

**ESTIMACION DE LA VARIACION DEL INDICE DE RESILIENCIA EN UN
SECTOR PILOTO DE LA RED DE DISTRIBUCION DE LA CIUDAD DE
BUCARAMANGA, CUANDO SE INSTALAN VALVULAS REGULADORAS DE
PRESION Y SU POSIBLE AFECTACIÓN EN LA GENERACIÓN DE DAÑOS**

DAVID RICARDO CHAPARRO TRIANA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2012

**ESTIMACION DE LA VARIACION DEL INDICE DE RESILIENCIA EN UN
SECTOR PILOTO DE LA RED DE DISTRIBUCION DE LA CIUDAD DE
BUCARAMANGA, CUANDO SE INSTALAN VALVULAS REGULADORAS DE
PRESION Y SU POSIBLE AFECTACIÓN EN LA GENERACIÓN DE DAÑOS**

DAVID RICARDO CHAPARRO TRIANA

Trabajo de investigación, requisito para optar al título de
INGENIERO CIVIL

Director:

LUIS FERNANDO CASTAÑEDA GALVIS

M. Eng, Ingeniero civil.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2012

DEDICATORIA

Le doy gracias a Dios y la Virgen por ser fuente de iluminación y energía, a mis papás por el apoyo y la confianza que me brindaron, a mi hermana por su compañía y colaboración, a mi novia por los consejos, la comprensión y tiempo dedicado y a las demás personas que estuvieron presentes durante toda mi formación como ingeniero, ya que sin ellas no hubiera sido fácil poder salir adelante.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	25
2. OBJETIVOS	29
2.1 OBJETIVO GENERAL	29
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS	29
3. CONCEPTOS FUNDAMENTALES	30
3.1 DISEÑO DE REDES	30
3.2 RESTRICCIONES HIDRÁULICAS	30
3.3 RESTRICCIONES COMERCIALES	31
3.4 RESTRICCIONES ADICIONALES	31
3.5 TIPOS DE FLUJO	31
3.5.1 Definición	31
3.5.2 FLUJO LAMINAR ($Re > 2200$)	31
3.5.3 FLUJO TURBULENTO ($Re < 4500$)	32
3.6 SISTEMAS DE ECUACIONES EMPLEADAS	32
3.6.1 ECUACION DE CONTINUIDAD	32
3.6.2 DARCY – WEISBACH	32
3.6.3 FACTOR DE FRICCIÓN	33
3.6.4 NUMERO DE REYNOLDS	34
3.6.5 PERDIDAS DE ENERGIA POR FRICCIÓN	34
3.6.6 DIAGRAMA DE MOODY	36
3.6.7 PÉRDIDAS MENORES	37
3.7 CONFIABILIDAD HIDRAULICA DE LA RED	37
3.7.1 Definición	37
3.7.2 REGIMEN DE CAMBIO	39

3.7.2.1 INDICE DE RESILIENCIA	39
3.7.2.2 RESILIENCIA DE LA RED	40
3.7.2.3 POTENCIA UNITARIA DE UNA TUBERIA	41
3.7.2.4 CONFIABILIDAD PROMEDIO	41
4. DISEÑO SOLUCION	43
4.1 NORMALIZACION DE LA FUNCION OBJETIVO	45
4.2 FUNCION OBJETIVO	46
5. SOFTWARE A UTILIZAR	47
5.1 EPANET 2.0	47
5.1.1 Características del modelo hidráulico	48
6. RESULTADOS	50
6.1 VÁLVULA V_18441	50
6.1.1 CARACTERIZACION	51
6.1.2 Ir Vs Número de Cambios	52
6.1.3 CU Vs Número de Cambios	53
6.1.4 Rango de Presiones Vs Número de Cambios	53
6.2 VÁLVULA V_19459	54
6.2.1 CARACTERIZACION	55
6.2.2 Ir Vs Número de Cambios	56
6.2.3 CU Vs Número de Cambios	57
6.2.4 Rango de Presiones Vs Número de Cambios	57
6.3 VÁLVULA V_18457	58
6.3.1 CARACTERIZACION	58
6.3.2 Ir Vs Número de Cambios	60
6.3.3 CU Vs Número de Cambios	60
6.3.4 Rango de Presiones Vs Número de Cambios	61
6.4 VÁLVULA V_18529	62

6.4.1 CARACTERIZACION	62
6.4.2 Ir Vs Número de Cambios	64
6.4.3 CU Vs Número de Cambios	64
6.4.4 Rango de Presiones Vs Número de Cambios	65
7. ANALISIS DE RESULTADOS	66
8. CONCLUSIONES	70
9. BIBLIOGRAFIA	72
ANEXOS	75

LISTA DE GRAFICAS

	Pág.
Grafica 1: Diagrama de moody.	36
Grafica 2: porcentaje de tubos válvula 18441	51
Grafica 3: Porcentaje Rugosidad tubos. Válvula 18441	52
Grafica 4: Índice de Resiliencia versus Numero de Cambios. Válvula 18441	52
Grafica 5: Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios. Válvula 18441	53
Grafica 6: Rango de Presiones versus Numero de Cambios. Válvula 18441	53
Grafica 7: Porcentaje de tubos Valvula_19459	55
Grafica 8: Porcentaje rugosidad tubos Valvula_19459	56
Grafica 9: Índice de Resiliencia versus Numero de Cambios. Valvula_19459	56
Grafica 10: Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios. Valvula_19459	57
Grafica 11: Rango de Presiones versus Numero de Cambios. Valvula_19459	57
Grafica 12: Porcentaje tubos Válvula V_18457	59
Grafica 13: Porcentaje Rugosidad tubos Válvula V_18457	59
Grafica 14: Índice de Resiliencia versus Numero de Cambios. Válvula V_18457	60
Grafica 15: Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios. Válvula V_18457	60
Grafica 16: Rango de Presiones versus Numero de Cambios. Válvula V_18457	61
Grafica 17: Porcentaje tubos Válvula V_18529	63
Grafica 18: Porcentaje Rugosidad tubos Válvula V_18529	63
Grafica 19: Índice de resiliencia versus Numero de Cambios Válvula V_18529	64

Grafica 20: Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios Válvula V_18529	64
Grafica 21: Rango de Presiones versus Numero de Cambios Válvula V_18529	65
Grafica 22: Porcentaje tubos Válvula V_3632	79
Grafica 23: Porcentaje Rugosidad tubos Válvula V_3632	79
Grafica 24: Índice de Resiliencia versus Numero de Cambios. Válvula V_3632	80
Grafica 25: Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios. Válvula V_3632	80
Grafica 26: Rango de Presiones versus Numero de Cambios. Válvula V_3632	81
Grafica 27: Porcentaje tubos Válvula V_3647	82
Grafica 28: Porcentaje Rugosidad tubos Válvula V_3647	83
Grafica 29: Índice de Resiliencia versus Numero de Cambios. Válvula V_3647	83
Grafica 30: Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios. Válvula V_3647	84
Grafica 31: Rango de Presiones versus Numero de Cambios. Válvula V_3647	84
Grafica 32: Porcentaje tubos Válvula V_3762	86
Grafica 33: Porcentaje Rugosidad tubos Válvula V_3762	86
Grafica 34: Índice de Resiliencia versus Numero de Cambios Válvula V_3762	87
Grafico 35: Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios Válvula V_3762	87
Graficas 36: Rango de Presiones versus Numero de Cambios Válvula V_3762	88
Graficas 37: Porcentaje tubos válvula v_5173	89
Grafica 38: Porcentaje Rugosidad tubos válvula v_5173	90

Grafica 39: Índice de Resiliencia versus Numero de Cambios. Válvula v_5173	90
Grafica 40: Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios. Válvula v_5173	91
Graficas 41: Rangos de Presiones versus Numero de Cambios. Válvula v_5173	91
Grafica 42: Porcentaje tubos Válvula v_5969	93
Grafica 43: Porcentaje Rugosidad tubos VALVULA V_5969	93
Grafica 44: índice de resiliencia versus Numero de Cambios VALVULA V_5969	94
Grafica 45: Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios VALVULA V_5969	94
Grafica 46: Rango de Presiones versus Numero de Cambios VALVULA V_5969	95
Grafica 47: Porcentaje tubos válvula v_6006	96
Grafica 48: Porcentaje Rugosidad tubos válvula v_6006	97
Grafica 49: índice de Resiliencia versus Numero de Cambios válvula v_6006	97
Grafica 50: Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios válvula v_6006	98
Grafica 51: Rango de Presiones versus Numero de Cambios válvula v_6006	98
Grafica 52: Porcentaje tubos VALVULA V_18423	100
Grafica 53: Porcentaje Rugosidad tubos VALVULA V_18423	100
Grafica 54: índice de Resiliencia versus Numero de Cambios VALVULA V_18423	101
Grafica 55: Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios VALVULA V_18423	102
Grafica 56: Rango de Presiones versus Numero de Cambios VALVULA V_18423	102

Grafica 57: Porcentaje tubos VALVULA V_18432	103
Grafica 58: Porcentaje Rugosidad tubos VALVULA V_18432	104
Graficas 59: índice de Resiliencia versus Numero de Cambios VALVULA V_18432	104
Graficas 60: Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios VALVULA V_18432	105
Graficas 61: Rango de Presiones versus Numero de Cambios VALVULA V_18432	105
Grafica 62: Porcentaje tubos Válvula V_18435	107
Grafica 63: Porcentaje Rugosidad tubos Válvula V_18435	107
Grafica 64: índice de Resiliencia versus Numero de Cambios Válvula V_18435	108
Grafica 65: índice de Resiliencia versus Numero de Cambios Válvula V_18435	108
Grafica 66: Rango de Presiones versus Numero de Cambios Válvula V_18435	109
Grafica 67: Porcentaje tubos VALVULA V_18436	110
Grafica 68: Porcentaje de Rugosidad tubos VALVULA V_18436	111
Grafica 69: índice de Resiliencia versus Numero de Cambios VALVULA V_18436	112
Grafica 70: Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios VALVULA V_18436	112
Grafica 71: Rango de Presiones versus Numero de Cambios VALVULA V_18436	113
Grafica 72: Porcentaje tubos VALVULA V_18439	114
Grafica 73: Porcentaje Rugosidad tubos VALVULA V_18439	115
Grafica 74: índice de Resiliencia versus Numero de Cambios VALVULA V_18439	115
Grafica 75: Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios VALVULA V_18439	116

Grafica 76: Rango de Presiones versus Numero de Cambios VALVULA V_18439	116
Grafica 77: Porcentaje tubos VALVULA V_18440	118
Grafica 78: Porcentaje Rugosidad tubos VALVULA V_18440	118
Grafica 79: índice de Resiliencia versus Numero de Cambios VALVULA V_18440	119
Grafica 80: Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios VALVULA V_18440	119
Graficas 81: Rango de Presiones versus Numero de Cambios VALVULA V_18440	120
Grafica 82: Porcentaje tubos válvula v_18442	121
Grafica 83: Porcentaje Rugosidad tubos válvula v_18442	122
Grafica 84: índice de Resiliencia versus Numero de Cambios válvula v_18442	122
Grafica 85: Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios válvula v_18442	123
Grafica 86: Rango de Presiones versus Numero de Cambios válvula v_18442	123
Grafica 87: Porcentaje tubos VALVULA V_18443	125
Grafica 88: Porcentaje Rugosidad tubos VALVULA V_18443	125
Graficas 89: Variación índice de Resiliencia versus Numero de Cambios VALVULA V_18443	126
Grafica 90: Variación Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios válvula v_18443	126
Grafica 91: Variación Rango de Presiones versus Numero de Cambios VALVULA V_18443	127
Grafica 92: Porcentaje tubos VALVULA V_18445	128
Grafica 93: Porcentaje Rugosidad tubos VALVULA V_18445	129
Grafica 94: Variación índice de Resiliencia versus Numero de Cambios VALVULA V_18445	129

Grafica 95: Variación Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios VALVULA V_18445	130
Grafica 96: Variación Rango de Presiones versus Numero de Cambios VALVULA V_18445	130
Grafica 97: Porcentaje tubos VALVULA V_18448	132
Grafica 98: Porcentaje Rugosidad VALVULA V_18448	132
Grafica 99: variación índice de Resiliencia versus Numero de Cambios VALVULA V_18448	133
Grafica 100: variación Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios VALVULA V_18448	133
Grafica 101: variación Rango de Presiones versus Numero de Cambios VALVULA V_18448	134
Grafica 102: Porcentaje tubos válvula v_18549	135
Grafica 103: Porcentaje Rugosidad tubos válvula v_18549	136
Grafica 104: variación índice de Resiliencia versus Numero de Cambios válvula v_18549	136
Grafica 105: variación Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios válvula v_18549	137
Grafica 106: variación Rango de Presiones versus Numero de Cambios válvula v_18549	137
Grafica 107: Porcentaje tubos VALVULA V_18550	139
Grafica 108: Porcentaje Rugosidad tubos VALVULA V_18550	139
Grafica 109: variación índice de Resiliencia versus Numero de Cambios VALVULA V_18550	140
Grafica 110: variación Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios VALVULA V_18550	140
Grafica 111: variación Rango de Presiones versus Numero de Cambios VALVULA V_18550	141
Grafica 112: Porcentaje tubos VALVULA V_18820	142
Grafica 113: Porcentaje Rugosidad tubos VALVULA V_18820	143

Grafica 114: variación índice de Resiliencia versus Numero de Cambios VALVULA V_18820	143
Grafica 115: variación Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios VALVULA V_18820	144
Grafica 116: Variación Rango de Presiones versus Numero de Cambios VALVULA V_18820	144
Grafica 117: Porcentaje tubos VALVULA V_18945	146
Grafica 118: Porcentaje Rugosidad tubos VALVULA V_18945	146
Grafica 119: variación índice de Resiliencia versus Numero de Cambios VALVULA V_18945	147
Grafica 120: variación Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios VALVULA V_18945	147
Grafica 121: variación Rango de Presiones versus Numero de Cambios VALVULA V_18945	148
Grafica 122: Porcentaje tubos VALVULA V_18946	149
Grafica 123: Porcentaje de Rugosidad VALVULA V_18946	150
Grafica 124: variación índice de Resiliencia versus Numero de Cambios VALVULA V_18946	150
Grafica 125: variación Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios VALVULA V_18946	151
Grafica 126: Variación Rango de Presiones versus Numero de Cambios VALVULA V_18946	151
Grafica 127: Porcentaje tubos VALVULA V_19110	153
Grafica 128: Porcentaje Rugosidad tubos VALVULA V_19110	153
Grafica 129: variación índice de Resiliencia versus Numero de Cambios VALVULA V_19110	154
Grafica 130: variación Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios VALVULA V_19110	154
Grafica 131: variación Rango de Presiones versus Numero de Cambios VALVULA V_19110	155

Grafica 132: Porcentaje de tubos VALVULA V_19112	156
Grafica 133: Porcentaje de Rugosidad tubos VALVULA V_19112	157
Grafica 134: variación índice de Resiliencia versus Numero de Cambios VALVULA V_19112	157
Grafica 135: variación Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios VALVULA V_19112	158
Grafica 136: variación Rango de Presiones versus Numero de Cambios VALVULA V_19112	158
Grafica 137: Porcentaje tubos VALVULA V_19113	160
Grafica 138: Porcentaje Rugosidad tubos VALVULA V_19113	160
Grafica 139: variación índice de Resiliencia versus Numero de Cambios VALVULA V_19113	161
Grafica 140: variación Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios VALVULA V_19113	161
Grafica 141: variación Rango de Presiones versus Numero de Cambios VALVULA V_19113	162
Grafica 142: Porcentaje tubos VALVULA V_19115	163
Grafica 143: Porcentaje Rugosidad tubos VALVULA V_19115	164
Grafica 144: variación índice de Resiliencia versus Numero de Cambios VALVULA V_19115	164
Grafica 145: variación Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios VALVULA V_19115	165
Grafica 146: variación Rango de Presiones versus Numero de Cambios VALVULA V_19115	165

LISTA DE RED

	Pág.
RED 1: Válvula V_18441	50
RED 2: Valvula_19459	54
RED 3: Válvula V_18457	58
RED 4: Válvula V_18529	62
RED 5: Válvula v_3632	78
RED 6: válvula v_3647	81
RED 7: VALVULA V_3762	85
RED 8: Válvula V_5173	88
RED 9: VALVULA V_5969	92
RED 10: válvula v_6006	95
RED 11: VALVULA V_18423	99
RED 12: VALVULA V_18432	102
RED 13: Válvula V_18435	106
RED 14: VALVULA V_18436	109
RED 15: VALVULA V_18439	113
RED 16: VALVULA V_18440	117
RED 17: valvula v_18442	120
RED 18: VALVULA V_18443	124
RED 19: VALVULA V_18445	127
RED 20: VALVULA V_18448	131
RED 21: válvula v_18549	134
RED 22: VALVULA V_18550	138
RED 23: VALVULA V_18820	141
RED 24: VALVULA V_18945	145
RED 25: VALVULA V_18946	148
RED 26: VALVULA V_19110	152

RED 27: VALVULA V_19112	155
RED 28: VALVULA V_19113	159
RED 29: VALVULA V_19115	162

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Rango diámetros válvula 18441	51
Tabla 2: Rangos rugosidad válvula 18441	51
Tabla 3: Rango diámetros Valvula_19459	55
Tabla 4: Rangos rugosidad Valvula_19459	55
Tabla 5: Rango diámetros Válvula V_18457	58
Tabla 6: Rangos rugosidad Válvula V_18457	59
Tabla 7: Rango diámetros Válvula V_18529	62
Tabla 8: Rangos rugosidad Válvula V_18529	63
Tabla 9	75
Tabla 10.	76
Tabla 11: Rango diámetros Válvula V_3632	78
Tabla 12: Rangos Rugosidad Válvula V_3632	79
Tabla 13: Rango diámetros Válvula V_3647	82
Tabla 14: Rangos rugosidad Válvula V_3647	82
Tabla 15: Rango diámetros Válvula V_3762	85
Tabla 16: Rango Rugosidad Válvula V_3762	86
Tabla 17: Rango diámetros VALVULA V_5173	89
Tabla 18: Rangos rugosidad VALVULA V_5173	89
Tabla 19: Rango diámetros VALVULA V_5969	92
Tabla 20: Rango rugosidad VALVULA V_5969	93
Tabla 21: Rango diámetros válvula v_6006	96
Tabla 22: Rango Rugosidades válvula v_6006	96
Tabla 23: Rango diámetros VALVULA V_18423	99
Tabla 24: Rango Rugosidad VALVULA V_18423	100
Tabla 25: Rango diámetros VALVULA V_18432	103
Tabla 26: Rango Rugosidad tubos VALVULA V_18432	103

Tabla 27: Rango diámetros Válvula V_18435	106
Tabla 28: Rangos Rugosidad tubos Válvula V_18435	107
Tabla 29: Rango diámetros VALVULA V_18436	110
Tabla 30: Rangos Rugosidad tubos VALVULA V_18436	111
Tabla 31: Rango de Presiones VALVULA V_18439	114
Tabla 32: Rango Rugosidades tubos VALVULA V_18439	114
Tabla 33: Rango diámetros VALVULA V_18440	117
Tabla 34: Rangos Rugosidad VALVULA V_18440	118
Tabla 35: Rango diámetros válvula v_18442	121
Tabla 36: Rangos Rugosidad tubos válvula v_18442	121
Tablas 37: Rango diámetros VALVULA V_18443	124
Tabla 38: Rango Rugosidad tubos VALVULA V_18443	125
Tabla 39: Rango diámetros VALVULA V_18445	128
Tablas 40: Rangos Rugosidad tubos VALVULA V_18445	128
Tabla 41: Rango diámetros VALVULA V_18448	131
Tabla 42: Rangos Rugosidad VALVULA V_18448	132
Tabla 43: Rango diámetros válvula v_18549	135
Tabla 44: Rangos Rugosidad tubos válvula v_18549	135
Tabla 45: Rango diámetros VALVULA V_18550	138
Tabla 46: Rangos Rugosidad VALVULA V_18550	139
Tabla 47: Rango diámetros VALVULA V_18820	142
Tablas 48: Rango Rugosidad VALVULA V_18820	142
Tabla 49: Rango diámetros VALVULA V_18945	145
Tabla 50: Rangos Rugosidad VALVULA V_18945	146
Tabla 51: Rango diámetros VALVULA V_18946	149
Tabla 52: Rango Rugosidad tubos VALVULA V_18946	149
Tabla 53: Rango diámetros VALVULA V_19110	152
Tabla 54: Rangos Rugosidad VALVULA V_19110	153
Tabla 55: Rango diámetros VALVULA V_19112	156
Tabla 56: Rango Rugosidad tubos VALVULA V_19112	156

Tabla 57: Rango diámetros VALVULA V_19113	159
Tabla 58: Rango Rugosidad VALVULA V_19113	160
Tabla 59: Rango diámetros VALVULA V_19115	163
Tabla 60: Rangos Rugosidad VALVULA V_19115	163

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. PRESIONES MÍNIMAS EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN	75
ANEXO B. RUGOSIDAD ABSOLUTA EN TUBOS COMERCIALES	76
ANEXO C. TABLAS RESULTADOS	78

RESUMEN

TITULO: ESTIMACION DE LA VARIACION DEL INDICE DE RESILIENCIA EN UN SECTOR PILOTO DE LA RED DE DISTRIBUCION DE LA CIUDAD DE BUCARAMANGA CUANDO SE INSTALAN VALVULAS REGULADORAS DE PRESION Y SU POSIBLE AFECTACION EN LA GENERACION DE DAÑOS.*

AUTOR: DAVID RICARDO CHAPARRO TRIANA**

PALBRAS CLAVES: RED DE DISTRIBUCION, RESILIENCIA, OPTIMIZACION, COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD

CONTENIDO:

Generalmente en las redes de distribución de agua potable se encuentra que sus diseños y planificación se han desarrollado de manera desordenada. El índice de resiliencia definido por Todini (2000) está basado en el concepto que la potencia total de entrada en una red de distribución de agua es igual a la potencia por unidad de peso disipada por el sistema, debido a la fricción, más la potencia por unidad de peso entregada en los nodos. Al instalar válvulas reguladoras con el objeto de cuantificar el índice de agua no contabilizada, se cambia el estado inicial del índice de resiliencia en la red, generando sobre presiones aguas arriba de la válvula y daños en las tuberías, afectándose el servicio entregado a los usuarios.

Por lo anterior, para hacer la planificación se realizaron modelos hidráulicos para mejorar la optimización, que permitiera minimizar la energía de entrada y disipada de la distribución, lo cual permite disminuir el porcentaje de agua que se pierde por fugas y retardar los procesos de renovación en los nodos del sistema. Además, se puede establecer una forma de realizar cambios en los diámetros de la tubería de la red de distribución con el objeto de uniformizar el plano de presiones, se ha comprobado que al uniformizar dicho plano se puede distribuir mejor la potencia de entrada en la red de distribución lo que genera que la red se vuelva más resiliente y más eficiente.

Este proyecto busca la manera de uniformizar los planos de presiones en dos medios: en un estado normal de operación y cuando se instalan las válvulas de presión. Al uniformizar el estado de presiones en toda la red de distribución, e está aumentando el grado de confiabilidad de la misma desde el punto de vista hidráulico, lo que conlleva a una mejora en la prestación del servicio.

* PROYECTO DE GRADO

** FACULTAD: físico-mecánicas. ESCUELA: ingeniería civil. DIRECTOR: M.ENG Ingeniero Luis Fernando Castañeda Galvis.

ABSTRACT

TITLE: ESTIMATE OF CHANGES IN INDEX SECTOR RESILIENCE IN BUCARMANGA A PILOT DISTRIBUTION NETWORK, WHEN INSTALLING PRESSURE REGULATORS AND POSSIBLE INVOLVEMENT IN THE GENERATION OF DAMAGES.*

AUTHOR: DAVID RICARDO CHAPARRO TRIANA**

KEYWORDS: DISTRIBUTION NETWORK, RESILIENCE, OPTIMIZATION, UNIFORMITY COEFFICIENT.

ABSTRACT:

Usually, at distribution networks of drinking water it's found that their designs and planning have been developed haphazardly. The resilience index defined by Todini (2000) is based on the concept that the full power input to a water distribution network is equal to the unit weight power dissipated by the system, due to friction, plus the unit weight power delivered in demand nodes. When installing control valves in order to quantify the rate of unaccounted water (IANC) it's changed to the initial state of index of resilience at the network, which generates over pressures at the top of the valve and pipeline damage, affecting the service delivered to users.

Therefore, to make the planning it had to be done hydraulic models to improve the optimization, which would minimize the input and dissipated energy of the distribution, allowing the percentage reduce of lost water by leakage in the system and slow the processes of renovation in the system nodes. Besides this, it can be establish a way to make changes in the pipe diameters of the distribution network, in order to standardize the level of pressure, this because it has been found that by standardizing that level, it can be a better distribution of the input power in the distribution network which generates the network becomes more and more efficient.

This project looks a form to standardize the pressure levels in two ways: in a normal state of operation, when installed and pressure valves. By standardizing the state of pressure in the whole distribution's network of drinking water, it's been increasing the degree of reliability from the same from that the hydraulic point of view, leading to improved service delivery.

* PROJECT GRADE

** COLLEGE: físico-mecánicas. SCHOOL: ingeniería civil. DIRECTOR: M.ENG Ingeniero Luis Fernando Castañeda Galvis.

1. INTRODUCCIÓN

Una red de distribución de agua potable se puede describir como un conjunto de tuberías, y accesorios, la cual su función principal es suministrar el agua a los usuarios bajo ciertas condiciones requeridas por los mismos. Sin embargo, en muchos casos las redes de distribución de agua potable han sido sistemas que se han desarrollado de manera desordenada generando que se deterioren debido a la metodología que se ha utilizado a través del tiempo. El diseño consiste en hallar los diámetros que deben llevar cada una de las tuberías de la red, para que sea posible transportar agua desde la fuente a cada nodo, manteniendo la presión mínima permitida. (Anexo A)

Este problema siempre se ha resuelto por ensayo y error. Sin embargo este método dirige a diseños funcionales desde el punto de vista hidráulico.

Este problema junto con la expansión extensa de las ciudades, genera efectos sobre los valores presentes teniendo en cuenta que las tuberías conforman el porcentaje de costo más importante del sistema. Las empresas que suministran el servicio de agua potable se enfrentan al problema de manejar redes deterioradas de manera óptima posible para mantener el nivel de servicio.

El servicio normalmente se basa en criterios predeterminados, los cuales son presentados por la empresa que suministra el servicio, Colombia se rige bajo el reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico (RAS 2000). [23]

El prestador del servicio debe cumplir con la entrega de agua a una presión mínima y un caudal de entrega que cumpla las normas de calidad. (Anexo A).

Uno de los criterios que normalmente se ve más afectado, es la presión mínima con la que es entregado el servicio en los nodos de consumo.

Se puede determinar que para un sistema de suministro de agua, que está presentando problemas de deterioro y que en cualquier momento puede fallar generando múltiples consecuencias en términos de confiabilidad, es necesario realizar acciones de mantenimiento necesarios para definir el nivel de servicio óptimo que determina la norma.

El mantenimiento se lleva a cabo para evitar posibles fallas en el sistema, así como para recuperar la capacidad del mismo cuando una falla ocurra. El objetivo principal es obtener seguridad en el sistema y continuidad en el funcionamiento, dado que los recursos para la construcción de una red de distribución de agua potable son limitados. Para darle solución a este problema se busca una estrategia o metodología que optimice todos los términos.

Utilizando la función multi-objetivo se busca encontrar la forma óptima de inversión que eleve la eficiencia del sistema a través de las modificaciones aplicadas a la red. Con esas modificaciones se busca mejorar el desempeño hidráulico de la red; esto como un objetivo en general. La modificación de tuberías es una alternativa de mejoría que es usualmente adoptada para mejorar la integridad física, dicha modificación se puede usar con el incremento de los diámetros e implementación de válvulas reguladoras de presión y de esta manera generar grandes mejoras en el desempeño hidráulico de la red.

Para lograr optimizar los objetivos, se necesitan de programas que realicen simulaciones hidráulicas para ejecutar la red y sea valorada con precisión y rapidez, manifestando objetivos promisorios. La metodología usada, se basa en la resiliencia de Todini (2000) [25], por medio de esta, se busca aumentar el desempeño hidráulico de la red por medio de la optimización de dos objetivos: El

índice de resiliencia (Ir) (Todini, E. 2000) y el coeficiente de uniformidad de presiones (Cu) (Araque, D. 2006); mediante el aumento del diámetro de algunas tuberías. Para lograr materializar la metodología utilizamos el algoritmo que desarrolla (Torres, S. 2012) en su trabajo de grado. Dicho algoritmo está programado en Visual Basic para aplicaciones de Microsoft Excel, que usa la biblioteca de enlace dinámico epanet2.dll¹.

La metodología es aplicada a un distrito de la red del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga AMB S.A E.S.P y se analizan los resultados.

- Modelo hidráulico estadio.

Para poder aplicar de manera rápida la metodología, se subdivide el modelo hidráulico estadio y como resultados se obtienen 31 redes pequeñas con un número de tuberías que oscila entre 33 y 1309, con estas redes se ejecuta el algoritmo haciendo 150 cambios, logrando obtener resultados satisfactorios.

Subsectores

- Válvula V_3632
- Válvula V_3647
- Válvula V_3762
- Válvula V_5173
- Válvula V_5969
- Válvula V_6006
- Válvula V_18423
- Válvula V_18432
- Válvula V_18435

¹ “The Epanet Programmer’s toolkit”. Es una biblioteca de enlace dinámico (DLL) que contiene funciones que ejecutan las más importantes tareas de Epanet.

- Válvula V_18436
- Válvula V_18439
- Válvula V_18440
- Válvula V_18441
- Válvula V_18442
- Válvula V_18443
- Válvula V_18445
- Válvula V_18447
- Válvula V_18448
- Válvula V_18457
- Válvula V_18529
- Válvula V_18549
- Válvula V_18550
- Válvula V_18820
- Válvula V_18945
- Válvula V_18946
- Válvula V_19096
- Válvula V_19110
- Válvula V_19112
- Válvula V_19113
- Válvula V_19115
- Válvula V_19459

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Establecer el orden de priorización de renovación de tuberías basadas en el índice de resiliencia, uniformizando los planos de presión, buscando aumentar la confiabilidad de las redes.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS

- Modelar en el programa de Epanet 2.0, la red de distribución y su posible afectación en la generación de daños cuando se instalan válvulas reguladoras de presión.
- Establecer los índices de resiliencia para la red piloto actual.
- Verificar el cambio en el índice de resiliencia general en la red de distribución del sector piloto con la instalación de las válvulas reguladoras de presión en la red.
- Establecer las tuberías a renovar en la red de distribución previo a la instalación de las válvulas reguladoras de presión con el objeto de uniformizar el estado de presiones de la red.
- Establecer una función objetivo con base en la disipación de energía de la red para realizar cambios en las tuberías.

3. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

3.1 DISEÑO DE REDES

Consiste en hallar los diámetros que deben llevar cada una de las tuberías de la red, y así mantener la presión mínima permitida en el momento de transportar agua desde la fuente a cada nodo. Este problema siempre se ha resuelto por ensayo y error. Sin embargo, este método nos dirige a diseños funcionales desde el punto de vista hidráulico con unas tarifas elevadas.

Este problema de diseño se puede modelar como un problema de optimización multi-objetivo en donde la variable de medida es una función objetivo que involucra el índice de resiliencia y el coeficiente de uniformidad. El problema radica en buscar un conjunto de diámetros que uniformice la resiliencia de la red y a su vez el plano de presiones óptimas, la cual se basa en la longitud, en el diámetro, y costo de la tubería, la cual está sujeta a las restricciones hidráulicas y comerciales. [6].

3.2 RESTRICCIONES HIDRÁULICAS

Se debe tener en cuenta que cada una de las restricciones y leyes se deben cumplir.

- Ley de conservación de la masa en cada nodo.
- Ley de conservación de energía en cada circuito.
- La presión en cada nodo debe ser mayor al valor mínimo.

3.3 RESTRICCIONES COMERCIALES

Los diámetros solo pueden tomar ciertos valores debido a que los fabricantes solo producen diámetros determinados.

3.4 RESTRICCIONES ADICIONALES

El método que se emplee debe ser capaz de encontrar una solución óptima para una gran variedad de topologías, topografías y demandas en los nodos.

La sistemática empleada debe obtener una solución en un tiempo razonable según el tamaño de la red.

3.5 TIPOS DE FLUJO

3.5.1 Definición

El ingeniero Osborne Reynolds logro hacer uno de los aportes más importantes a la teoría de flujo en conductos cerrados desarrollando de una manera sólida la teoría de los diferentes tipos de flujo: flujo laminar, flujo turbulento y un punto intermedio llamado flujo en transición.

3.5.2 FLUJO LAMINAR ($Re > 2200$)

Se caracteriza por las líneas de corriente, o de flujo, siguen una trayectoria entre ellas y las pérdidas de energía provienen del rozamiento entre las partículas en las distintas líneas de corriente y entre el fluido y las paredes de la tubería.

3.5.3 FLUJO TURBULENTO ($Re < 4500$)

Se caracteriza por el intercambio significativo de partículas entre líneas de corriente, también se presentan pérdidas de energía adicionales. De ello se desprende necesariamente que cuando hay un mayor rozamiento característico del flujo, las pérdidas de energía sean mayores al flujo turbulento. [2]

Con el fin de detallar adecuadamente los tipos de flujo, Reynolds se basa en la teoría de similitud de fuerzas para así poder relacionar las potencias inerciales y viscosas en una cantidad, adimensional, que caracterice los flujos: dos flujos que se encuentren bajo diferentes condiciones, pero cuyo valor no difiera significativamente, se comportaran de manera similar. [2] Esta cantidad se conoce como el número de Reynolds.

3.6 SISTEMAS DE ECUACIONES EMPLEADAS

3.6.1 ECUACION DE CONTINUIDAD

Es el volumen de agua que circula en una sección por cada unidad de tiempo.

$$Q = \frac{\text{Volumen}}{\text{tiempo}} \quad \text{ó} \quad Q = A * V \quad (1)$$

Donde Q es el caudal que circula por la tubería, A es el área en función del diámetro interno de la tubería, y V representa la velocidad de circulación del fluido.

3.6.2 DARCY – WEISBACH

Para las conducciones de sección circular y diámetro D la ecuación propuesta por Weisbach es:

$$h_f = f(R_s, \varepsilon_r) \times \frac{L}{D} \times \left(\frac{V^2}{2 \times g} \right) \quad (2)$$

Esta expresión la modifíco Darcy, y expresada en términos de pérdidas se presenta así:

$$h_f = f \times \frac{L}{D} \times \left(\frac{V^2}{2 \times g} \right) = \left(\frac{8 \times f \times L}{\pi^2 \times g \times D^5} \right) \times Q^2 \quad (3)$$

En donde h_f son las pérdidas, f representa el factor de fricción, L es la longitud de la tubería, D es el diámetro de la tubería, V es la velocidad de circulación del fluido, y Q es el caudal que circula por la tubería.

3.6.3 FACTOR DE FRICCIÓN

La principal diferencia que aporta la ecuación de Darcy – Weisbach es el valor de fricción f , logrando que esta expresión sea la más utilizada en la hidráulica aplicada.

Aunque existen otras maneras de encontrar el factor de fricción f , y es con la utilización de la fórmula propuesta por Colebrook – White. Cuyos resultados dependen de los valores de Reynolds (Re) y rugosidad relativa (K_s) del tipo del material de la tubería.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{K_s}{3.7d} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (4)$$

En donde K_s es la rugosidad absoluta, Re es el número de Reynolds, y f representa el factor de fricción.

3.6.4 NUMERO DE REYNOLDS

Es un parámetro de semejanza hidrodinámica que relaciona las fuerzas de inercia con las fuerzas de viscosidad.

Para tuberías de sección transversal circular, en donde por magnitud lineal característica del flujo puede adoptarse el diámetro (d), el número de Reynolds adquiere la siguiente forma:

$$R_s = \frac{vd\rho}{\mu} \quad (5)$$

Donde V es la velocidad de flujo, d una característica geométrica, conocida como longitud significativa que en tuberías es el diámetro, ρ y μ la densidad y viscosidad absoluta del flujo.

3.6.5 PERDIDAS DE ENERGIA POR FRICCION

Cuando el agua fluye a través de una tubería, y los diámetros generalmente se mantienen constantes, se mantiene una velocidad media, y por lo tanto, la energía cinética del flujo es constante, lo que hace que las pérdidas de energía se den en forma de presión.

Estas pérdidas están dadas por la siguiente ecuación:

$$h_f = f \frac{l v^2}{d 2g} \quad (6)$$

Donde h_f expresa las pérdidas de presión por fricción, esto se da en unidades de metros de cabeza de agua del fluido a velocidad media \tilde{v} en un tramo de tubería de longitud l , diámetro d y con un factor de fricción f , g es la aceleración de la gravedad (m/s^2).

Esta ecuación está basada en pruebas realizadas físicamente, y fue deducida a la par por Henry Darcy, ingeniero francés, y Julius Weisbach, científico e ingeniero alemán en el siglo XIX [Saldarriaga, 2001, p. 45] [3], y se conoce como la ecuación de Darcy-Weisbach.

El siguiente avance lo hizo el ingeniero alemán Johann Nikuradse, este varió de manera controlada el factor de rugosidad absoluta de la tubería (K_s) y el número de Reynolds para representar el valor del factor de fricción en función de estas dos variables. Una medida de la fricción que produce una tubería debido a las irregularidades en su material. Seguidamente, C.F. Moddy realizó un diagrama similar al de Nikuradse para tuberías comerciales.

Del mismo modo, L. Prandtl encontró la forma de desarrollar una base teórica necesaria para expresar el factor de fricción para flujos turbulentos. Junto con uno de sus estudiantes T. Von Karman, lograron deducir ecuaciones validas en flujo turbulento pero no para flujo en transición, predominante en el flujo en tuberías comerciales [Saldarriaga, 2001][3]. Después C.F. Colebrook y H. White, investigadores ingleses, terminaron los trabajos de Prandtl y Von Karman al deducir una fórmula que expresa el factor de fricción implícitamente en función de la rugosidad relativa de un tubo (K_s/d) y el número de Reynolds del fluido. Esta fórmula es válida tanto para flujo turbulento como para el flujo en transición. Se conoce como la ecuación de Colebrook-White:

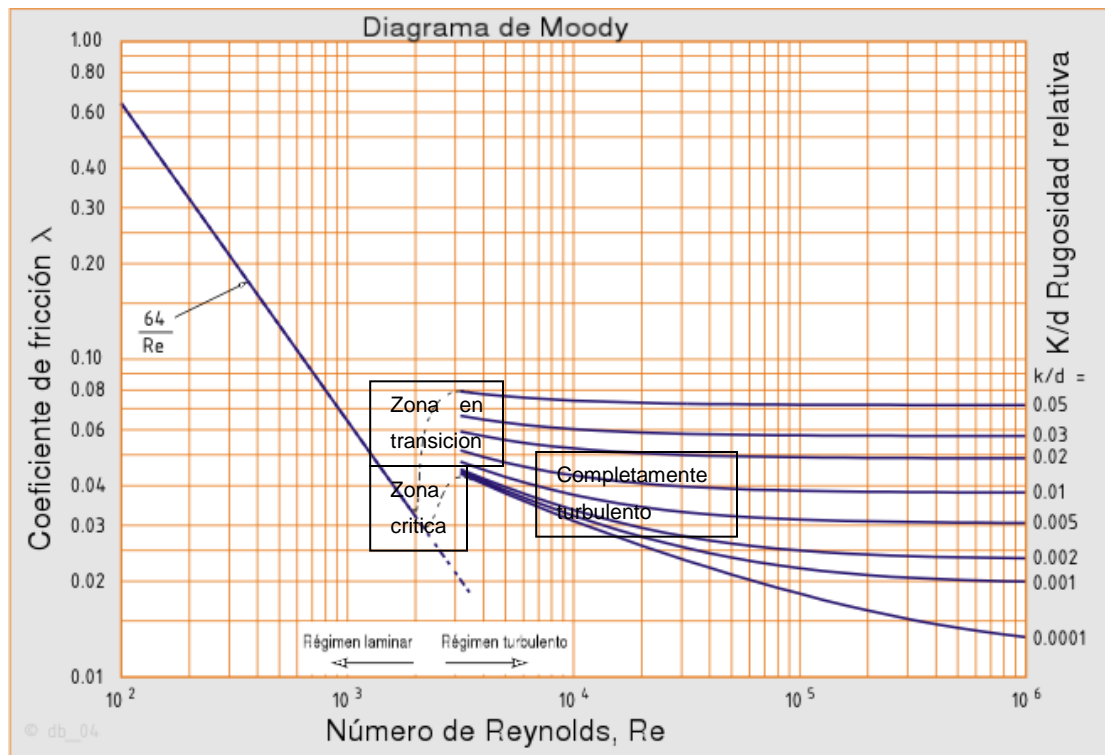
$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{K_s}{3.7d} + \frac{2.51}{R_s \sqrt{f}} \right) \quad (7)$$

3.6.6 DIAGRAMA DE MOODY

El diagrama de Moody, nos permite determinar el valor de fricción f a partir de Re Y K_s/d de forma directa, es una representación log – log del factor de fricción f frente al de Re , tomando como parámetro K_s/d . Se distinguen cinco zonas, que corresponden a los diferentes regímenes hidráulicos, perteneciendo al coeficiente de fricción f valores diferentes en cada caso (ver grafica 1).

Este diagrama se puede aplicar a cualquier tipo de líquido y flujo.

Grafica 1: Diagrama de moody.



Fuente: <http://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Moody-es.png>

3.6.7 PÉRDIDAS MENORES

En las redes de distribución de agua potable podemos encontrar diferentes tipos de accesorios como codos, válvulas de todo tipo, T, expansiones o contracciones, necesarios para el correcto funcionamiento hidráulico o para la construcción de la red. Todos estos accesorios generan un segundo tipo de pérdidas de energía conocido como perdidas menores.

Para cualquier accesorio las pérdidas menores provocadas se expresan como una porción de energía cinética así:

$$h_m = k_m \frac{v^2}{2g} \quad (8)$$

Donde h_m expresa las pérdidas de presión en unidades de metros de cabeza de agua por el accesorio con coeficiente de perdidas menores K_m . De nuevo, \tilde{v} denota la velocidad media del fluido y g la aceleración de la gravedad (cm/s^2).

3.7 CONFIABILIDAD HIDRAULICA DE LA RED

3.7.1 Definición

La complejidad del diseño de una red de distribución está dado por la relación no lineal entre las variables involucradas, como caudal, pérdidas de energía, diámetros de las tuberías y su valor, esto se ha resuelto al considerarlo un problema de optimización combinatoria (Saldarriaga; 2005) [4], a través del cual se obtiene un diseño de costo mínimo para el caudal máximo horario. [5]

Para obtener una mejor confiabilidad en el sistema, el problema se puede formular así:

Maximizar $f(x) = 1 - \text{beneficio}(x) = \text{deterioro}(x)$;

En donde beneficio (x) es el beneficio obtenido al implementar la configuración de tuberías x y $f(x)$ es la función que depende de la configuración del sistema de agua potable x. Para ultimar se busca un método con el cual se pueda encontrar el punto óptimo de rehabilitación, este corresponde al momento que al maximizar $f(x)$, el beneficio no se logra acrecentar de manera significativa, por ser un régimen de progreso del nivel de servicio experimentado por los consumidores, el cual lo explica el índice de resiliencia que relaciona la energía disipada por el sistema bajo la configuración física real con la energía que debe disipar el sistema. [6]

Durante los últimos años, el problema de diseño de las redes de distribución de agua potable ha sido resuelto de diferentes maneras, pero actualmente con los estudios desarrollados por Todini (2000). [25]

Es importante considerar una característica dentro del proceso de diseño óptimo: La resiliencia como la capacidad de la red de recuperarse ante fallas y condiciones de operación extremas. [8]

Saldarriaga y Araque (2005). [9] Recurrieron al concepto de resiliencia para desarrollar una sistemática que permitiera escoger las tuberías, en una red existente, que deben ser sustituidas, con el fin de conseguir el mayor incremento de la resiliencia de la red, y a su vez la confiabilidad.

