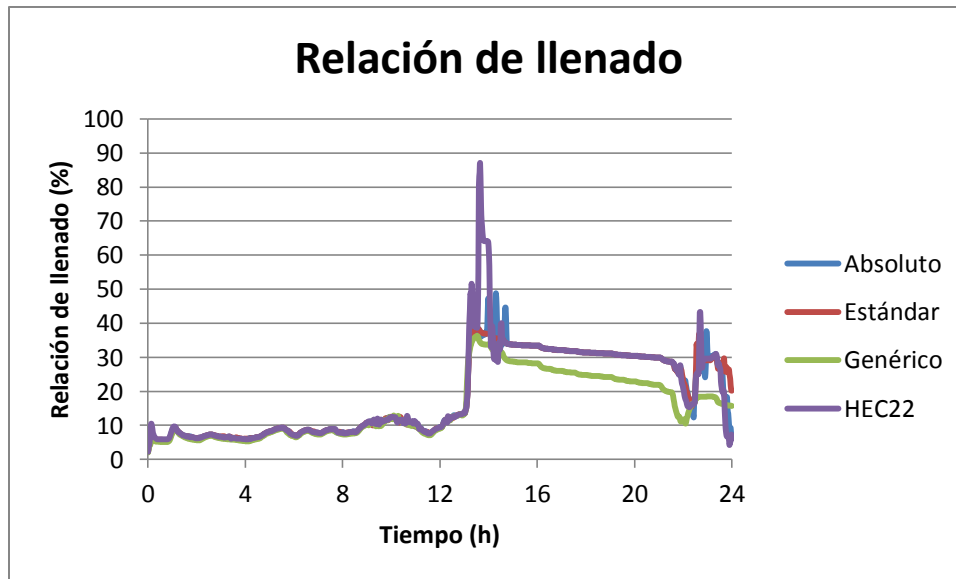
En esta modelación en contraposición al modelo mayorado un 20% sin cañuela profunda ninguno de sus métodos sobrecarga al sistema. Se observa claramente cómo el método HEC22 tiene resaltos hidráulicos generando así cambios súbitos en el nivel de la cámara de inspección analizada. A continuación se presentan las características de flujo en la tubería aguas abajo de la cámara.



Gráfica 147 Velocidad en la Tubería TA16. Comparación de Métodos.

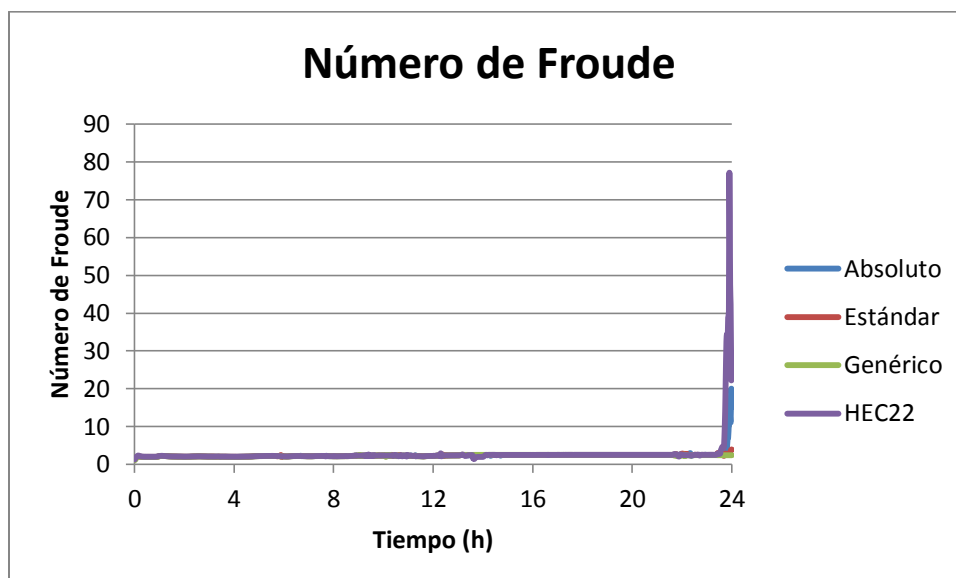


Gráfica 148 Velocidad en la Tubería TA16. Comparación de Métodos (Detalle 1).



Gráfica 149 Relación de llenado en la Tubería TA16. Comparación de Métodos.

En las gráficas anteriores se observa como la velocidad tiene un cambio súbito en un tiempo cercano al final de la modelación. Esto es debido a que el nivel en la cámara se desea aproximar a cero, generando así que la relación de llenado en la tubería haga lo propio, concluyendo esto en que todo el flujo tome velocidades significativas a una relación de llenado ínfima.



Gráfica 150 Número de Froude en la Tubería TA16. Comparación de Métodos.

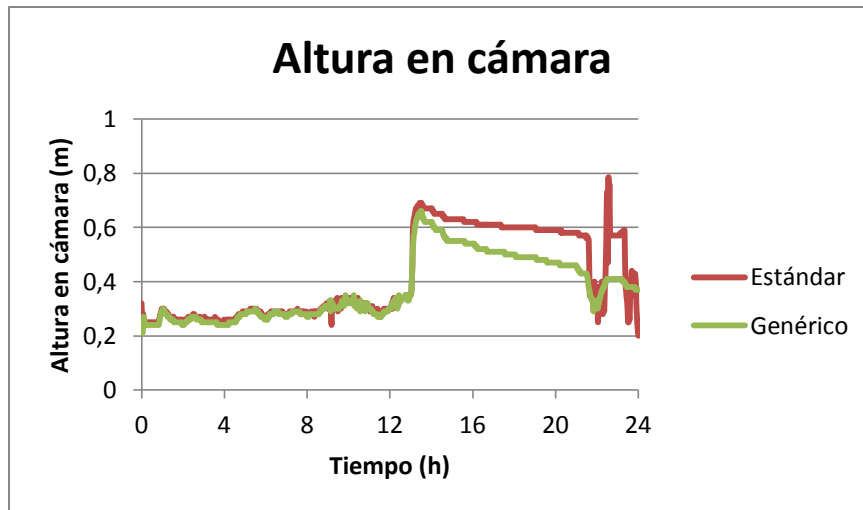
Al tener ésta velocidad alta en la tubería y una relación de llenado tan baja el número de Froude alcanza valores altos. A continuación se mostrará la siguiente cámara de inspección y su tubería correspondiente.



Gráfica 151 Altura en cámara C93B. Comparación de Métodos.