Uno de los objetivos primordiales es realizar un estudio de resiliencia, utilizando un modelo hidráulico de una red existente, manipulando el software Epanet 2.0. Este estudio estará enfocado en el cambio del índice de resiliencia de la red a lo largo de su periodo de operación. El índice de resiliencia es la medida de los efectos combinados que producen las diferencias de potencias, disipada real y máxima disipada, con la uniformidad nodal del sistema, al maximizar el índice de resiliencia

se mejora la habilidad del sistema para enfrentar eventuales fallas en la misma, también se debe tener en cuenta que para poder sacar el máximo provecho al estudio que se le realiza a la red, es pertinente tenerla calibrada previamente.

Por lo anterior, para hacer la planificación se debe realizar modelos hidráulicos para mejorar la optimización, que permita reducir la energía de entrada y disipada de la distribución, lo cual permite disminuir el porcentaje de agua que se pierde por fugas en el sistema y retardar los procesos de renovación en los nodos del sistema. Además de esto, se puede establecer una forma de realizar cambios en los diámetros de la tubería de la red de distribución con el objeto de uniformizar el plano de presiones, se ha comprobado que al uniformizar dicho plano se puede distribuir mejor la potencia de entrada en la red de distribución lo que genera que la red se vuelva más resiliente, más eficiente.

El problema de diseño óptimo de una red de distribución de agua potable se define de la siguiente forma: conociendo el trazado de la red de distribución, su topología y su conectividad, además de conocer los niveles de los caudales que se entregan en cada nodo, encontrar la combinación de diámetros que reduzca al máximo el costo constructivo del sistema pero que a su vez logre conseguir los niveles de confiabilidad aceptables.

3.7.2 REGIMEN DE CAMBIO

3.7.2.1 INDICE DE RESILIENCIA

Este índice lo propuso el ingeniero Ezio Todini, el calcula la relación que hay entre la potencia por unidad de peso de operación del sistema y la potencia por unidad de peso máxima que el sistema pueda tener. Ósea que calcula el superávit de potencia por unidad de peso existente en la red.

Y se puede escribir como:

$$I_R = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_e} Q_i H_i - \sum_{j=1}^{n_u} Q_j (H_j - H_j^*)}{\sum_{i=1}^{n_e} Q_i H_i - \sum_{j=1}^{n_u} Q_j H_j^*} = \frac{\sum_{j=1}^{n_u} Q_j (H_j - H_j^*)}{\sum_{i=1}^{n_e} Q_i H_i - \sum_{j=1}^{n_u} Q_j H_j^*} \quad (9)$$

El índice de resiliencia representa fundamentalmente el valor que excede la potencia relativa en la red, de modo que gracias a eso se provee la energía adicional que necesita el fluido para enfrentar los eventos adversos. La confiabilidad se relaciona con la disponibilidad de caudal, y está sujeta a la redundancia de caminos que pueda tomar el fluido (redes malladas).

3.7.2.2 RESILIENCIA DE LA RED

Prasad y Park [11] consideran que los circuitos presentes en las redes malladas son más confiables si las tuberías incidentes en un nodo no son ampliamente variables en diámetro, es decir, una red mallada es mucha más confiable si las discontinuidades entre el diámetro de tuberías adyacentes son mínimas. Esto último se debe a que el coeficiente de pérdidas en ensanchamiento o reducciones es menor cuanto menor es la diferencia de diámetros, y de esta forma, cuanto menos discontinuidad menos pérdida por tales singularidades y en consecuencia más excedente de potencia en la red.

Así Prasad y Park desarrollan la resiliencia en la red para solucionar tales problemáticas incorporando ambos conceptos: excedente de potencia y mallas confiables con menores discontinuidades, ya que según ellos el índice de resiliencia no refleja explícitamente los efectos de la redundancia de las redes malladas y así, una red ramificada con suficiente excedente de potencia pueda ser considerada como confiable si se emplea como medida el índice de resiliencia, pero es bien sabido que las redes ramificadas distan mucho de ser confiables.

Cuando se diseña una red mallada se busca evitar que tenga grandes discontinuidades en los diámetros de tuberías incidentes en un nodo ya que a una red mallada llegan más tuberías que una red ramificada. [11]

Índice de resiliencia (Ir):

$$I_r = \frac{\sum_{j=1}^{n_u} Q_j (H_j - H_j^*)}{\left[\sum_{i=1}^{n_s} (Q_s H_s)_i + \sum_{i=1}^{n_s} \frac{P_i}{\gamma} \right] - \sum_{j=1}^{n_u} Q_j H_j^*} \quad (10)$$

3.7.2.3 POTENCIA UNITARIA DE UNA TUBERIA

SALDARRIAGA (2010). [12] precisa la potencia unitaria de una tubería como (PUT).

$$P_{UT} = q_{ij} (h_i - h_j) \quad (11)$$

En donde q_{ij} representa el caudal que es transportado por la tubería desde el nodo i hasta el nodo j , h_i y h_j son las presiones en cada nodo respectivamente.

Esta potencia se relaciona a la potencia por unidad de peso que pierde el fluido cuando pasa por la tubería desde su comienzo hasta su final, y está asociada con las pérdidas por fricción.

3.7.2.4 CONFIABILIDAD PROMEDIO

Los trazados de una red de distribución en forma de circuitos generan una redundancia en ellas mismas, lo que hace las redes mucho más confiables, el CIACUA [13] propone:

$$CP = \frac{\sum_{i=1}^{n_n} NRA_i}{N_n} \quad (12)$$

Donde CP es la confiabilidad promedio, NRA_i es el número de trayectos de suministro posibles entre el nodo fuente y el nodo i, N_n es el número de nodos. De este modo CP corresponde al promedio de número de trayectos de suministro.

4. DISEÑO SOLUCION

La solución que se propone en esta investigación radica en hacer uso de la resiliencia de la red, ya que todos los autores que afrontan el tema de confiabilidad de redes de distribución coinciden en una premisa: No hay una definición única, acabada y precisa sobre el concepto de confiabilidad hidráulica. La resiliencia en la red demuestra la mejor afinidad en ambos escenarios de confiabilidad (demandas aleatorias y fallos de tuberías), y a su vez está unida al índice de resiliencia que representa fundamentalmente que tanto se excede la potencia relativa en la red, de modo que ese excedente provee la energía adicional que necesita el fluido para enfrentar los eventos adversos. Ahora, la confiabilidad se relaciona con la disponibilidad de caudal, y la disponibilidad de caudal está sujeta a la redundancia de caminos que pueda tomar el fluido, (redes malladas). [19]

Para darle solución al problema de confiabilidad optamos por la que toma S. TORRES [16] en su trabajo de grado, el cual usa el método de suma ponderada exponencial, ya que el proceso de optimizar sistemática y simultáneamente una colección de funciones objetivos es llamado optimización multi-objetivo u optimización vectorial. Con un problema de optimización multi-objetivo (MOOP) no hay necesariamente una solución que sea óptima respecto a todos los objetivos, una solución puede ser mejor para un propósito pero la peor para otro. Así, la noción más aceptada de “óptimo” en el entorno de MOOP es el concepto de solución de Pareto óptima.

Un resultado es Pareto óptimo si no hay otra solución que mejore al menos un objetivo sin empeorar cualquier otro. El conjunto de todas estas soluciones Pareto óptimas conforman lo que se conoce como frontera de Pareto.

Los métodos para solucionar MOOP se pueden clasificar en tres grupos.

1. Aquellos que utilizan directamente el concepto de eficiencia de Pareto para obtener soluciones.
2. Aquellos que se basan en combinación de objetivos.
3. Aquellos basados en la asignación de prioridades a los objetivos.

Así los métodos basados en la combinación de objetivos lo que hacen es construir un único objetivo que contiene a todos los objetivos, para posteriormente optimizarla. Los métodos del tercer grupo lo que hacen es optimizar una sola función, tratando a las restantes como restricciones, esto lo hacen con cada una de las funciones dando inicio con la que tiene mayor importancia. [16]

Según R.T Marler y J.S. Arora [20] encuentra que no hay un único método que sea consistentemente superior, más bien, la selección de un método específico para solucionar un MOOP depende de la complejidad del problema, del tipo de información que proporciona, de las preferencias del usuario, de los requerimientos para la solución y de la disponibilidad de software.

Ya que no hay respuesta a que método es mejor, se deben preferir los que proporcionan condiciones necesarias y suficientes para hallar puntos de Pareto óptimos, uno de tantos métodos que aparecen cumpliendo tales condiciones es el utilizado por S. TORRES [16] al desarrollar el algoritmo el cual está basado en la suma ponderada exponencial, que además presenta una combinación de características deseables.

La formulación matemática de dicha función ponderada exponencial es:

$$U = \sum_{i=1}^k (e^{pw_i} - 1) e^{pF_i(x)} \quad (15)$$

Donde U es la función objetivo ponderada, k representa el número de objetivos, F_i representa la función objetivo i , W_i es el factor que refleja el peso o importancia que tiene el objetivo i entre los demás y p es el parámetro propio del método. El éxito de este método está ligado al valor de p , de modo que grandes valores de p benefician el desempeño del método. Y es así como se llega al único inconveniente que tiene este método y que es considerado en dicho documento. [24] Grandes valores de p pueden conducir a desbordamientos numéricos, por su condición de exponente, por lo tanto es aconsejable normalizar las funciones antes del uso del método para prevenir dicho inconveniente.

4.1 NORMALIZACION DE LA FUNCION OBJETIVO

Normalizar la función objetivo es con el fin de llevar dicha función a unidades adimensionales y de esta manera lograr que este a un mismo límite. A pesar de que existen varias maneras de hacer dicha transformación la que mejor lo hace según MARLER Y ARORA (2004) [20] es:

$$f_i^{trans}(x) = \frac{f_i(x) - f_i^o}{f_i^{max} - f_i^o} \quad (16)$$

La ecuación de la que se habla anteriormente se conoce como ecuación de normalización en donde $f_i^{trans}(x)$ es la función i normalizada, $f_i(x)$ la función objetivo inicial, f_i^o es el valor más bajo que puede tomar la función objetivo i , f_i^{max} es el valor más alto que puede tomar la función objetivo i , x es el número de soluciones factibles. La función normalizada llega a tomar valores entre 0 y 1, dichos valores dependen de la exactitud con la cual son hallados los valores máximos f_i^{max} y mínimos f_i^o que puede tomar dicha función. El costo para poder calcular con exactitud estos valores de f_i^{max} y f_i^o es bastante alto en tiempo de

computo, sabiendo que el campo de soluciones factibles es muy amplio. Por lo tanto se toman valores aproximados para f_i^{max} y f_i^o analizado desde el punto de vista de la ingeniería.

4.2 FUNCION OBJETIVO

Utilizando la metodología de la suma pondera exponencial, la función a trabajar es:

$$U = (e^{p*w_1} - 1)e^{p*IR} + (e^{p*w_2} - 1)e^{p*CU} \quad (17)$$

Donde I_R es el índice de resiliencia de la red, Cu el coeficiente de uniformidad, w1 y w2 representan la importancia que se da a maximizar a cada función, esto tiene que cumplir que $w_1+w_2=1$ y $w_{1,2} \geq 0$, p representa el parámetro del método.

Como se puede ocasionar desbordamientos numéricos, se le dará un valor máximo a p de 350. Este valor se deriva de los datos numéricos que pueden alojar mayores cantidades para Visual Basic.

5. SOFTWARE A UTILIZAR

5.1 EPANET 2.0

EPANET [21] Es un software para computador, desarrollado por la U.S. EPA, para realizar simulaciones en periodos extendidos del comportamiento hidráulico y de la calidad del agua en redes de tuberías a presión. EPANET permite seguir la evolución del flujo del agua en las tuberías, de la presión en los nudos de demanda, del nivel de agua en los depósitos, y la concentración de cualquier sustancia a través del sistema de distribución durante un periodo de tiempo de simulación, también permite determinar los tiempos de permanencia del agua en la red y su procedencia desde los distintos puntos de alimentación.

EPANET ha sido diseñado como una herramienta de investigación para mejorar el conocimiento del movimiento y evolución de los constituyentes del agua en el interior de los sistemas de distribución.

El programa de EPANET es un simulador dinámico en periodo extendido para redes hidráulicas a presión compuesto por:

- ❖ Un módulo de análisis hidráulico que permite simular el comportamiento dinámico de la red bajo determinadas leyes de operación.
- ❖ Un módulo para el seguimiento de la calidad del agua a través de la red.

EPANET permite calcular:

- ✓ El caudal que circula por cada una de las conducciones.
- ✓ La presión en cada uno de los nodos.

- ✓ El nivel de agua en cada tanque.
- ✓ La concentración de diferentes componentes químicos a través de la red.
- ✓ El tiempo de permanencia del agua en las tuberías.
- ✓ La procedencia del agua en cada punto de la red.

5.1.1 Características del modelo hidráulico

- No existe límite en el tamaño de la red que se desee analizar.
- Calcula las pérdidas por fricción en las conducciones mediante las expresiones de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach o Chezy-Manning.
- Incluye pérdidas menores en elementos como codos, acoplamientos, etc.
- Modela diferentes tipos de válvulas, incluyendo válvulas de regulación, válvulas de retención, válvulas de aislamiento, válvulas reductoras de presión, válvulas de control de caudal, etc.
- Permite el almacenamiento de agua en tanques que presenten cualquier geometría.
- Posibilidad de establecer diferentes categorías de consumo en los nudos, cada una de ellas con su propia curva de modulación. [22]

TORRES. S (2012) [16] Desarrollo un algoritmo en su trabajo de grado, el cual está programado en visual Basic para aplicaciones de Microsoft Excel, que usa la biblioteca de enlace dinámico epanet2.dll. Dicho algoritmo tiene como función

mejorar de forma óptima el desempeño hidráulico de redes mediante el aumento de diámetros de tuberías, donde se priorice los cambios de aquellas tuberías que más contribuyan a maximizar conjuntamente el índice de resiliencia y la uniformidad de presiones, los parámetros con los cuales se va a trabajar para darle importancia al índice de resiliencia van a ser 30%, 50% y 80% y de esta manera poder observar los cambios en el índice de resiliencia y en el coeficiente de uniformidad que generan los parámetros.

Para lograr de manera efectiva estos cambios se deben tener en cuenta ciertas restricciones como son:

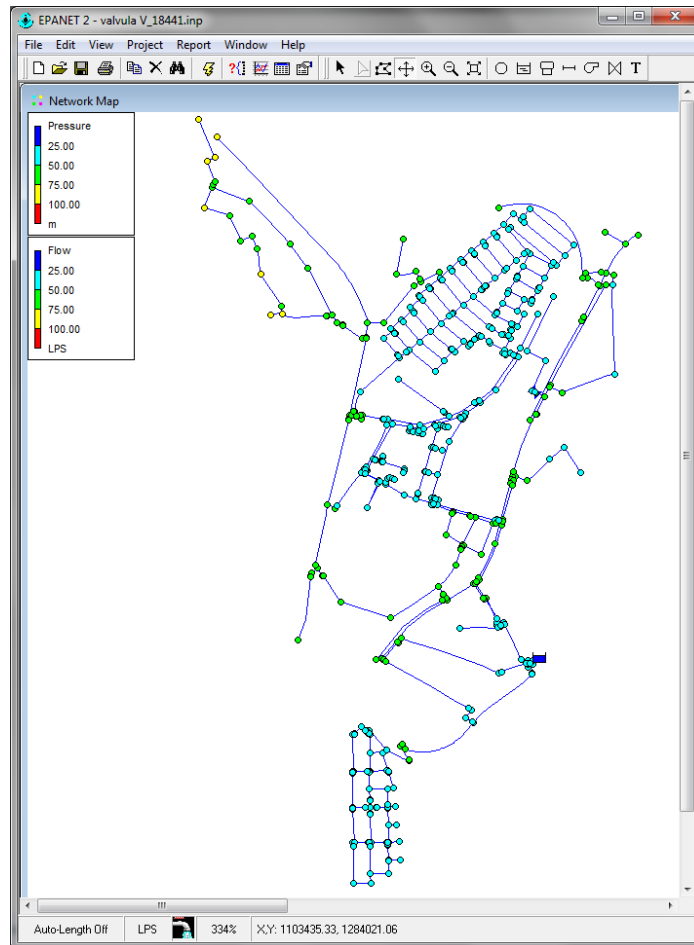
- * Restricciones Hidráulicas [3.2]
- * Restricciones comerciales [3.3]
- * Restricciones adicionales [3.4]

6. RESULTADOS

Se analizó uno a uno los sub-districtos, con el fin de encontrar las tuberías a rehabilitar en la red, para mejorar la resiliencia de la misma, esto se logró variando el parámetro de importancia del índice de resiliencia tomando valores de 30%, 50% y 80%.

6.1 VÁLVULA V_18441

RED 1: Válvula V_18441



6.1.1 CARACTERIZACION

Tabla 1: Rango diámetros válvula 18441

rango diámetros	# tubos	Long [m]
2 pulg	127	3276.27
3 pulg	350	5938
4 pulg	58	1251.24
6 pulg	41	909.78

Grafica 2: porcentaje de tubos válvula 18441

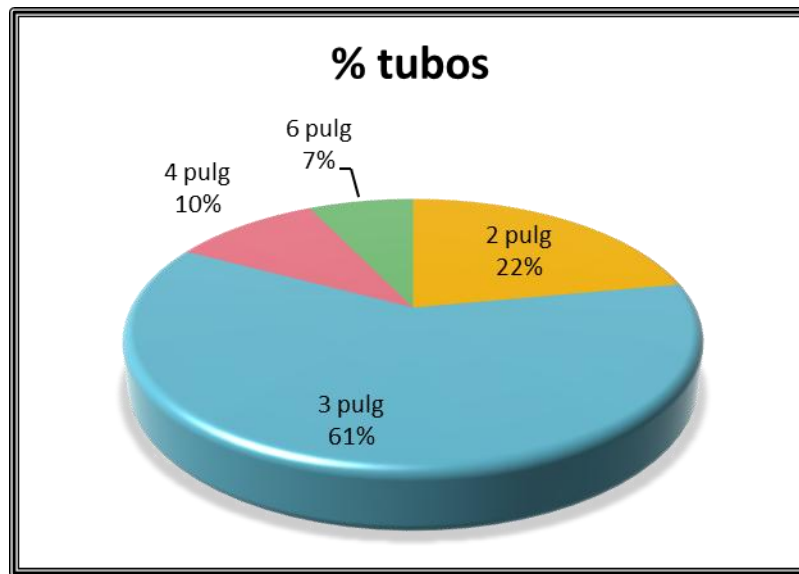
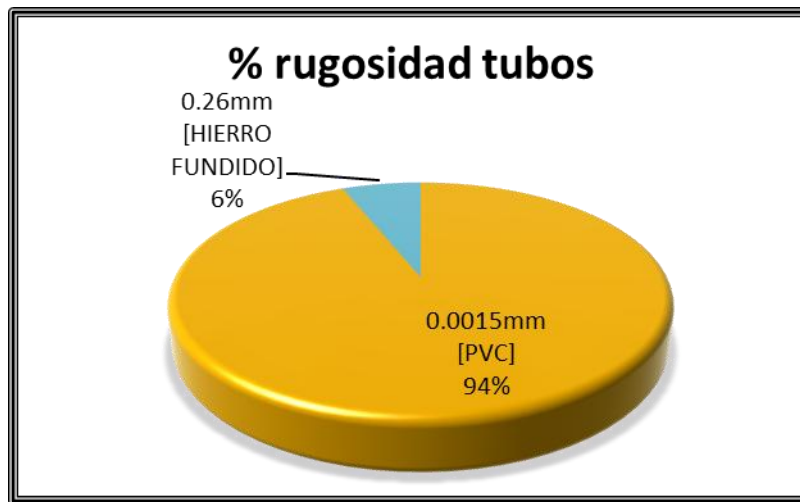


Tabla 2: Rangos rugosidad válvula 18441

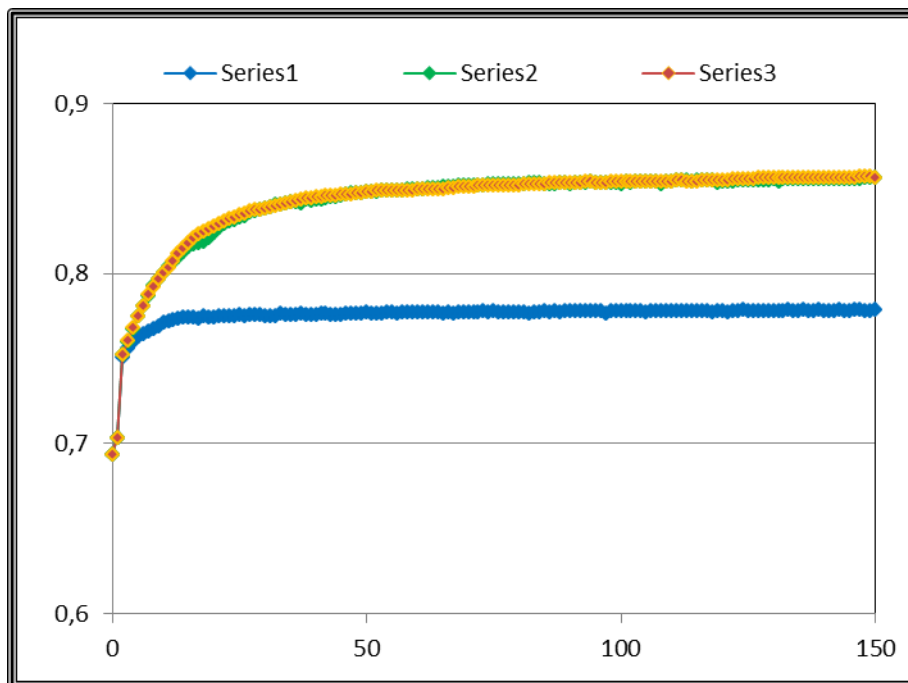
rangos rugosidad	# tubos
0.0015mm [PVC]	107
0.26mm [HIERRO FUNDIDO]	7

Grafica 3: Porcentaje Rugosidad tubos. Válvula 18441



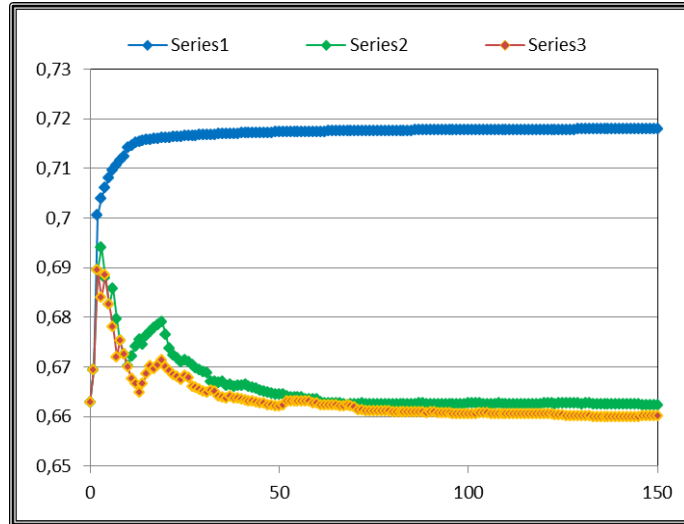
6.1.2 Ir Vs Número de Cambios

Grafica 4: Índice de Resiliencia versus Numero de Cambios. Válvula 18441



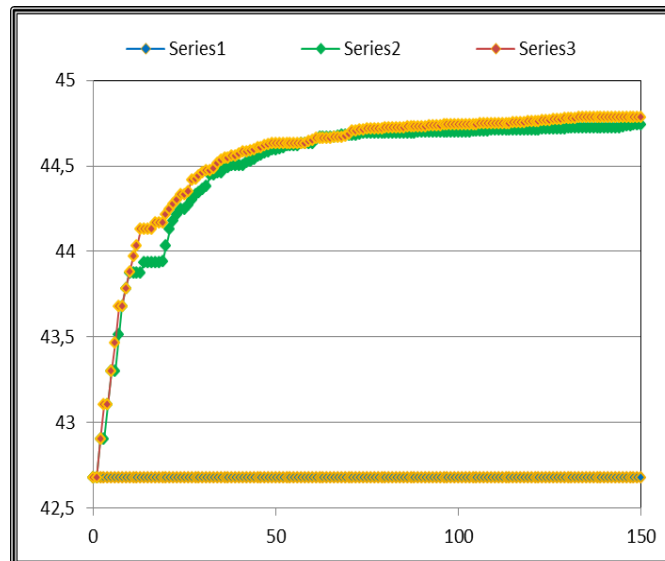
6.1.3 CU Vs Número de Cambios

Grafica 5: Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios. Válvula 18441



6.1.4 Rango de Presiones Vs Número de Cambios

Grafica 6: Rango de Presiones versus Numero de Cambios. Válvula 18441

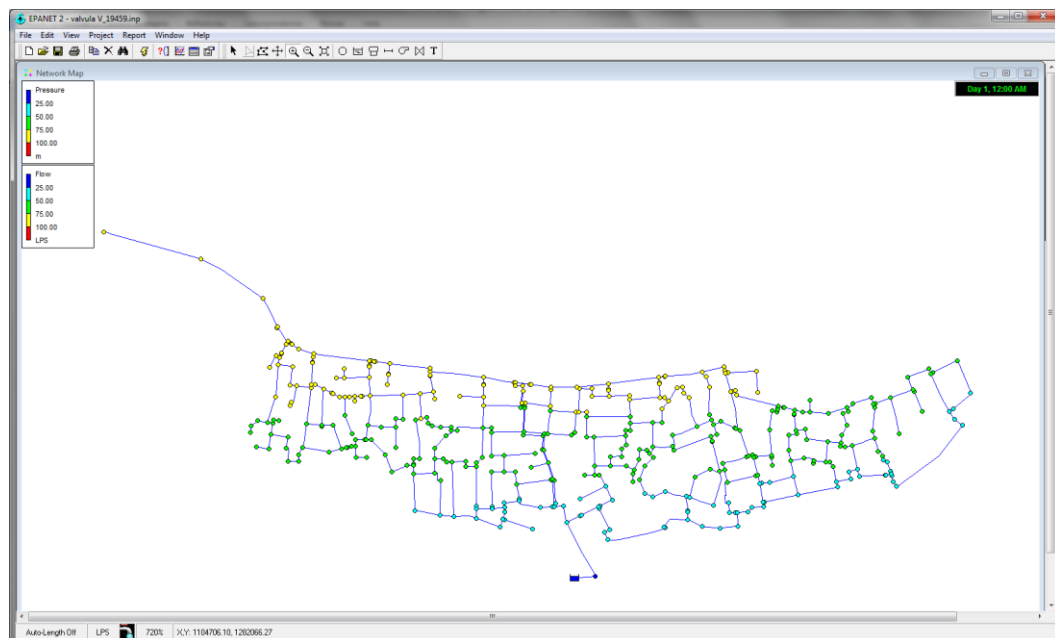


En la gráfica 5, 6 y 7 se puede observar que la variación del índice de resiliencia, coeficiente de uniformidad y rango de presiones, es significativo en los primeros 15 cambios, de ahí en adelante, los cambios no van a ser significativos y si representarían un alto costo para realizar los cambios en las tuberías.

Los parámetros que se utilizaron son 30%, 50% y 80%, aunque la gráfica muestra que dicha variación es mejor para los parámetros de 50% y 80% debido a la importancia que se le asigna a la resiliencia.

6.2 VÁLVULA V_19459

RED 2: Valvula_19459



6.2.1 CARACTERIZACION

Tabla 3: Rango diámetros Valvula_19459

rango diámetros	# tubos	Long [m]
2 pulg	359	5120.15
3 pulg	94	1428.43
4 pulg	20	329.3

Grafica 7: Porcentaje de tubos Valvula_19459

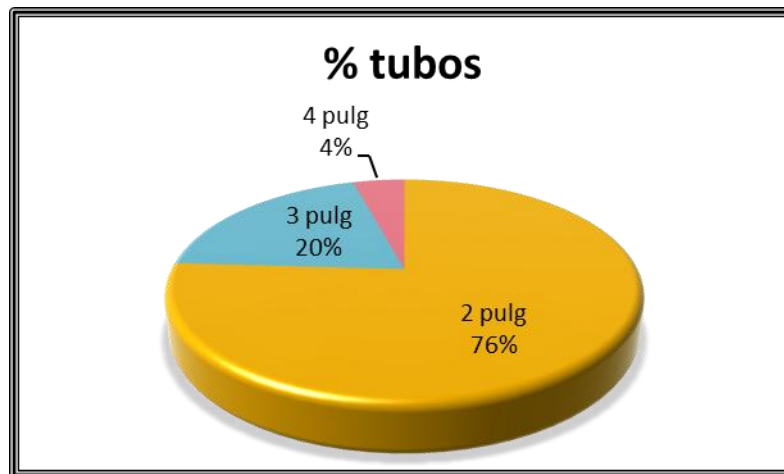
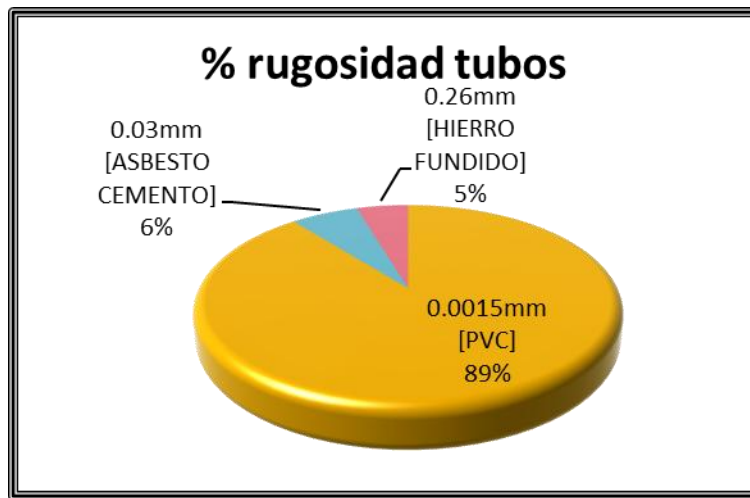


Tabla 4: Rangos rugosidad Valvula_19459

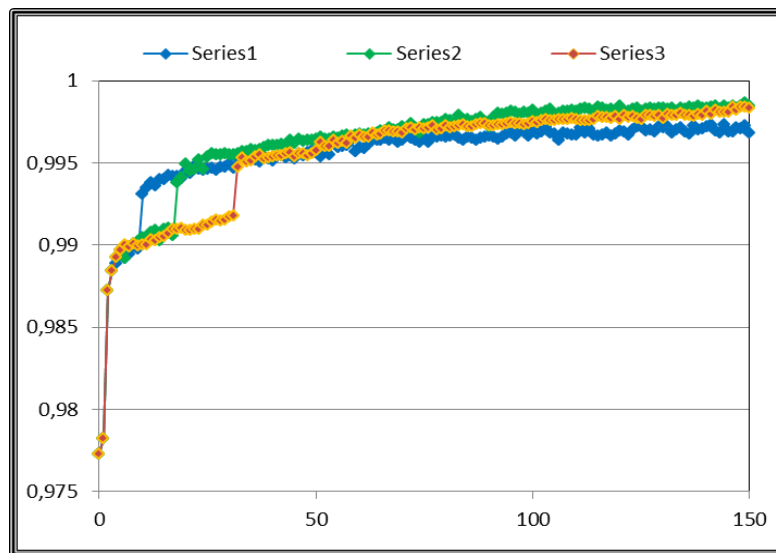
rangos rugosidad	# tubos
0.0015mm [PVC]	422
0.03mm [ASBESTO CEMENTO]	29
0.26mm [HIERRO FUNDIDO]	22

Grafica 8: Porcentaje rugosidad tubos Valvula_19459



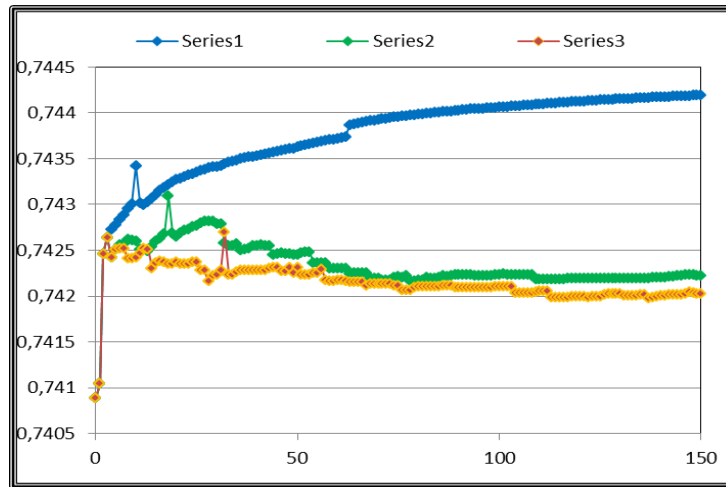
6.2.2 Ir Vs Número de Cambios

Grafica 9: Índice de Resiliencia versus Numero de Cambios. Valvula_19459



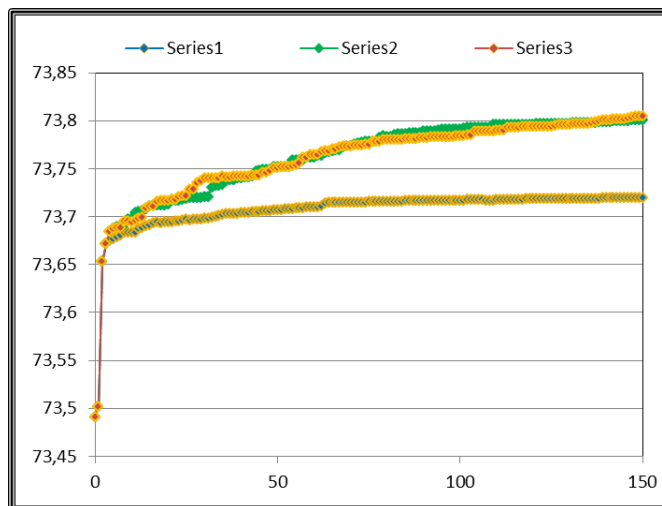
6.2.3 CU Vs Número de Cambios

Grafica 10: Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios. Valvula_19459



6.2.4 Rango de Presiones Vs Número de Cambios

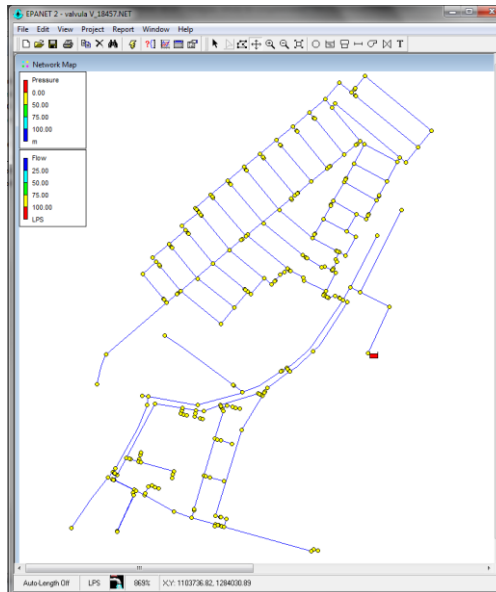
Grafica 11: Rango de Presiones versus Numero de Cambios. Valvula_19459



En las gráficas 9,10, y 11 se puede apreciar que la mayor variación del índice de resiliencia, coeficiente de uniformidad y rango de presiones, se logra en los 20 cambios iniciales de ahí en adelante los cambios no van a tener una variación que considerar.

6.3 VÁLVULA V_18457

RED 3: Válvula V_18457



6.3.1 CARACTERIZACION

Tabla 5: Rango diámetros Válvula V_18457

rango diámetros	# tubos	Long [m]
2 pulg	58	651.59
3 pulg	197	3450.07
4 pulg	29	409.01

Grafica 12: Porcentaje tubos Válvula V_18457

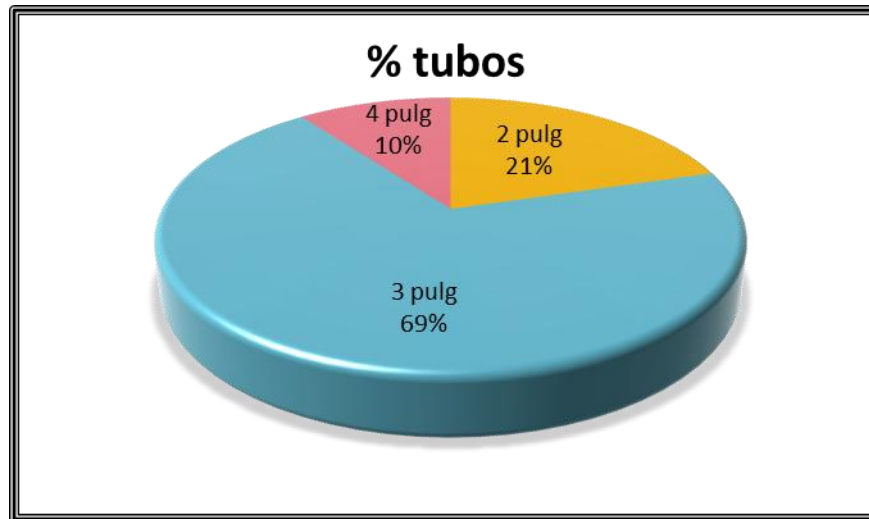
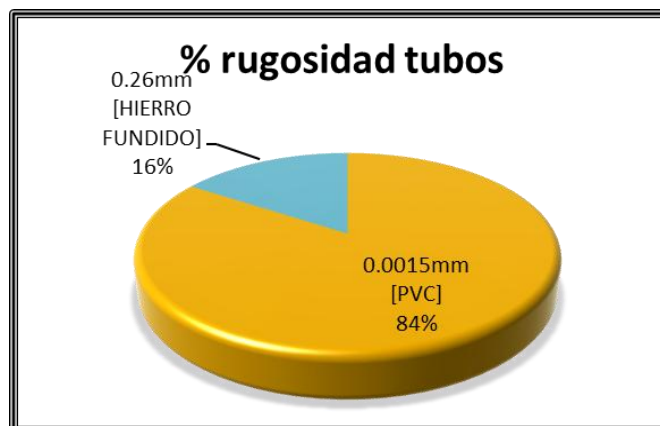


Tabla 6: Rangos rugosidad Válvula V_18457

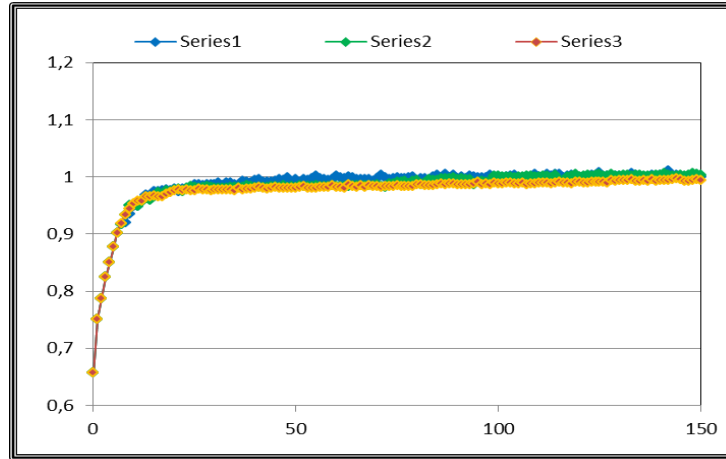
rangos rugosidad	# tubos
0.0015mm [PVC]	239
0.26mm [HIERRO FUNDIDO]	45

Grafica 13: Porcentaje Rugosidad tubos Válvula V_18457



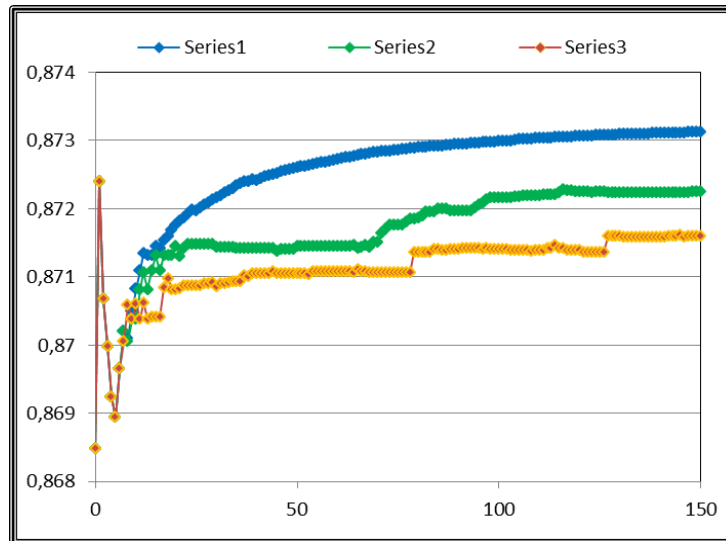
6.3.2 Ir Vs Número de Cambios

Grafica 14: Índice de Resiliencia versus Numero de Cambios. Válvula V_18457



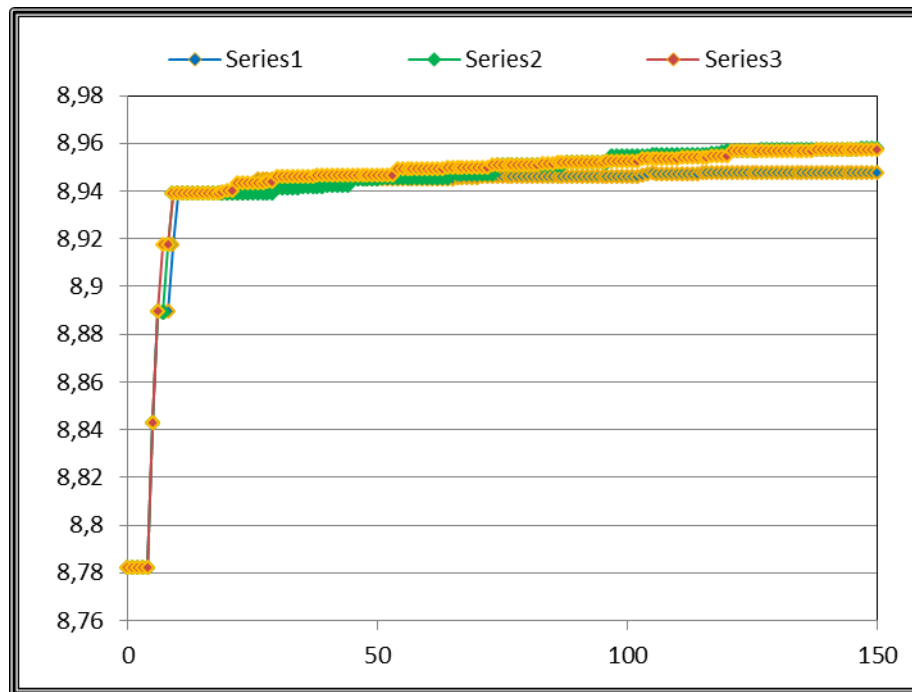
6.3.3 CU Vs Número de Cambios

Grafica 15: Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios. Válvula V_18457



6.3.4 Rango de Presiones Vs Número de Cambios

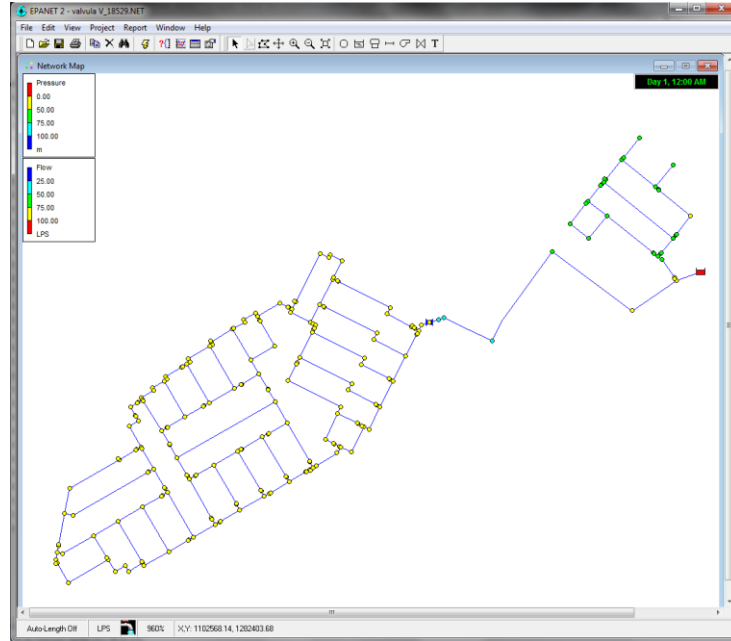
Grafica 16: Rango de Presiones versus Numero de Cambios. Válvula V_18457



Como se puede apreciar en las graficas 14, 15 y 16 tienen un comportamiento muy parecido a las graficas de las válvulas 18457 y 19459, esto se debe a que los diámetros de las redes son homogéneos. Al igual los cambios más significativos se presentan en los 20 cambios iniciales.