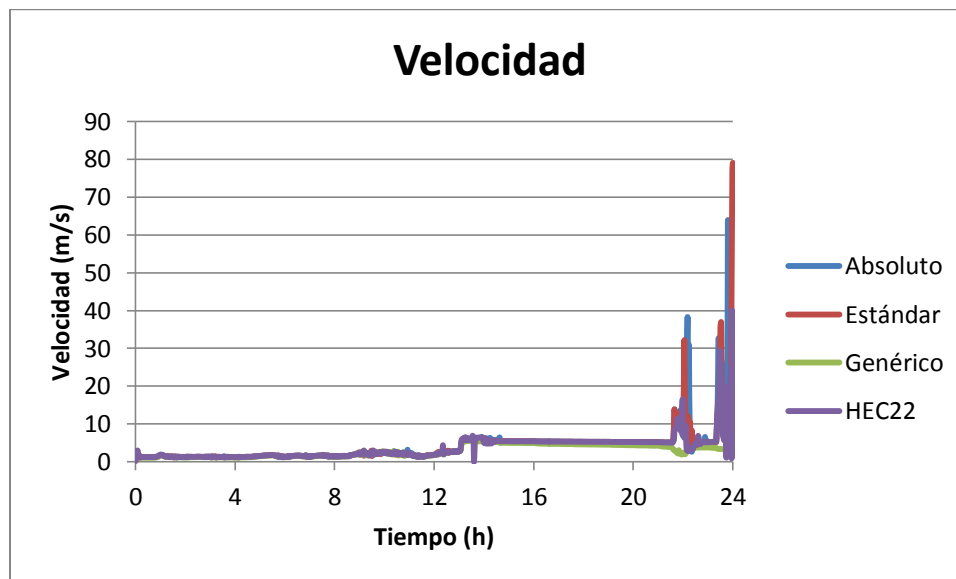


Gráfica 152 Altura en cámara C93B. Comparación de Métodos (Detalle 1).

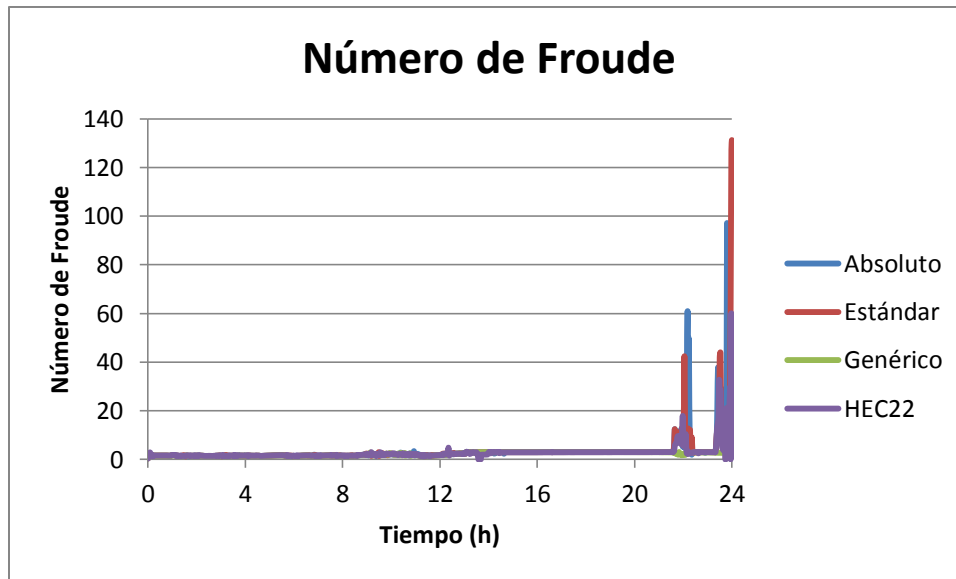


Gráfica 153 Altura en cámara C93B. Comparación de Métodos (Detalle 2).

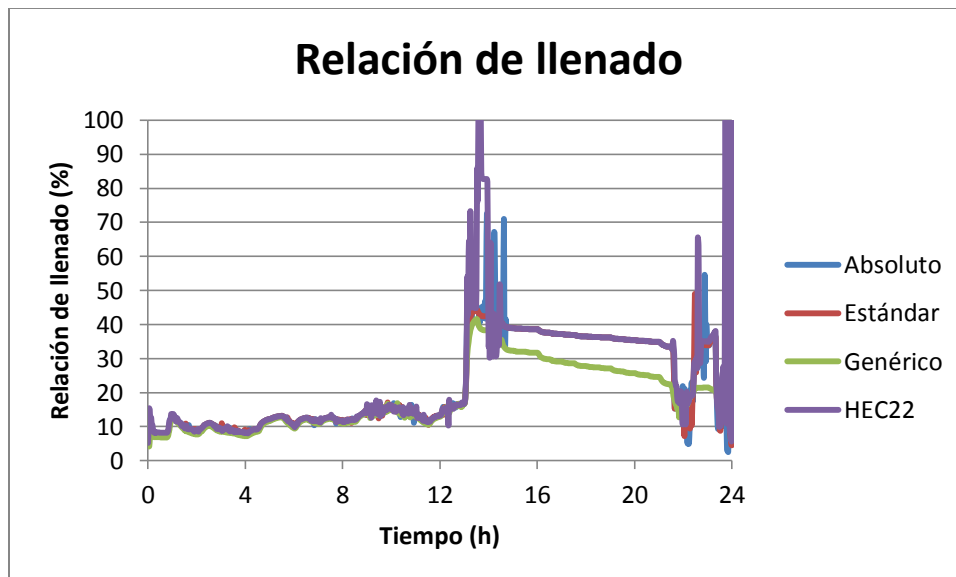
En esta modelación en específico se observa un fenómeno nunca antes visto en este proyecto grado. Se observa cómo el método HEC22 y el método Absoluto generan que la red sufra una sobrecarga. Se observa de la misma manera como el método Genérico sigue siendo el método que produce menores perturbaciones al flujo. A continuación se muestran las características de la tubería aguas abajo de esta cámara.



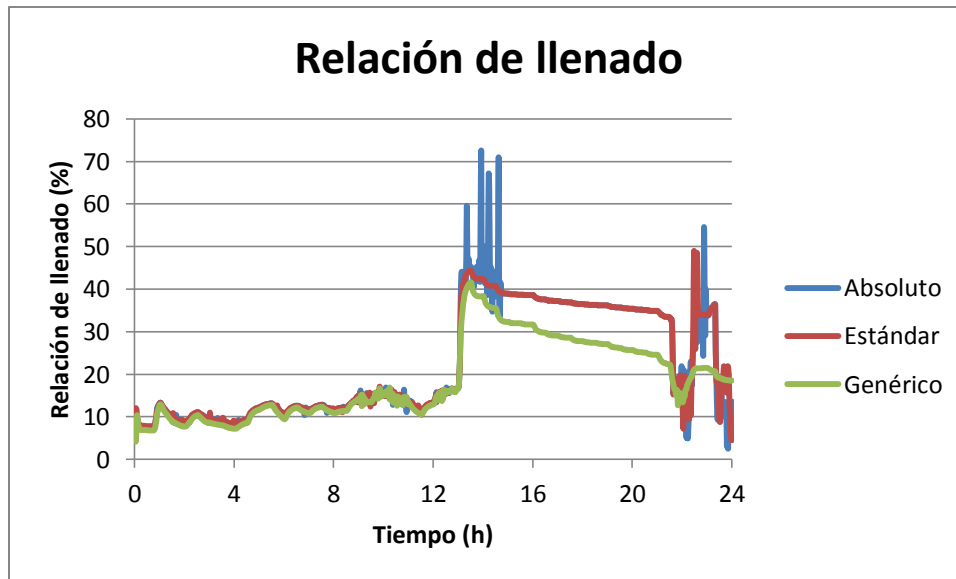
Gráfica 154 Velocidad en la Tubería TA5. Comparación de Métodos.