6.4 VÁLVULA V_18529

RED 4: Válvula V_18529



6.4.1 CARACTERIZACION

Tabla 7: Rango diámetros Válvula V_18529

rango diámetros	# tubos	Long [m]
3 pulg	107	2190.29
4 pulg	128	1779.9
6 pulg	22	624.43

Grafica 17: Porcentaje tubos Válvula V_18529

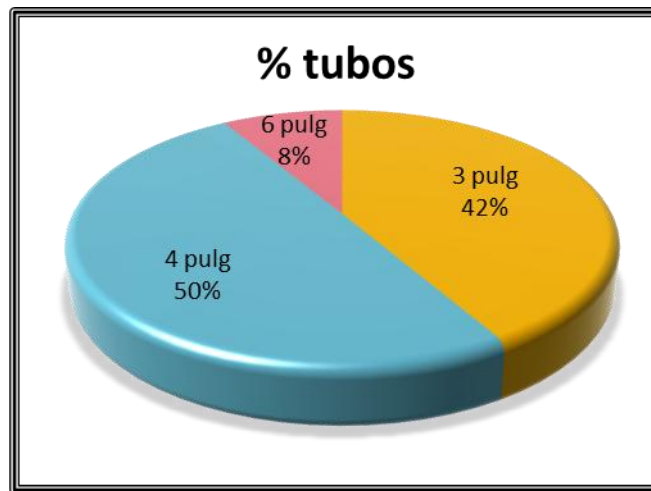
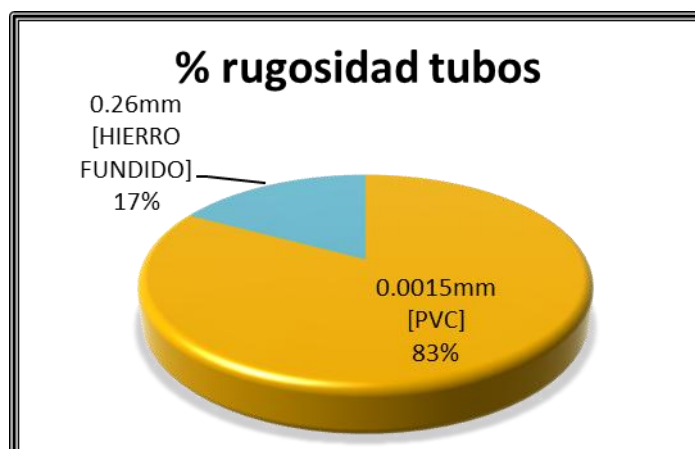


Tabla 8: Rangos rugosidad Válvula V_18529

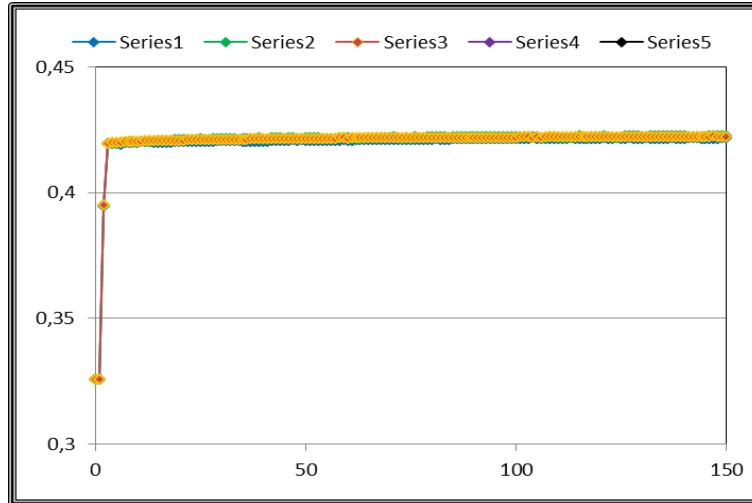
rangos rugosidad	# tubos
0.0015mm [PVC]	213
0.26mm [HIERRO FUNDIDO]	44

Grafica 18: Porcentaje Rugosidad tubos Válvula V_18529



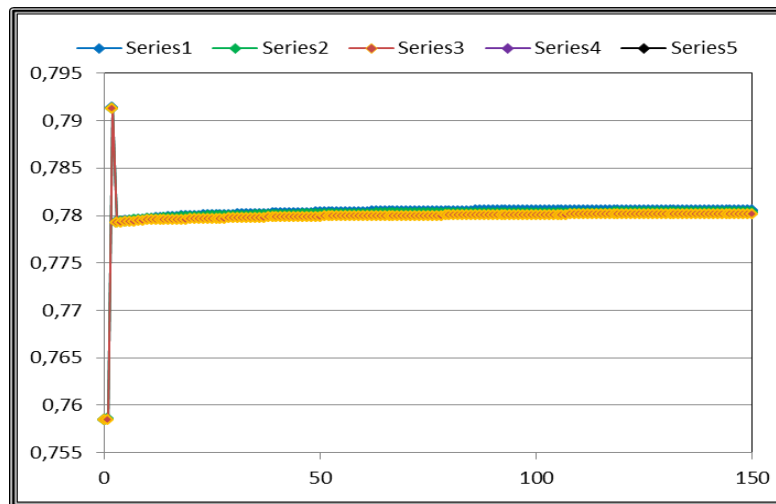
6.4.2 Ir Vs Número de Cambios

Grafica 19: Índice de resiliencia versus Numero de Cambios Válvula V_18529



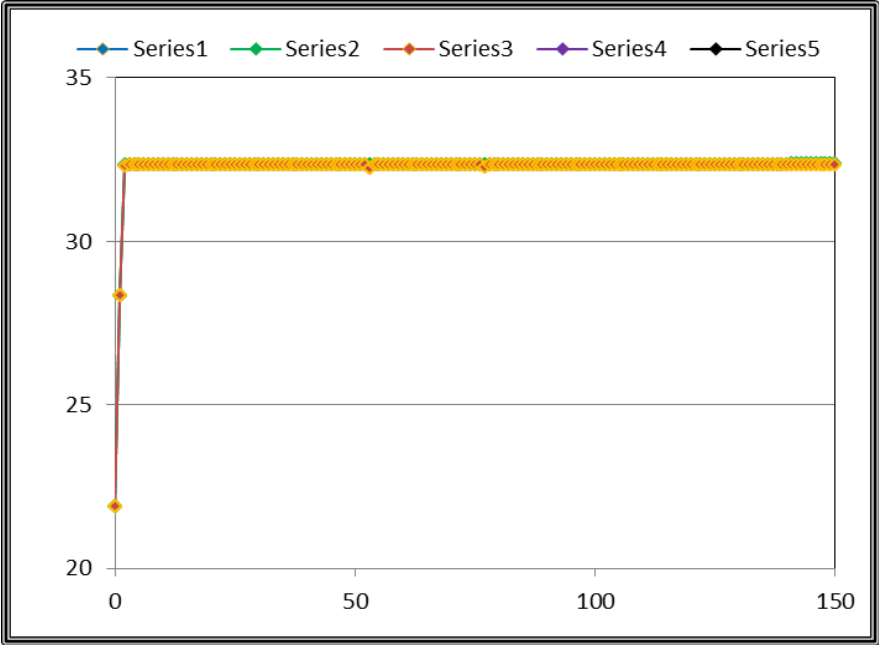
6.4.3 CU Vs Número de Cambios

Grafica 20: Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios Válvula V_18529



6.4.4 Rango de Presiones Vs Número de Cambios

Grafica 21: Rango de Presiones versus Numero de Cambios Válvula V_18529



7. ANALISIS DE RESULTADOS

Al revisar los resultados se deduce que hacer 150 cambios a un sub-sector es poco eficiente, debido a que la variación del índice de resiliencia y el coeficiente de uniformidad no es muy notable, además que su costo es muy elevado, por esto, al analizar las gráficas anteriores se puede apreciar que la variación más notable del índice de resiliencia y del coeficiente de uniformidad se presentan en los primeros cambios.

- ❖ En la gráfica 6, se puede observar que la variación del índice de resiliencia es significativo en los primeros cambios. Los parámetros que se utilizaron son 30%, 50% y 80%, aunque la gráfica muestra que dicha variación es mejor para los parámetros de 50% y 80% debido a la importancia que se le da a la resiliencia.

Nota: Este comportamiento se ve reflejado en las gráficas 12, 13, 14, 18, 19, 20 y en las presentadas en el anexo 10.3.

- ❖ En la Grafica 7, Se puede observar que el rango de presiones logra establecer una uniformidad en los primeros 15 cambios, logrando así mantener una presión óptima para el correcto funcionamiento de la red y de esta manera evitar daños, pérdidas significativas por fugas y alteraciones en la misma.
- ❖ En las gráficas 24, 25 y 26 se evidencia un grado de uniformidad debido a la homogeneidad de los diámetros de la red, sin que los parámetros de importancia que se le asignaron al índice resiliencia afecten el comportamiento de los resultados.

A continuación se presentan unas tablas en donde se evidencian de una manera directa los cambios que se deben realizar en el subsector, para optimizar el índice

de resiliencia y el coeficiente de uniformidad, bajo los diferentes parámetros que fueron asignados.

Tabla de parámetro de 30% para el índice de resiliencia

TABLA 1 30%					
subsectores	N° de cambios	IRi	IRf	CUi	CUf
válvula V_18423	0	1.0000	1.0000	0.6839	0.6838
válvula V_18432	16	0.6829	0.7028	0.6485	0.6402
válvula V_18435	0	1.0000	1.0000	0.7096	0.7093
válvula V_18436	18	0.7796	0.8319	0.4269	0.3493
válvula V_18439	0	1.0000	1.0000	0.6254	0.6251
válvula V_18440	32	0.7957	0.8115	0.561	0.5492
válvula V_18441	10	0.7687	0.8402	0.6450	0.6751
válvula V_18442	0	0.5178	0.5123	0.5560	0.5604
válvula V_18443	0	0.4906	0.4898	0.6926	0.6907
válvula V_18445	0	1.0000	1.0000	0.9957	0.9957
válvula V_18448	0	1.0000	1.0000	0.9982	0.9982
válvula V_18457	12	0.9068	1.0000	0.8782	0.8726
válvula V_18529	3	0.3276	0.4226	0.7597	0.7804
válvula V_18549	0	1.0000	1.0000	0.7490	0.7491
válvula V_18550	0	0.6192	0.6172	0.6076	0.6171
válvula V_18820	17	0.9474	0.9616	0.4303	0.4303
válvula V_18945	24	0.9962	1.0000	0.5421	0.5376
válvula V_18946	17	0.9620	0.9897	0.6766	0.6725
válvula V_19110	0	1.0000	1.0000	0.5982	0.5981
válvula V_19112	0	0.9992	0.9998	0.6514	0.6512
válvula V_19113	3	0.4129	0.4088	0.5598	0.5649
válvula V_19115	0	1.0000	1.0000	0.7278	0.7278
válvula V_19459	10	0.9960	1.0000	0.7422	0.7427
válvula V_3632	0	1.0000	1.0000	0.8018	0.8014
válvula V_3647	5	1.0000	1.0000	0.6234	0.6229
válvula V_3762	5	0.3972	0.8091	0.6095	0.6695
válvula V_5173	8	0.5812	0.5874	0.492	0.4859
válvula V_5969	18	0.9539	1.0000	0.6568	0.6513
válvula V_6006	12	0.5766	0.5781	0.7298	0.7302

Tabla de parámetro de 50% para el índice de resiliencia

TABLA 2 50%					
subsectores	N° de cambios	IRi	IRf	CUi	CUf
válvula V_18423	0	1.0000	1.0000	0.6839	0.6838
válvula V_18432	5	0.6829	0.7102	0.6485	0.6373
válvula V_18435	0	1.0000	1.0000	0.7096	0.7093
válvula V_18436	13	0.7796	0.8669	0.4269	0.3269
válvula V_18439	0	1.0000	1.0000	0.6254	0.6247
válvula V_18440	14	0.7957	0.8131	0.5610	0.5488
válvula V_18441	13	0.7687	0.8639	0.6450	0.6597
válvula V_18442	5	0.5178	0.5158	0.5560	0.5595
válvula V_18443	0	0.4906	0.4901	0.6926	0.6886
válvula V_18445	0	1.0000	1.0000	0.9957	0.9957
válvula V_18448	0	1.0000	1.0000	0.9982	0.9982
válvula V_18457	10	0.9068	1.0000	0.8782	0.8724
válvula V_18529	3	0.3276	0.4228	0.7597	0.7803
válvula V_18549	0	1.0000	1.0000	0.7490	0.7490
válvula V_18550	5	0.6192	0.6170	0.6076	0.6060
válvula V_18820	2	0.9616	1.0000	0.4303	0.3932
válvula V_18945	10	0.9962	1.0000	0.5421	0.5373
válvula V_18946	5	0.9620	1.0000	0.6766	0.6673
válvula V_19110	0	1.0000	1.0000	0.5982	0.5982
válvula V_19112	0	0.9992	0.9999	0.6514	0.6511
válvula V_19113	5	0.4129	0.4132	0.5598	0.5624
válvula V_19115	0	1.0000	1.0000	0.7278	0.7279
válvula V_19459	8	0.9960	1.0000	0.7422	0.7421
válvula V_3632	2	1.0000	1.0000	0.8018	0.8014
válvula V_3647	0	1.0000	1.0000	0.6234	0.6229
válvula V_3762	5	0.3972	0.8513	0.6095	0.6592
válvula V_5173	10	0.5812	0.5946	0.4859	0.4491
válvula V_5969	15	0.9539	1.0000	0.6568	0.6506
válvula V_6006	3	0.5766	0.5798	0.7298	0.7301

Tabla de parámetro de 80% para el índice de resiliencia

TABLA 3 80%					
subsectores	N° de cambios	IRi	IRf	CUi	CUf
válvula V_18423	0	1.0000	1.0000	0.6839	0.6838
válvula V_18432	15	0.6829	0.7129	0.6485	0.6371
válvula V_18435	0	1.0000	1.0000	0.7096	0.7093
válvula V_18436	25	0.7796	0.8657	0.4269	0.3173
válvula V_18439	2	1.0000	1.0000	0.6254	0.6247
válvula V_18440	11	0.7957	0.8133	0.5610	0.5481
válvula V_18441	10	0.7687	0.8644	0.6450	0.6591
válvula V_18442	0	0.5178	0.5163	0.5560	0.5589
válvula V_18443	5	0.4906	0.4885	0.6926	0.6854
válvula V_18445	0	1.0000	1.0000	0.9957	0.9957
válvula V_18448	0	1.0000	1.0090	0.9982	0.9982
válvula V_18457	10	0.9068	1.0000	0.8782	0.8721
válvula V_18529	3	0.3276	0.4425	0.7597	0.7803
válvula V_18549	0	1.0000	1.0000	0.7490	0.7490
válvula V_18550	0	0.6192	0.6113	0.6076	0.6037
válvula V_18820	2	0.9474	1.0000	0.4303	0.3930
válvula V_18945	8	0.9962	1.0000	0.5421	0.5372
válvula V_18946	8	0.9620	1.0000	0.6766	0.6673
válvula V_19110	0	1.0000	1.0000	0.5982	0.5981
válvula V_19112	0	0.9992	0.9999	0.6514	0.6511
válvula V_19113	3	0.4132	0.4132	0.5598	0.5608
válvula V_19115	0	1.0000	1.0000	0.7278	0.7278
válvula V_19459	4	0.9960	1.0000	0.7421	0.7421
válvula V_3632	0	1.0000	1.0000	0.8018	0.8014
válvula V_3647	0	1.0000	1.0000	0.6234	0.6229
válvula V_3762	8	0.3972	0.8571	0.6095	0.6585
válvula V_5173	8	0.5812	0.5945	0.4920	0.4493
válvula V_5969	17	0.9539	1.0000	0.6568	0.6506
válvula V_6006	2	0.5766	0.5788	0.7298	0.7300

8. CONCLUSIONES

- ✓ Al revisar los resultados se deduce que hacer 150 cambios a un sub-sector es poco eficiente, debido a que la variación del índice de resiliencia y el coeficiente de uniformidad no es muy notable, además que su costo es muy elevado, por esto, al analizar las gráficas anteriores se puede apreciar que la variación más notable se presentan en los primeros cambios.
- ✓ Cuando los distritos son homogéneos, aguas abajo de una reguladora no es fácil aplicar la metodología debido a que los cambios no afectan mucho la resiliencia de la red.
- ✓ Para poder aplicar la metodología se tuvo que dividir el distrito en sub-distritos cambiando las válvulas reguladoras por embalses y esto puede afectar los resultados de manera considerable.
- ✓ En las redes pequeñas el cambio de tuberías no es muy significativo ya que su variación en la resiliencia y en el coeficiente de uniformidad no es muy notable.
- ✓ Para que la metodología sea fácil de aplicar, debe haber una variabilidad en diámetros y así poder obtener cambios en la resiliencia notorios.
- ✓ Debido a que hay una válvula reguladora aguas arriba y una cabeza establecida las pérdidas en diámetros pequeños no son tan significativas, debido que al hacer cambios las pérdidas van hacer iguales a las iniciales.
- ✓ Teniendo en cuenta la falta de criterios de parada, los desbordamientos numéricos, a la hora de ejecutar el programa que desarrollo TORRES (2012) [16], se debe mejorar el programa añadiendo las debidas soluciones para que no se generen desbordamientos numéricos y crear unos parámetros de parada

diferentes a los que él propone, ya que detener el programa al finalizar el número de cambios que desde un inicio se propuso es algo de poca utilidad ya que la variación de la resiliencia deja de ser significativa después de cierto número de cambios, de tal manera que un criterio de parada puede ser la variación de la resiliencia de la red, si no hay variación significativa detener la ejecución del programa.

9. BIBLIOGRAFIA

- [1] AURELIO HERNANDEZ, *Diseño de redes de distribución. Máster de ingeniería del agua. Cap1. Introducción a la ingeniería hidráulica.*
- [2] STREETER, V., Wylie, B., Bedford, K., *Fluid Mechanics. EE.UU. ECB/McGraw-Hill, pp.260.*
- [3] SALDARRIAGA, JUAN, (2001). *Hidráulica de tuberías. Bogotá, Colombia: McGraw Hill.*
- [4] SALDARRIAGA, JUAN, (2001). <http://www.scielo.org.co/pdf/ring/n22/n22a14.pdf> consultada el 25 de octubre del 2001.
- [5] SALDARRIAGA, JUAN.; Serna, Manuel.; Arbeláez, Juliana. *Diseño de redes de distribución incluyendo el concepto de resiliencia. Bogotá mayo del 2005.*
- [6] ARAQUE FUENTES, Diego A. *Optimización de redes de acueducto con el fin de uniformizar el estado de presiones, Universidad de los andes, Bogotá Junio del 2004.*
- [7] TODINI, E. <http://es.scribd.com/doc/48891129/16-Renovacion-Priorizada-de-Redes-Con-Concepto-de-Potencia-Unitaria> consultada el 25 de octubre del 2011.
- [8] SALDARRIAGA, JUAN. Serna, Manuel.; Arbeláez, Juliana. *Diseño de redes de distribución incluyendo el concepto de resiliencia. Bogotá mayo del 2008.*

- [9] SALDARRIAGA, JUAN y Araque <http://www.scielo.org.co/pdf/ring-n22/n22a15.pdf> consultada el 25 de octubre del 2011.
- [10] MENDOZA, F.L.; Saldarriaga, J.G. *Diseño Optimizado de redes de distribución de agua potable incluyendo análisis de costo mínimo versus resiliencia de la red.*, pg. 3 párr. 2.
- [11] PRASAD, T.D & PARK N-S, *Multiobjective genetic algorithms for design of water distribution networks*. Journal of Water Resources Planning and Management. Vol.130, Issue 1 (2004); p 73-82.
- [12] SALDARRIAGA J.G, OCHOA S, MORENO M, ROMERO N & CORTÉS O. *Renovación priorizada de redes de distribución utilizando el concepto de potencia unitaria*. Universidad de los Andes. (2010); p 7-15.
- [13] Centro de investigaciones en acueductos y alcantarillados. Universidad de los Andes.
- [14] PALACIOS, Luis; Benavidez Holger. *Diseño económico de redes de distribución de agua a presión*. Universidad técnica particular de Loja.
- [15] SALDARRIAGA, Juan G. CONTRERAS, Felipe S. *Metodología para la determinación del plano óptimo de presiones en una red de distribución de agua potable*. XX CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA. (2002).
- [16] TORRES, Sergio, *Optimización del índice de resiliencia y uniformización de la presión como criterios para renovar tuberías en redes de distribución de acueductos*. (2012).

- [17] ARAQUE FUENTES, Diego A. *Optimización de redes con el fin de uniformizar el estado de presiones*. Bogotá, 2006. Trabajo de grado (Magíster en Ingeniería Civil). Universidad de los Andes.
- [18] YATES, D.F.; Templeman, A.B. y Boffey T.B 1984. *The computational complexity of the problem of determining least capital cost designs for water supply networks*. *Engg. Optimization*, 7(2), pp. 142-155.
- [19] Darian Nicholas Raad. Multi-objective optimization of water distribution systems design using metaheuristics. Cap 8.
- [20] MARLER, R.T. & ARORA, J.S. *Survey of multi-objective optimization methods for engineering*. Structural and Multidisciplinary Optimization. (2004).
- [21] <http://www.instagua.upv.es/Epanet/>, consultada el 8 de septiembre 2011.
- [22] *EPANET 2.0 vE, Pagina de EPANET en castellano, análisis y simulación de redes hidráulicas a presión*.
- [23] *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS- 2000), sección II, título B*.
- [24] Athan, T.W.; Papalambros, P.Y. 1996 A note on weighted criteria methods for compromise solutions in multi-objective optimization, *Eng.optim.*27, 155-176
- [25] Todini E. (2000). Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban Water Journal*, 2, 115-122.

ANEXOS

ANEXO A. PRESIONES MÍNIMAS EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN

El nivel de complejidad está determinado por el periodo para el cual fue diseñada o se va diseñar. [23]

Tabla 9

Nivel de complejidad	Presión mínima (kPa)	Presión mínima (metros)	Red matriz (años)	Red secundaria (años)	Red terciaria (años)
Bajo	98.1	10	-	15	15
Medio	98.1	10	20	15	20
Medio alto	147.2	15	25	20	-
Alto	147.2	15	30	25	-

ANEXO B. RUGOSIDAD ABSOLUTA EN TUBOS COMERCIALES

Tabla 10.

RUGOSIDAD ABSOLUTA EN TUBOS COMERCIALES	
MATERIALES	ϵ , en mm
Tubos lisos	
De vidrio, cobre, laton, madera (bien cepillada), acero nuevo soldado y con una mano interior de pintura; tubos de acero de precisión sin constura, serpentines industriales, plastico, hule.	0,0015
Tubos industriales de laton.	0,025
Tubos de madera.	0.2 a 1
Hierro forjado.	0,05
Fierro fundido nuevo.	0,25
Fierro fundido, con proteccion interior de asfalto.	0,12
Fierro fundido oxidado.	1 a 1.5
Fierro fundido, con incrustaciones	1.5 a 3
Fierro fundido, centrifugado	0,05
Fierro fundido nuevo, con bridas o juntas de macho y campana.	0.15 a 0.3
Fierro fundido usado, con bridas o juntas de macho y campana.	2 a 3.5
Fierro fundido para agua potable, con bastantes incrustaciones y diametro de 50 a 125 mm.	1 a 4
Fierro galvanizado.	0,15
Acero rolado, nuevo.	0,05
Acero laminado, nuevo.	0.04 a 0.1
Acero laminado con proteccion interior de asfalto.	0,05

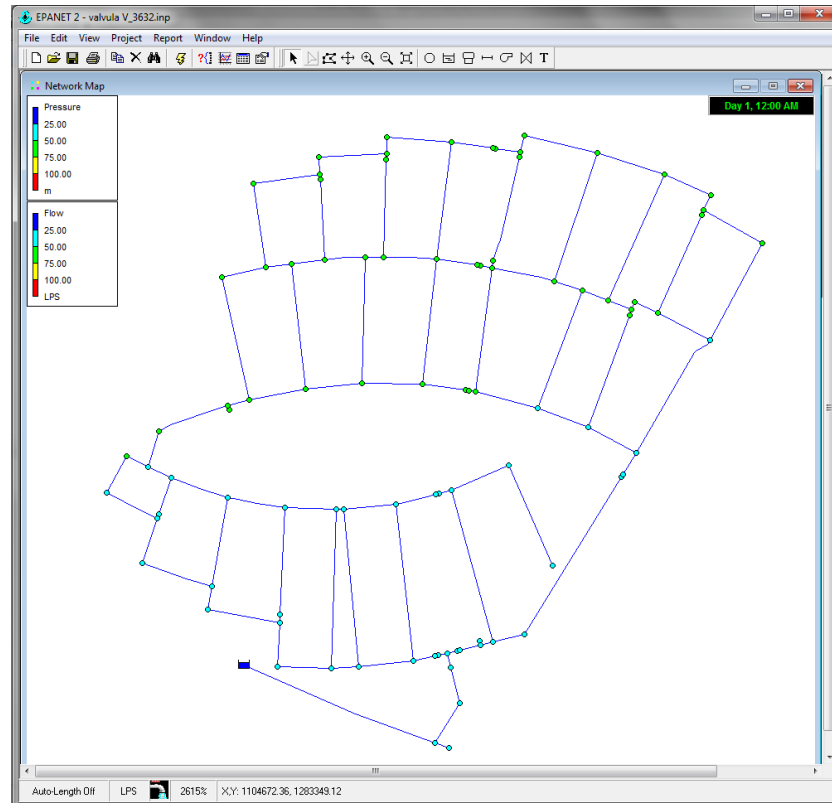
Tubos de acero soldado de calidad normal	
Nuevo.	0.05 a 0.10
Limpiado despues de mucho uso.	0.15 a 0.20
Moderadamente oxidado, con pocas incrustaciones.	0,4
Con muchas incrustaciones.	3
Con remaches transversales, en buen estado.	0,1
Con costura longitudinal y una linea transversal de remaches en cada junta, o bine laqueado interiormente.	0.3 a 0.4
Con lineas transversales de remaches, sencilla o doble; o tubos remachados con doble hilera longitudinal de remaches e hilera transversal sencilla, sin incrustaciones.	0.6 a 0.7
Acero soldado, con una hilera transversal sencilla de pernos en cada junta, laqueado interior, sin oxidaciones, con circulacion de agua turbia.	1
Acero soldado, con doble hilera transversal de pernos, agua turbia, tuberias remachadas con doble costura longitudinal de remaches y transversal sencilla, interior asfaltado o laqueado.	1.2 a 1.3
Acero soldado, con costura doble de remaches transversales, muy oxidado. Acero remachado, de cuatro a seis filas longitudinales de remaches, con mucho tiempo de servicio.	2
Tubos remachados, con filas longitudinales y transversales.	
a) Espesor de lamina < 5 mm	0,65
b) Espesor de lamina de 5 a 12 mm	1,95
c) Espesor de lamina > 12 mm, o entre 6 y 12 mm, si las hileras de pernos tienen cubrejuntas.	3
d) Espesor de lanima > 12 mm con cubrejuntas.	5,5
Tubos remachados, con cuatro filas tranversales y seis longitudinales con cubrejuntas interiores.	4
Asbesto-cemento nuevo.	0,025
asbesto-cemento, con proteccion interior de safalto.	0,0015
Concreto centrifugado, nuevo.	0,16
Concerto centrifugado, con proteccion bituminosa.	0.0015 a 0.125
Concreto en galerias, colado con cimbra normal de madera.	1 a 2
Concreto en galerias, colado con cimbra rugosa de madera.	10
Concreto armado en tubos y galerias, con acabados interior cuidadosamente terminado a mano.	0,01
Concreto de acabado liso.	0,025
Conductos de concreto armado, con acabado liso y varios años de servicio.	0.2 a 0.3
Concreto alisado interiormente con cemento.	0,25
Galerias con acabado interior de cemento.	1.5 a 1.6
Concreto con acabado normal.	1 a 3
Concreto con acabado rugoso.	10
Cemento liso.	0.3 a 0.8
Cemento no pulido.	1 a 2
Concreto presforzado Freyssinet.	0,04
Concreto presforzado Bona y Socoman	0,25
Mamposteria de piedra, bien junteada.	1.2 a 2.5
Mamposteria de piedra rugosa, sin juntear.	8 a 15
Mamposteria de piedra, mal acabada.	1.5 a 3

Fuente: Sotelo; Hidráulica General, Volumen 1, México. Pp. 285-286

ANEXO C. TABLAS RESULTADOS

Válvula V_3632

RED 5: Válvula v_3632



CARACTERIZACION

Tabla 11: Rango diámetros Válvula V_3632

rango diámetros	# tubos	Long [m]
2 [pulg]	22	683.65
3 [pulg]	87	1445.78
4 [pulg]	5	111.47

Grafica 22: Porcentaje tubos Válvula V_3632

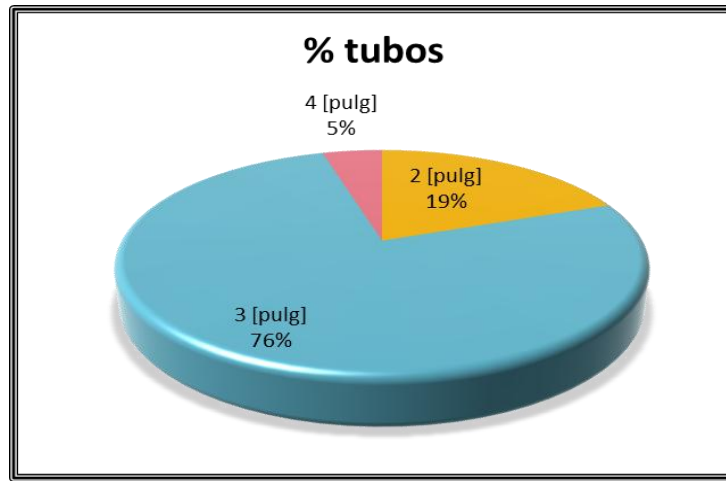
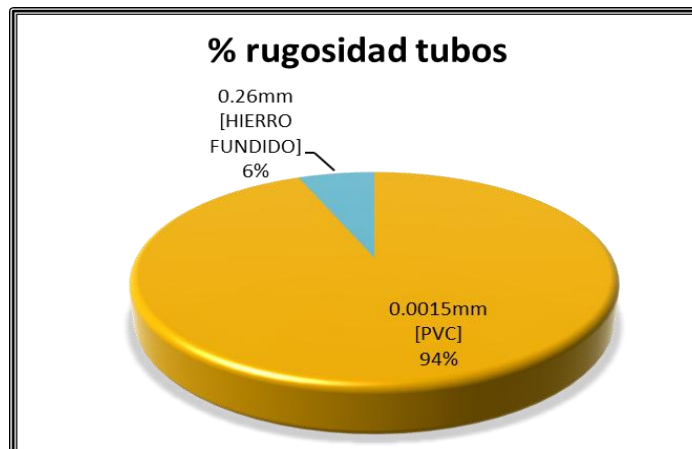


Tabla 12: Rangos Rugosidad Válvula V_3632

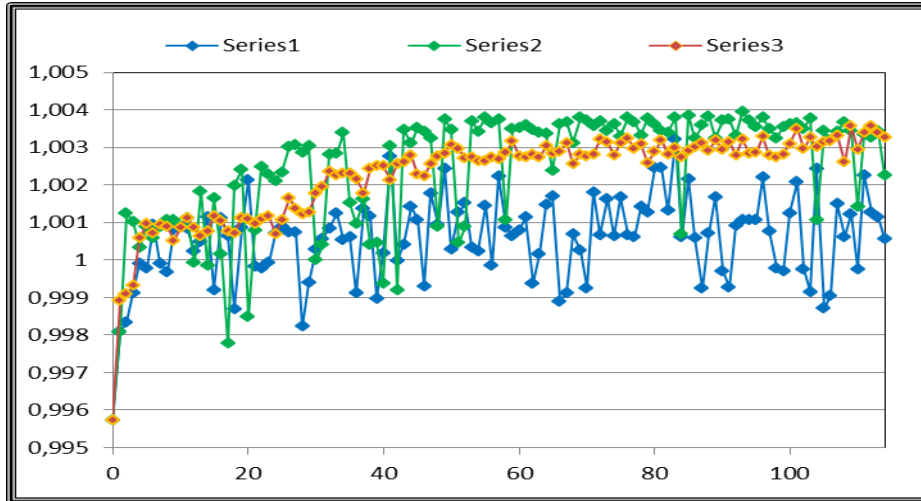
rangos rugosidad	# tubos
0.0015mm [PVC]	107
0.26mm [HIERRO FUNDIDO]	7

Grafica 23: Porcentaje Rugosidad tubos Válvula V_3632



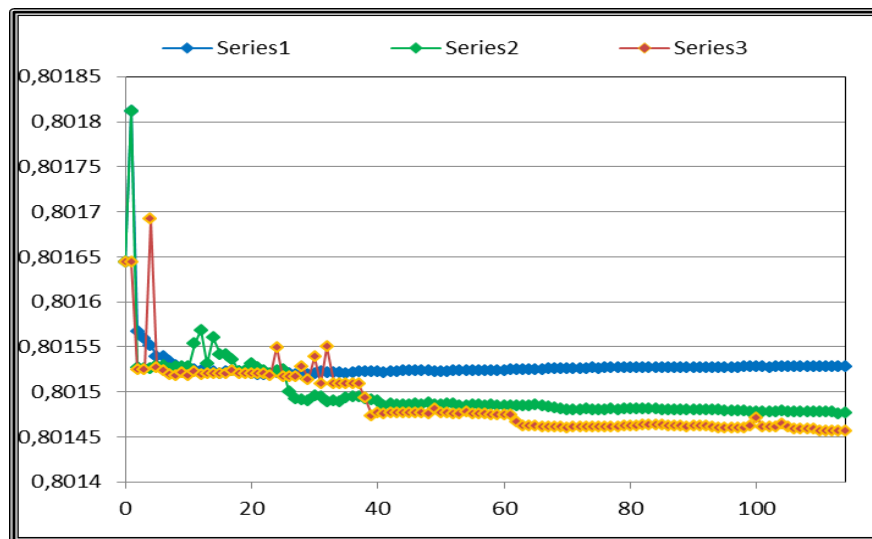
Índice de Resiliencia versus Numero de Cambio

Grafica 24: Índice de Resiliencia versus Numero de Cambios. Válvula V_3632



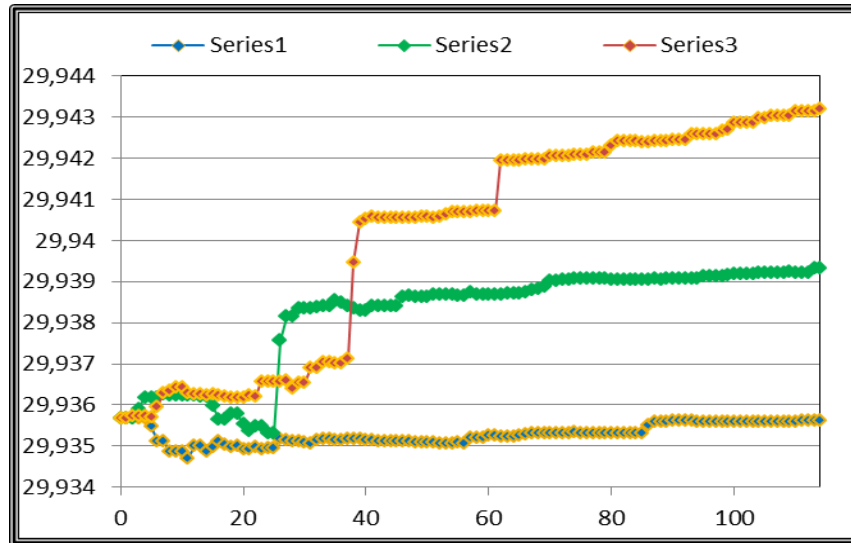
Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios

Grafica 25: Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios. Válvula V_3632



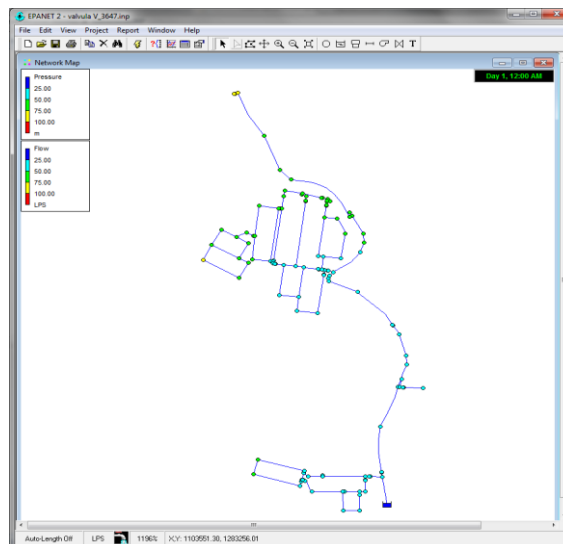
Rango de Presiones versus Numero de Cambios

Grafica 26: Rango de Presiones versus Numero de Cambios. Válvula V_3632



Válvula V_3647

RED 6: válvula v_3647



CARACTERIZACION

Tabla 13: Rango diámetros Válvula V_3647

rango de diámetros	# tubos	Long [m]
2 [pulg]	52	1123.07
3 [pulg]	49	505.82
4 [pulg]	27	680.74

Grafica 27: Porcentaje tubos Válvula V_3647

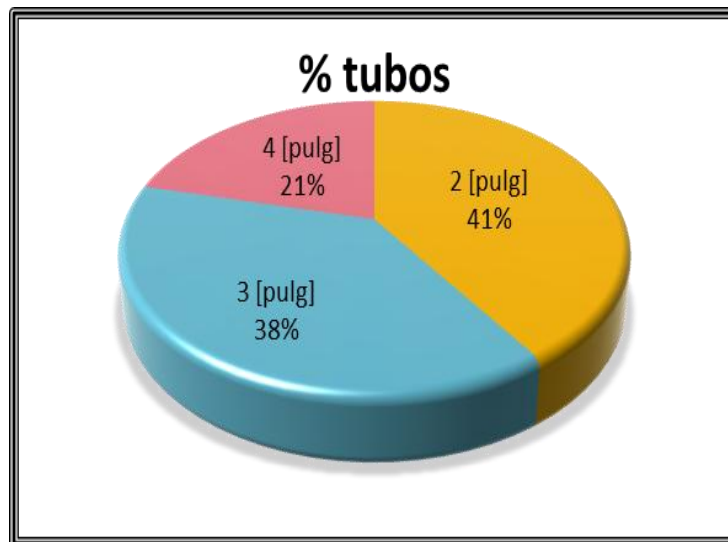
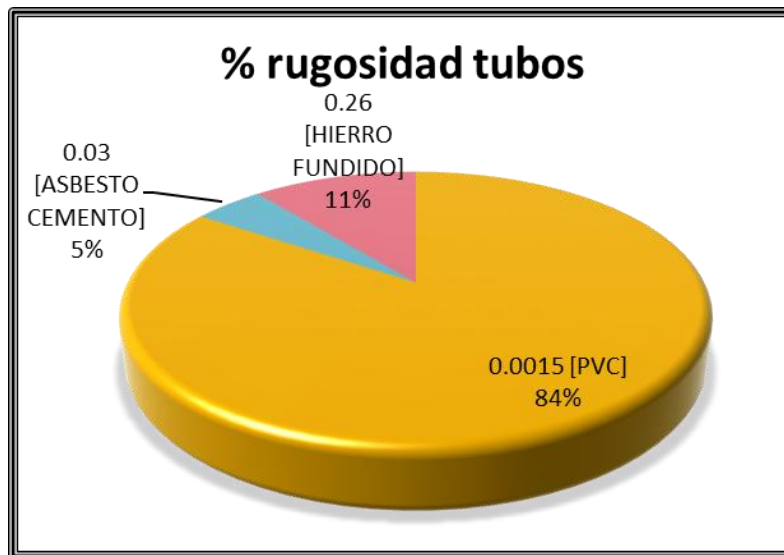


Tabla 14: Rangos rugosidad Válvula V_3647

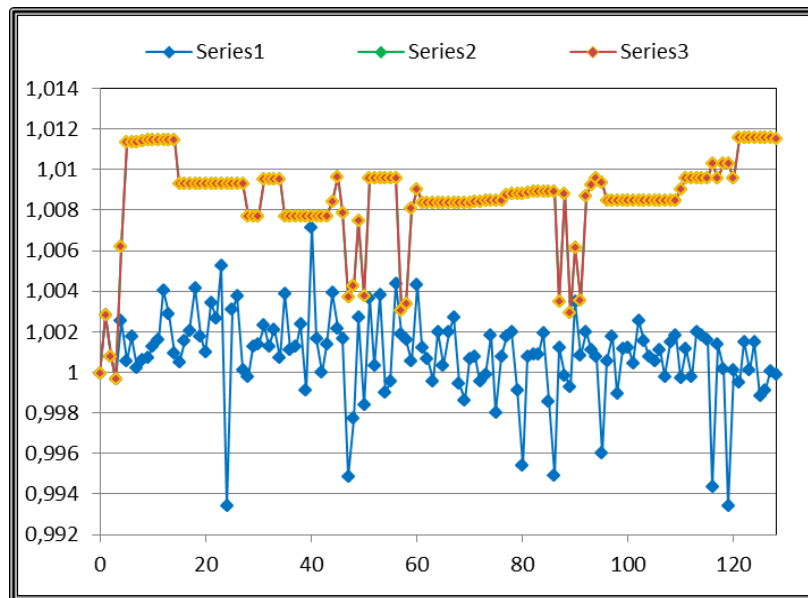
Rangos rugosidad	# tubos
0.0015 [PVC]	108
0.03 [ASBESTO CEMENTO]	6
0.26 [HIERRO FUNDIDO]	14

Grafica 28: Porcentaje Rugosidad tubos Válvula V_3647



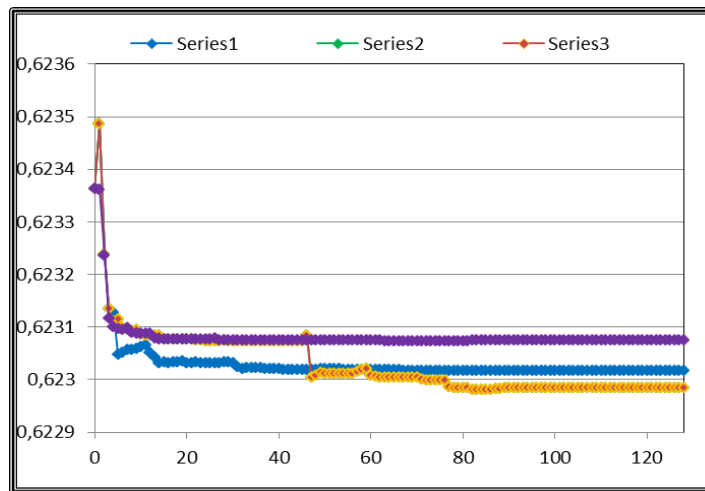
Índice de Resiliencia versus Numero de Cambios

Grafica 29: Índice de Resiliencia versus Numero de Cambios. Válvula V_3647



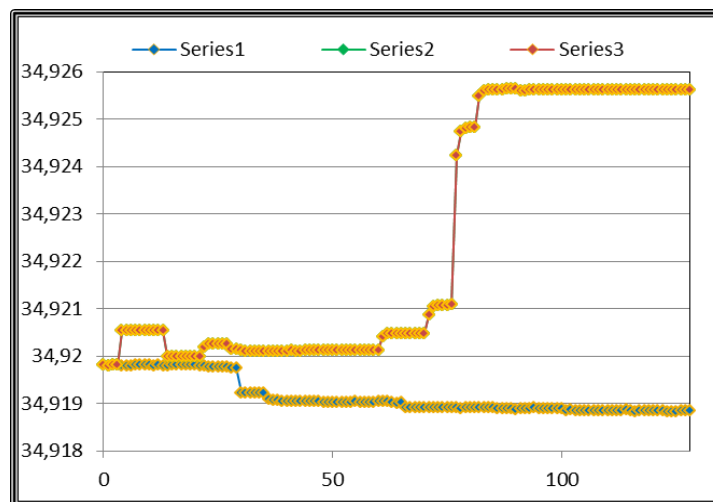
Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios

Grafica 30: Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios. Válvula V_3647



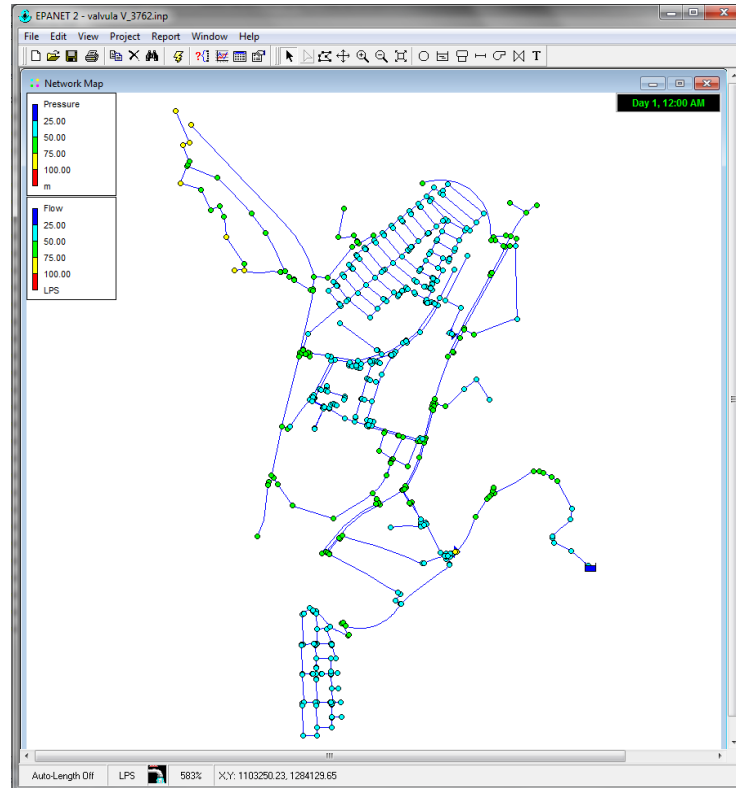
Rango de Presiones versus Numero de Cambios

Grafica 31: Rango de Presiones versus Numero de Cambios. Válvula V_3647



Válvula V_3762

RED 7: VALVULA V_3762



CARACTERIZACION

Tabla 15: Rango diámetros Válvula V_3762

rango diámetros	# tubos	Long [m]
2 [pulg]	127	3276.27
3 [pulg]	350	5938
4 [pulg]	58	1260.24
6 [pulg]	58	1263.91
8 [pulg]	6	139.77

Grafica 32: Porcentaje tubos Válvula V_3762

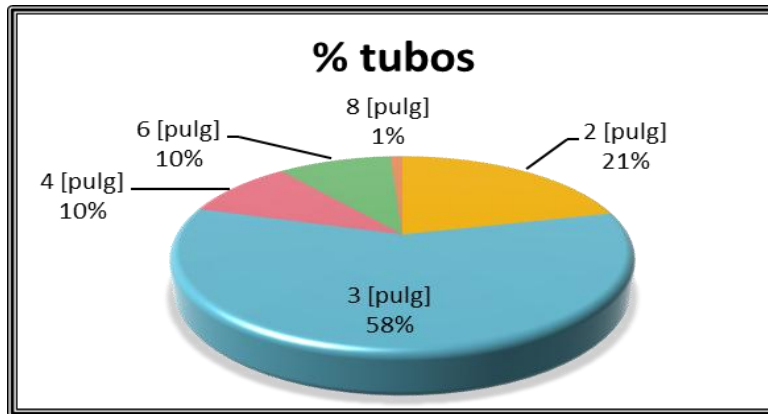
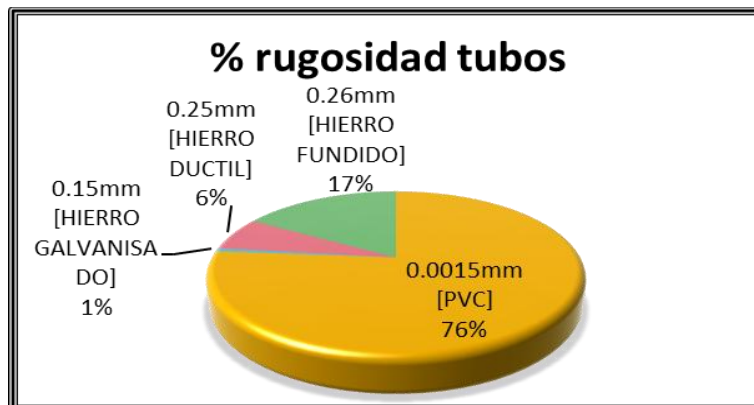


Tabla 16: Rango Rugosidad Válvula V_3762

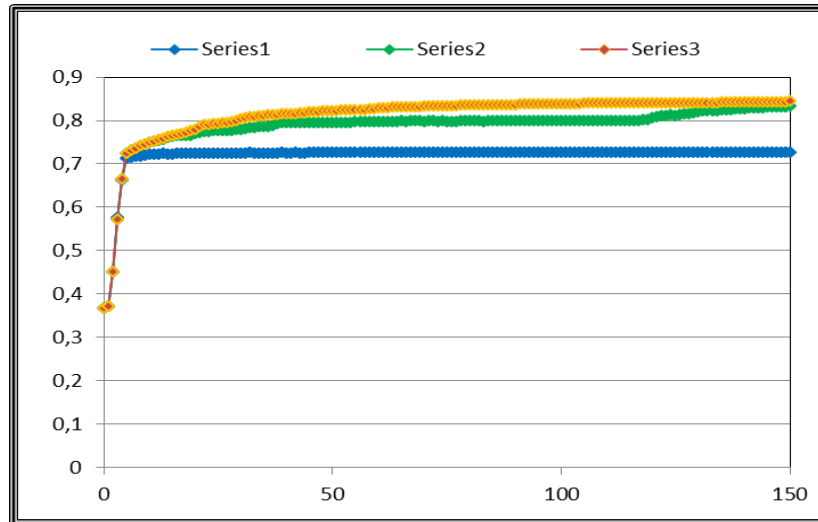
rango rugosidad	# tubos
0.0015mm [PVC]	457
0.15mm [HIERRO GALVANISADO]	4
0.25mm [HIERRO DUCTIL]	39
0.26mm [HIERRO FUNDIDO]	99

Grafica 33: Porcentaje Rugosidad tubos Válvula V_3762



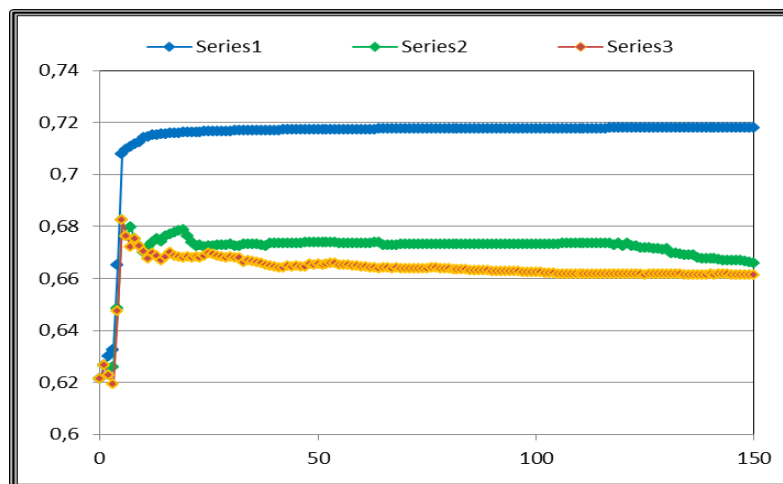
Índice de Resiliencia versus Numero de Cambios

Grafica 34: Índice de Resiliencia versus Numero de Cambios Válvula V_3762



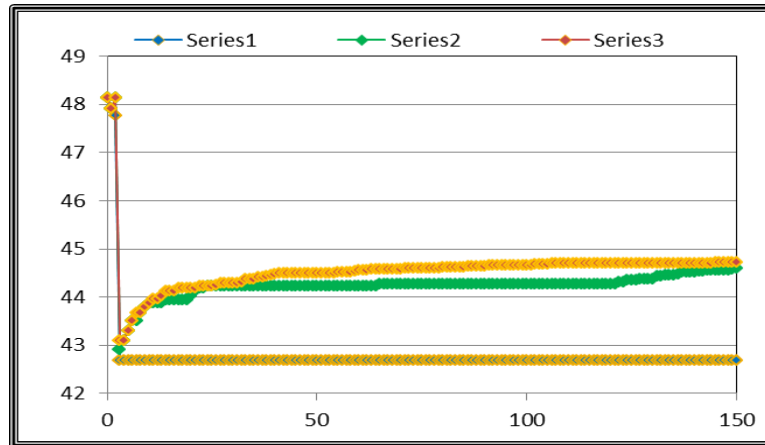
Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios

Grafico 35: Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios Válvula V_3762



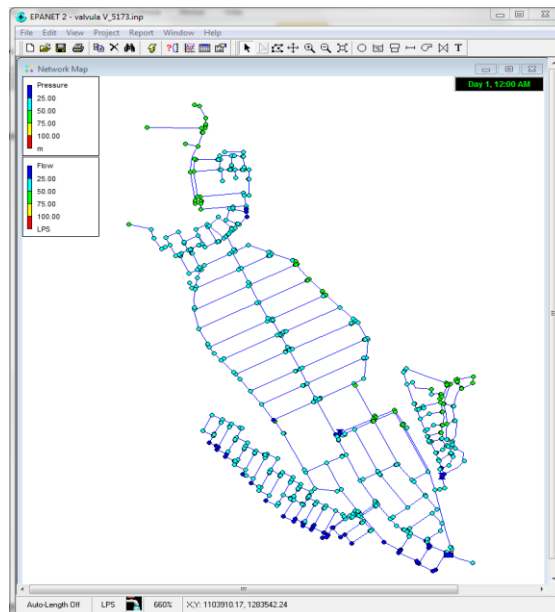
Rango de Presiones versus Numero de Cambios

Graficas 36: Rango de Presiones versus Numero de Cambios Válvula V_3762



VALVULA V_5173

RED 8: Válvula V_5173



CARACTERIZACION

Tabla 17: Rango diámetros VALVULA V_5173

rango diámetros	# tubos	Long [m]
2 pulg	229	3658.01
3 pulg	294	6035.16
4 pulg	114	2414.16
6 pulg	45	1168.48

Graficas 37: Porcentaje tubos válvula v_5173

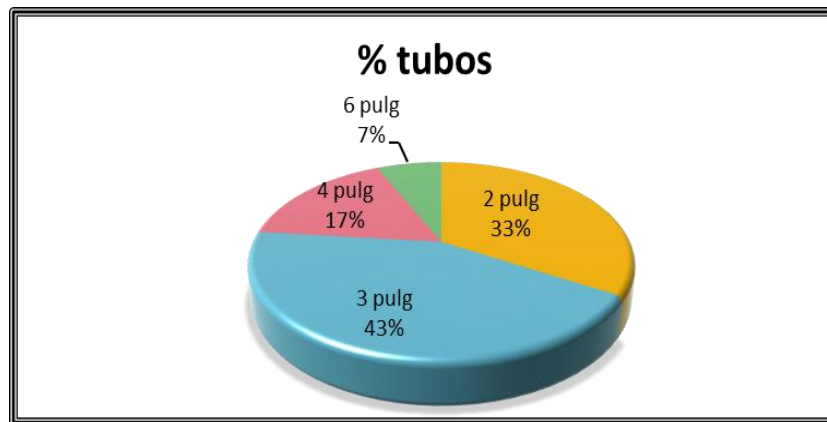
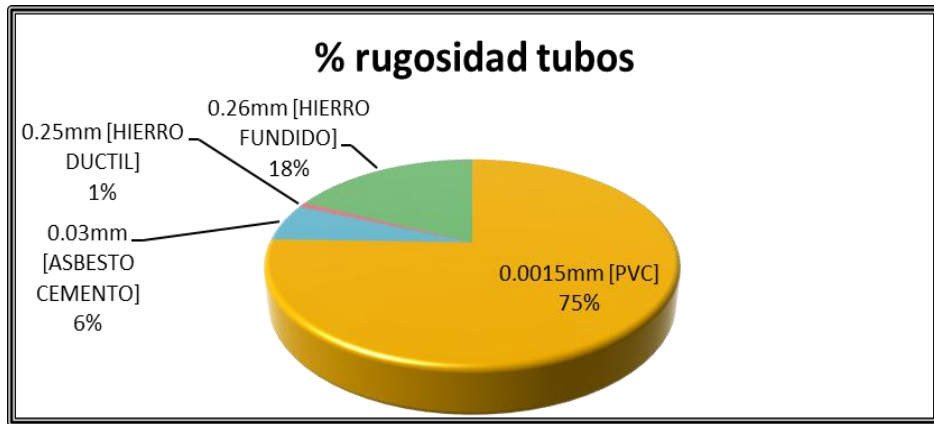


Tabla 18: Rangos rugosidad VALVULA V_5173

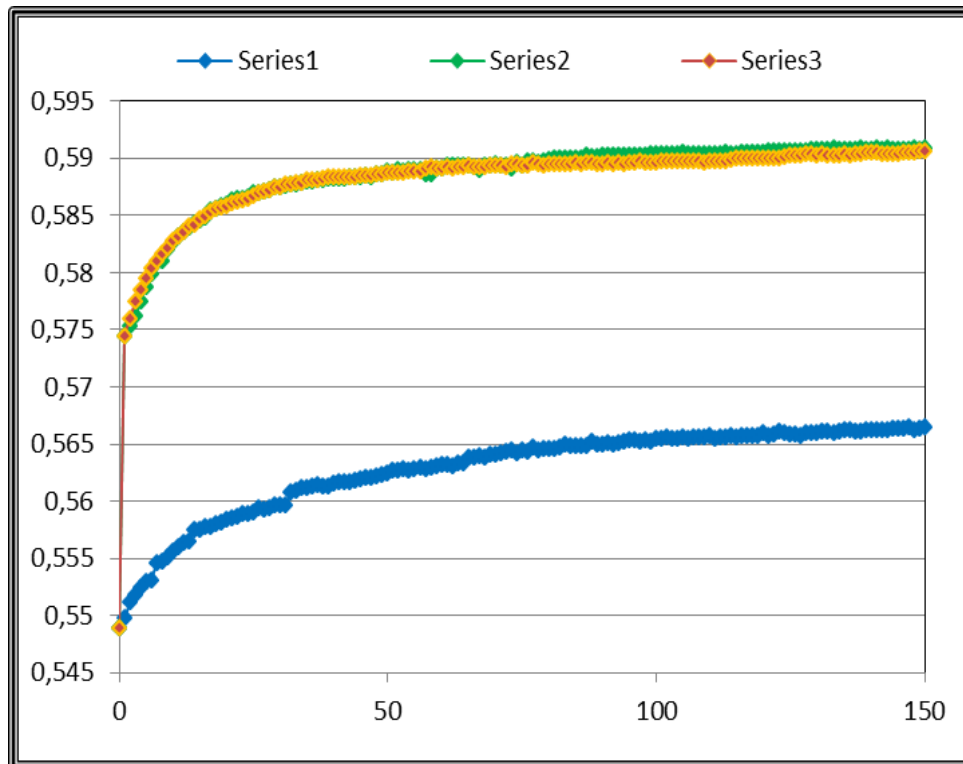
rangos rugosidad	# tubos
0.0015mm [PVC]	515
0.03mm [ASBESTO CEMENTO]	40
0.25mm [HIERRO DUCTIL]	5
0.26mm [HIERRO FUNDIDO]	122

Grafica 38: Porcentaje Rugosidad tubos válvula v_5173



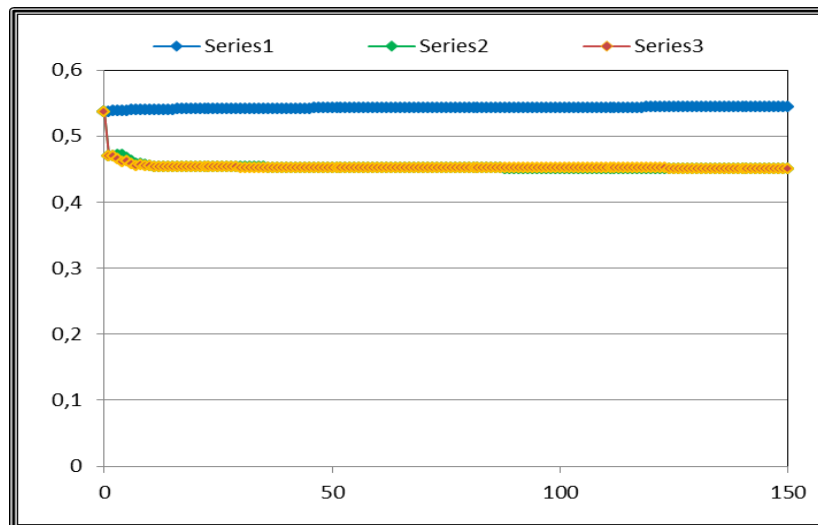
Índice de Resiliencia versus Numero de Cambios

Grafica 39: Índice de Resiliencia versus Numero de Cambios. Válvula v_5173



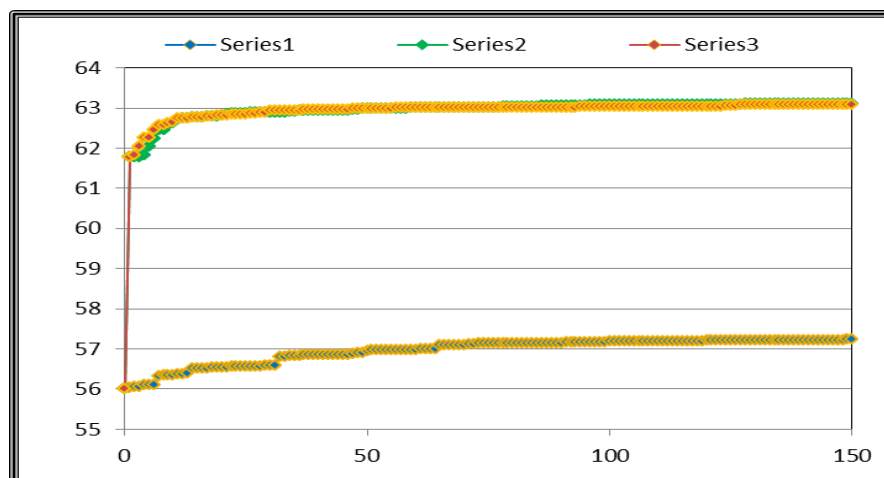
Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios

Grafica 40: Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios. Válvula v_5173



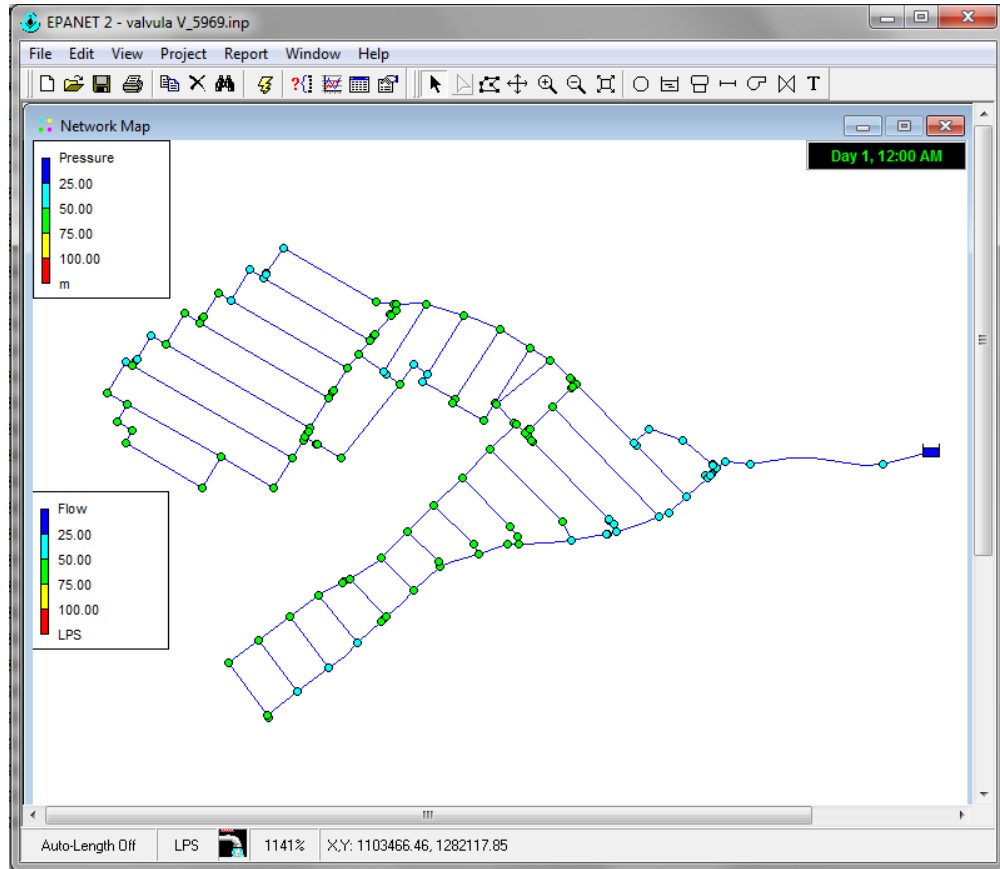
Rangos de Presiones versus Numero de Cambios

Graficas 41: Rangos de Presiones versus Numero de Cambios. Válvula v_5173



VALVULA V_5969

RED 9: VALVULA V_5969



CARACTERIZACION

Tabla 19: Rango diámetros VALVULA V_5969

rango diámetros	# tubos	Long [m]
2 [pulg]	74	2218.1
3 [pulg]	81	1215.57
4 [pulg]	5	156.74

Grafica 42: Porcentaje tubos Válvula v_5969

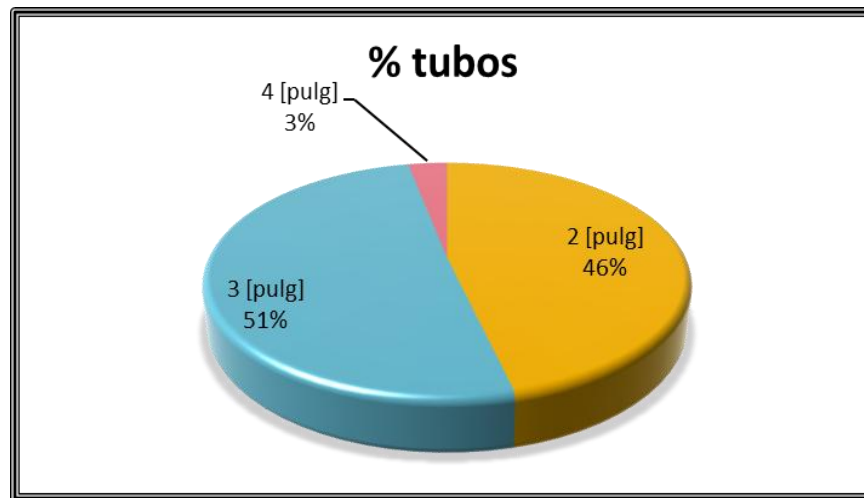
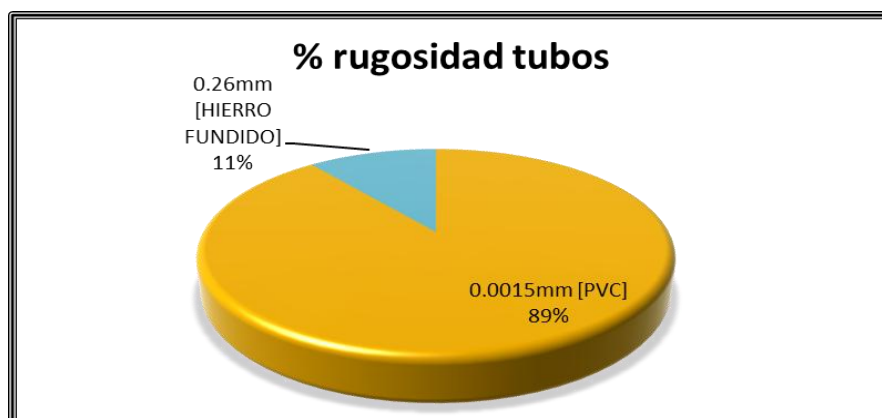


Tabla 20: Rango rugosidad VALVULA V_5969

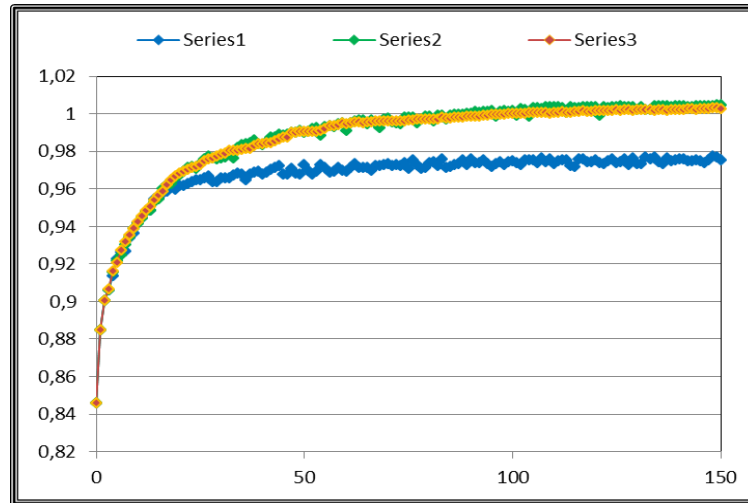
rangos rugosidad	# tubos
0.0015mm [PVC]	143
0.26mm [HIERRO FUNDIDO]	17

Grafica 43: Porcentaje Rugosidad tubos VALVULA V_5969



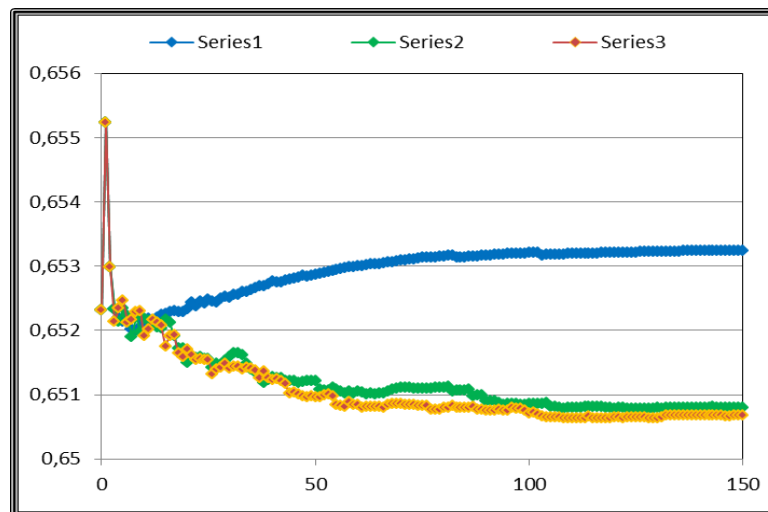
Índice de resiliencia versus Numero de Cambios

Grafica 44: índice de resiliencia versus Numero de Cambios VALVULA V_5969



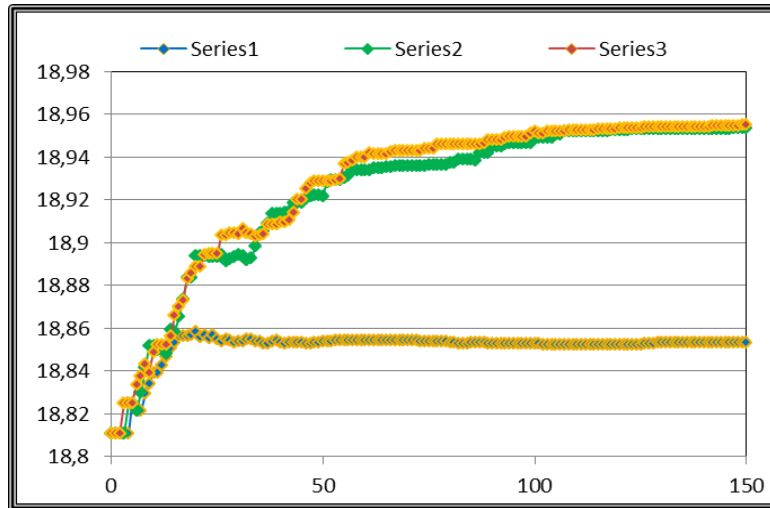
Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios

Grafica 45: Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios VALVULA V_5969



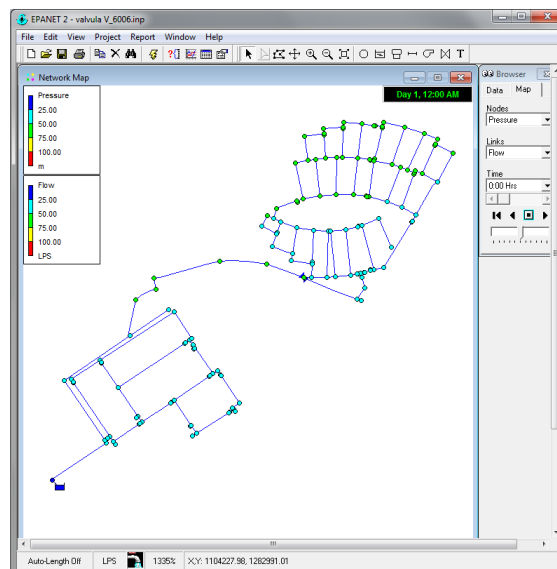
Rango de Presiones versus Numero de Cambios

Grafica 46: Rango de Presiones versus Numero de Cambios VALVULA V_5969



VALVULA V_6006

RED 10: válvula v_6006



CARACTERISTICAS

Tabla 21: Rango diámetros válvula v_6006

rango diámetros	# tubos	Long [m]
2 pulg	22	683.65
3 pulg	136	2333.43
4 pulg	17	734.2

Grafica 47: Porcentaje tubos válvula v_6006

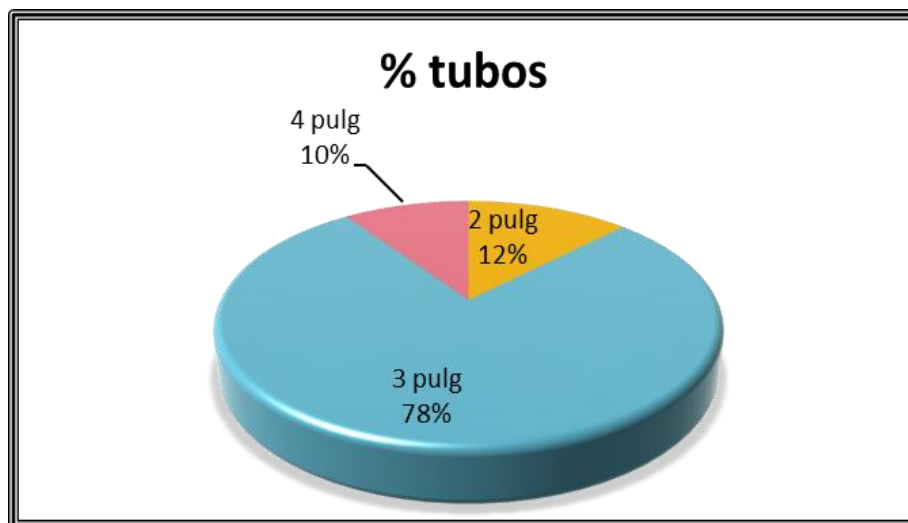
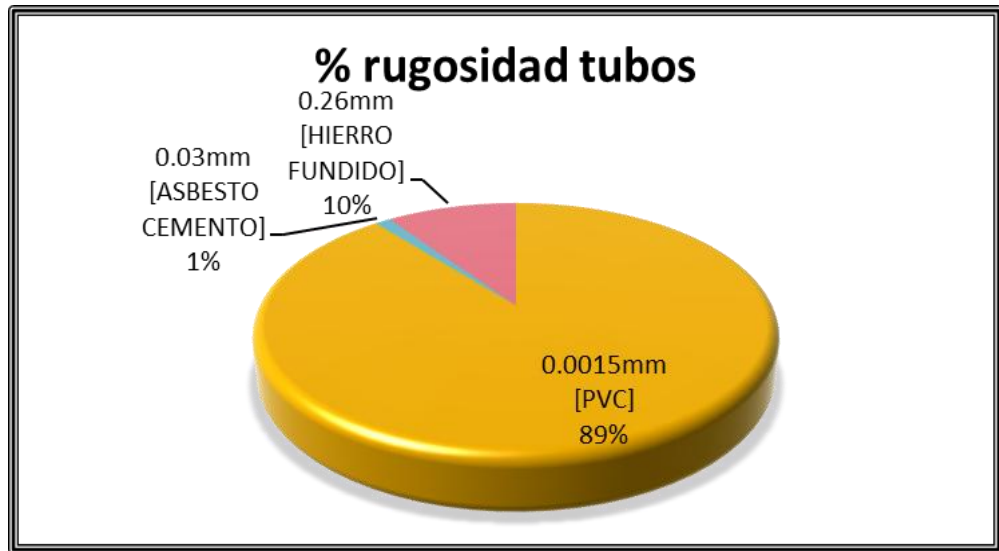


Tabla 22: Rango Rugosidades válvula v_6006

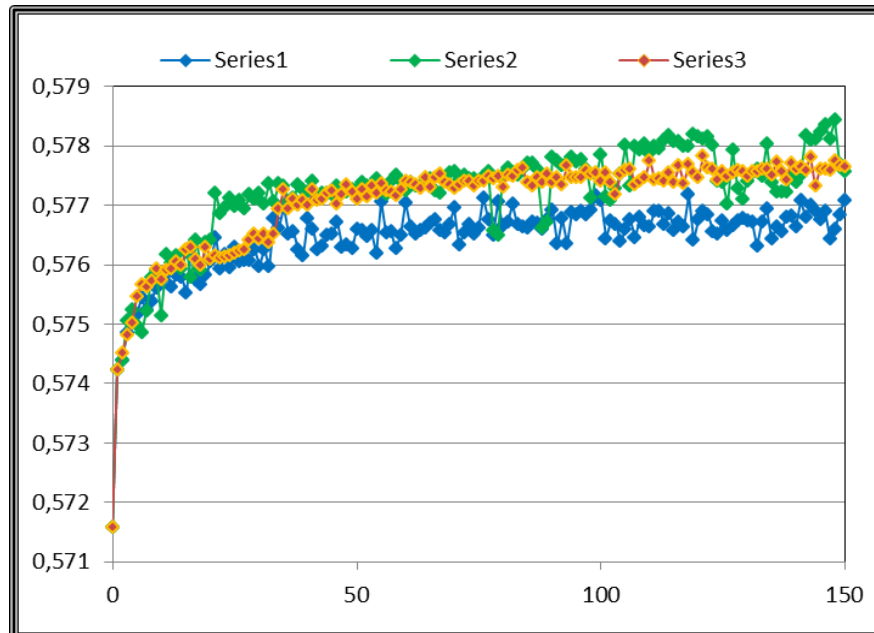
rangos rugosidad	# tubos
0.0015mm [PVC]	156
0.03mm [ASBESTO CEMENTO]	2
0.26mm [HIERRO FUNDIDO]	17

Grafica 48: Porcentaje Rugosidad tubos válvula v_6006



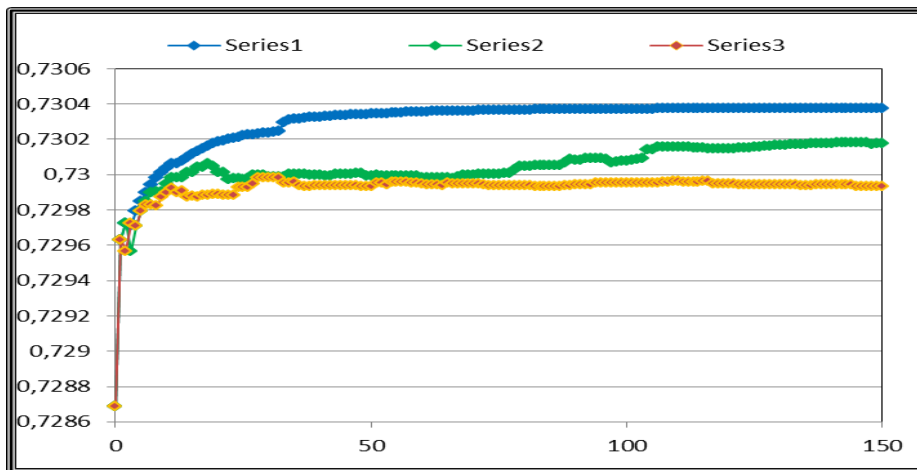
Índice de Resiliencia versus Numero de Cambios

Grafica 49: índice de Resiliencia versus Numero de Cambios válvula v_6006



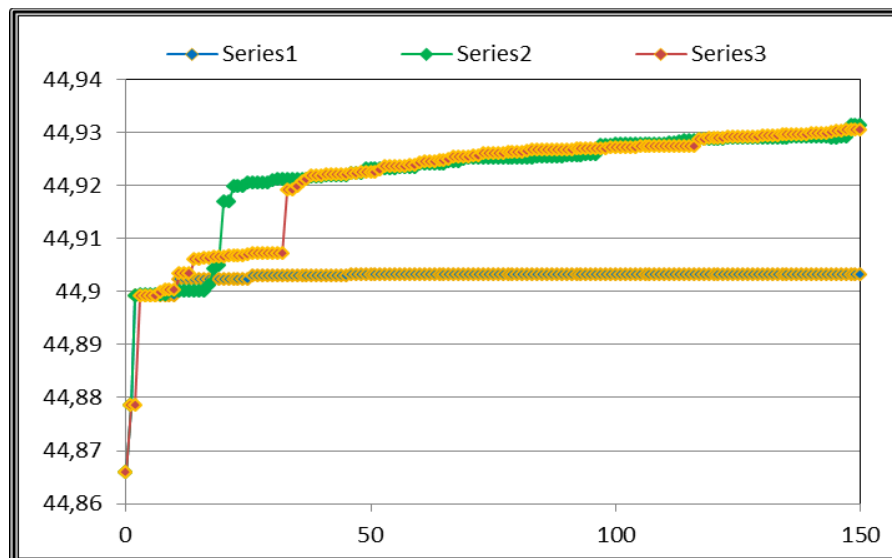
Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios

Grafica 50: Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios válvula v_6006



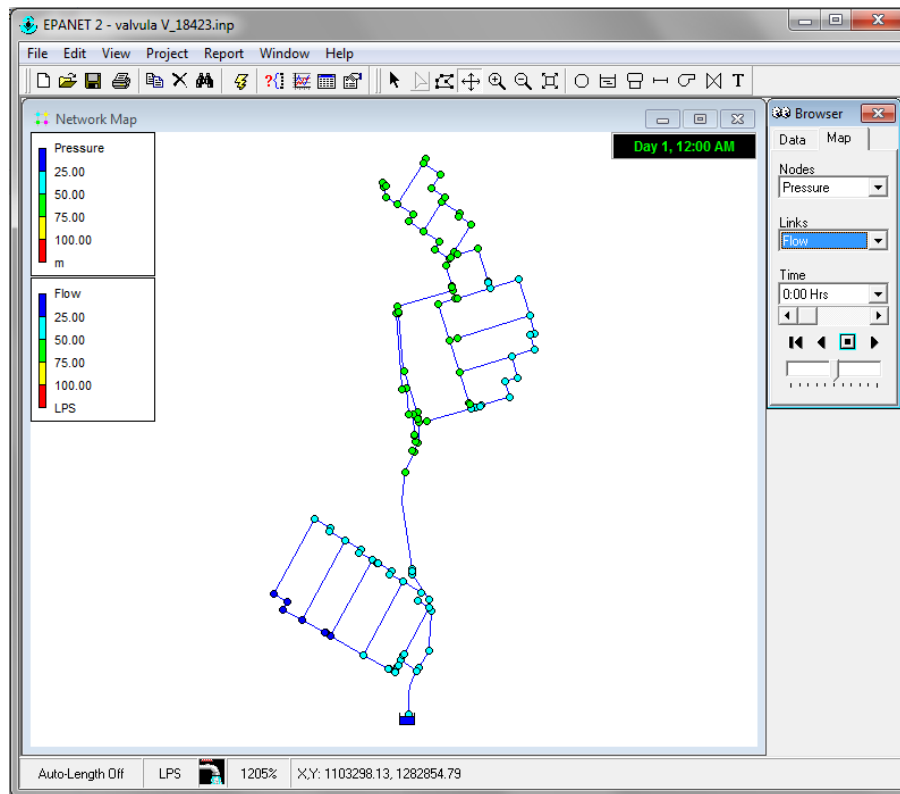
Rango de Presiones versus Numero de Cambios

Grafica 51: Rango de Presiones versus Numero de Cambios válvula v_6006



VALVULA V_18423

RED 11: VALVULA V_18423



CARACTERIZACION

Tabla 23: Rango diámetros VALVULA V_18423

rango diámetros	# tubos	Long [m]
3 pulg	74	1327.4
4 pulg	47	701.97
6 pulg	3	47.51

Grafica 52: Porcentaje tubos VALVULA V_18423

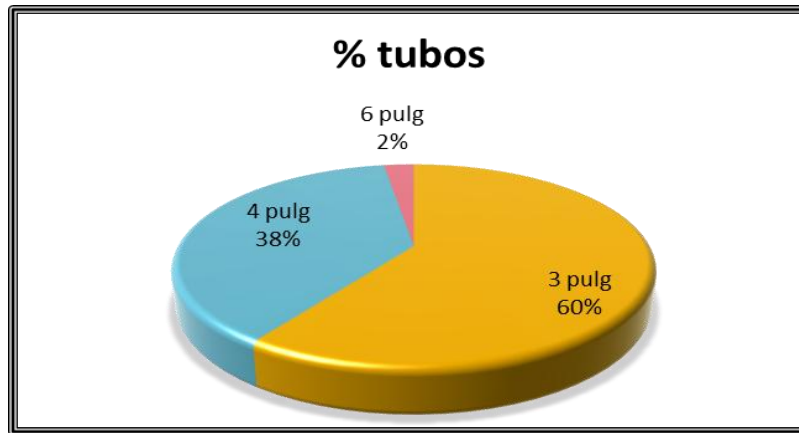
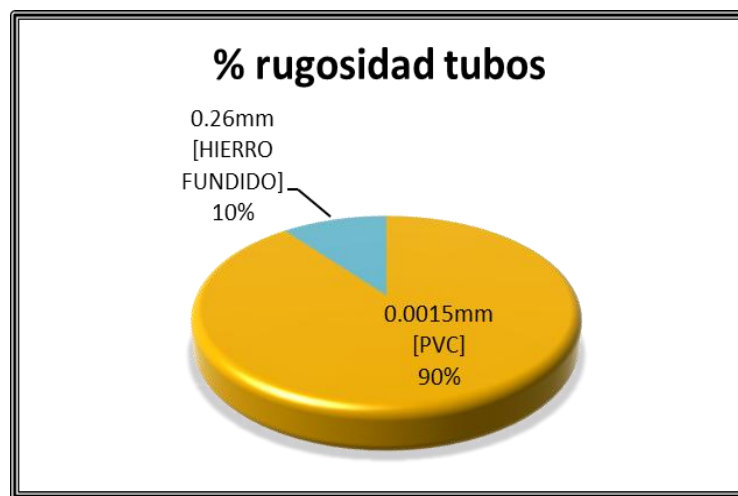