Gráfica 155 Número de Froude en la Tubería TA5. Comparación de Métodos.

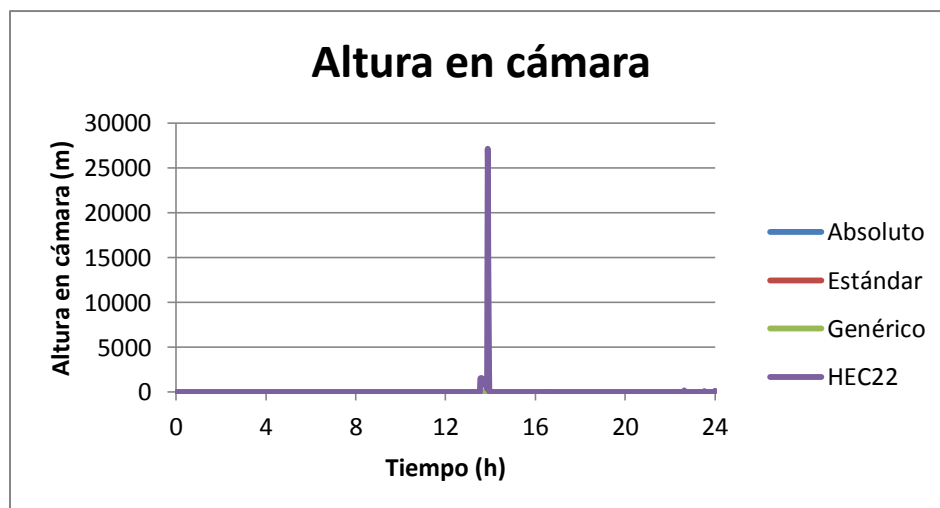


Gráfica 156 Relación de llenado en la Tubería TA5. Comparación de Métodos.

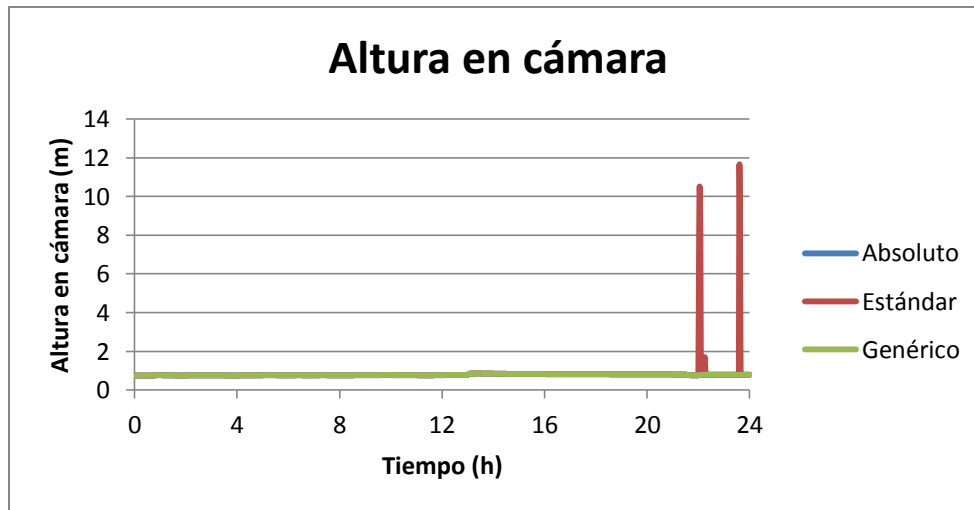


Gráfica 157 Relación de llenado en la Tubería TA5. Comparación de Métodos (Detalle 1).

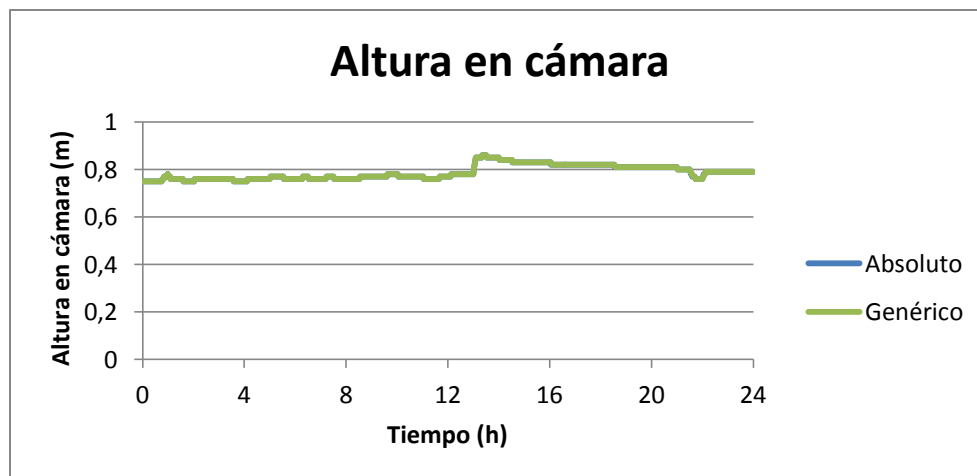
Se observa como el método HEC22 y el método Absoluto cuando sobrecargan la red producen picos en la velocidad, Número de Froude y relación de llenado. El método HEC22 presuriza la tubería aguas abajo después del proceso de sobrecarga a la red. El método Absoluto no logra presurizar la tubería mas sufre un cambio en la relación de llenado cercano al 20%. A continuación se muestra la última cámara de inspección.



Gráfica 158 Altura en cámara C80A. Comparación de Métodos.

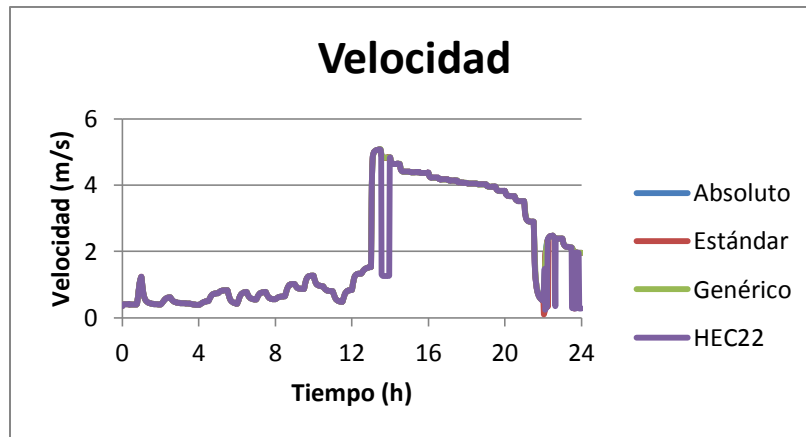


Gráfica 159 Altura en cámara C80A. Comparación de Métodos (Detalle 1).