Tabla 24: Rango Rugosidad VALVULA V_18423

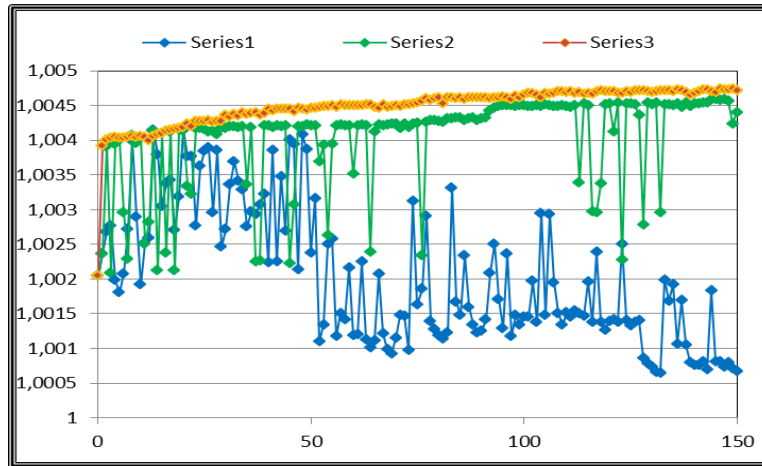
rangos rugosidad	# tubos
0.0015mm [PVC]	111
0.26mm [HIERRO FUNDIDO]	13

Grafica 53: Porcentaje Rugosidad tubos VALVULA V_18423



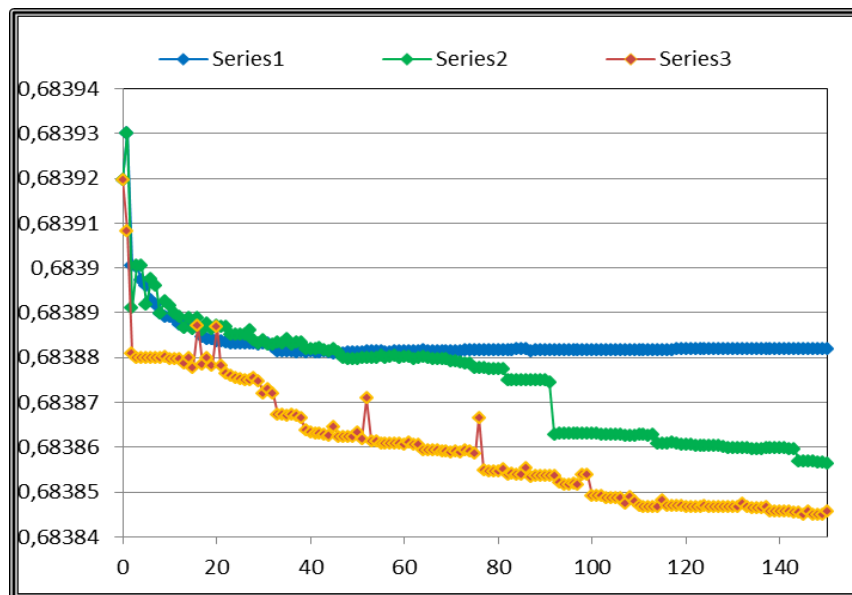
Índice de Resiliencia versus Numero de cambios

Grafica 54: índice de Resiliencia versus Numero de Cambios VALVULA V_18423



Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios

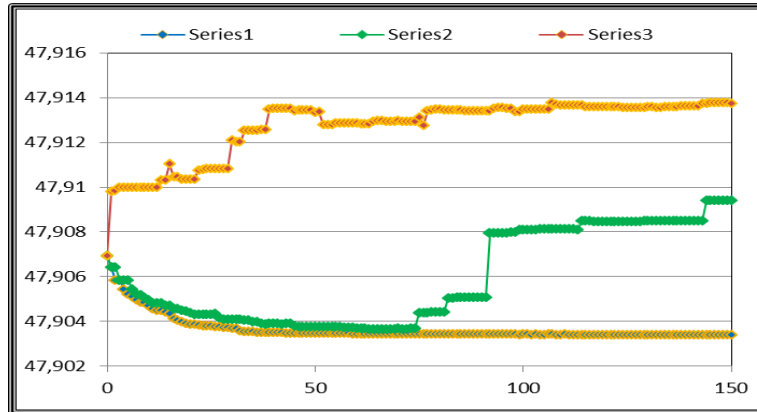
Grafica 55: Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios



VALVULA V_18423

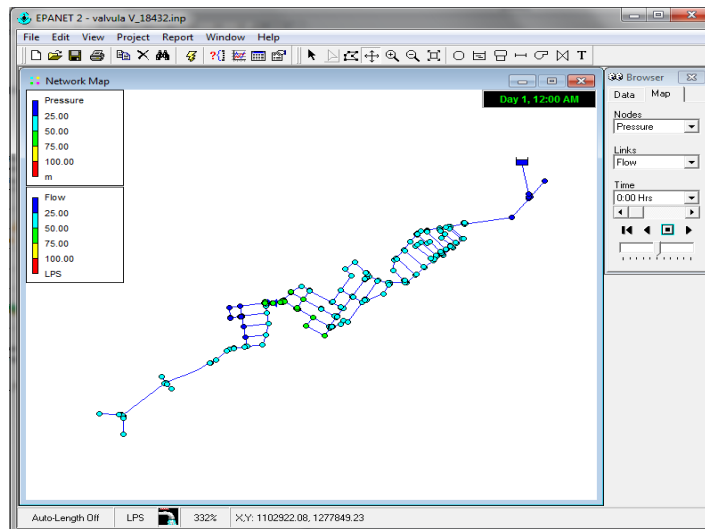
Rango de Presiones versus Numero de Cambios

Grafica 56: Rango de Presiones versus Numero de Cambios VALVULA V_18423



VALVULA V_18432

RED 12: VALVULA V_18432



CARACTERIZACION

Tabla 25: Rango diámetros VALVULA V_18432

rango diámetros	# tubos	Long [m]
2 pulg	66	1315.63
3 pulg	108	3251.3
4 pulg	64	1575.95
6 pulg	20	699.1

Grafica 57: Porcentaje tubos VALVULA V_18432

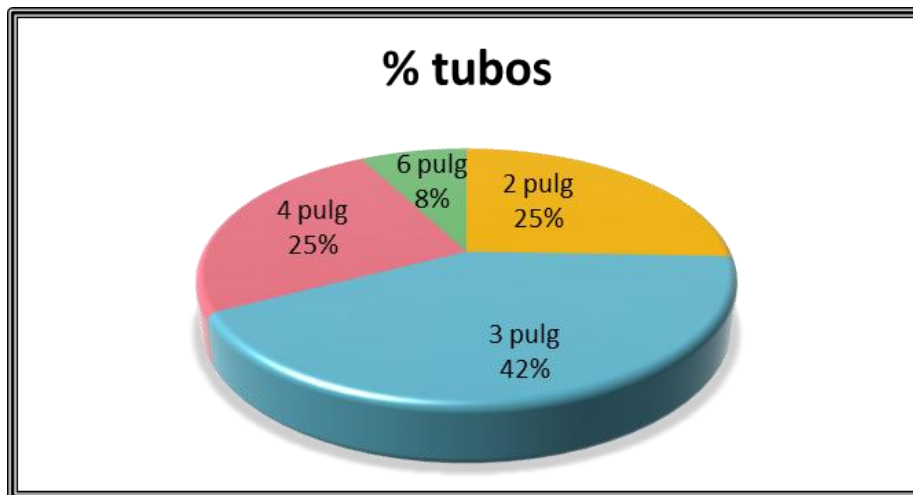
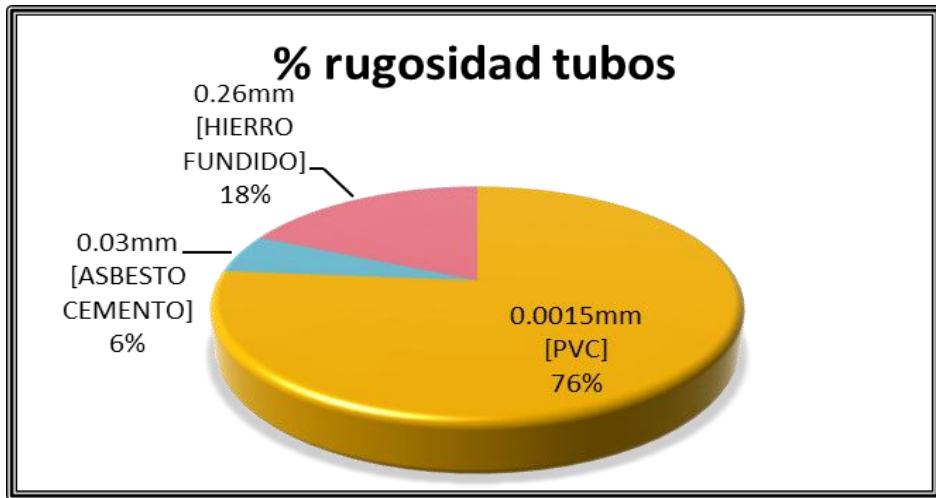


Tabla 26: Rango Rugosidad tubos VALVULA V_18432

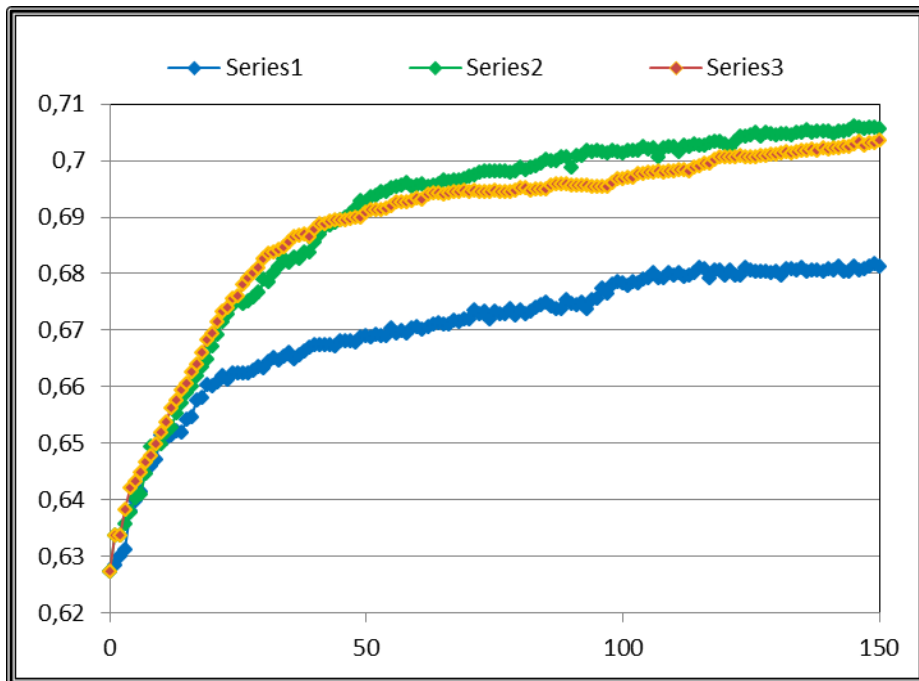
rangos rugosidad	# tubos
0.0015mm [PVC]	197
0.03mm [ASBESTO CEMENTO]	14
0.26mm [HIERRO FUNDIDO]	47

Grafica 58: Porcentaje Rugosidad tubos VALVULA V_18432



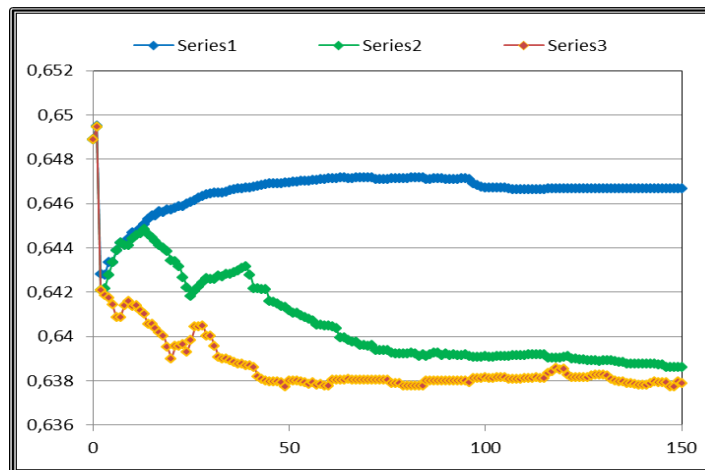
Índice de Resiliencia versus Numero de Cambios

Graficas 59: índice de Resiliencia versus Numero de Cambios VALVULA V_18432



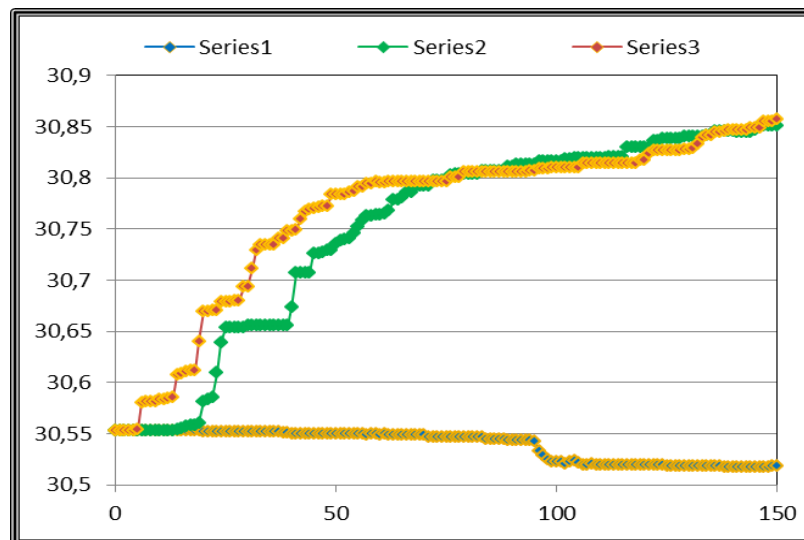
Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios

Graficas 60: Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios VALVULA V_18432



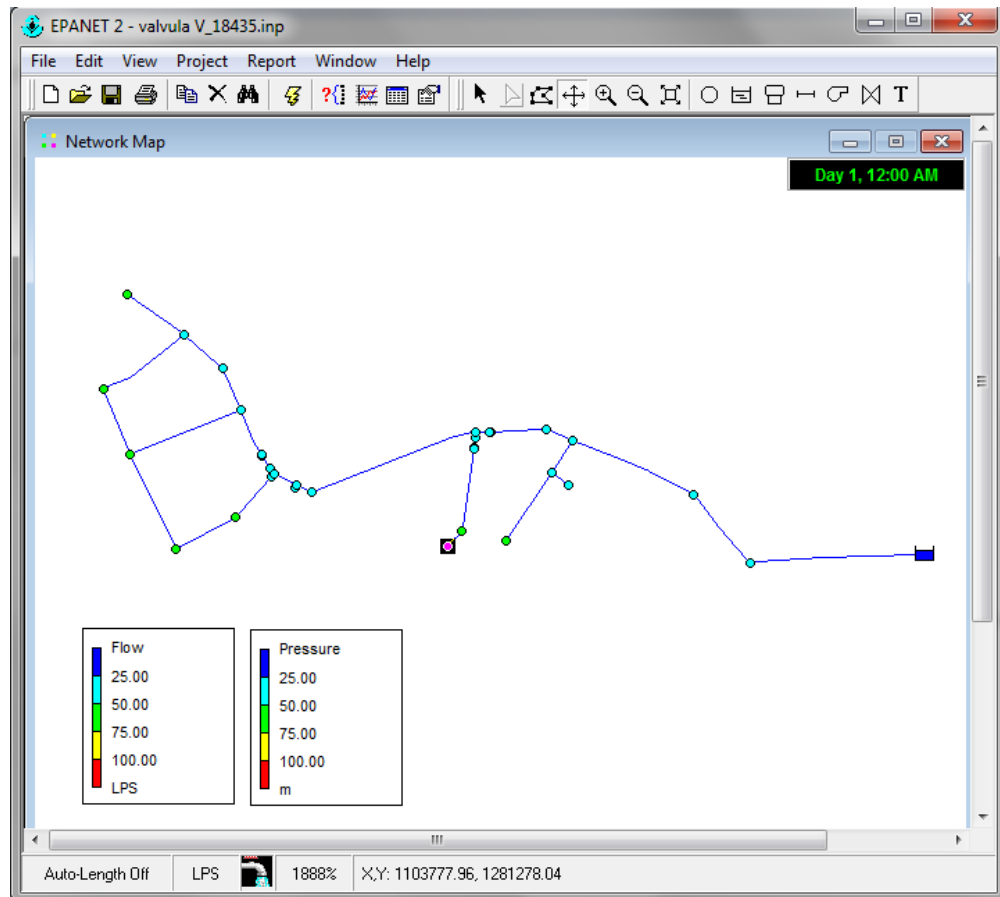
Rango de Presiones versus Numero de Cambios

Graficas 61: Rango de Presiones versus Numero de Cambios VALVULA V_18432



VALVULA V_18435

RED 13: Válvula V_18435



CARACTERIZACION

Tabla 27: Rango diámetros Válvula V_18435

rango diámetros	# tubos	Long [m]
2 pulg	19	433.06
3 pulg	14	313.44

Grafica 62: Porcentaje tubos Válvula V_18435

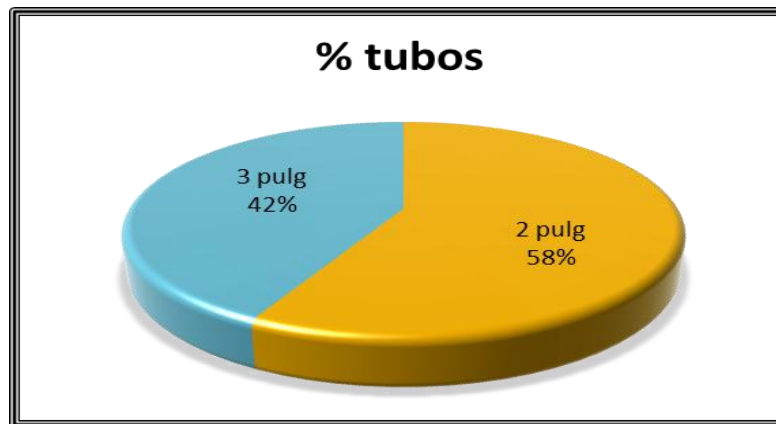
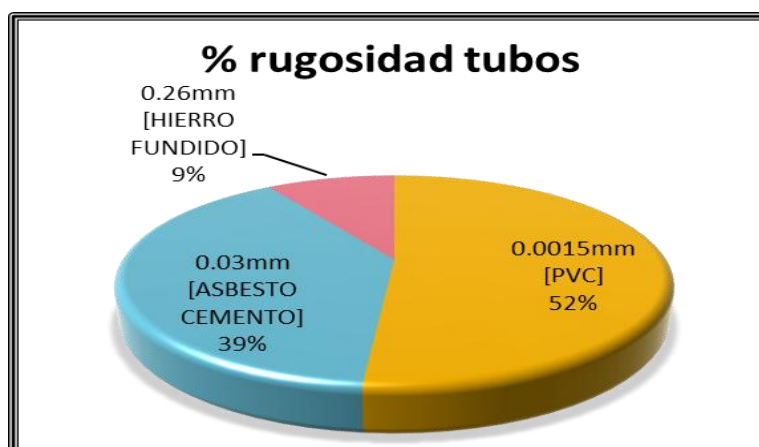


Tabla 28: Rangos Rugosidad tubos Válvula V_18435

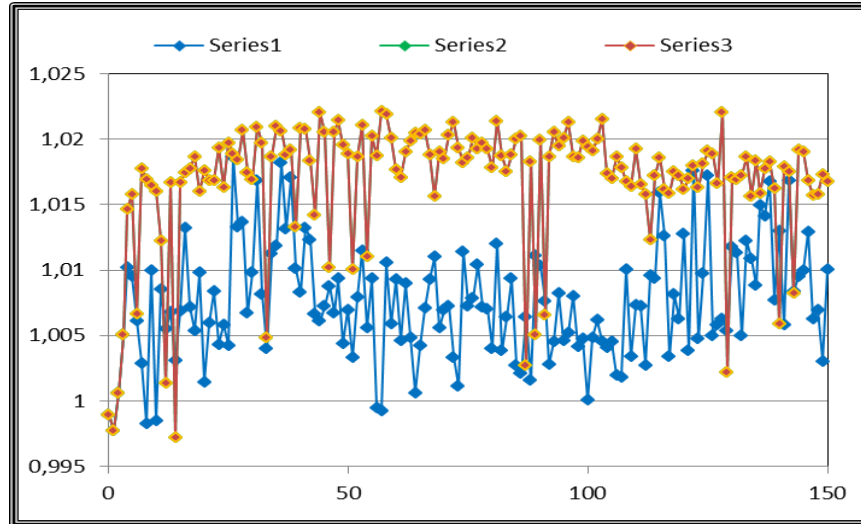
rangos rugosidad	# tubos
0.0015mm [PVC]	17
0.03mm [ASBESTO CEMENTO]	13
0.26mm [HIERRO FUNDIDO]	3

Grafica 63: Porcentaje Rugosidad tubos Válvula V_18435



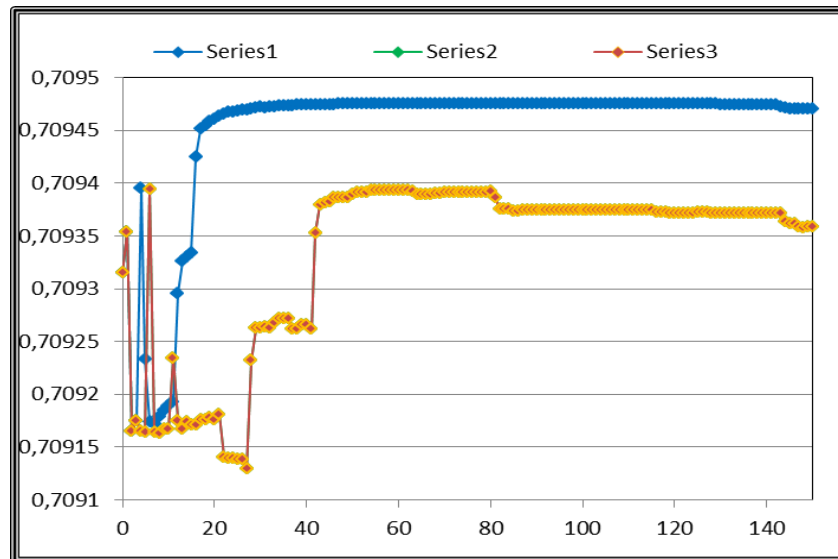
Índice de Resiliencia versus Numero de Cambios

Grafica 64: índice de Resiliencia versus Numero de Cambios Válvula V_18435



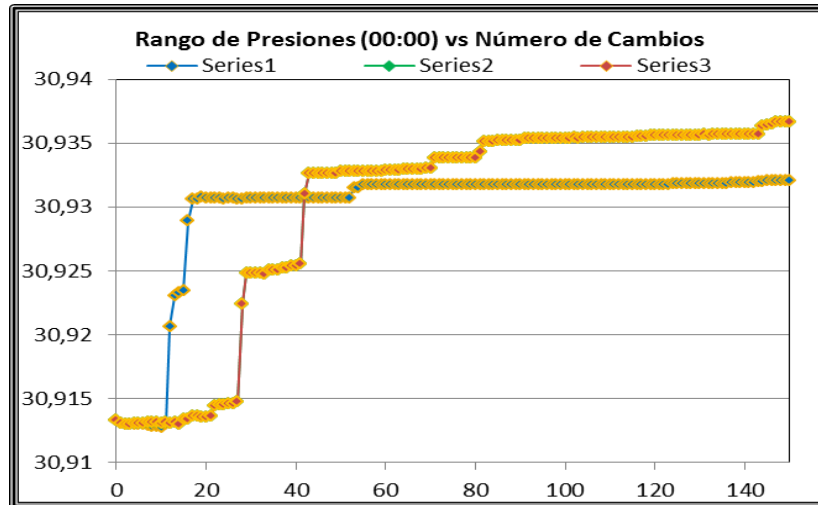
Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios

Grafica 65: índice de Resiliencia versus Numero de Cambios Válvula V_18435



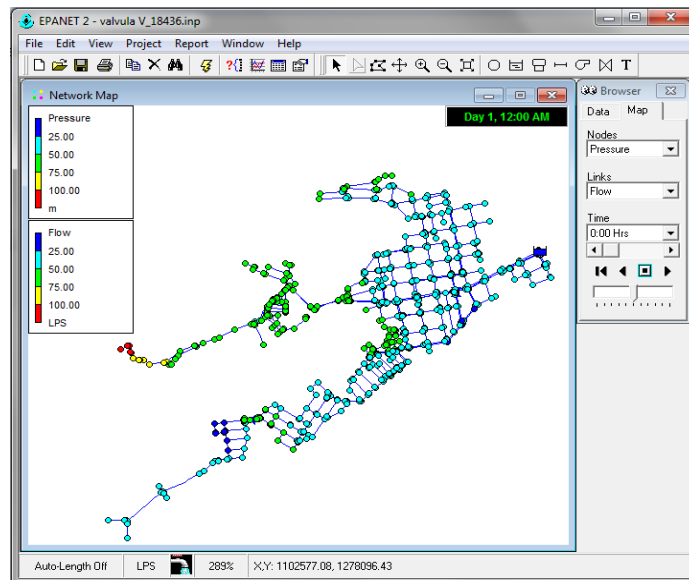
Rango de Presiones versus Numero de Cambios

Grafica 66: Rango de Presiones versus Numero de Cambios Válvula V_18435



VALVULA V_18436

RED 14: VALVULA V_18436



CARACTERIZACION

Tabla 29: Rango diámetros VALVULA V_18436

rango diámetros	# tubos	Long [m]
2 pulg	557	13013.5
3 pulg	264	6174.26
4 pulg	215	4763.36
6 pulg	98	2744.15
10 pulg	3	5.11

Grafica 67: Porcentaje tubos VALVULA V_18436

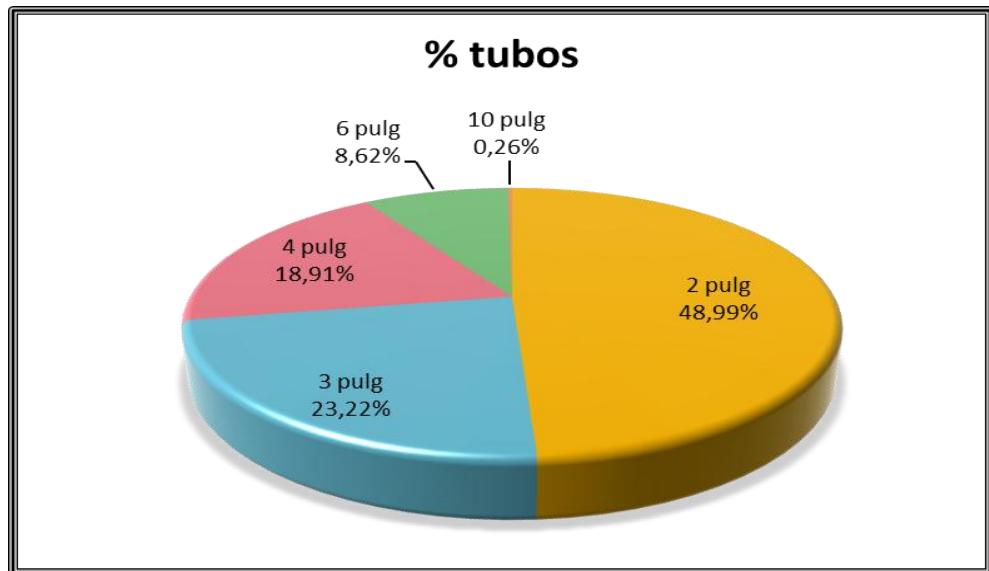
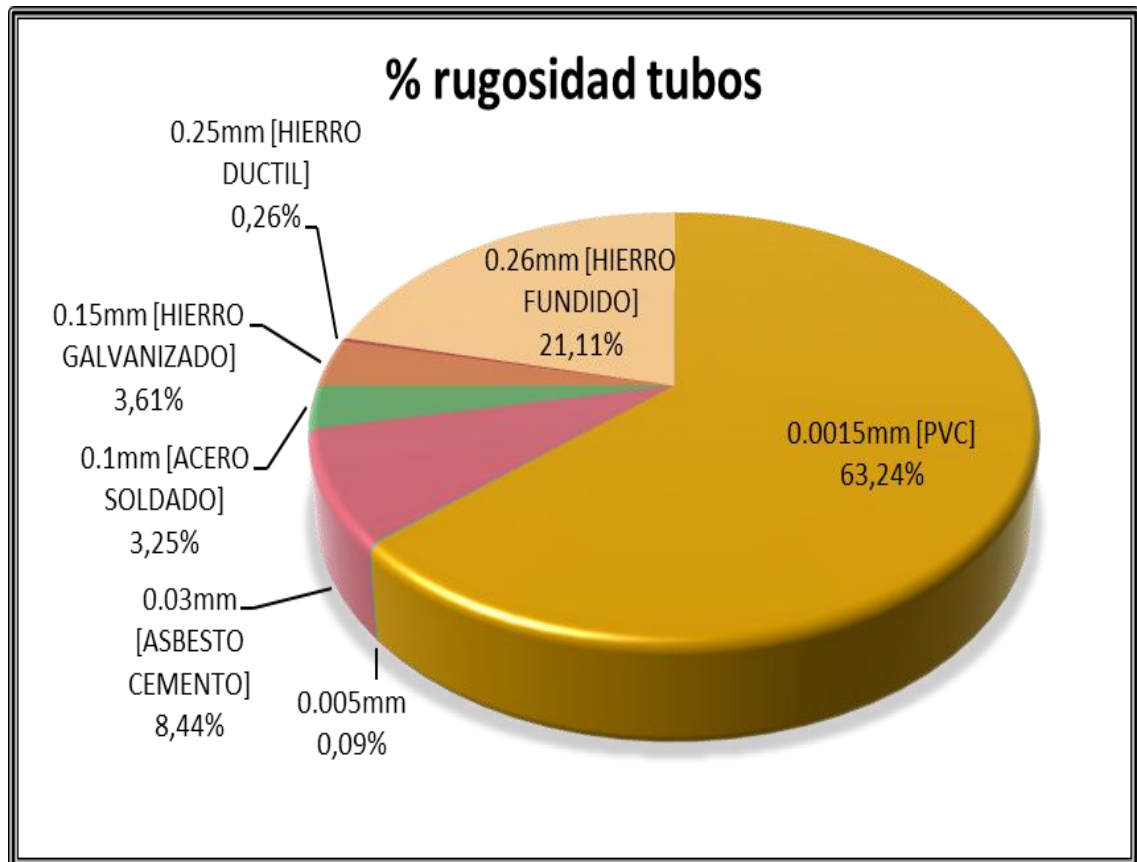


Tabla 30: Rangos Rugosidad tubos VALVULA V_18436

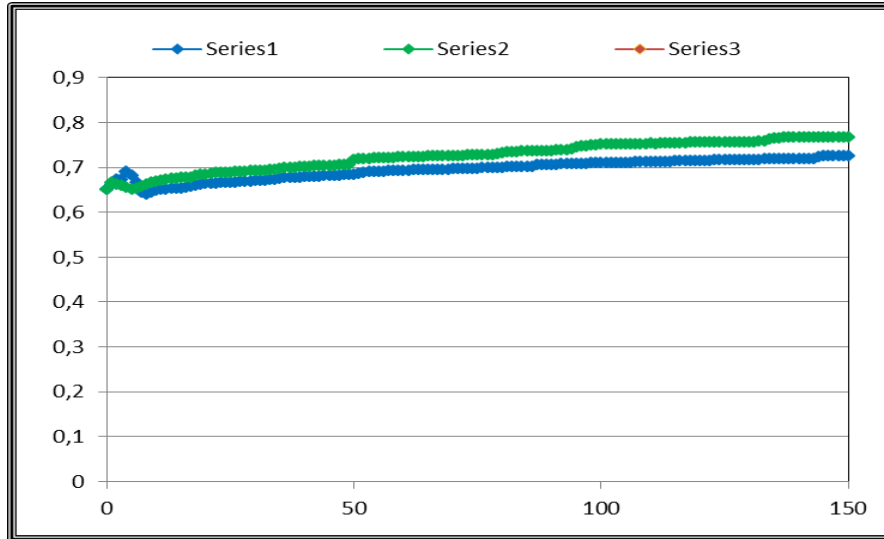
rangos rugosidad	# tubos
0.0015mm [PVC]	719
0.005mm	1
0.03mm [ASBESTO CEMENTO]	96
0.1mm [ACERO SOLDADO]	37
0.15mm [HIERRO GALVANIZADO]	41
0.25mm [HIERRO DUCTIL]	3
0.26mm [HIERRO FUNDIDO]	240

Grafica 68: Porcentaje de Rugosidad tubos VALVULA V_18436



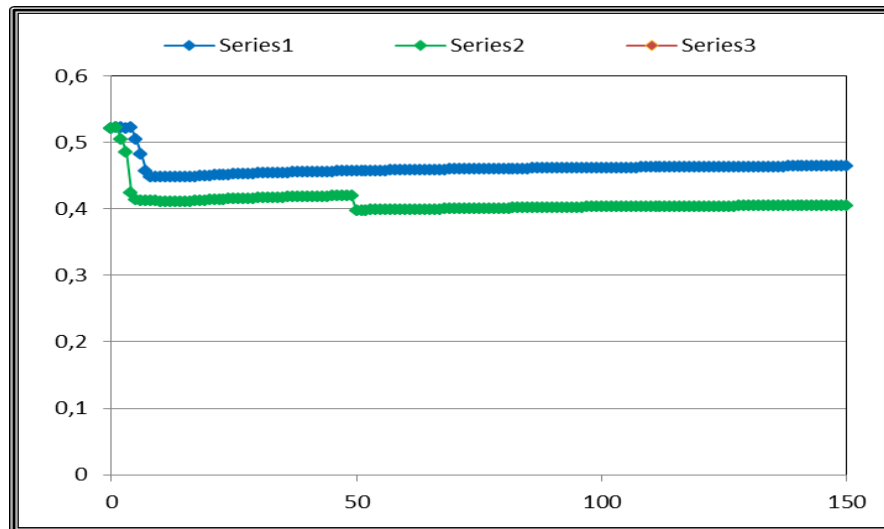
Índice de Resiliencia versus Numero de Cambios

Grafica 69: índice de Resiliencia versus Numero de Cambios VALVULA V_18436



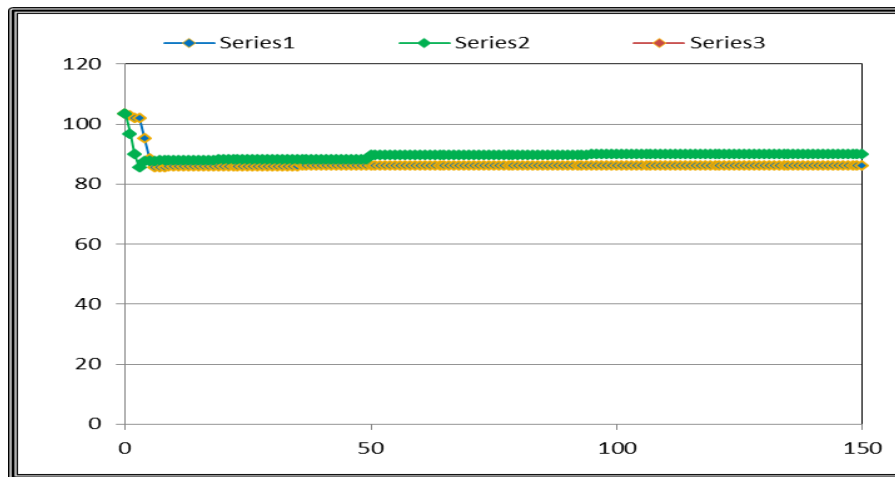
Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios

Grafica 70: Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios VALVULA V_18436



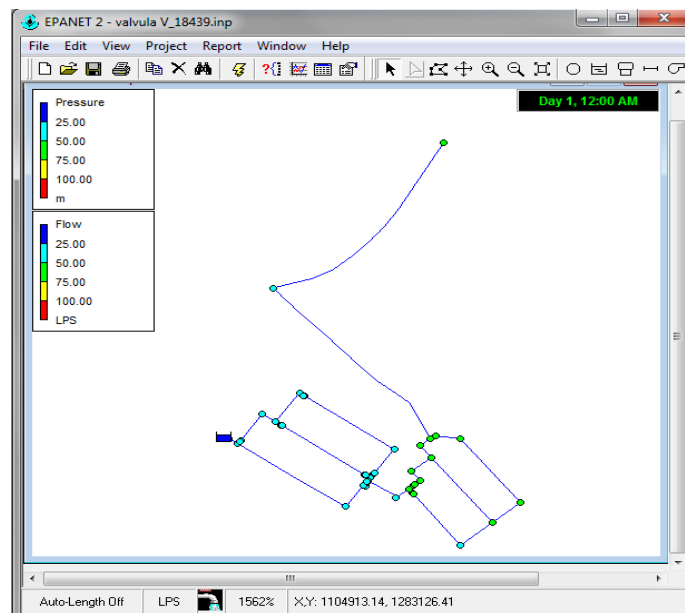
Rango de Presiones versus Numero de Cambios

Grafica 71: Rango de Presiones versus Numero de Cambios VALVULA V_18436



VALVULA V_18439

RED 15: VALVULA V_18439



CARACTERIZACION

Tabla 31: Rango de Presiones VALVULA V_18439

rango diámetros	# tubos	Long [m]
2 pulg	25	851.58
3 pulg	20	342.98

Grafica 72: Porcentaje tubos VALVULA V_18439

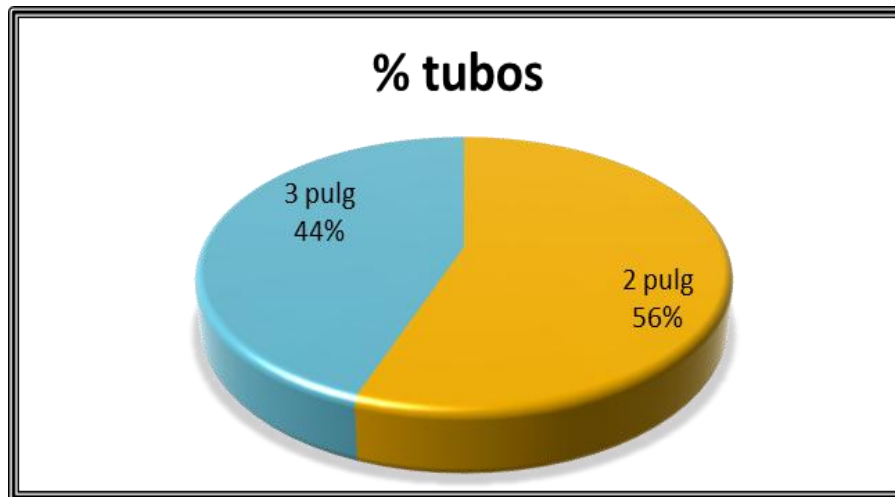
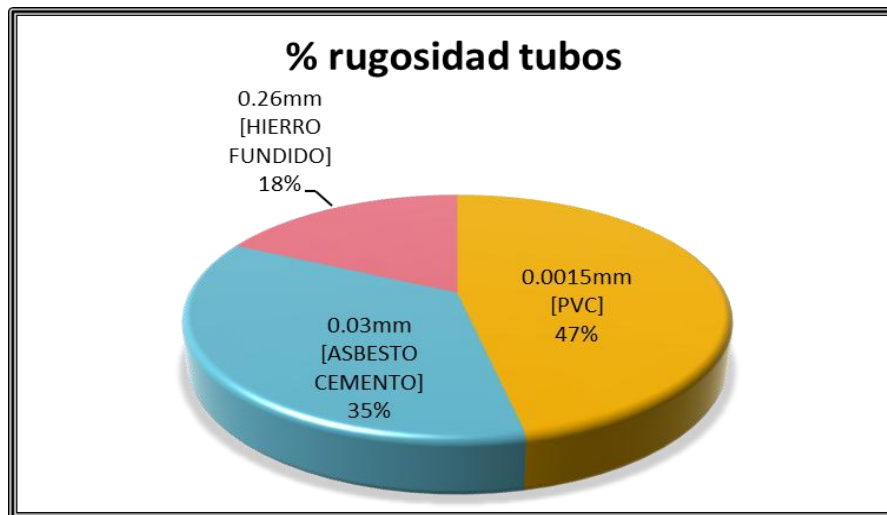


Tabla 32: Rango Rugosidades tubos VALVULA V_18439

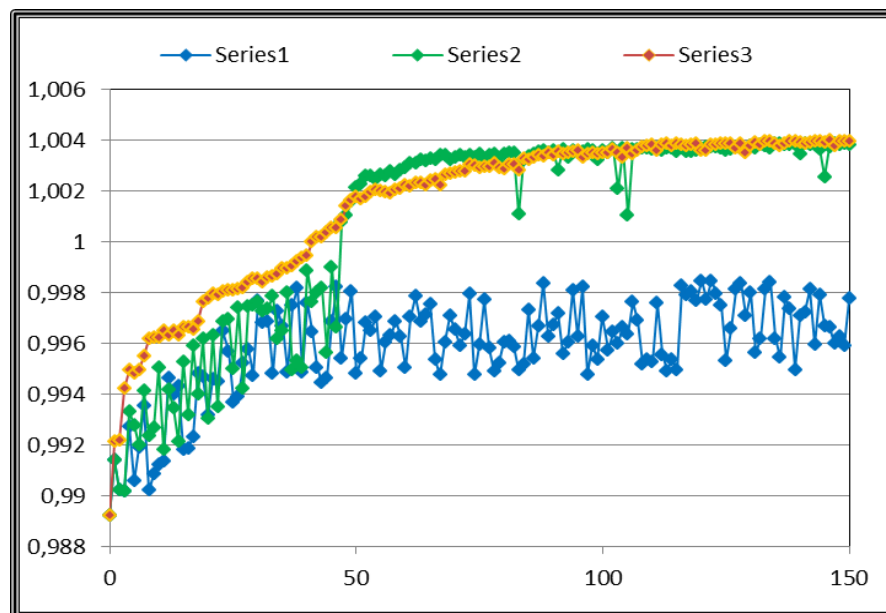
rangos rugosidad	# tubos
0.0015mm [PVC]	21
0.03mm [ASBESTO CEMENTO]	16
0.26mm [HIERRO FUNDIDO]	8

Grafica 73: Porcentaje Rugosidad tubos VALVULA V_18439



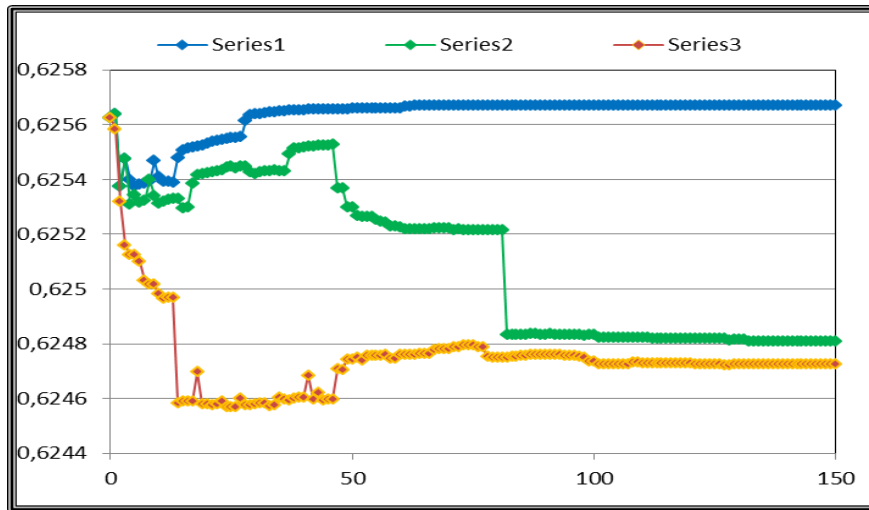
Índice de resiliencia versus Numero de Cambios