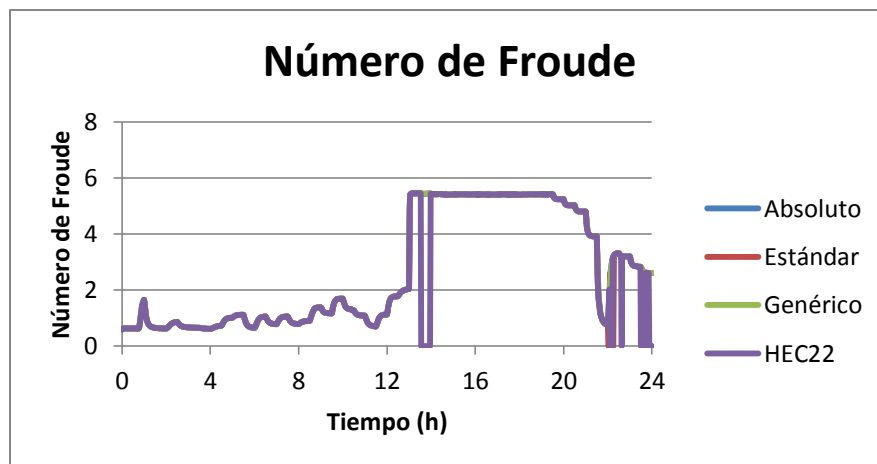


Gráfica 160 Altura en cámara C80A. Comparación de Métodos (Detalle 2).

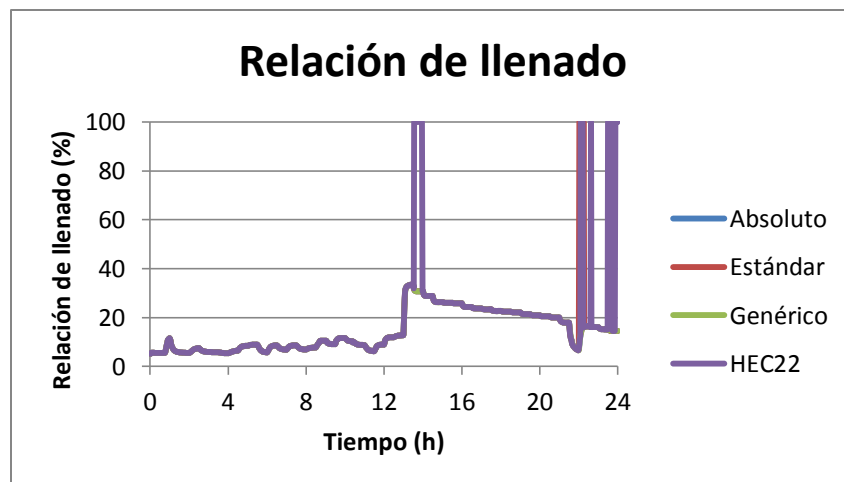
Se nota como se tiene la misma segregación de métodos de pérdidas menores en el flujo cuando éste se modelaba sin cañuelas profundas. A diferencia de la cámara de pasada se observa cómo el método HEC22 y el método Estándar siguen siendo los métodos que remueven mayor energía al flujo. A continuación se mostrarán los resultados de la tubería aguas abajo de la cámara analizada.



Gráfica 161 Velocidad en la Tubería T36. Comparación de Métodos.



Gráfica 162 Número de Froude en la Tubería T36. Comparación de Métodos.

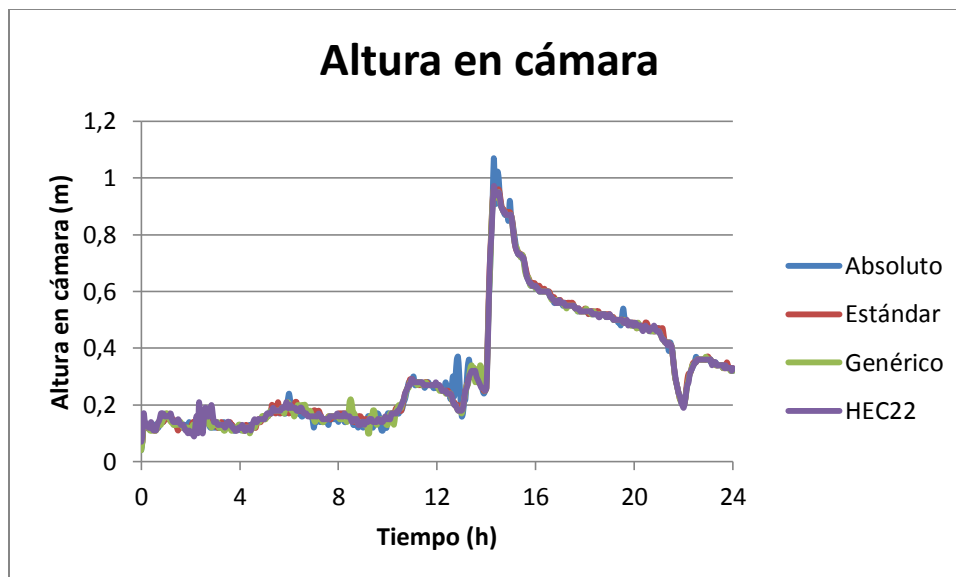


Gráfica 163 Relación de llenado en la Tubería T36. Comparación de Métodos.



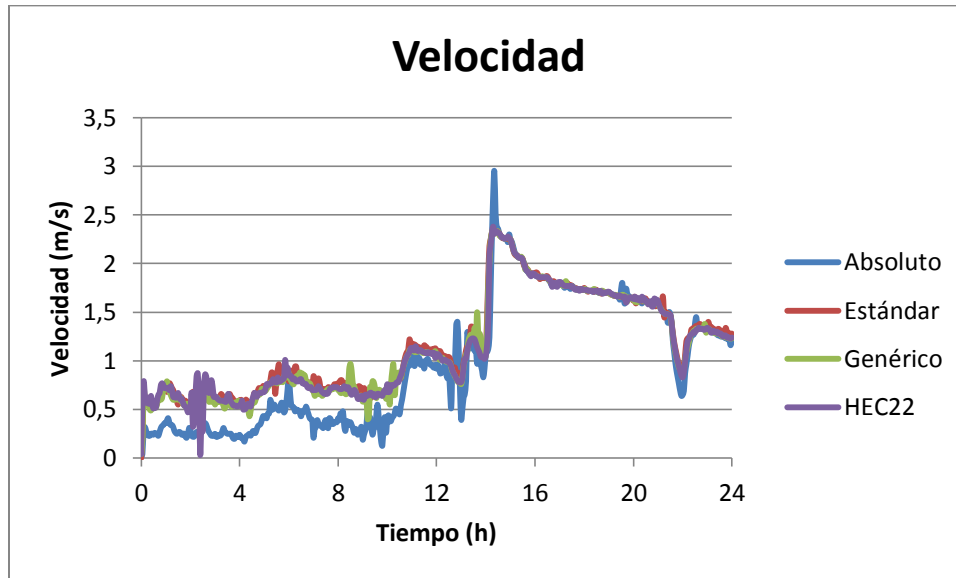
Gráfica 164 Relación de llenado en la Tubería T36. Comparación de Métodos (Detalle 1).

Se observa una diferencia abrupta entre métodos, ya que mientras el método Absoluto o Genérico tienen una relación de llenado máxima del 34% en los métodos HEC22 o Estándar se sobrecarga la red de drenaje urbano. Como conclusión de esta modelación con cañuelas profundas se observa como ésta hace que el flujo sea menos propenso a sobrecargas en el sistema., De igual forma muestra como tiende a que la tubería aguas abajo tenga una relación de llenado mínima y una velocidad máxima. A continuación se mostrarán los resultados de la modelación de Acacias-Girardot con cañuelas profundas para una mayoración de pendiente de un 20%.

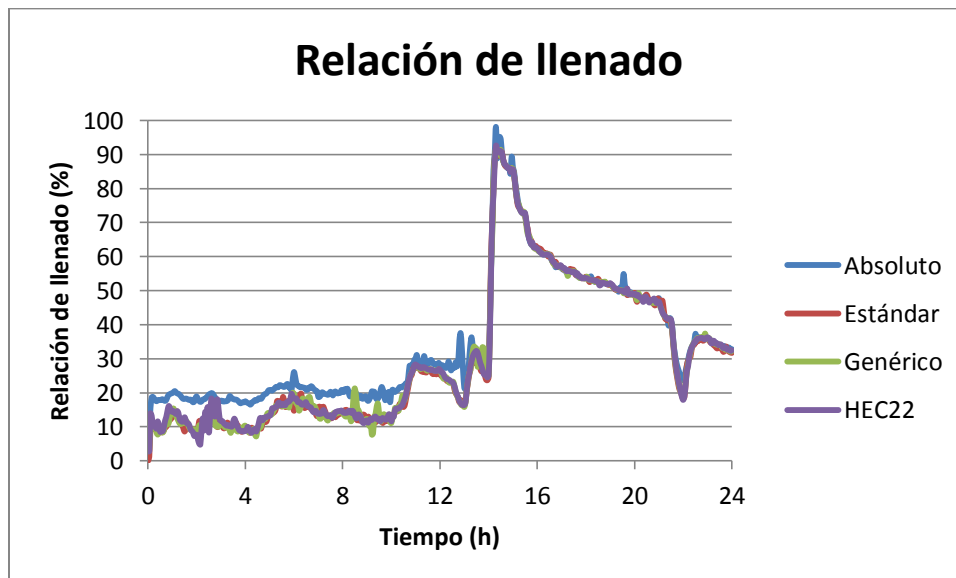


Gráfica 165 Altura en cámara A3.11. Comparación de Métodos.

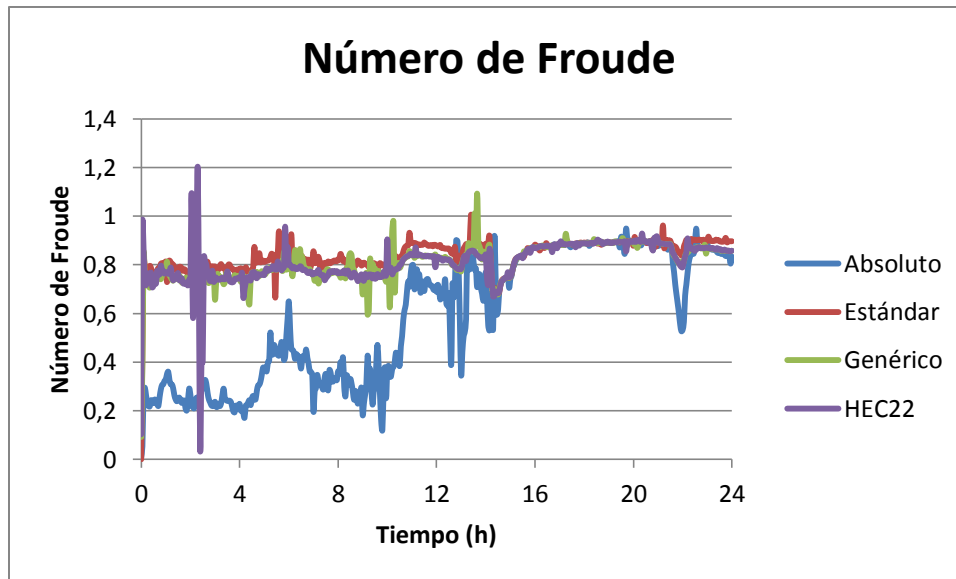
En contraposición con la modelación sin cañuelas profundas en la modelación actual ningún método de pérdidas menores hace que la red sufra una sobrecarga en algún momento de la modelación. Se observa como el método Absoluto sigue generando mayores niveles en la cámara de inspección aun cuando en esta no se produce ninguna sobrecarga. A continuación se mostrarán los resultados de la tubería aguas abajo de la cámara.



Gráfica 166 Velocidad en la Tubería T20. Comparación de Métodos.

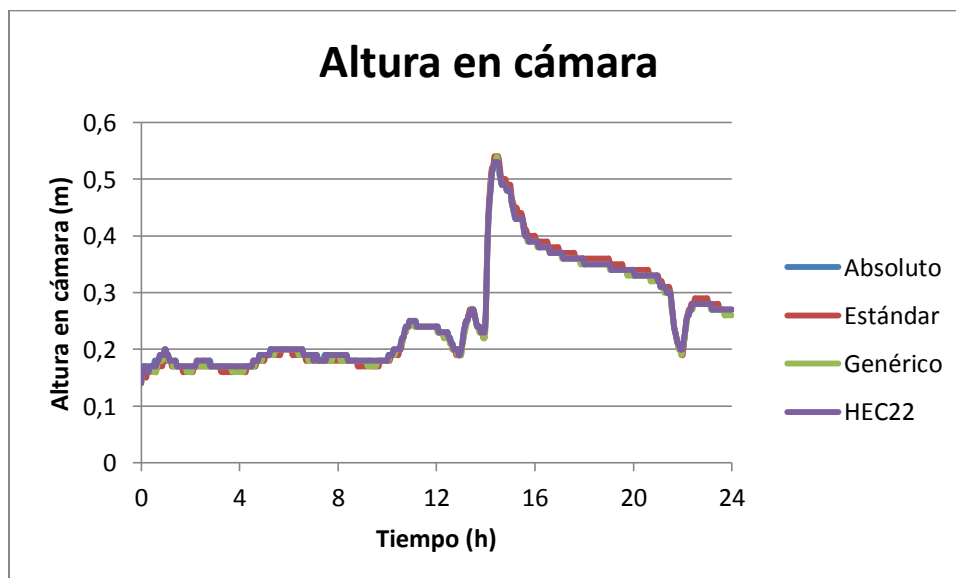


Gráfica 167 Relación de llenado en la Tubería T20. Comparación de Métodos.