Grafica 74: índice de Resiliencia versus Numero de Cambios VALVULA V_18439



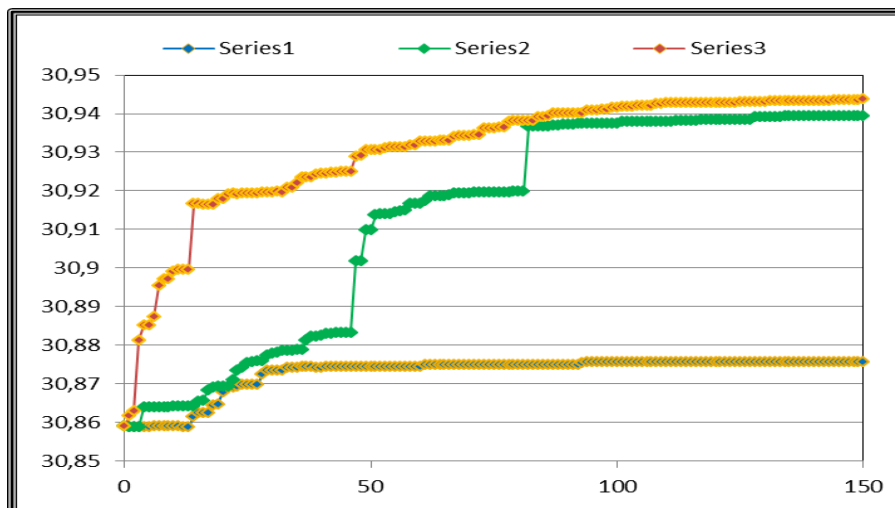
Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios

Grafica 75: Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios VALVULA V_18439



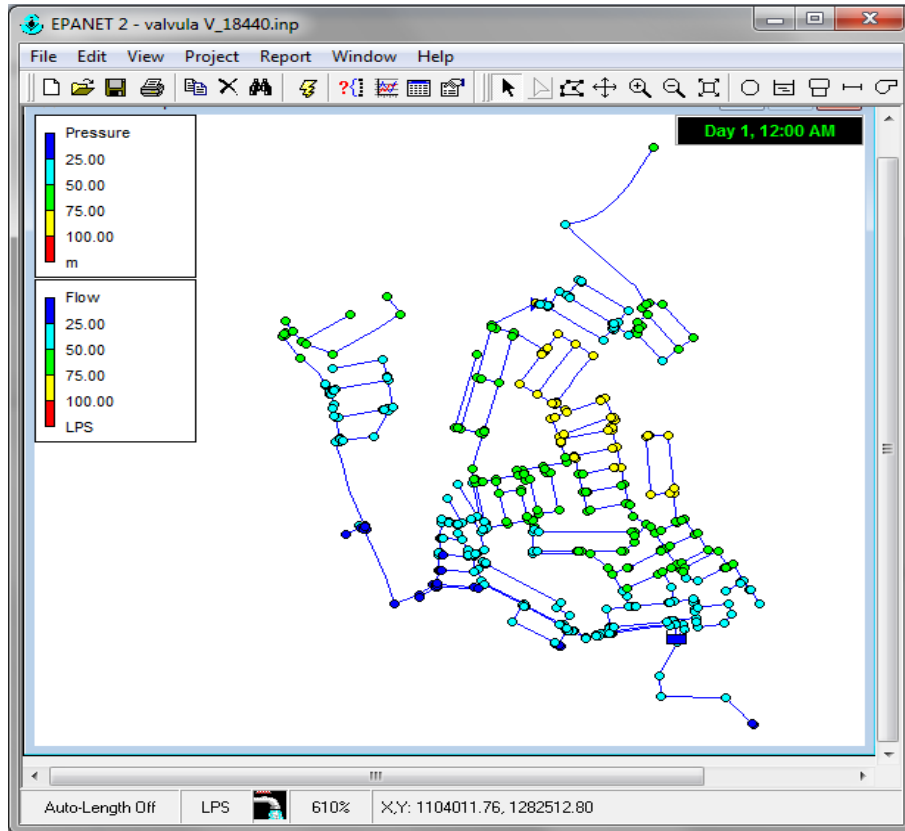
Rango de Presiones versus Numero de Cambios

Grafica 76: Rango de Presiones versus Numero de Cambios VALVULA V_18439



VALVULA V_18440

RED 16: VALVULA V_18440



CARACTERIZACION

Tabla 33: Rango diámetros VALVULA V_18440

rango diámetros	# tubos	Long [m]
2 pulg	260	5124.12
3 pulg	140	2673.71
4 pulg	81	1036.7
6 pulg	31	1039.33

Grafica 77: Porcentaje tubos VALVULA V_18440

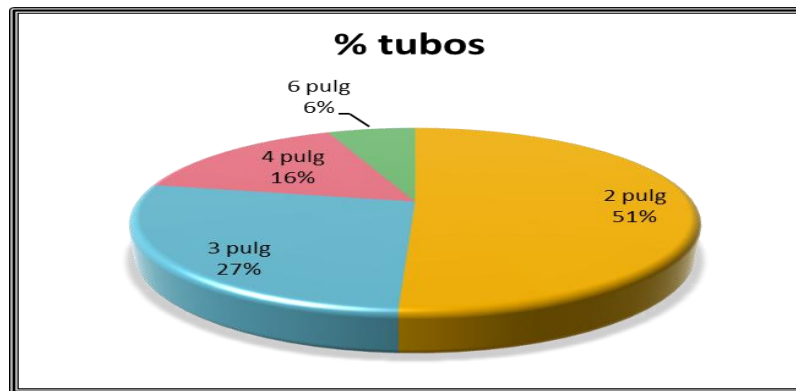
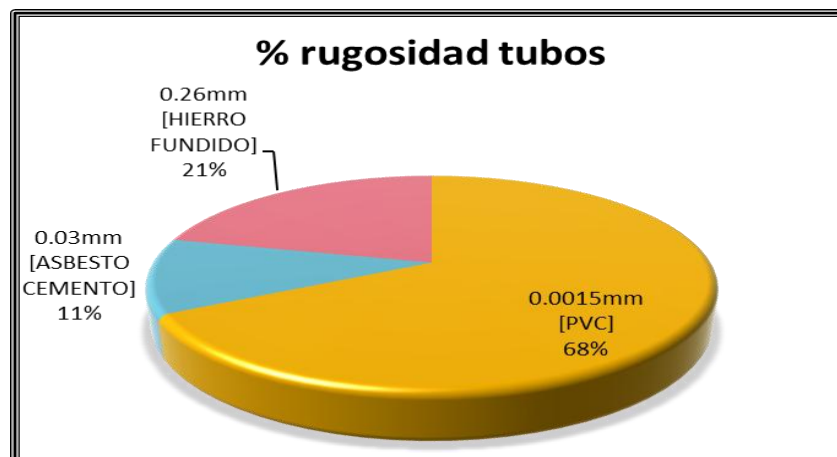


Tabla 34: Rangos Rugosidad VALVULA V_18440

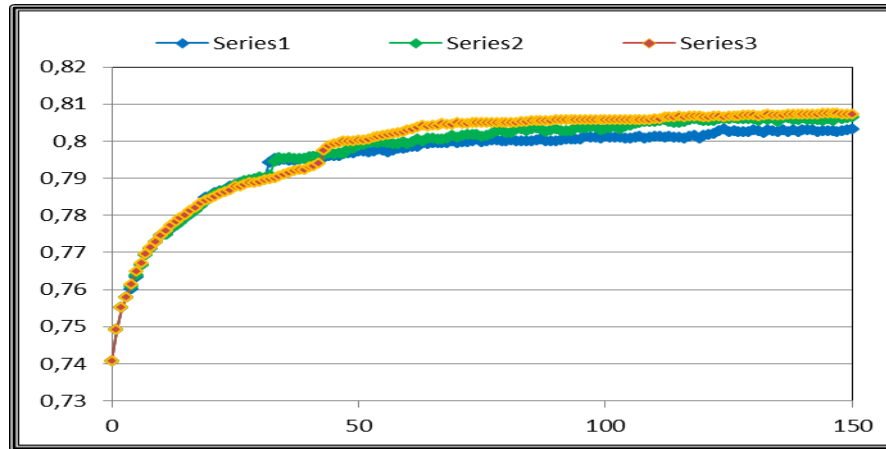
rangos rugosidad	# tubos
0.0015mm [PVC]	345
0.03mm [ASBESTO CEMENTO]	58
0.26mm [HIERRO FUNDIDO]	109

Grafica 78: Porcentaje Rugosidad tubos VALVULA V_18440



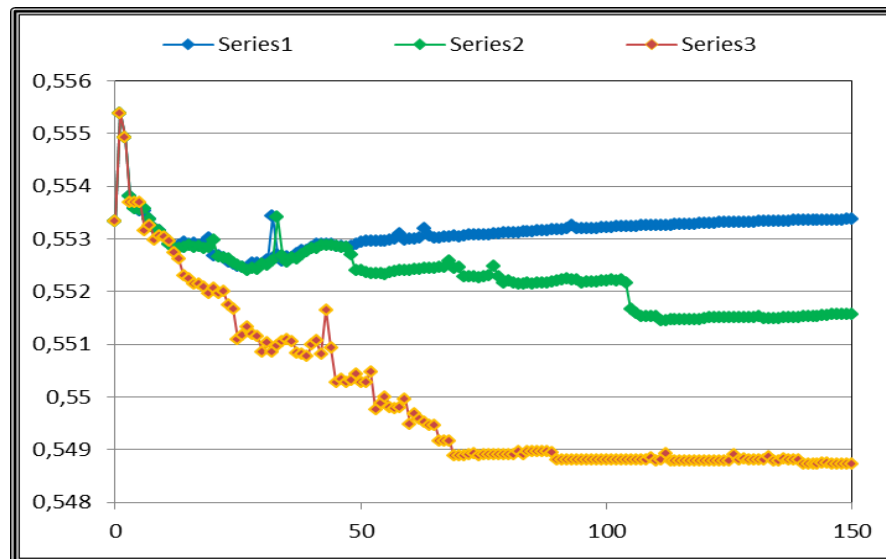
Índice de Resiliencia versus Numero de Cambios

Grafica 79: índice de Resiliencia versus Numero de Cambios VALVULA V_18440



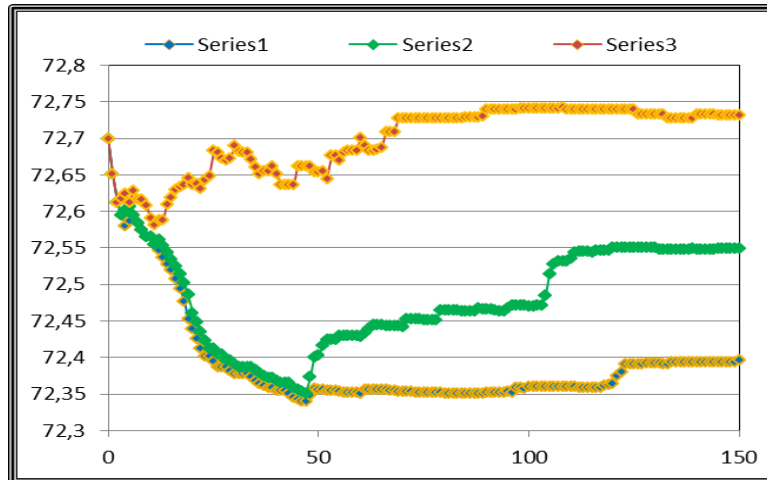
Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios

Grafica 80: Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios VALVULA V_18440



Rango de Presiones versus Numero de Cambios

Graficas 81: Rango de Presiones versus Numero de Cambios VALVULA V_18440



VALVULA V_18442

RED 17: valvula v_18442

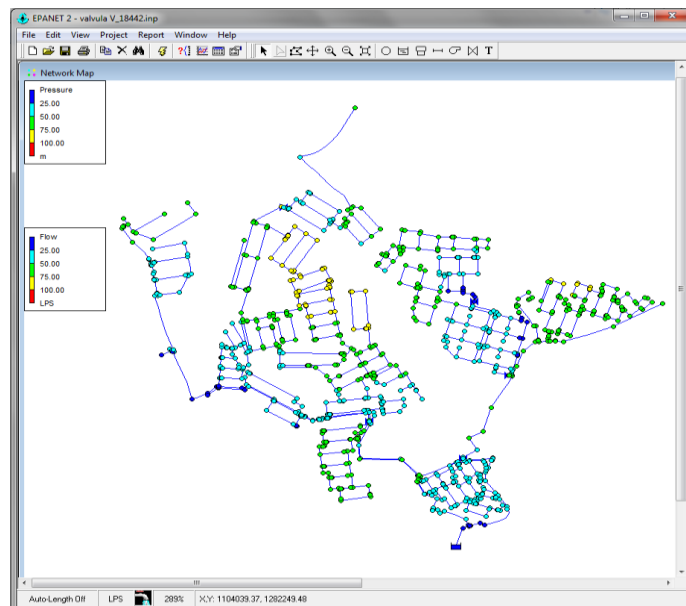


Tabla 35: Rango diámetros válvula v_18442

rango diámetros	# tubos	Long [m]
2 pulg	583	9377.48
3 pulg	304	5483.58
4 pulg	126	1864.51
6 pulg	61	1831.42
8 pulg	22	455.48
10 pulg	7	116.78

Grafica 82: Porcentaje tubos válvula v_18442

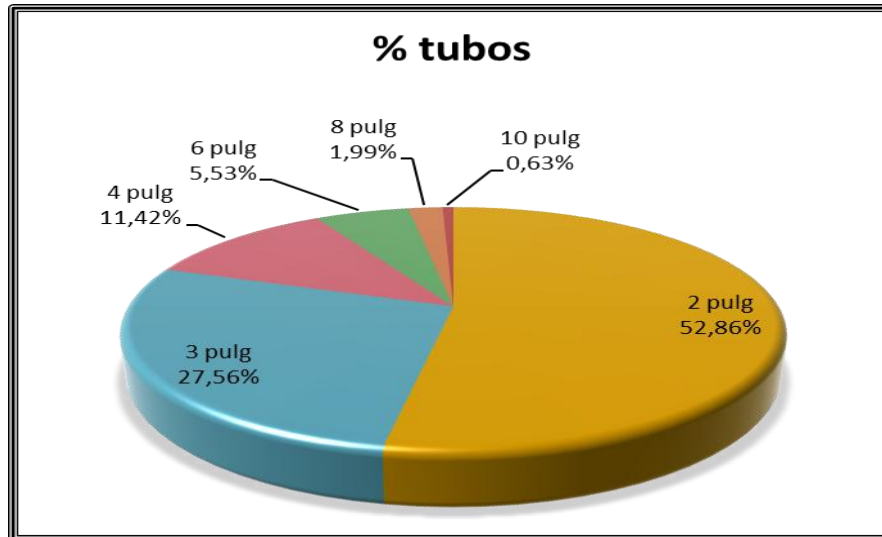
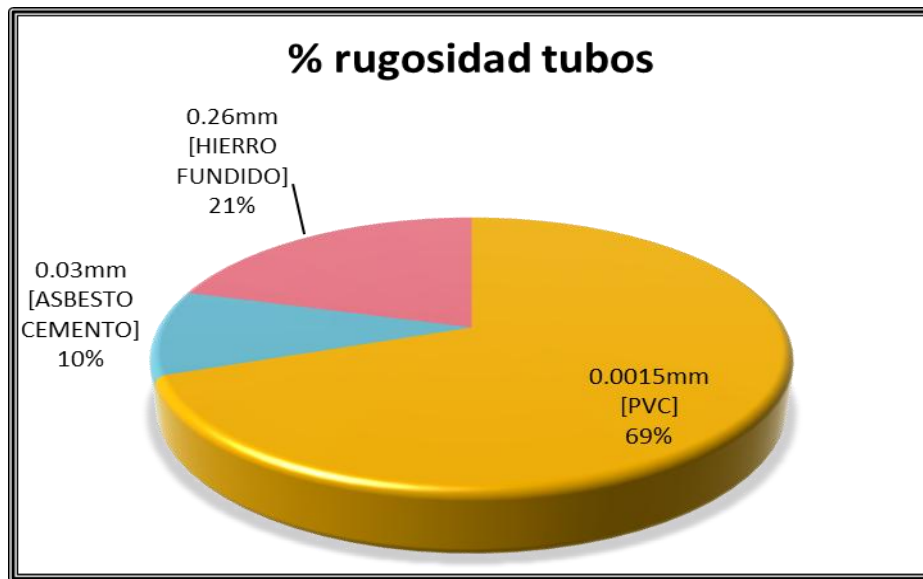


Tabla 36: Rangos Rugosidad tubos válvula v_18442

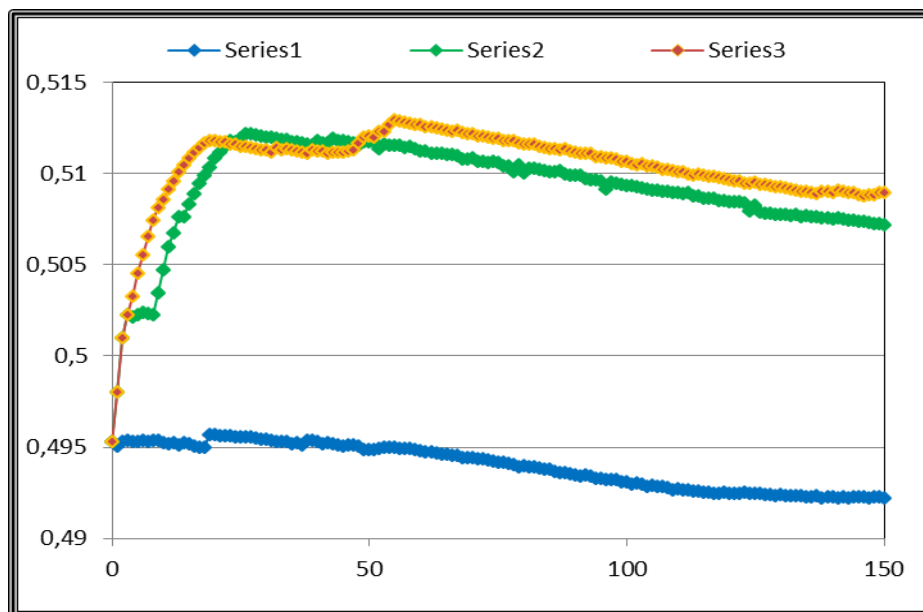
rangos rugosidad	# tubos
0.0015mm [PVC]	765
0.03mm [ASBESTO CEMENTO]	112
0.26mm [HIERRO FUNDIDO]	226

Grafica 83: Porcentaje Rugosidad tubos válvula v_18442



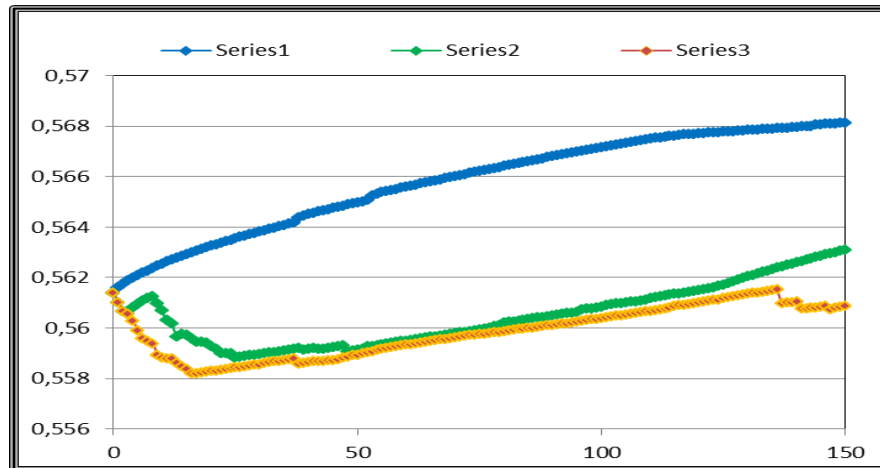
Índice de Resiliencia versus Numero de Cambios

Grafica 84: índice de Resiliencia versus Numero de Cambios válvula v_18442



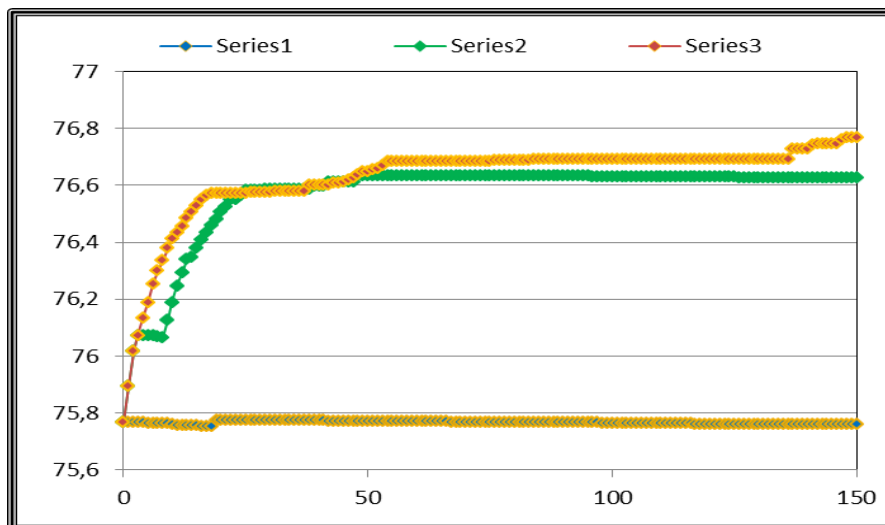
Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios

Grafica 85: Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios válvula v_18442



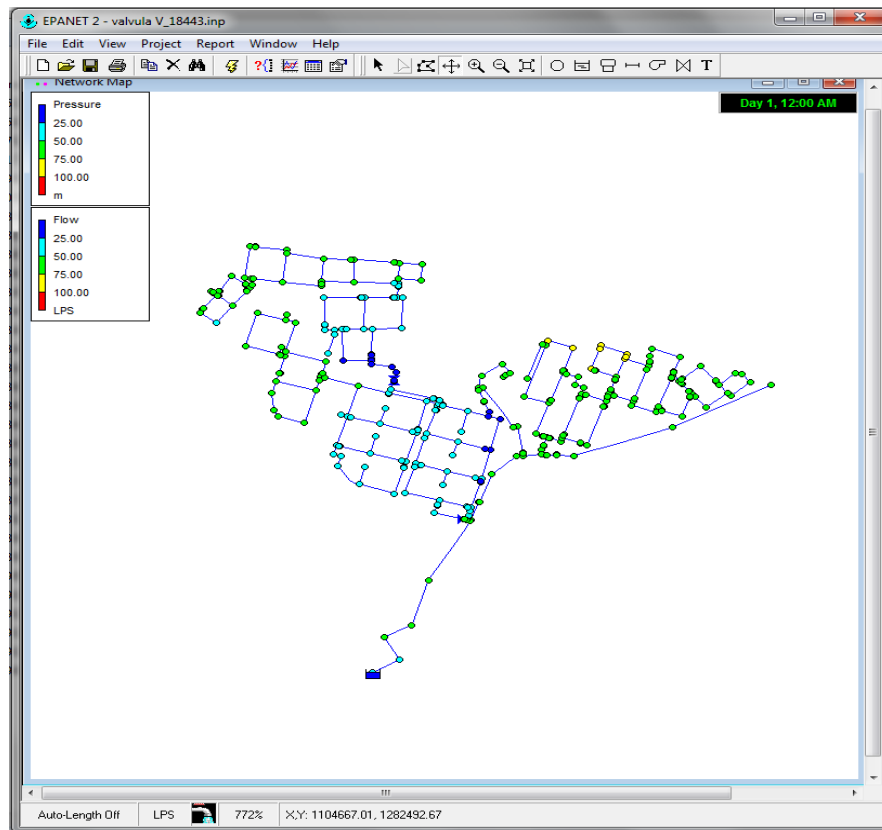
Rango de Presiones versus Numero de Cambios

Grafica 86: Rango de Presiones versus Numero de Cambios válvula v_18442



VALVULA V_18443

RED 18: VALVULA V_18443



CARACTERIZACION

Tablas 37: Rango diámetros VALVULA V_18443

rango diámetros	# tubos	Long [m]
2 pulg	157	2143.86
3 pulg	160	2794.05
4 pulg	30	624.39
6 pulg	7	278.74

Grafica 87: Porcentaje tubos VALVULA V_18443

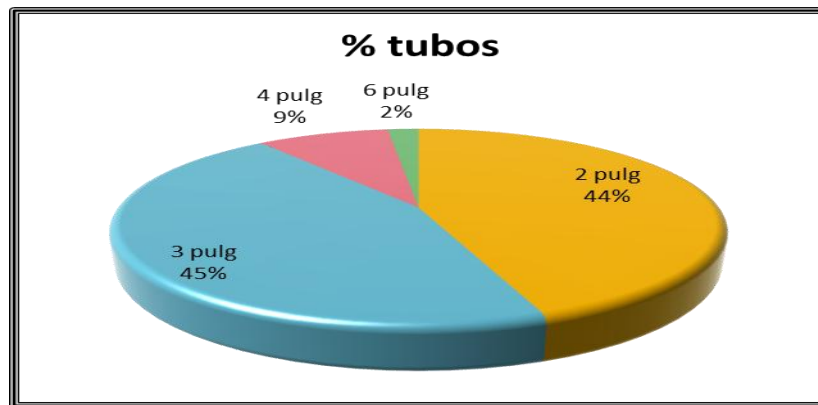
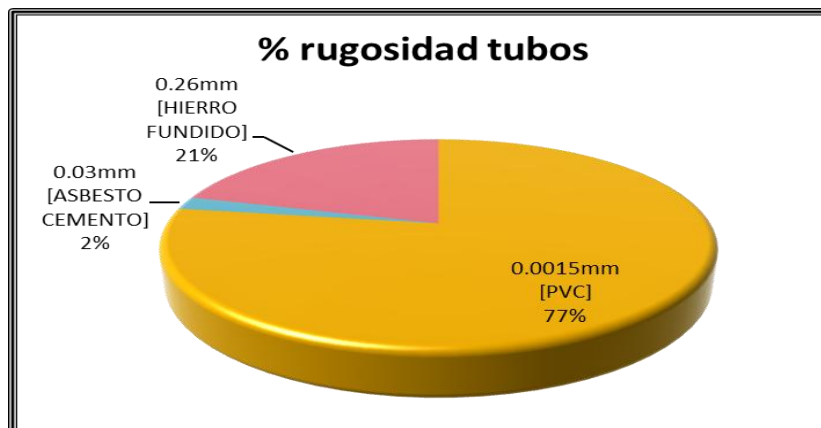


Tabla 38: Rango Rugosidad tubos VALVULA V_18443

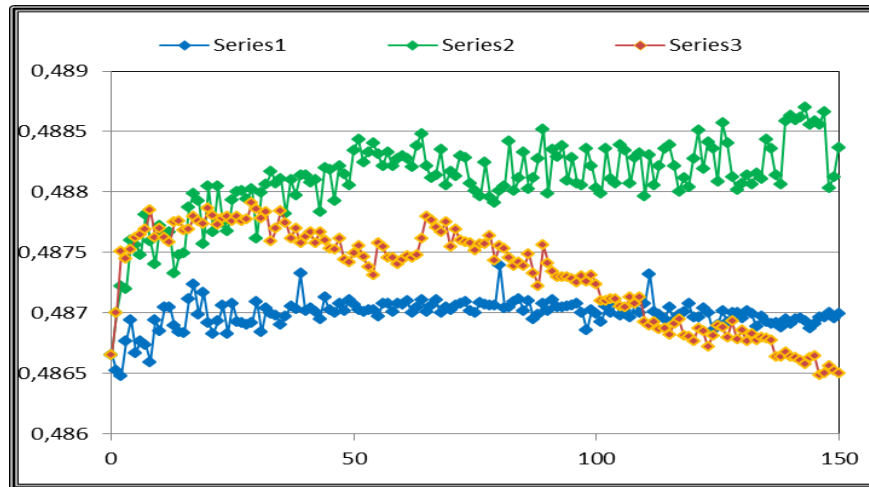
rangos rugosidad	# tubos
0.0015mm [PVC]	274
0.03mm [ASBESTO CEMENTO]	7
0.26mm [HIERRO FUNDIDO]	73

Grafica 88: Porcentaje Rugosidad tubos VALVULA V_18443



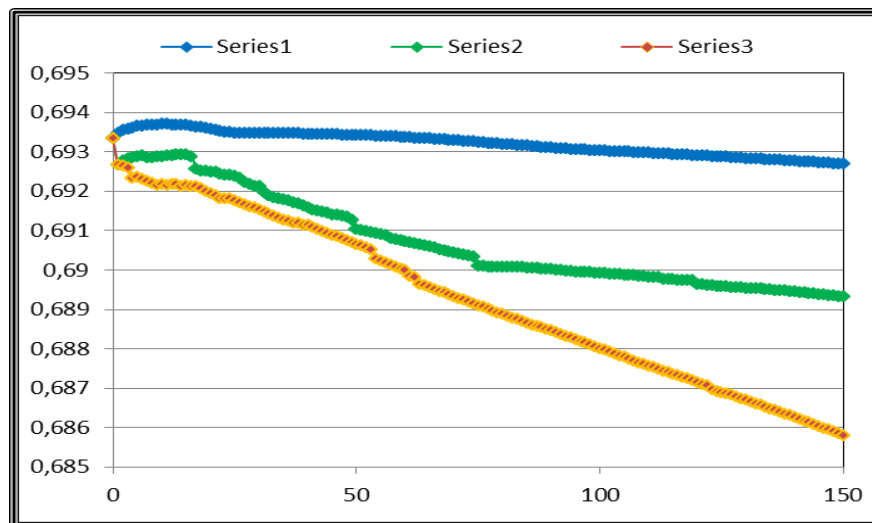
Índice de Resiliencia versus Numero de Cambios

Graficas 89: Variación índice de Resiliencia versus Numero de Cambios VALVULA V_18443



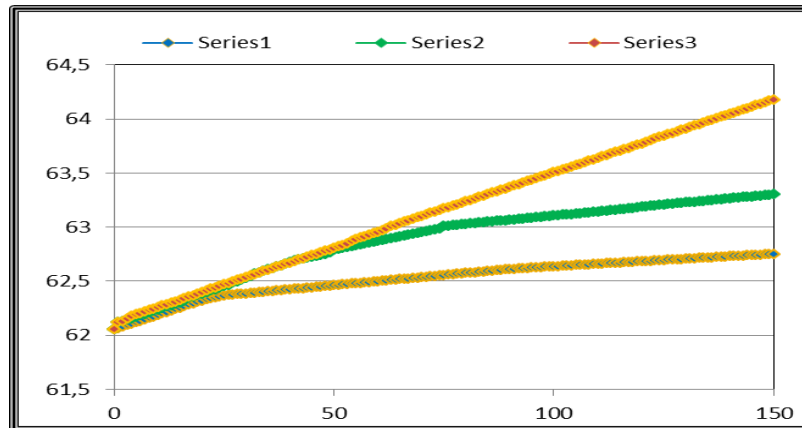
Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios

Grafica 90: Variación Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios válvula v_18443



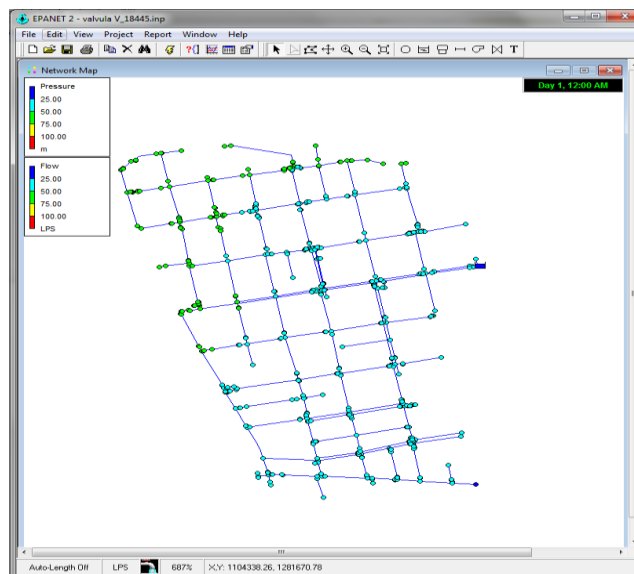
Rango de Presiones versus Numero de cambios

Grafica 91: Variación Rango de Presiones versus Numero de Cambios VALVULA V_18443



VALVULA V_18445

RED 19: VALVULA V_18445

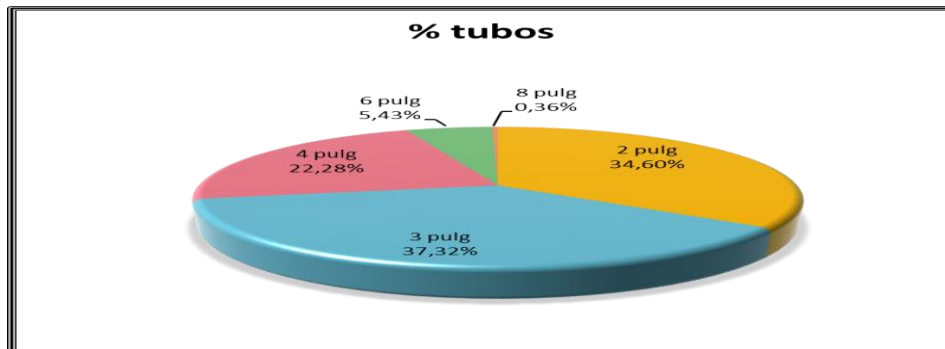


CARACTERIZACION

Tabla 39: Rango diámetros VALVULA V_18445

rango diámetros	# tubos	Long [m]
2 pulg	191	5063.65
3 pulg	206	2487.13
4 pulg	123	2052.85
6 pulg	30	669.67
8 pulg	2	5.69

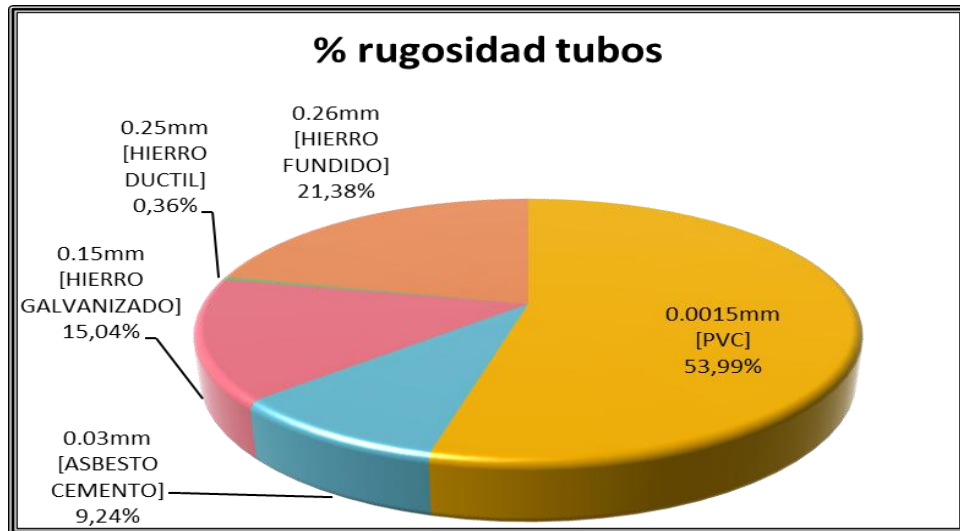
Grafica 92: Porcentaje tubos VALVULA V_18445



Tablas 40: Rangos Rugosidad tubos VALVULA V_18445

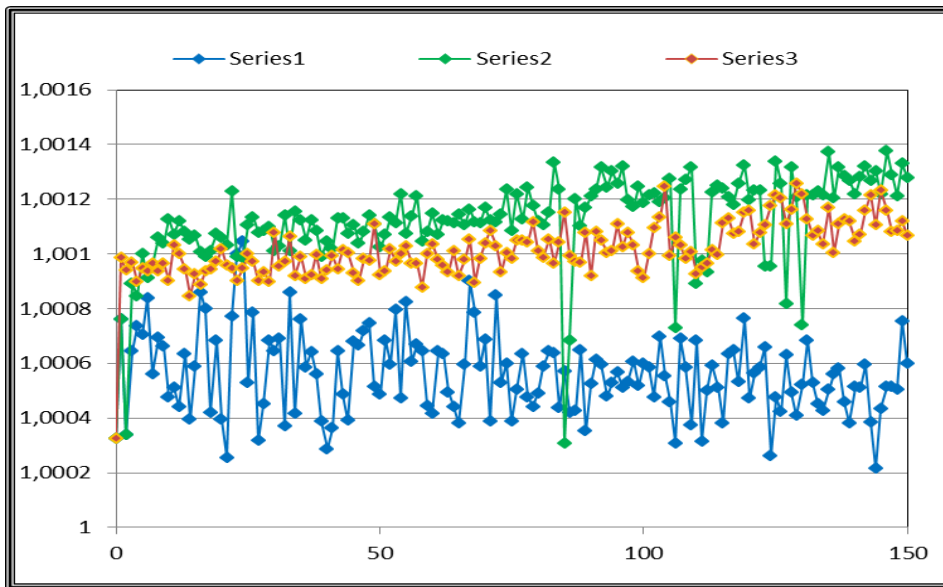
rangos rugosidad	# tubos
0.0015mm [PVC]	298
0.03mm [ASBESTO CEMENTO]	51
0.15mm [HIERRO GALVANIZADO]	83
0.25mm [HIERRO DUCTIL]	2
0.26mm [HIERRO FUNDIDO]	118

Grafica 93: Porcentaje Rugosidad tubos VALVULA V_18445



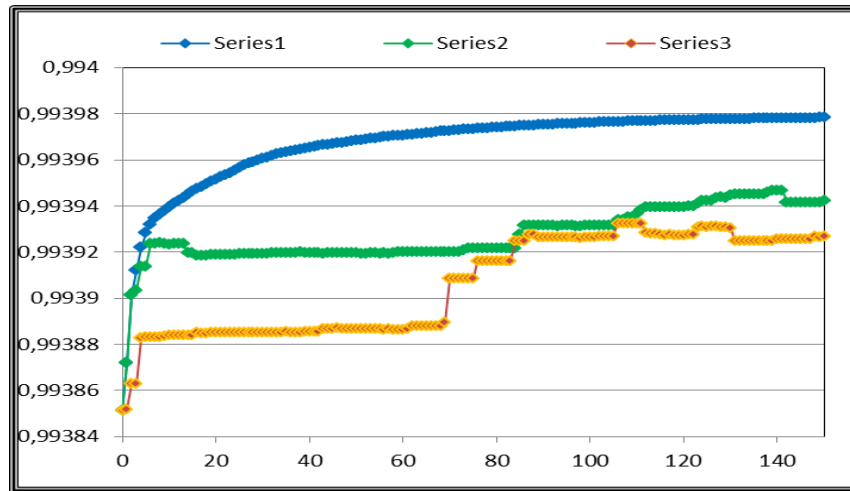
Índice de Resiliencia versus Numero de Cambios

Grafica 94: Variación índice de Resiliencia versus Numero de Cambios VALVULA V_18445



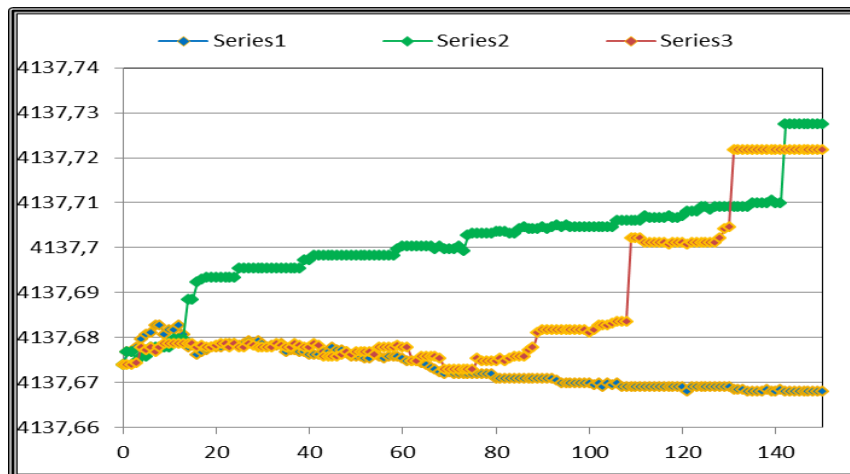
Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios

Grafica 95: Variación Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios VALVULA V_18445



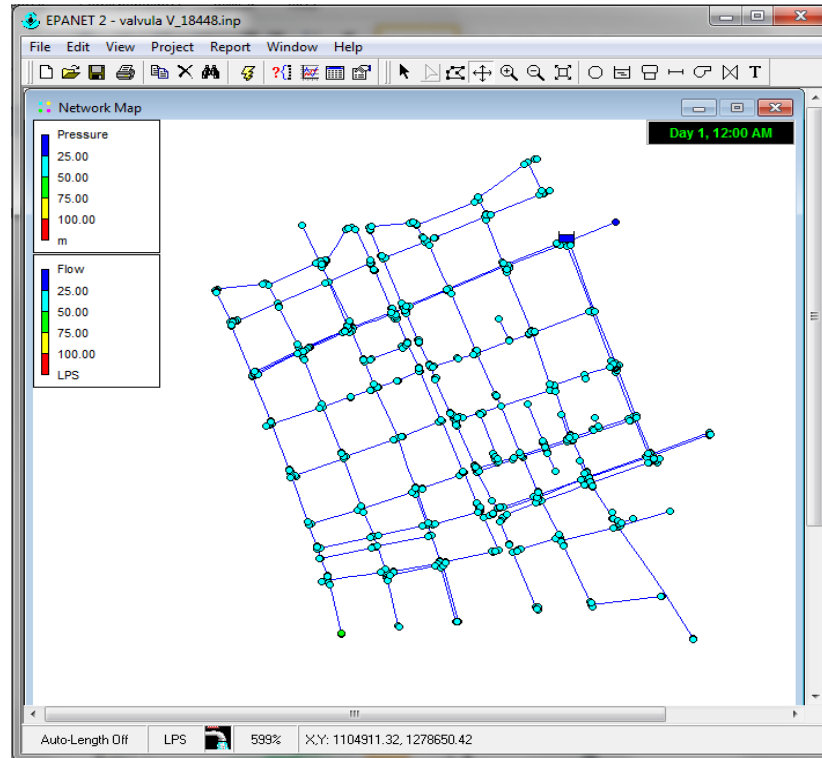
Rango de Presiones versus Numero de Cambios

Grafica 96: Variación Rango de Presiones versus Numero de Cambios VALVULA V_18445



VALVULA V_18448

RED 20: VALVULA V_18448



CARACTERIZACION

Tabla 41: Rango diámetros VALVULA V_18448

rango diámetros	# tubos	Long [m]
2 pulg	305	5491.68
3 pulg	269	4214.19
4 pulg	88	1143.26
6 pulg	57	1563.83
8 pulg	37	1074.35
10 pulg	1	3.82

Grafica 97: Porcentaje tubos VALVULA V_18448

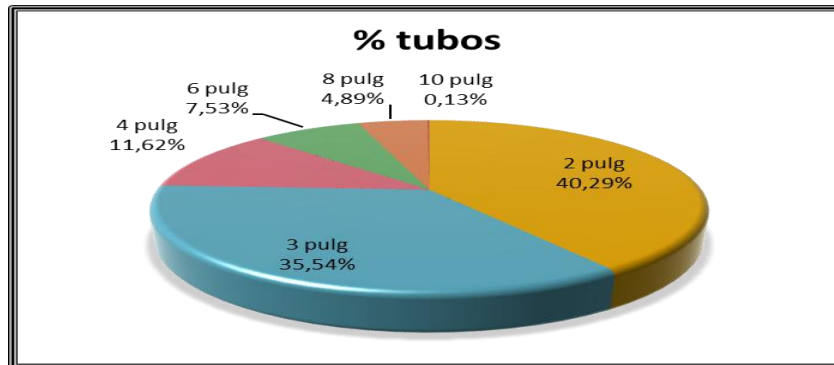
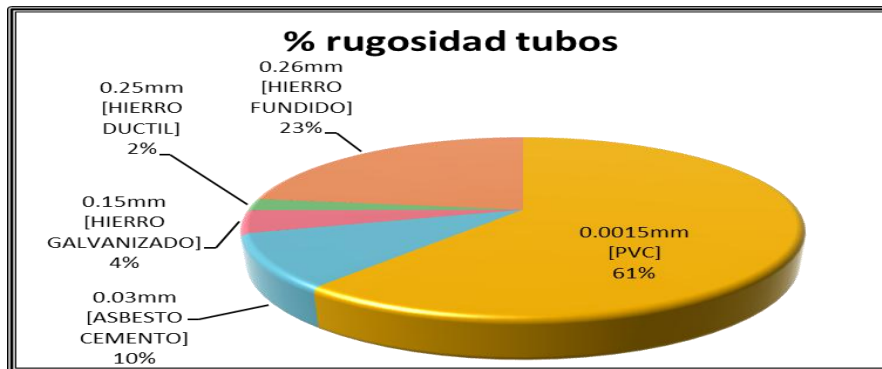


Tabla 42: Rangos Rugosidad VALVULA V_18448

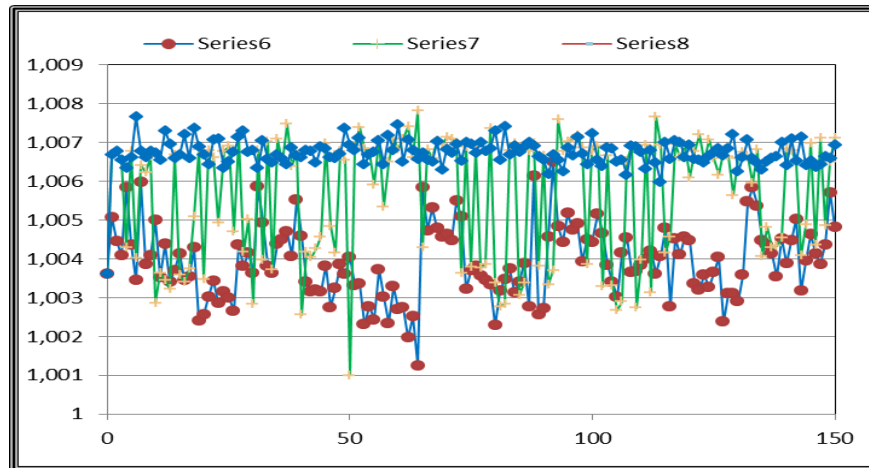
rangos rugosidad	# tubos
0.0015mm [PVC]	463
0.03mm [ASBESTO CEMENTO]	73
0.15mm [HIERRO GALVANIZADO]	31
0.25mm [HIERRO DUCTIL]	16
0.26mm [HIERRO FUNDIDO]	174

Grafica 98: Porcentaje Rugosidad VALVULA V_18448



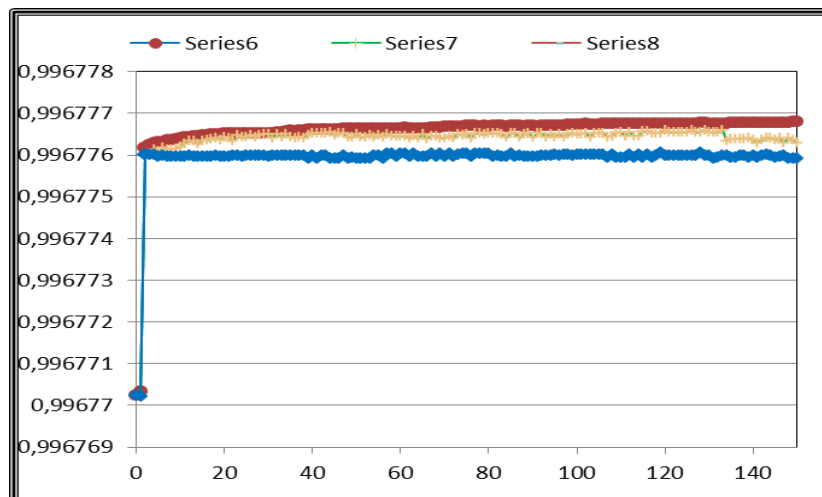
Índice de Resiliencia versus Numero de Cambios

Grafica 99: variación índice de Resiliencia versus Numero de Cambios VALVULA V_18448



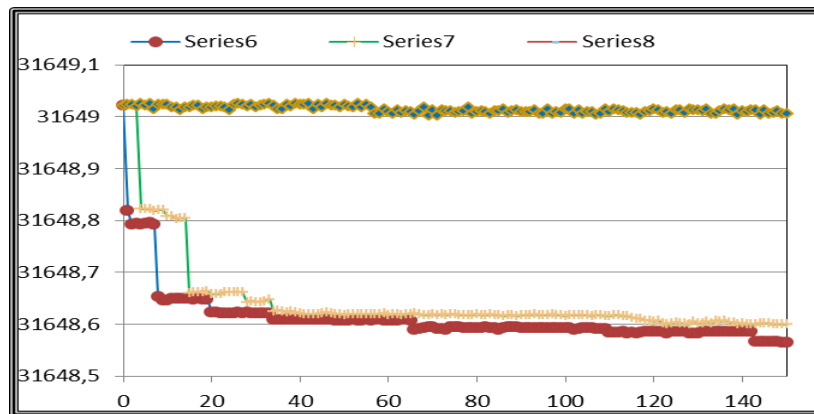
Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios

Grafica 100: variación Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios VALVULA V_18448



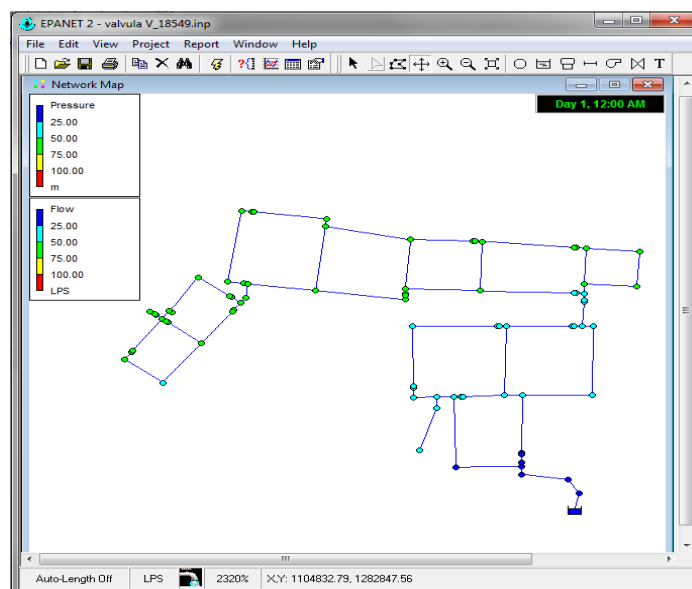
Rango de Presiones versus Número de Cambios

Grafica 101: variación Rango de Presiones versus Numero de Cambios VALVULA V_18448



VALVULA V_18549

RED 21: válvula v_18549



CARACTERIZACION

Tabla 43: Rango diámetros válvula v_18549

rango diámetros	# tubos	Long [m]
2 pulg	10	207.06
3 pulg	72	1140.71
4 pulg	5	54.29

Grafica 102: Porcentaje tubos válvula v_18549

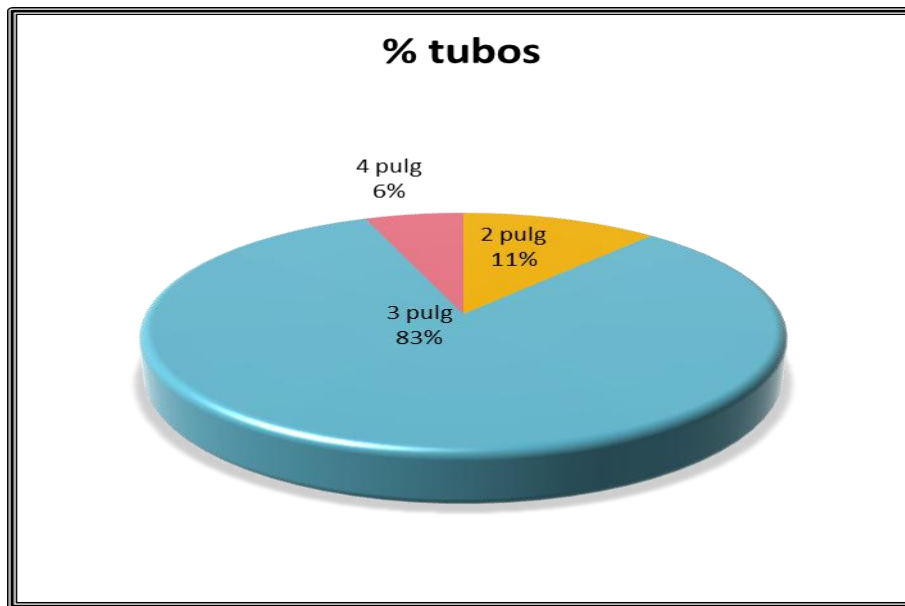
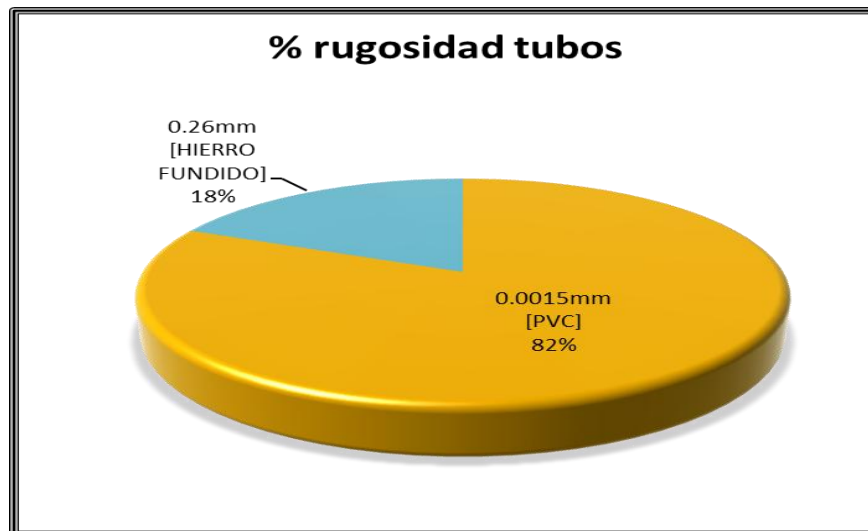


Tabla 44: Rangos Rugosidad tubos válvula v_18549

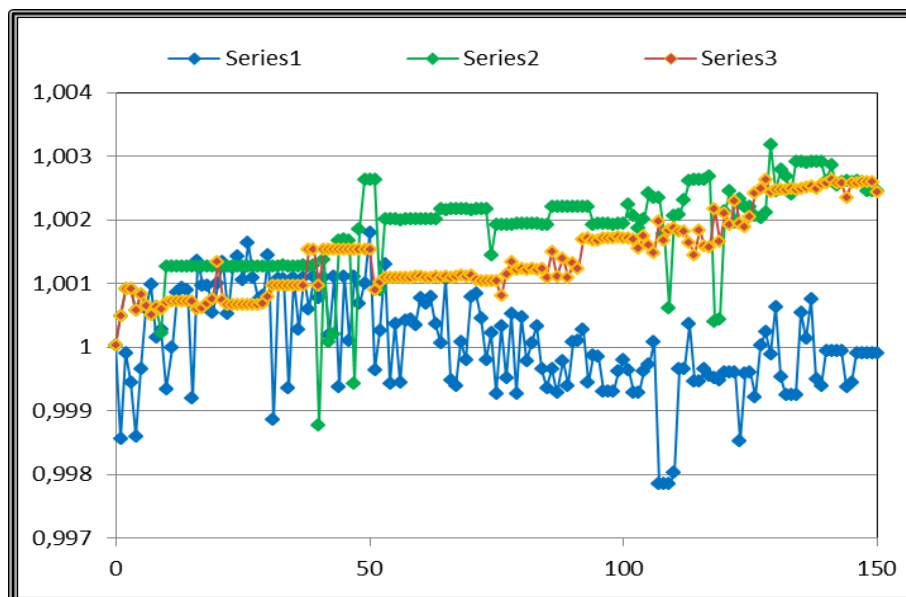
rangos rugosidad	# tubos
0.0015mm [PVC]	71
0.26mm [HIERRO FUNDIDO]	16

Grafica 103: Porcentaje Rugosidad tubos válvula v_18549



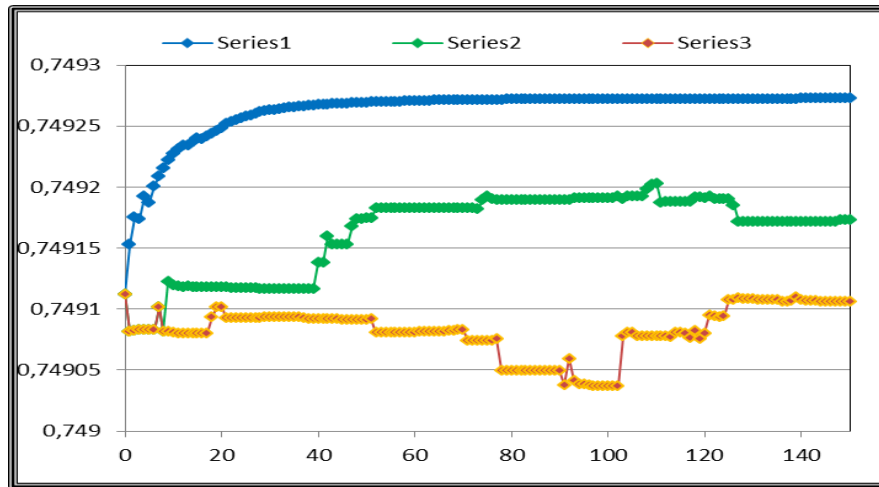
Índice de Resiliencia versus Numero de Cambios

Grafica 104: variación índice de Resiliencia versus Numero de Cambios válvula v_18549



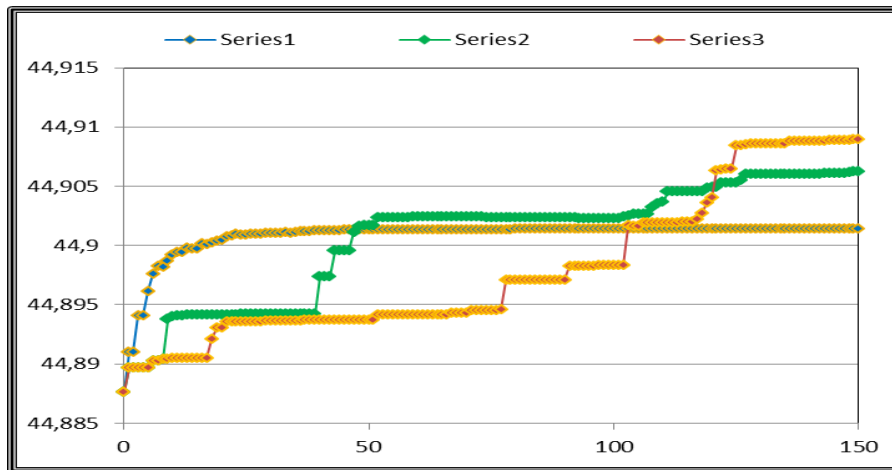
Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios

Grafica 105: variación Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios válvula v_18549



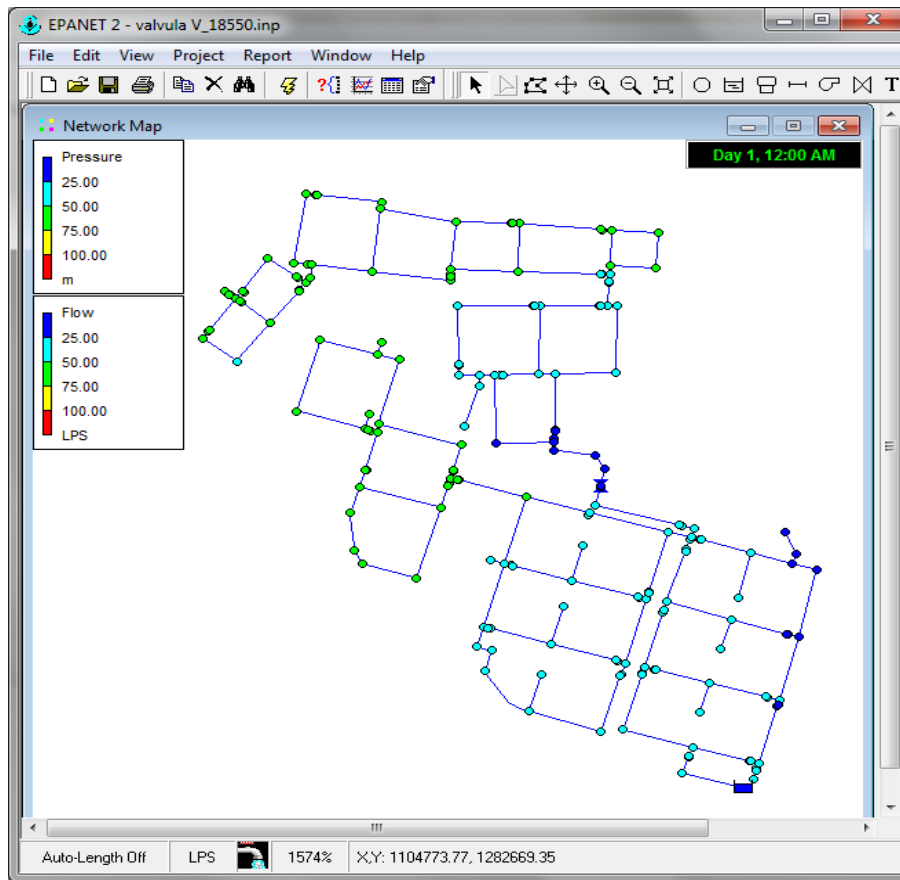
Rango Presiones versus Numero de Cambios

Grafica 106: variación Rango de Presiones versus Numero de Cambios válvula v_18549



VALVULA V_18550

RED 22: VALVULA V_18550



CARACTERIZACION

Tabla 45: Rango diámetros VALVULA V_18550

rango diámetros	# tubos	Long [m]
2 pulg	39	687.8
3 pulg	147	2589.85
4 pulg	15	188.18

Grafica 107: Porcentaje tubos VALVULA V_18550

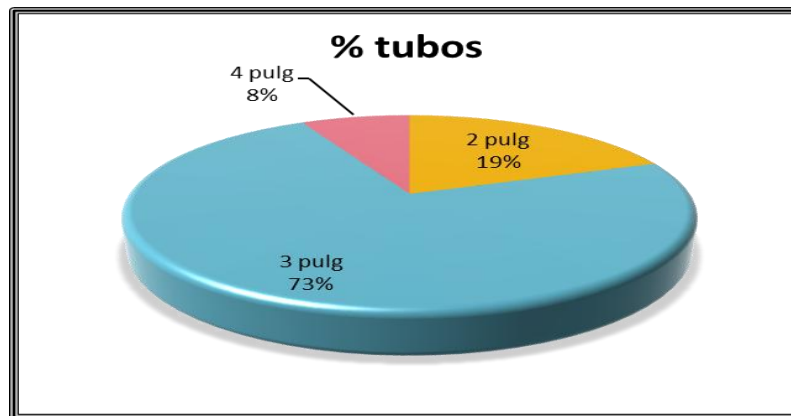
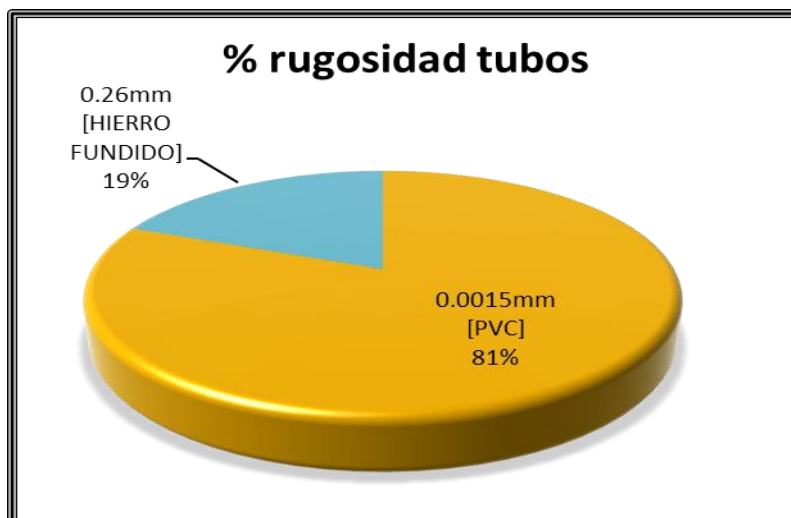


Tabla 46: Rangos Rugosidad VALVULA V_18550

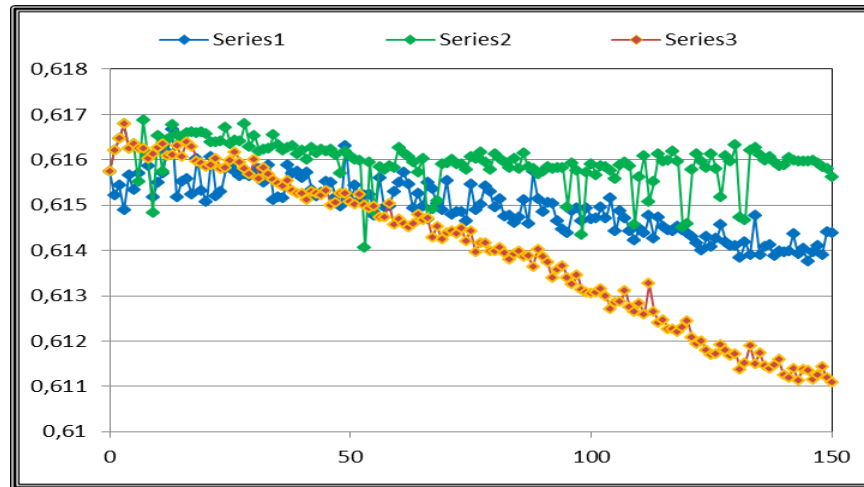
rangos rugosidad	# tubos
0.0015mm [PVC]	163
0.26mm [HIERRO FUNDIDO]	38

Grafica 108: Porcentaje Rugosidad tubos VALVULA V_18550



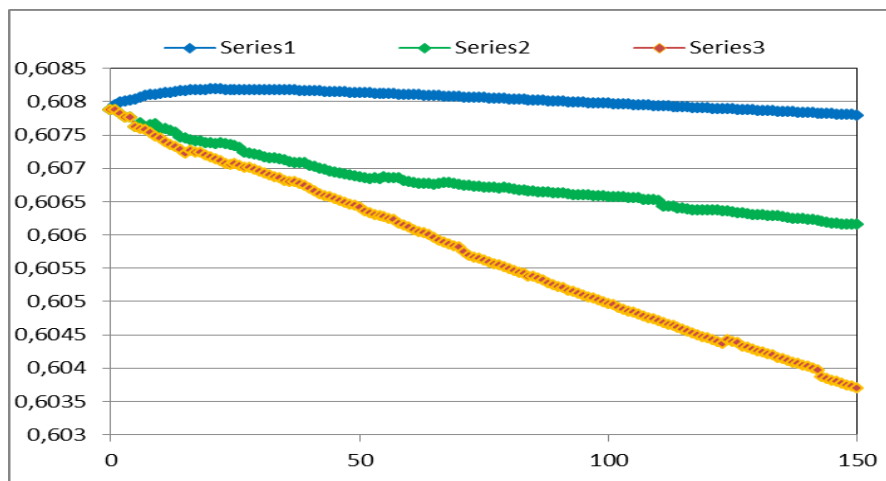
Índice de Resiliencia versus Numero de Cambios

Grafica 109: variación índice de Resiliencia versus Numero de Cambios VALVULA V_18550



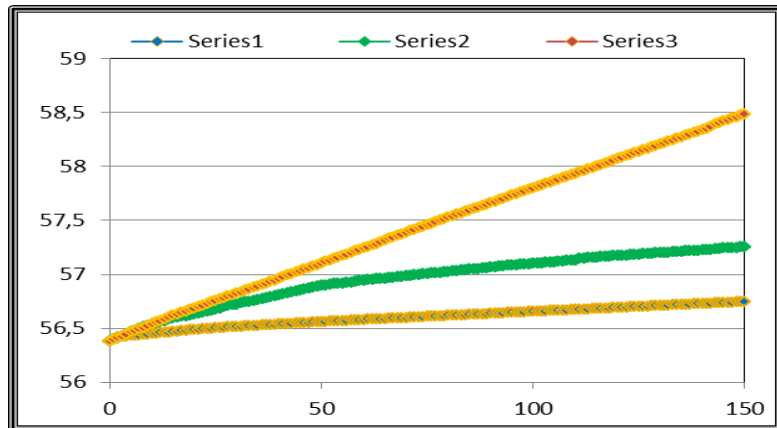
Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios

Grafica 110: variación Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios VALVULA V_18550



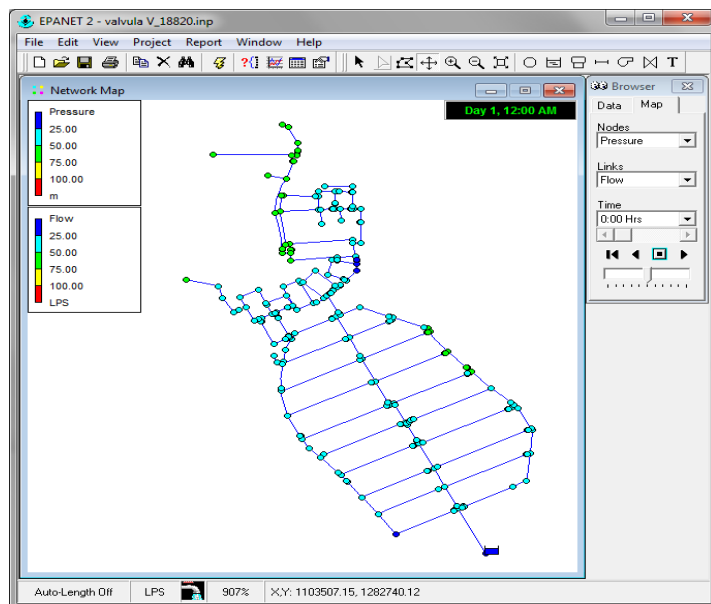
Rangos de Presiones versus Numero de Cambios

Grafica 111: variación Rango de Presiones versus Numero de Cambios VALVULA V_18550



VALVULA V_18820

RED 23: VALVULA V_18820

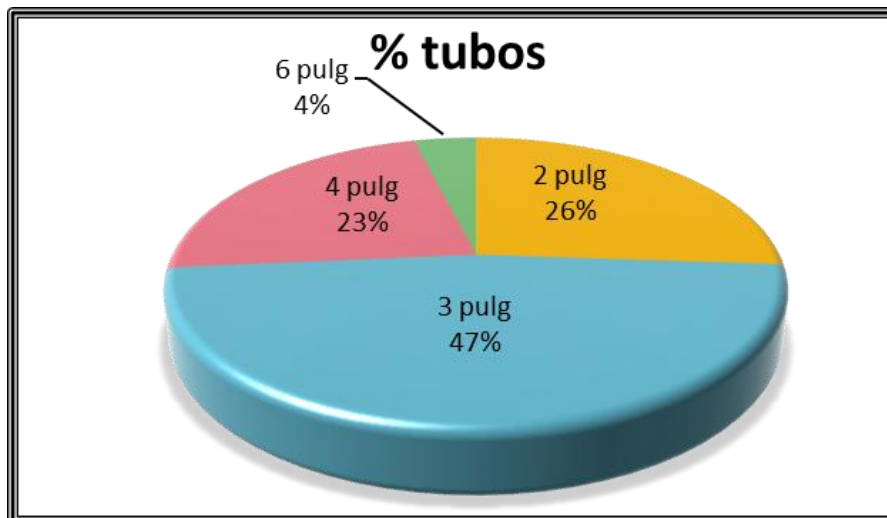


CARACTERIZACION

Tabla 47: Rango diámetros VALVULA V_18820

rango diámetros	# tubos	Long [m]
2 pulg	73	1351.8
3 pulg	133	3277.5
4 pulg	63	1262.21
6 pulg	11	275.26

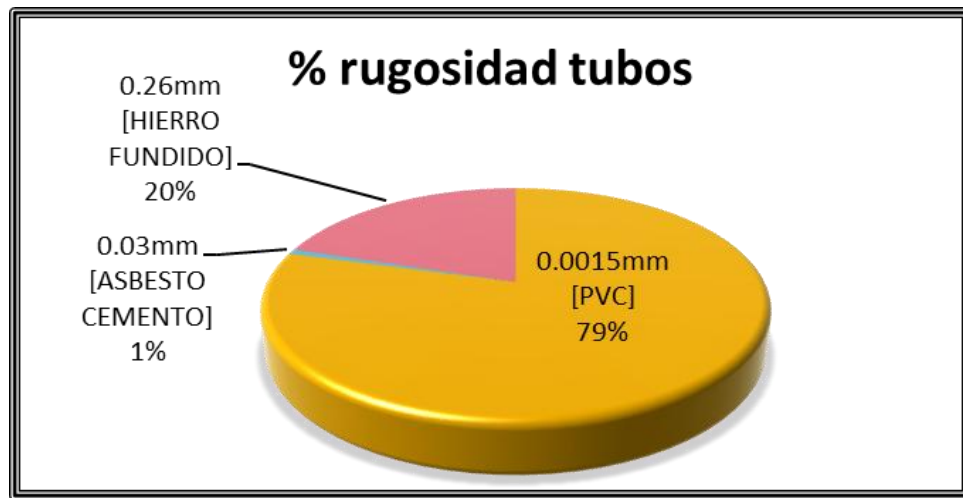
Grafica 112: Porcentaje tubos VALVULA V_18820



Tablas 48: Rango Rugosidad VALVULA V_18820

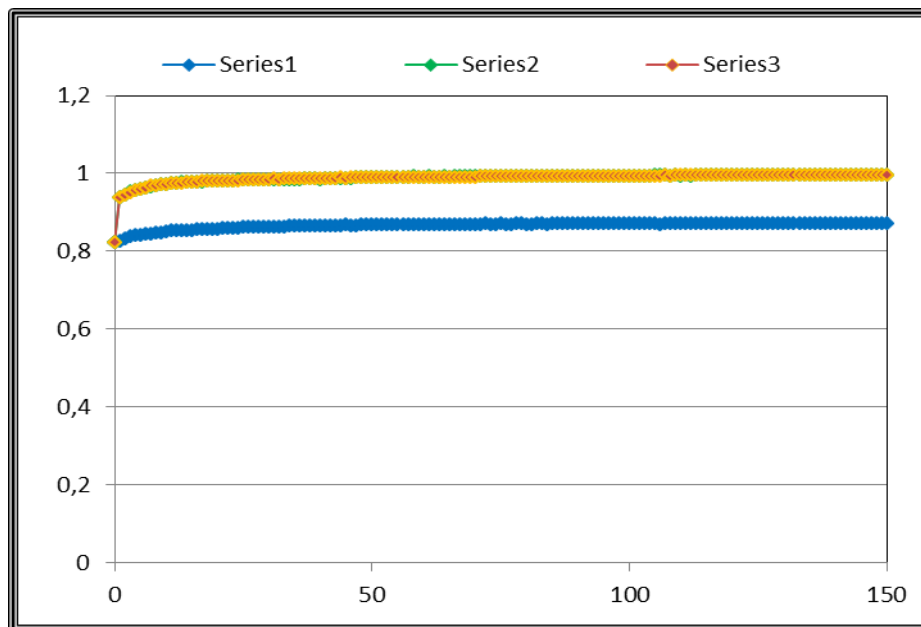
rangos rugosidad	# tubos
0.0015mm [PVC]	222
0.03mm [ASBESTO CEMENTO]	2
0.26mm [HIERRO FUNDIDO]	56

Grafica 113: Porcentaje Rugosidad tubos VALVULA V_18820



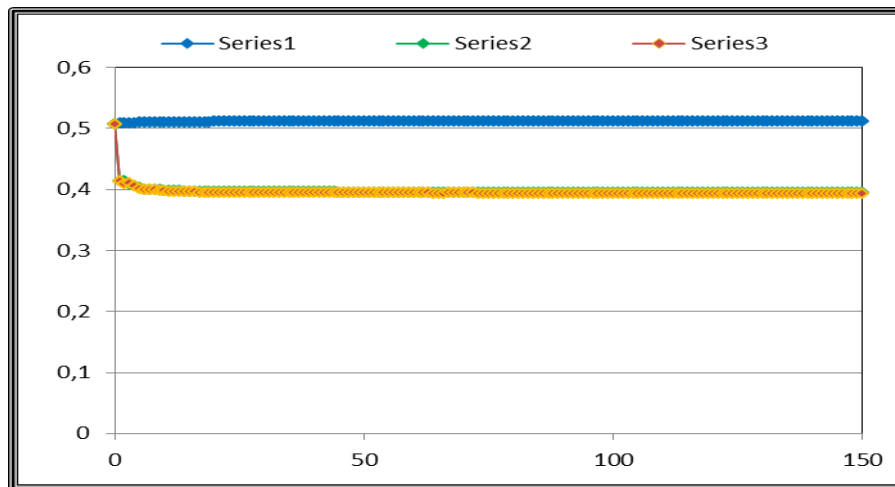
Índice de Resiliencia versus Numero de Cambios

Grafica 114: variación índice de Resiliencia versus Numero de Cambios VALVULA V_18820



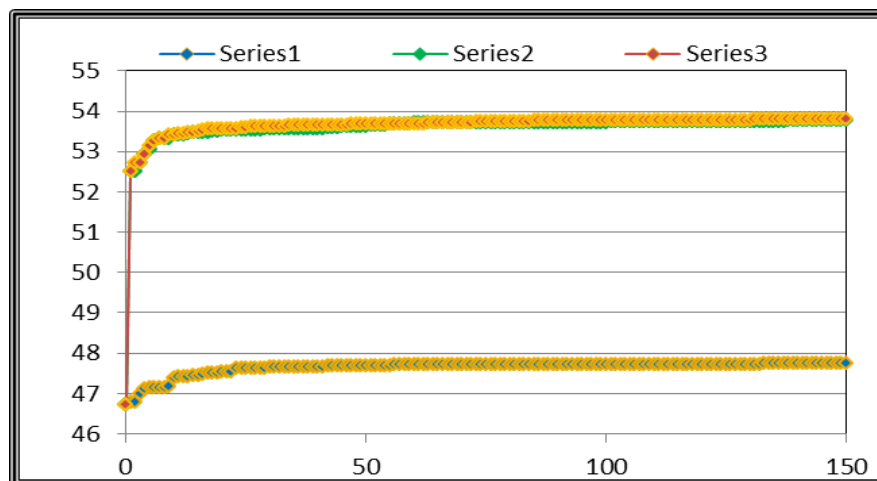
Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios

Grafica 115: variación Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios VALVULA V_18820



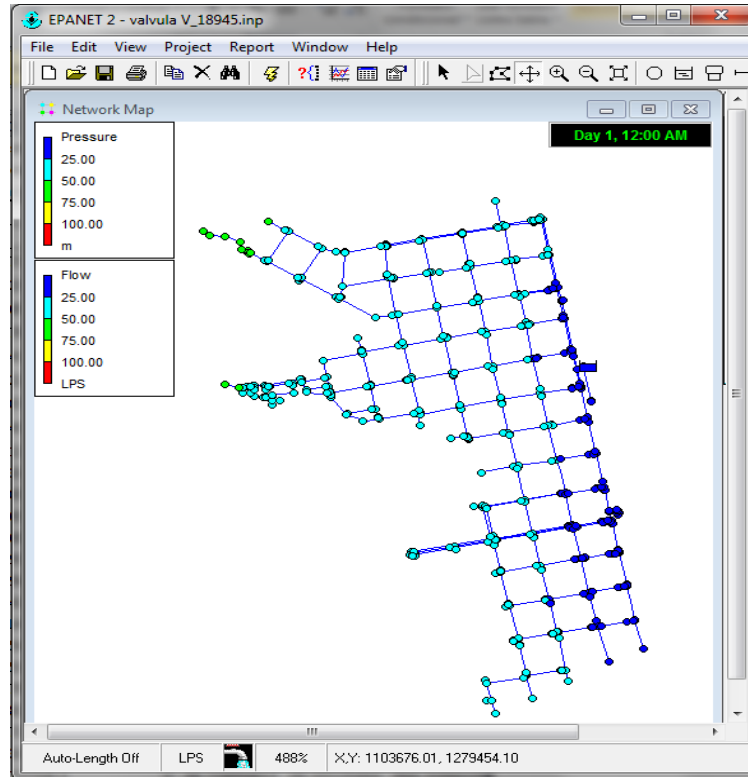
Rango de Presiones versus Numero de Cambios

Grafica 116: Variación Rango de Presiones versus Numero de Cambios VALVULA V_18820



VALVULA V_18945

RED 24: VALVULA V_18945



CARACTERIZACION

Tabla 49: Rango diámetros VALVULA V_18945

rango diámetros	# tubos	Long [m]
2 pulg	365	8859.13
3 pulg	80	1066.24
4 pulg	148	3992.1
6 pulg	29	938.54
8 pulg	16	173.16

Grafica 117: Porcentaje tubos VALVULA V_18945

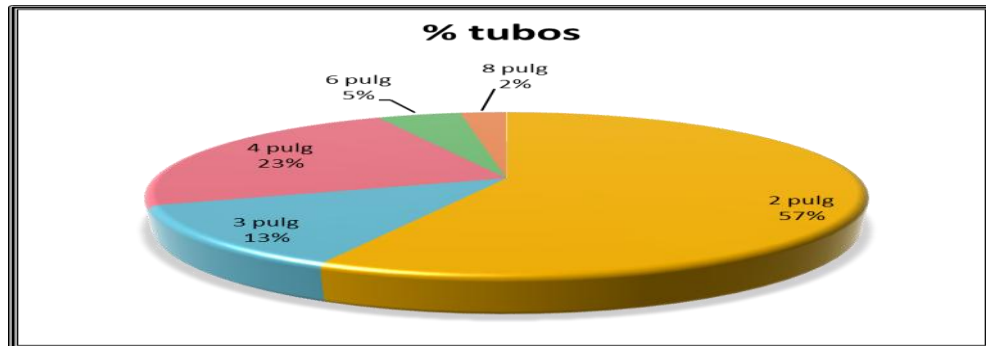
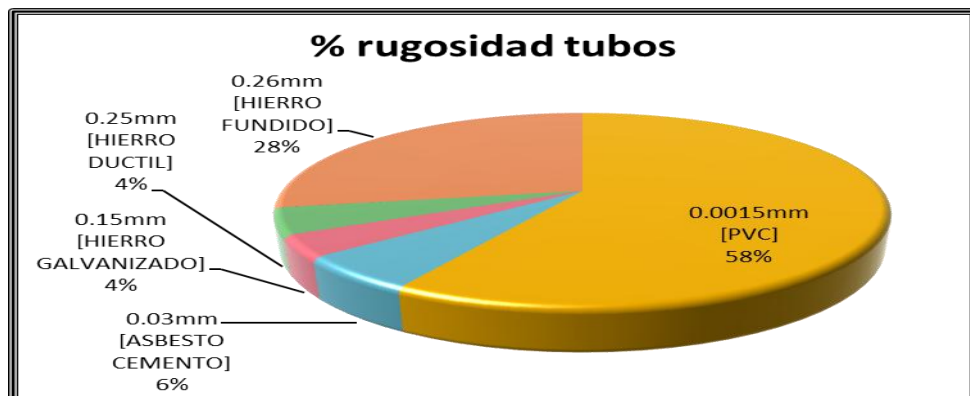


Tabla 50: Rangos Rugosidad VALVULA V_18945

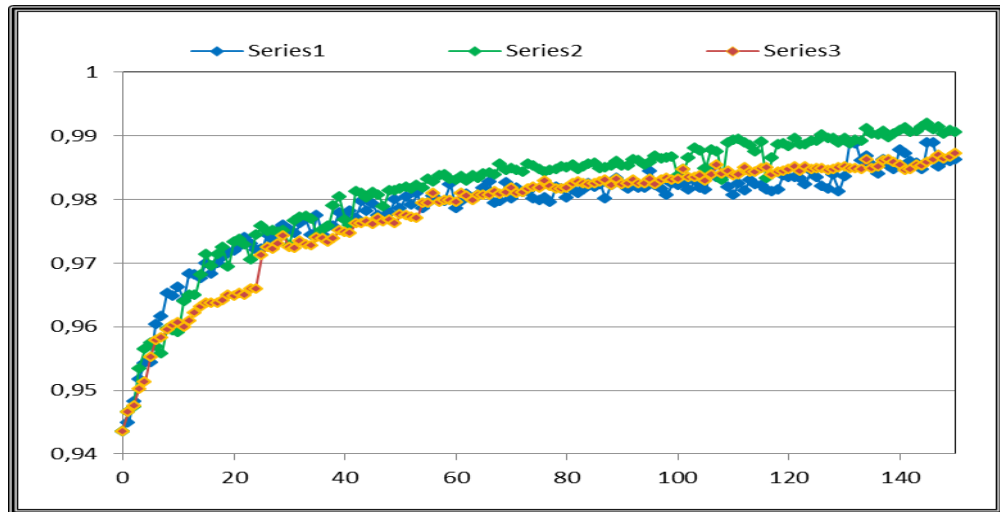
rangos rugosidad	# tubos
0.0015mm [PVC]	373
0.03mm [ASBESTO CEMENTO]	37
0.15mm [HIERRO GALVANIZADO]	23
0.25mm [HIERRO DUCTIL]	28
0.26mm [HIERRO FUNDIDO]	177

Grafica 118: Porcentaje Rugosidad tubos VALVULA V_18945



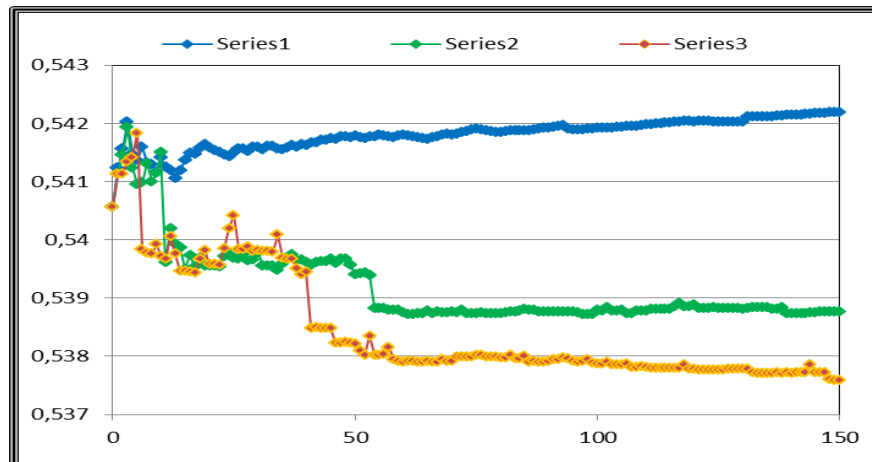
Índice de Resiliencia versus Numero de Cambios

Grafica 119: variación índice de Resiliencia versus Numero de Cambios VALVULA V_18945



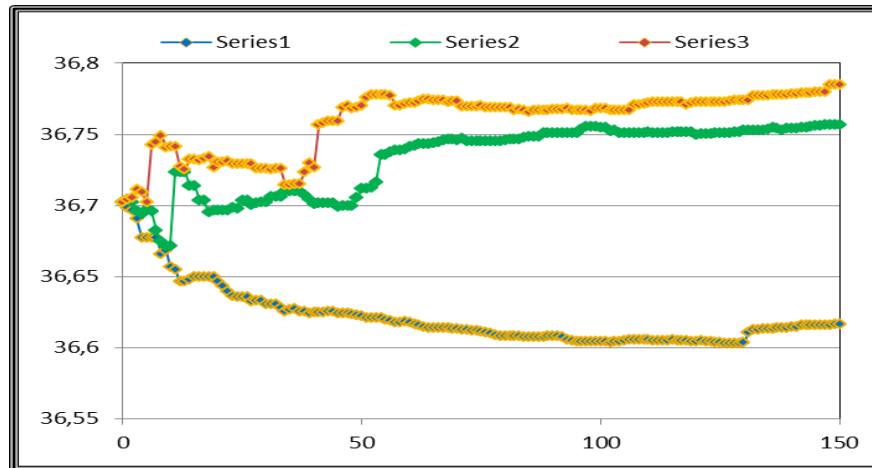
Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios

Grafica 120: variación Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios VALVULA V_18945



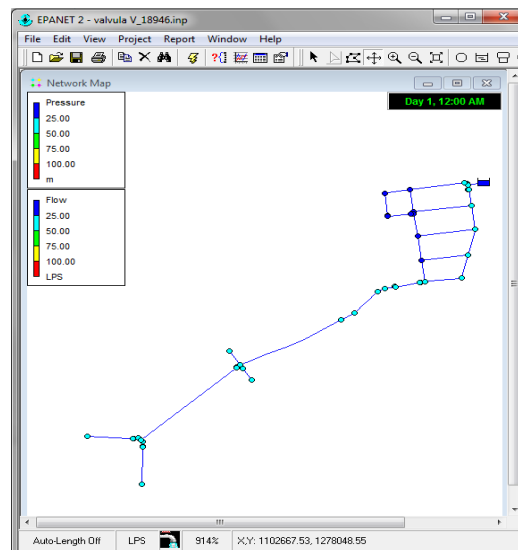
Rango de Presiones versus Numero de Cambios