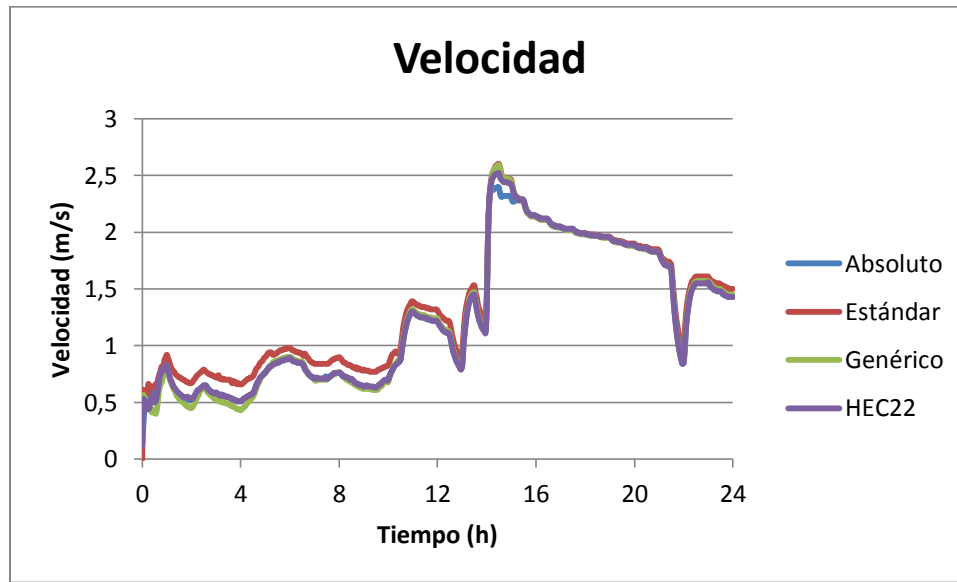
Gráfica 168 Número de Froude en la Tubería T20. Comparación de Métodos.

Se nota como el método Absoluto produce en la tubería aguas abajo una relación de llenado mayor que la de sus métodos homólogos. De la misma forma éste método genera velocidades menores en la tubería posterior a la cámara analizada al igual que un Número de Froude inferior. Los resultados obtenidos son congruentes a las modelaciones sin cañuelas profundas así que se sigue manteniendo este parámetro. A continuación se muestran los resultados de la siguiente cámara de inspección.

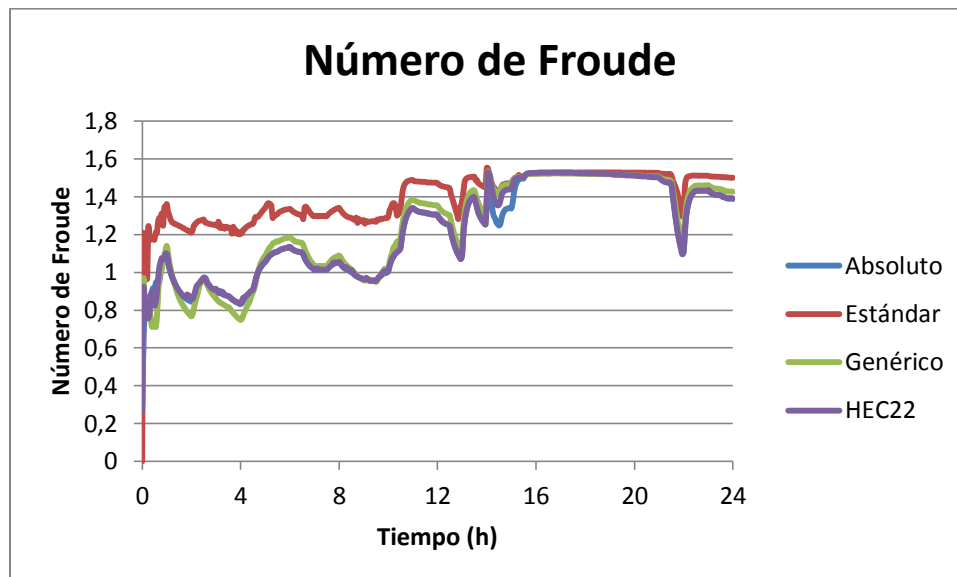


Gráfica 169 Altura en cámara A13.9. Comparación de Métodos.

Mediante el uso de cañuelas profundas en ésta cámara de inspección no se presenta ningún tipo de sobrecarga en ningún momento de la red de drenaje, a diferencia del modelo sin cañuelas profundas en el cual tanto el método HEC22 como el método Estándar hacían que la red sufriera una sobrecarga. A continuación se muestran las características de flujo de la tubería aguas abajo de la cámara de inspección.



Gráfica 170 Velocidad en la Tubería T8. Comparación de Métodos.

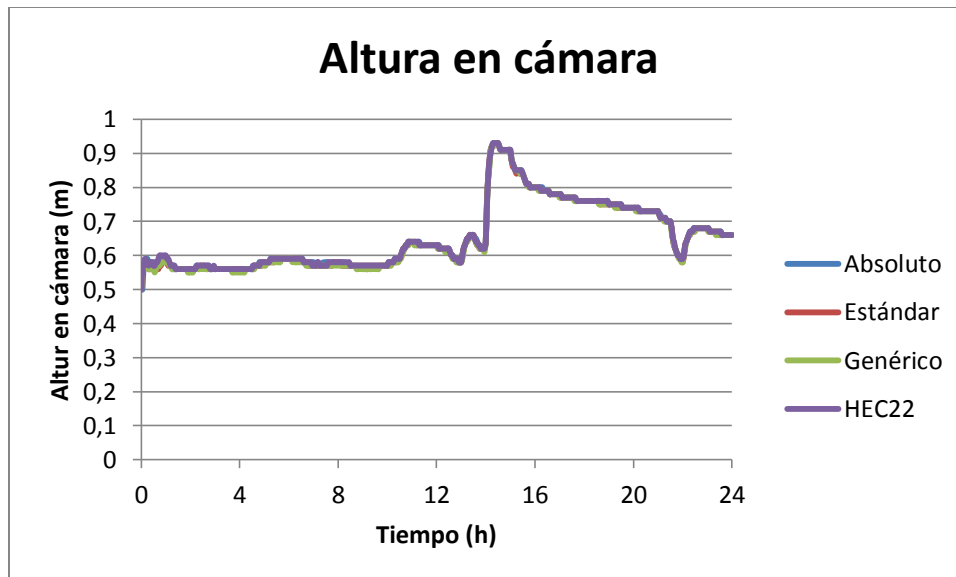


Gráfica 171 Número de Froude en la Tubería T8. Comparación de Métodos.



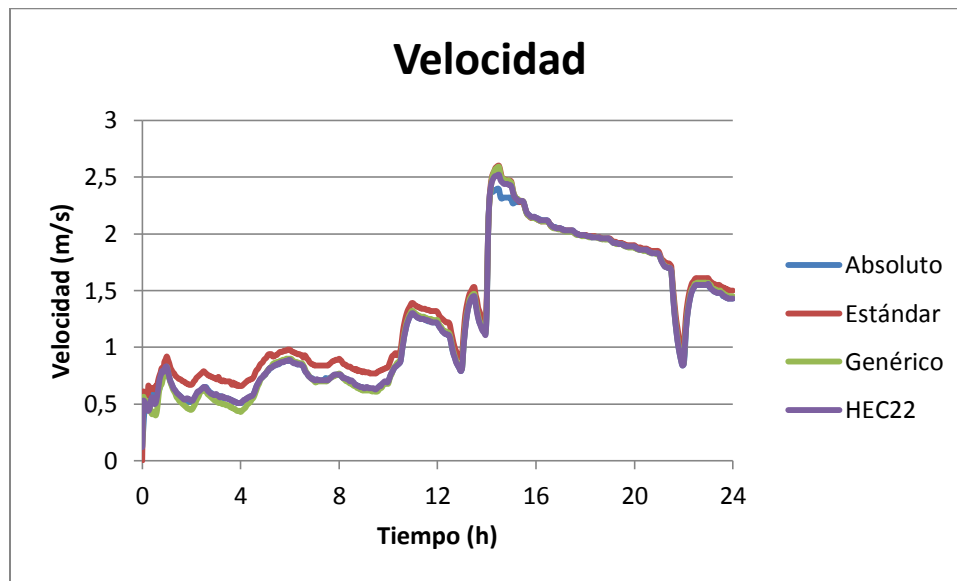
Gráfica 172 Relación de llenado en la Tubería T8. Comparación de Métodos.

Se observa como el método Estándar tiene levemente una mayor velocidad que los otros métodos de pérdidas menores repercutiendo esto en un mayor Número de Froude y una relación de llenado menor que la de los métodos homólogos. Al igual que en el modelo anterior la velocidad generada por el método Absoluto es ligeramente inferior repercutiendo en su relación de llenado y Número de Froude. A diferencia de la modelación sin cañuelas profundas en ésta sí se obtuvo diferenciación entre métodos de pérdidas menores. A continuación se muestran los resultados de la última cámara de inspección.

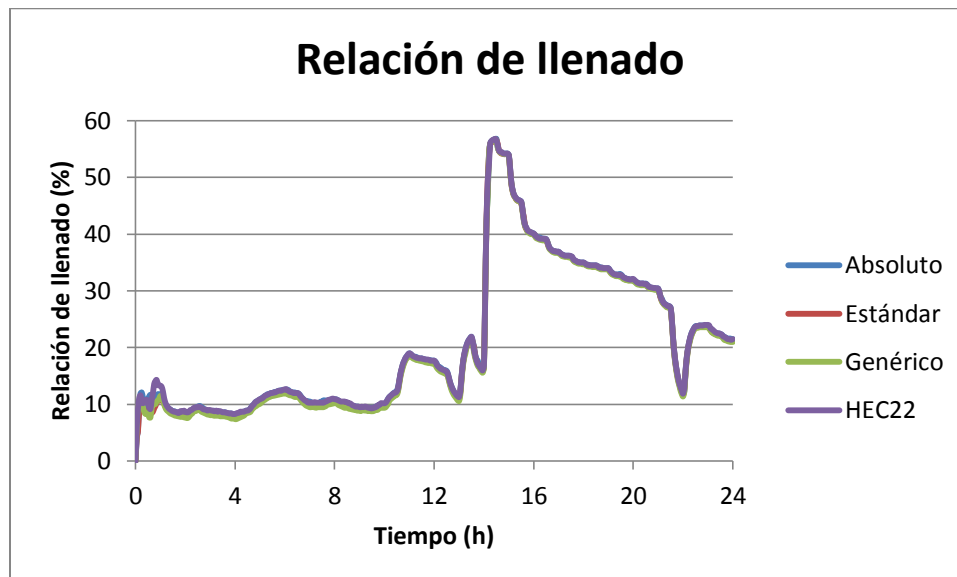


Gráfica 173 Altura en cámara TA9. Comparación de Métodos.

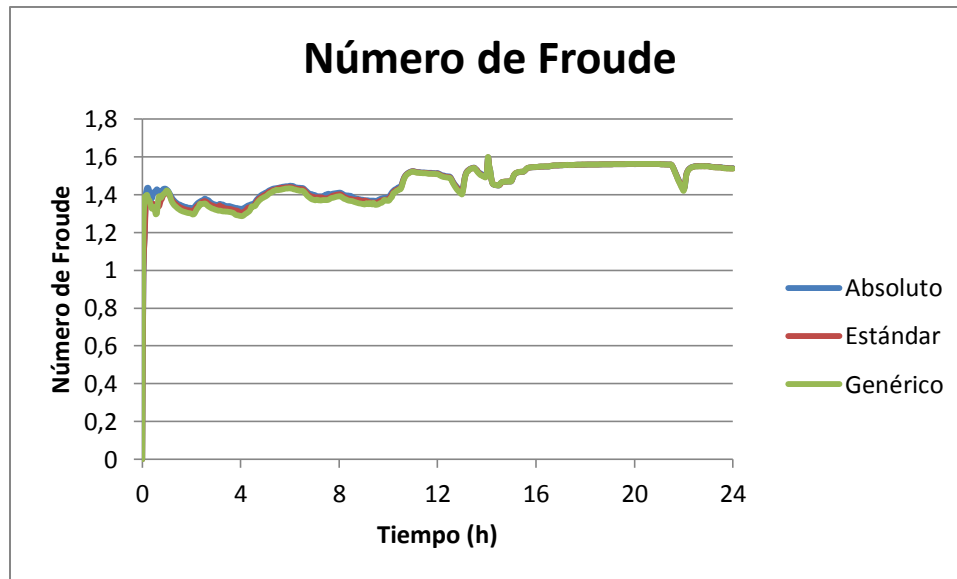
En esta modelación, al igual que en las dos anteriores, no se presenta en ningún momento sobrecarga en la red de drenaje. A diferencia de la modelación hecha sin cañuelas profundas ésta nueva modelación asegura que la cámara no va a sufrir sobrecarga y que su nivel máximo será de 0.93 metros.



Gráfica 174 Velocidad en la Tubería T180. Comparación de Métodos.



Gráfica 175 Relación de llenado en la Tubería T180. Comparación de Métodos.



Gráfica 176 Número de Froude en la Tubería T180. Comparación de Métodos.

Al igual que en la cámaras pasadas se observa como no se genera ninguna sobrecarga en la red de drenaje. No se observa todavía una diferenciación clara de métodos de pérdidas menores cuando se utilizan cañuelas profundas. Como conclusión se observó la eficiencia del uso de cañuelas profundas en el sistema de alcantarillado urbano. Para las tres cámaras analizadas se mostró como sin cañuelas profundas éstas sufrían sobrecarga con uno o dos métodos de pérdidas menores en cámaras de inspección (HEC22 y/o Estándar), a diferencia de cuando se utilizaban cañuelas profundas en las cuales se observó cómo ninguna de las cámaras analizadas sufrió este fenómeno.

6 Conclusiones y Recomendaciones

A través de las múltiples modelaciones que se han hecho en el presente Documento de Grado se observó cómo se diferencian los métodos de pérdidas menores en cámaras de inspección y como fue necesario ir mayorando la pendiente hasta un 20% para obtener resultados contundentes. Es fundamental recalcar cómo cada red de drenaje se comportaba de una manera particular; por ejemplo, la red de drenaje de Acacias-Girardot obtuvo resultados de segregación de métodos desde la primera mayoración de pendiente, dos por ciento, a diferencia de la red Prado-Medellín en la cual se tuvo que esperar hasta la modelación con mayoración de pendiente de un 5% para notar resultados. Es importante aclarar que cada una de estas redes tenía un evento de precipitación específico razón por la cual cada red es independiente de la otra. La razón por la cual se hace énfasis en aclarar que cada red es única es debido a que en cada una de éstas llegó a la misma diferenciación de métodos de pérdidas menores.

Primeramente, como se mencionó en el párrafo anterior, se pudo notar como la red de Acacias-Girardot es más sensible a cambios topológicos en la red; esto se puede afirmar debido a que ésta red arrojó resultados cuando se había mayorado sólo un 2% la pendiente. Por el contrario con la red de Prado-Medellín se tuvo que mayorar un 5% para que ésta comenzara a diferenciar los métodos de pérdidas menores en el flujo. Es fundamental recalcar que a pesar de que se tuvieron que mayorar las pendientes y que cada red es más o menos sensible a cambios topológicos se llegó a la misma diferenciación de métodos de pérdidas menores.

Desde las primeras modelaciones mayoradas se notó como el método HEC 22 hacía que se sobrecargara la red en dado momento en contra posición a sus métodos homólogos; éste fue el primer parámetro para afirmar que el método que afecta de mayor manera al flujo es el HEC22. Se observaba también en estas modelaciones que en el momento que se presentaba el evento de sobrecarga en la cámara de inspección, la tubería aguas abajo bajaba su velocidad de manera inmediata, su Número de Froude se reducía y su relación de llenado aumentaba hasta llevar al flujo a condiciones de presurización.

En las primeras modelaciones también se observaba, aunque no de manera tan clara, como el método Absoluto a pesar de que no generara sobrecargas en la cámara de inspección producía que la tubería aguas abajo tuviera una menor velocidad que la que se obtenía con otros métodos de pérdidas menores. Al tener una velocidad menor por asociación de características de flujo se tenía un Número de Froude menor y una relación de llenado mayor. Esta última es de especial cuidado porque como se clarificó en la sección de marco teórico lo que se desea evitar en todas las redes de drenaje urbano es que se sobrecargue ya que estas pueden producir en la población problemas de salud pública.

De la misma manera en las primeras modelaciones también se notaba como ligeramente el método Genérico hacía que la tubería aguas abajo presentara una velocidad tenuemente mayor que la obtenida con sus otros métodos homólogos. Esta diferencia generaba un valor levemente menor en la relación de llenado y un valor mayor en el Número de Froude.

Al ir avanzando en las modelaciones se observó como el método Estándar era el segundo método en generar sobrecargas a las redes de drenaje. Esto se descubrió ya que en ciertas modelaciones cuando el método HEC22 sobrecargaba la cámara de inspección se revisaban las modelaciones sin ese método. Se observó que, al igual que el método HEC22, el método Estándar producía sobrecargas a la cámara y su tubería aguas abajo. Generando esto en el ducto una disminución súbita de velocidad, menor Número de Froude y un aumento constante en la relación de llenado hasta que la tubería fluyera bajo presión.

En las modelaciones posteriores se fue observando como en ciertas cámaras de inspección cuando se mayoraba la pendiente la velocidad disminuía. Esto fue debido a que en ciertas cámaras de inspección al mayorar la pendiente el nivel de ésta aumentaba generando así que fuese más difícil para el flujo desplazarse. En las modelaciones finales se logró observar cómo para ambas redes de drenaje se presentó la misma diferenciación de métodos de pérdidas menores.

Con respecto a la modelación mayorada un 20% para ambas redes de drenaje se obtuvieron gráficas claves para el presente documento. En estas gráficas se observaba como se era consistente con que el método HEC 22 seguido por el método Estándar eran los que removían una mayor energía al flujo; no obstante, en estas gráficas también se observaba como el método Absoluto producía mayores niveles en las cámaras de inspección y que el método que menos perturbaba al flujo era el método Genérico. Siendo así estos resultados se observa como el Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS-2011), promueve los métodos que generan mayores pérdidas en el sistema para tener así un factor de seguridad en la modelación de los sistemas de alcantarillado.

Ahora bien con respecto al uso de cañuelas profundas en los sistemas de alcantarillado se observaron las diferencias absolutas entre modelaciones con cañuelas y sin cañuelas. Por ejemplo, en la red de Acacias-Girardot en todas las modelaciones en las cuales las cámaras de inspección no tenían cañuelas profundas se presentó el evento de sobrecarga y en algunas de estas no sólo con un método de pérdidas menores sino con dos, usualmente método HEC22 y Estándar. A diferencia de cuando estas mismas redes se modelaban con cañuelas profundas en las cuales no se obtuvo para ninguna de las cámaras analizadas el fenómeno de sobrecarga en la red de drenaje.

En las modelaciones con cañuela profunda no se observó una diferenciación clara entre métodos de pérdidas menores. No obstante, se observó cómo el método HEC22 seguía siendo el método que hacía perder más energía al flujo cuando éste transitaba a través de las cámaras de inspección. De este punto en adelante es complejo decir cual método afecta más al flujo ya que en algunas modelaciones parecía que era el método Estándar y en otras el método Absoluto.

Es importante recalcar que todos estos métodos de pérdidas menores fueron hallados mediante pruebas en laboratorios haciendo así que todos estos métodos sean netamente empíricos. Al no existir métodos que sean físicamente basados todos estos modelos van a ser aproximaciones a cómo se comportaría el flujo; nunca se tendría el comportamiento exacto en las cámaras de inspección y en cómo estas afectan al sistema de alcantarillado

Como sugerencias se recomienda que para futuras investigaciones en el tema se haga un mayor énfasis en cañuelas profundas y la diferenciación de estas con los métodos de pérdidas menores. Aparte de esto se recomienda utilizar un mayor número de redes de alcantarillado, esto con el fin de obtener patrones en las cámaras cuando se utilizan cañuelas profundas. Otra sugerencia para un próximo trabajo en el tema de investigación es que las pendientes se también se reduzcan para poder tener así un mayor número de resultados.

7 Bibliografía

Escuela de Ingeniería de Antioquia. (s.f.). *Mecánica de Fluidos y Recursos Hidráulicos*. Recuperado el 20 de Abril de 2013, de Clasificación del flujo como laminar o turbulento: http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/laminar_turbulento.htm

ARECO. (2013). *Manhole/Access Covers and Frames*. Recuperado el 25 de mayo de 2013, de <http://www.areco.co.uk/shop/manhole-covers.asp>

Bentley, S. G. (2013). Standar headloss coeficients.

Empresas Públicas de Medellín. (2009). *Guía para el diseño Hidráulico de Redes de Alcantarillado*. Medellín.

Gowers, E. (1995). The anatomy of Rome from Capitol to Cloaca. *Journal of Roman Studies*, 23-32.

Grewe, K. (2009). *Die Reliefdarstellung einer antiken Steinsägemaschine aus Hierapolis in Phrygien und ihre Bedeutung für die Technikgeschichte. Internationale Konferenz 13.–16. Juni 2007 in Istanbul*.

Hagger, W. (2002). Supercritical Flow across Sewer Manholes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1-4.

KESSEL. (2012). Komfort inspection chambers d 400. Lenting, Alemania.

Ministerio de Desarrollo Económico. (2011). *Reglamento de agua potable y saneamiento básico*. Bogotá.

Paez, D. a. (2010). Análisis de sensibilidad de ña respues hidráulica de sistemas de alcantarillado a variaciones del diametro y la rugosidad. Bogotá.

Saldarriaga, J. G. (10 de marzo de 2013). Sistemas de drenaje urbano. *Flujo gradualmente variado en tuberías parcialmente llenas*. Bogotá.