Grafica 121: variación Rango de Presiones versus Numero de Cambios VALVULA V_18945



VALVULA V_18946

RED 25: VALVULA V_18946



CARACTERIZACION

Tabla 51: Rango diámetros VALVULA V_18946

rango diámetros	# tubos	Long [m]
2 pulg	19	524.04
3 pulg	31	1289.52

Grafica 122: Porcentaje tubos VALVULA V_18946

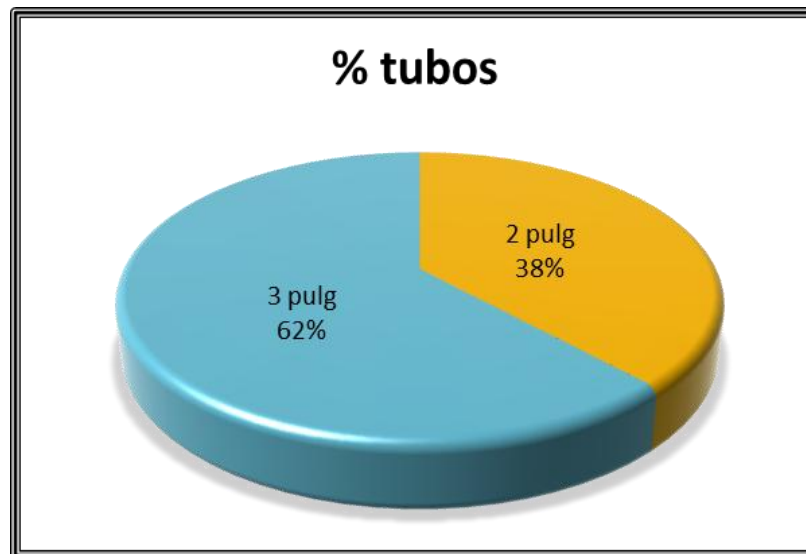
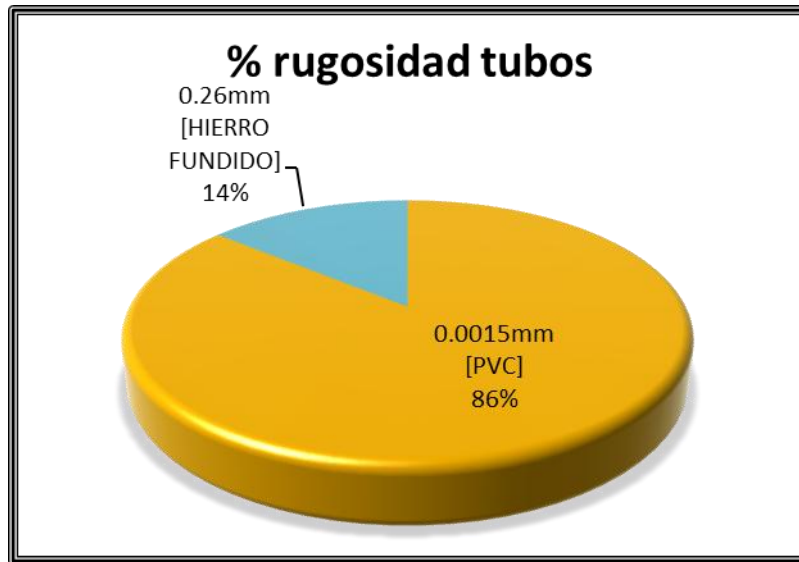


Tabla 52: Rango Rugosidad tubos VALVULA V_18946

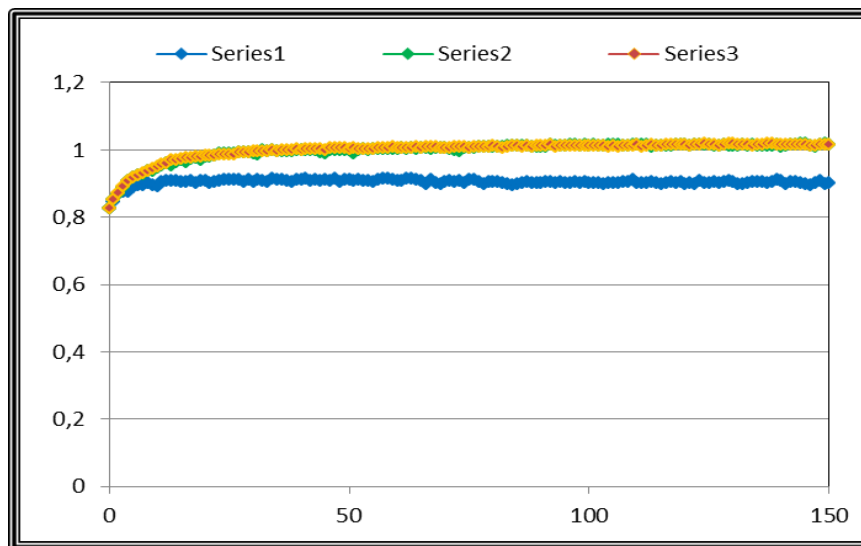
rangos rugosidad	# tubos
0.0015mm [PVC]	43
0.26mm [HIERRO FUNDIDO]	7

Grafica 123: Porcentaje de Rugosidad VALVULA V_18946



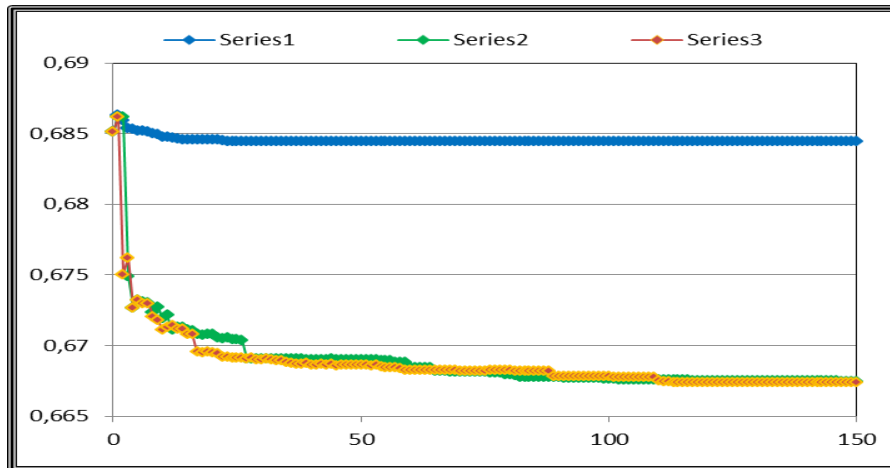
Índice de Resiliencia versus Numero de Cambios

Grafica 124: variación índice de Resiliencia versus Numero de Cambios VALVULA V_18946



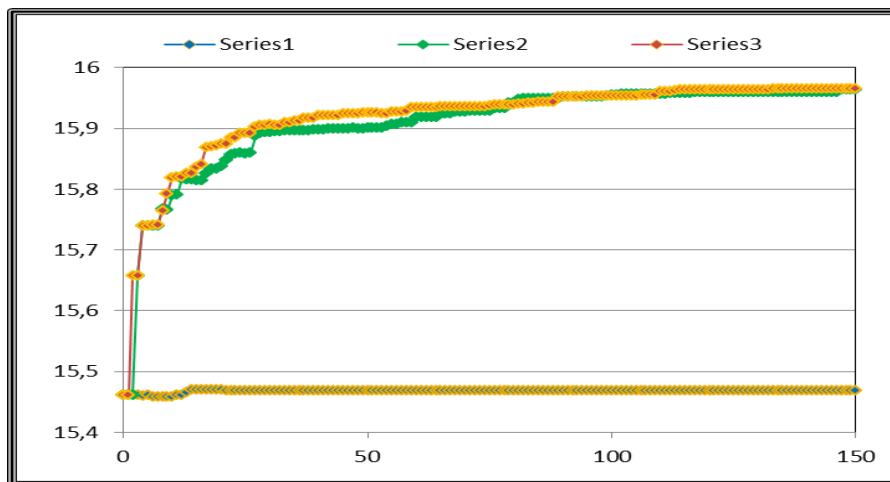
Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios

Grafica 125: variación Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios VALVULA V_18946



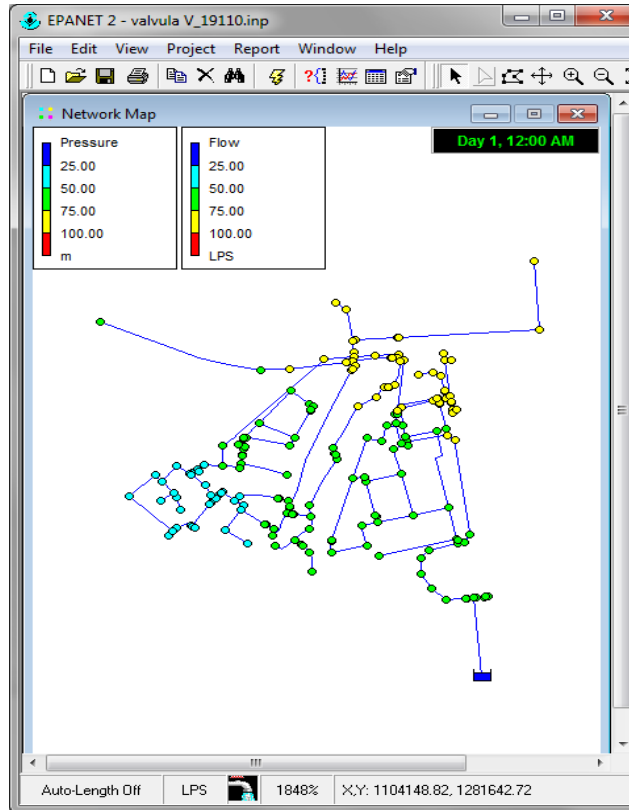
Rango de Presiones versus Numero de Cambios

Grafica 126: Variación Rango de Presiones versus Numero de Cambios VALVULA V_18946



VALVULA V_19110

RED 26: VALVULA V_19110



CARACTERIZACION

Tabla 53: Rango diámetros VALVULA V_19110

rango diámetros	# tubos	Long [m]
2 pulg	114	1723.73
3 pulg	27	215.47
4 pulg	21	448.82
6 pulg	34	490.89

Grafica 127: Porcentaje tubos VALVULA V_19110

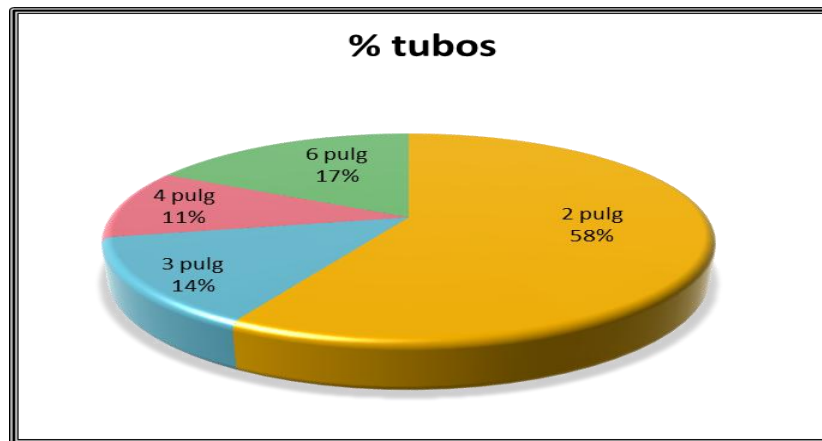
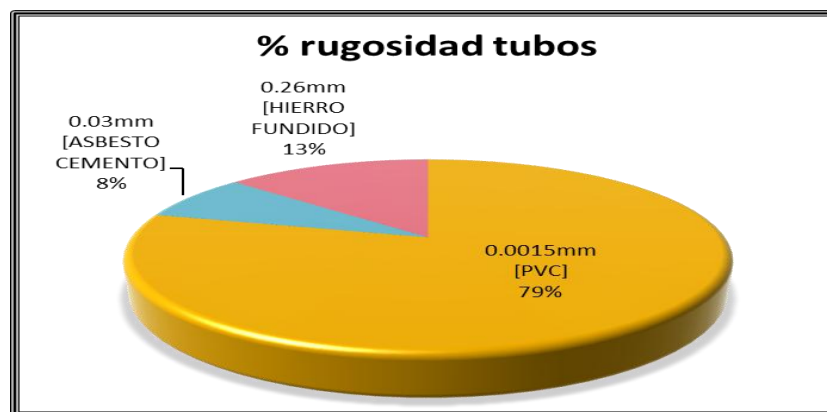


Tabla 54: Rangos Rugosidad VALVULA V_19110

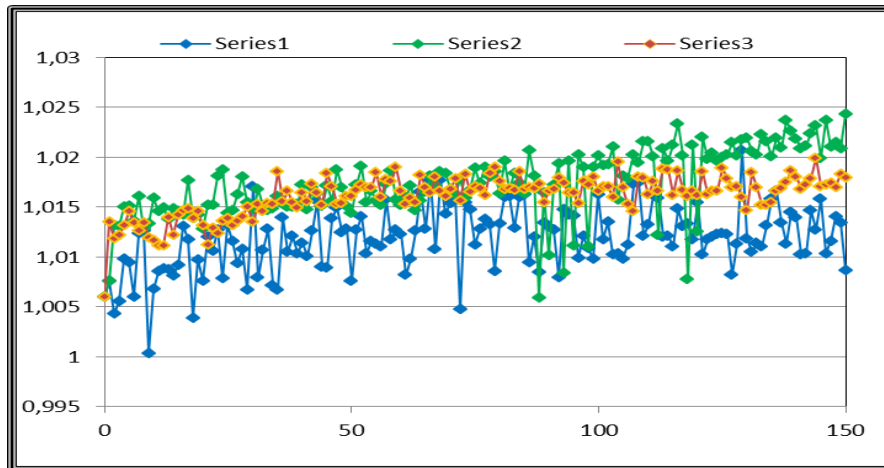
rangos rugosidad	# tubos
0.0015mm [PVC]	155
0.03mm [ASBESTO CEMENTO]	15
0.26mm [HIERRO FUNDIDO]	26

Grafica 128: Porcentaje Rugosidad tubos VALVULA V_19110



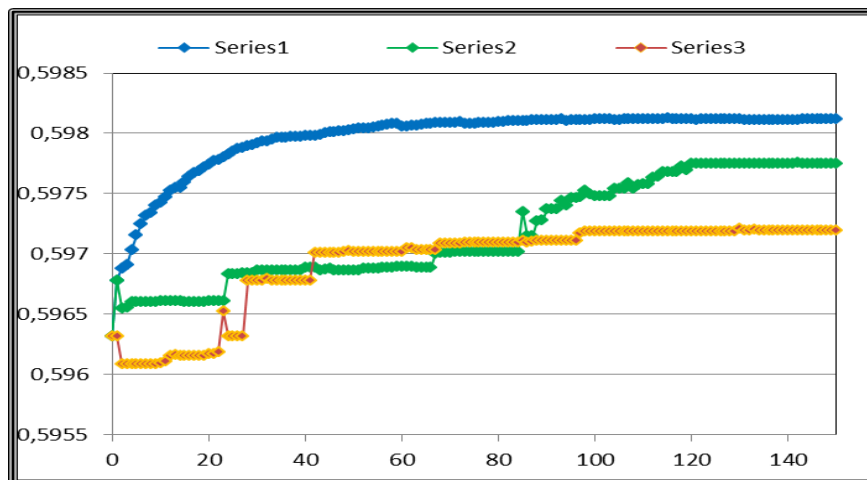
Índice de resiliencia versus Numero de Cambios

Grafica 129: variación índice de Resiliencia versus Numero de Cambios VALVULA V_19110



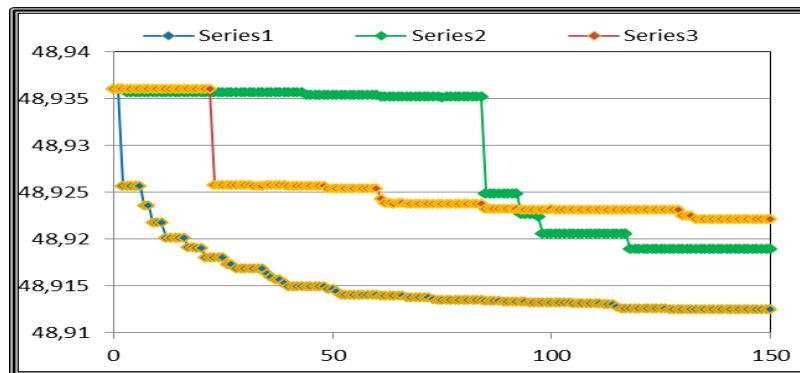
Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios

Grafica 130: variación Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios VALVULA V_19110



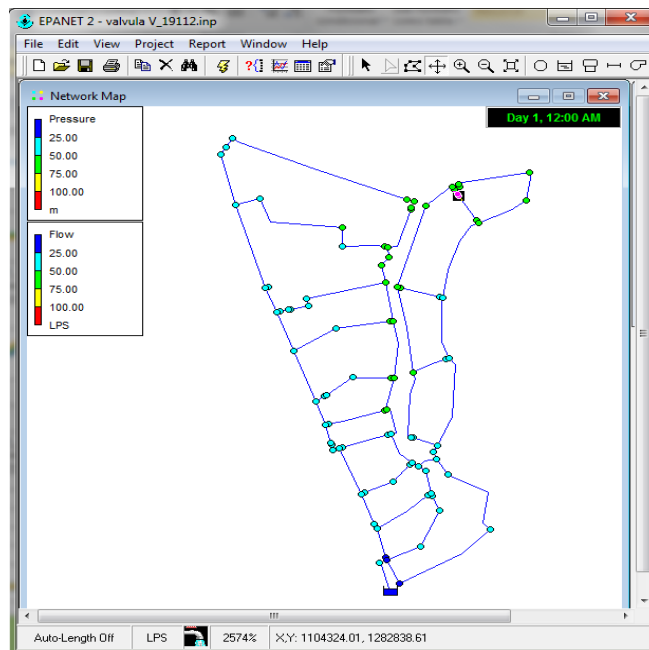
Rango de Presiones versus Numero de Cambios

Grafica 131: variación Rango de Presiones versus Numero de Cambios VALVULA V_19110



VALVULA V_19112

RED 27: VALVULA V_19112



CARACTERIZACION

Tabla 55: Rango diámetros VALVULA V_19112

rango diámetros	# tubos	Long [m]
2 pulg	29	1554.99
3 pulg	68	5433.57
4 pulg	5	509.778

Grafica 132: Porcentaje de tubos VALVULA V_19112

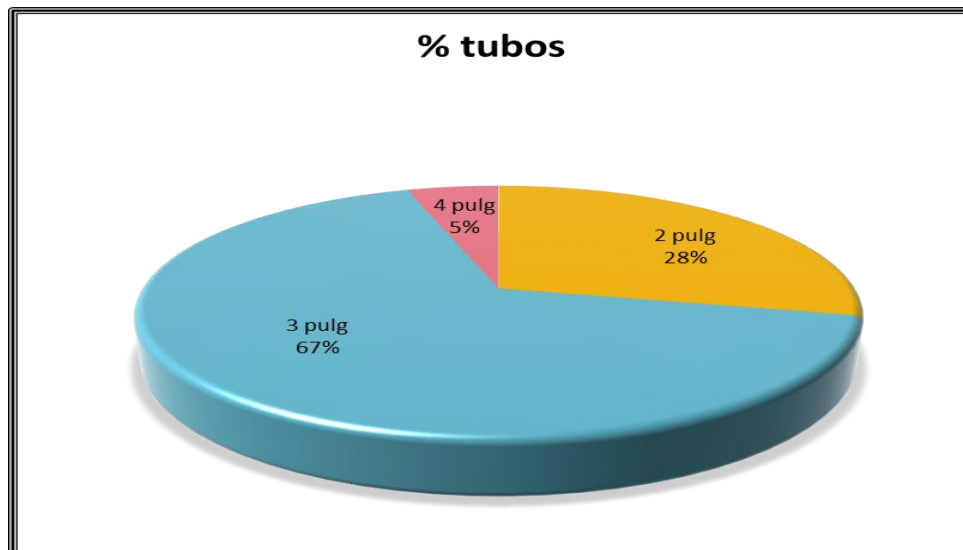
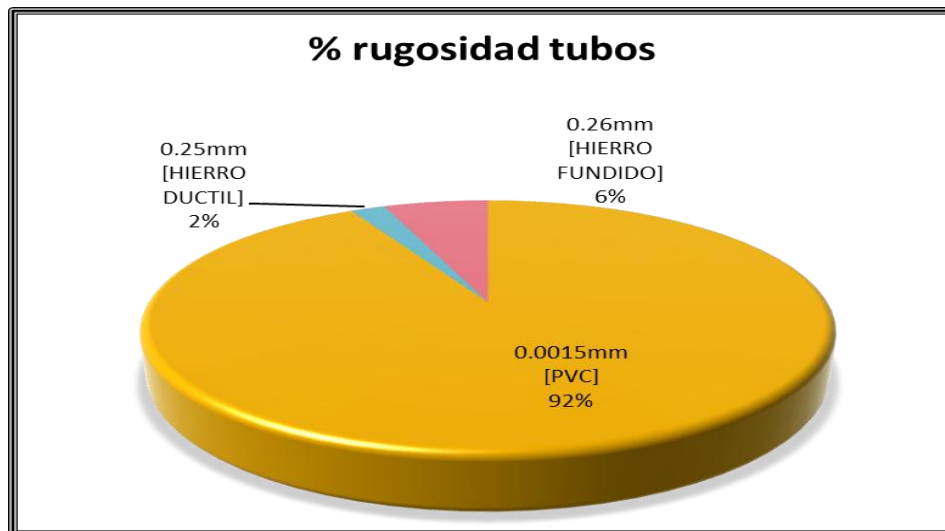


Tabla 56: Rango Rugosidad tubos VALVULA V_19112

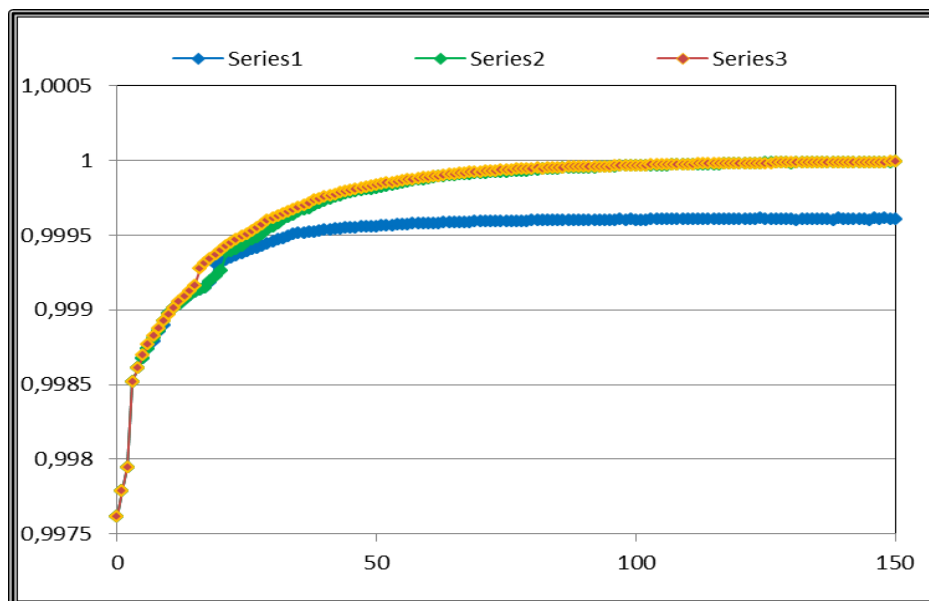
rangos rugosidad	# tubos
0.0015mm [PVC]	94
0.25mm [HIERRO DUCTIL]	2
0.26mm [HIERRO FUNDIDO]	6

Grafica 133: Porcentaje de Rugosidad tubos VALVULA V_19112



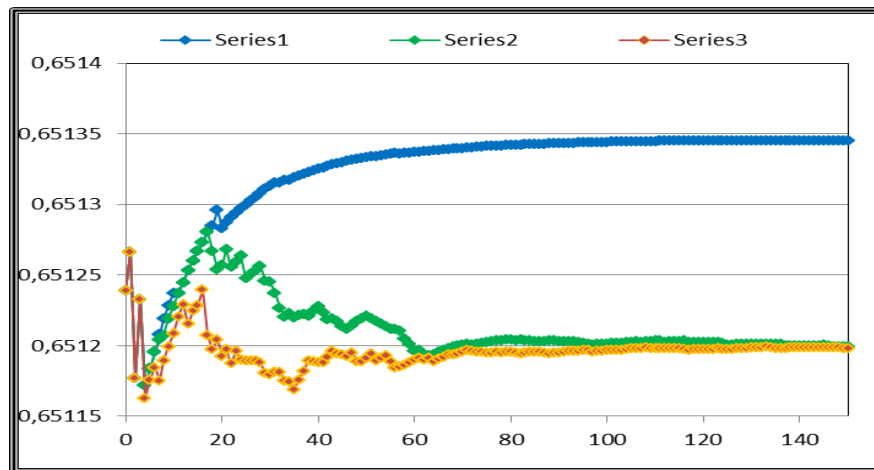
Índice de Resiliencia versus Numero de Cambios

Grafica 134: variación índice de Resiliencia versus Numero de Cambios VALVULA V_19112



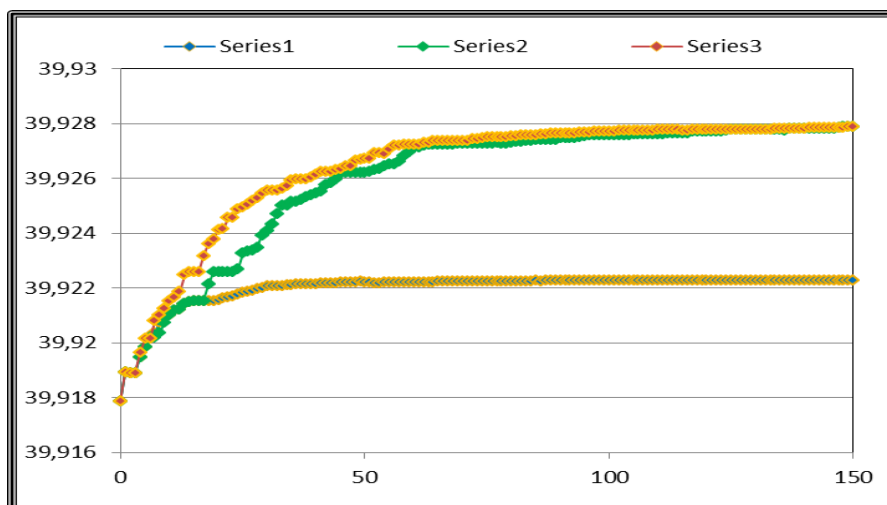
Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios

Grafica 135: variación Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios VALVULA V_19112



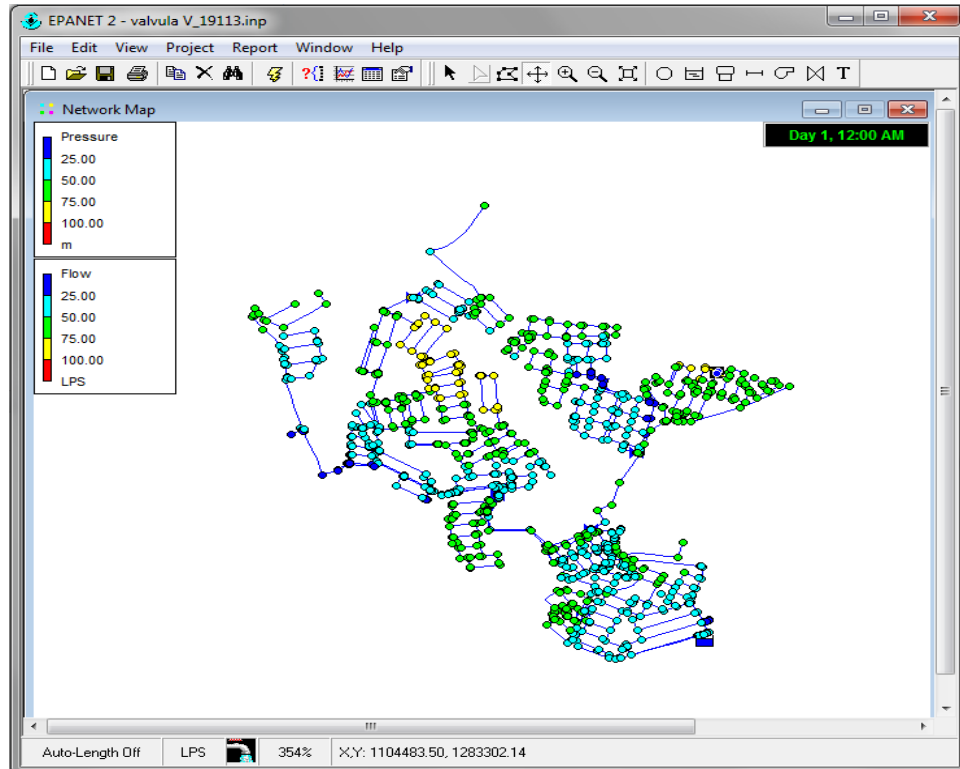
Rango de Presiones versus Numero de Cambios

Grafica 136: variación Rango de Presiones versus Numero de Cambios VALVULA V_19112



VALVULA V_19113

RED 28: VALVULA V_19113



CARACTERIZACION

Tabla 57: Rango diámetros VALVULA V_19113

rango diámetros	# tubos	Long [m]
2 pulg	746	12515.4
3 pulg	335	6037.84
4 pulg	126	1864.51
6 pulg	61	1831.42
8 pulg	34	889.62
10 pulg	7	116.78

Grafica 137: Porcentaje tubos VALVULA V_19113

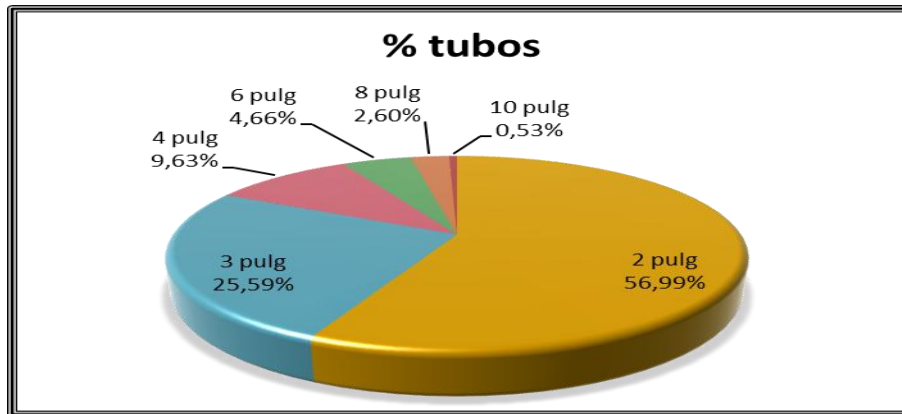
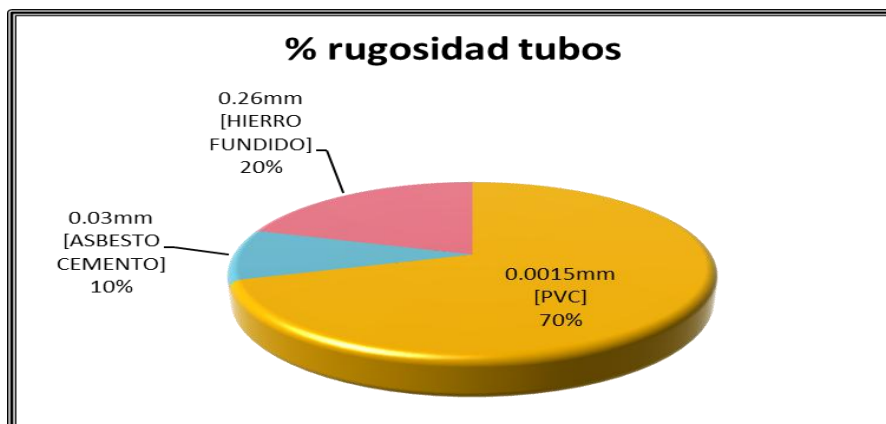


Tabla 58: Rango Rugosidad VALVULA V_19113

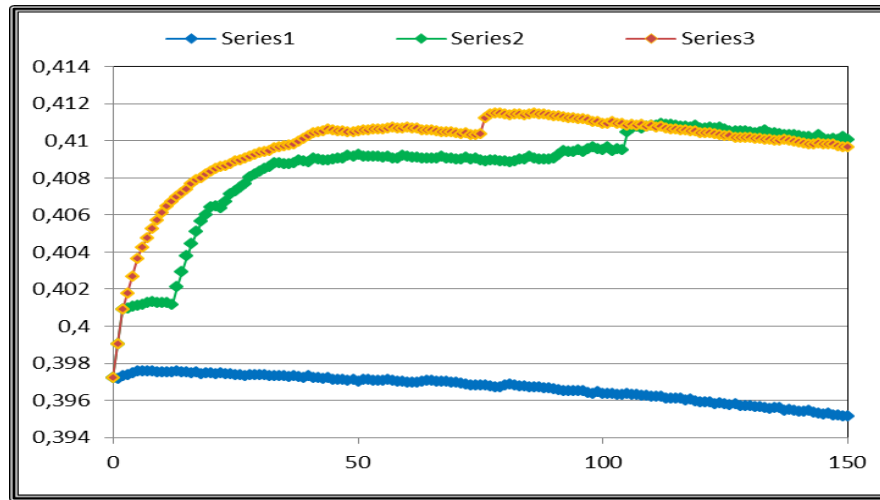
rangos rugosidad	# tubos
0.0015mm [PVC]	921
0.03mm [ASBESTO CEMENTO]	123
0.26mm [HIERRO FUNDIDO]	265

Grafica 138: Porcentaje Rugosidad tubos VALVULA V_19113



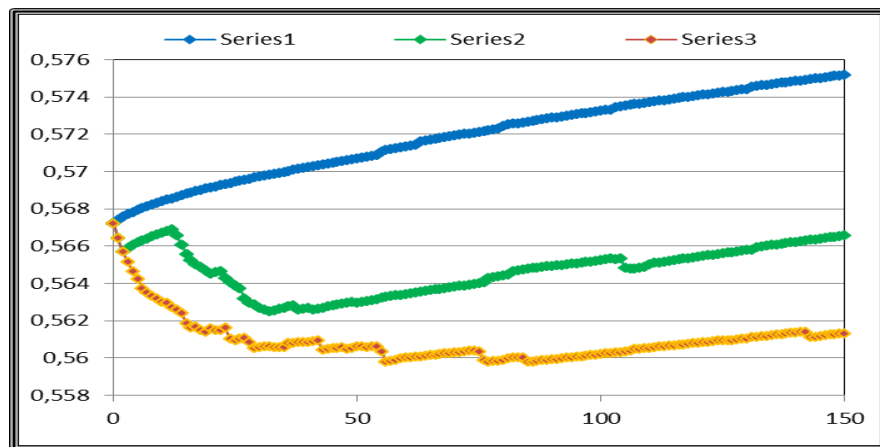
Índice de Resiliencia versus Numero de Cambios

Grafica 139: variación índice de Resiliencia versus Numero de Cambios VALVULA V_19113



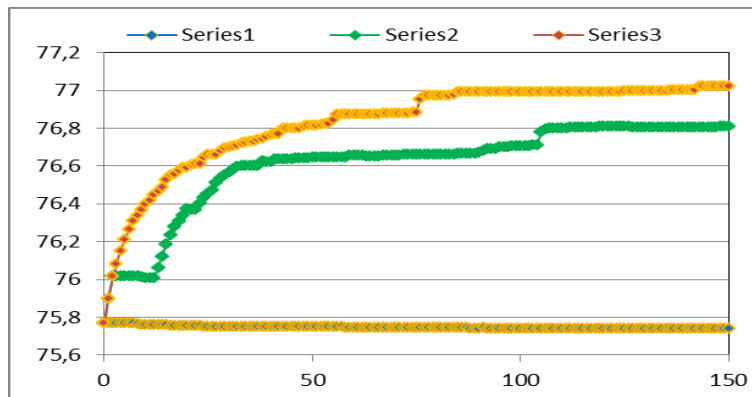
Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios

Grafica 140: variación Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios VALVULA V_19113



Rango de Presiones versus Numero de Cambios

Grafica 141: variación Rango de Presiones versus Numero de Cambios VALVULA V_19113



VALVULA V_19115

RED 29: VALVULA V_19115

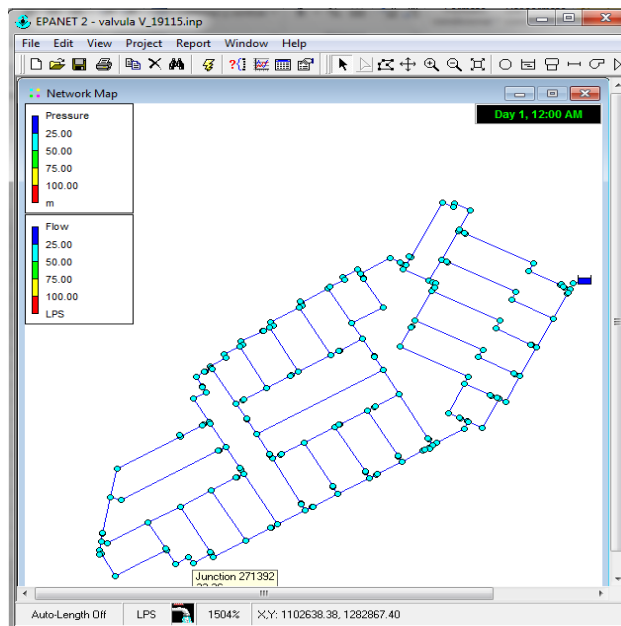


Tabla 59: Rango diámetros VALVULA V_19115

rango diámetros	# tubos	Long [m]
3 pulg	102	2045.59
4 pulg	101	1315.69
6 pulg	15	228.06

Grafica 142: Porcentaje tubos VALVULA V_19115

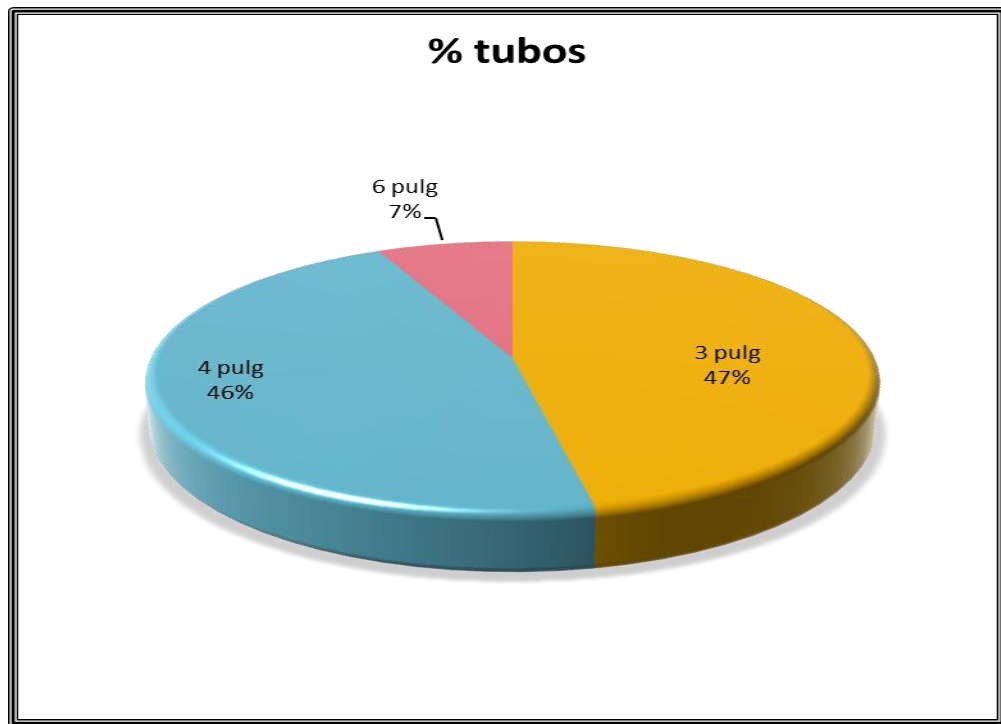
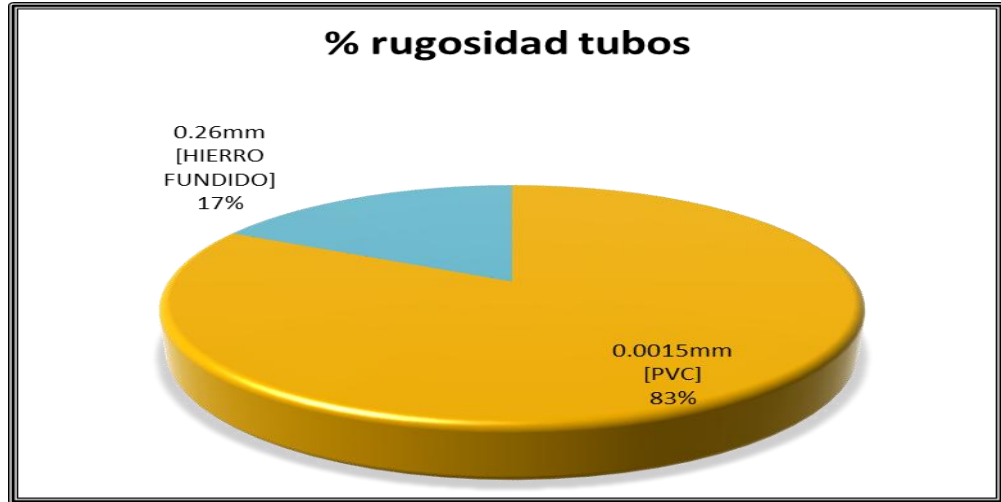


Tabla 60: Rangos Rugosidad VALVULA V_19115

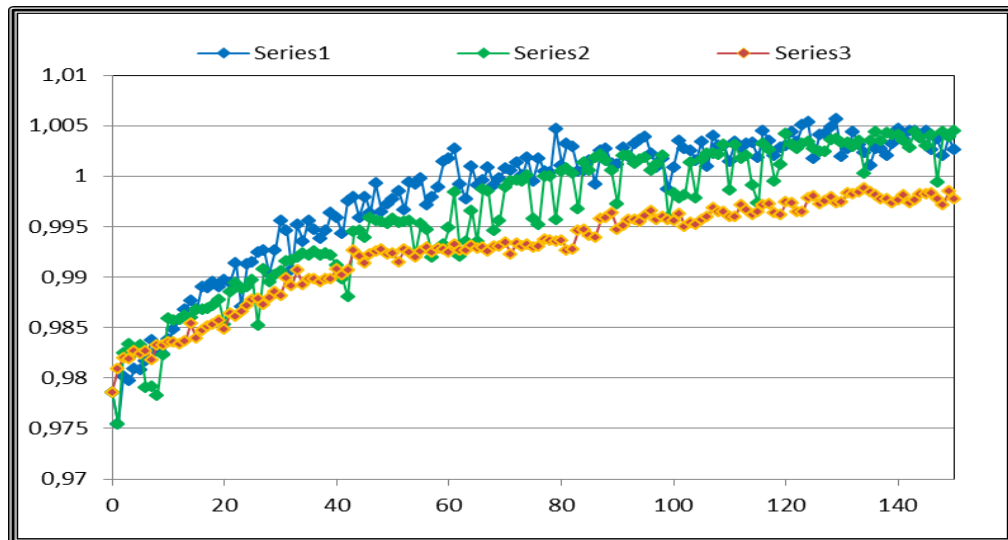
rangos rugosidad	# tubos
0.0015mm [PVC]	180
0.26mm [HIERRO FUNDIDO]	38

Grafica 143: Porcentaje Rugosidad tubos VALVULA V_19115



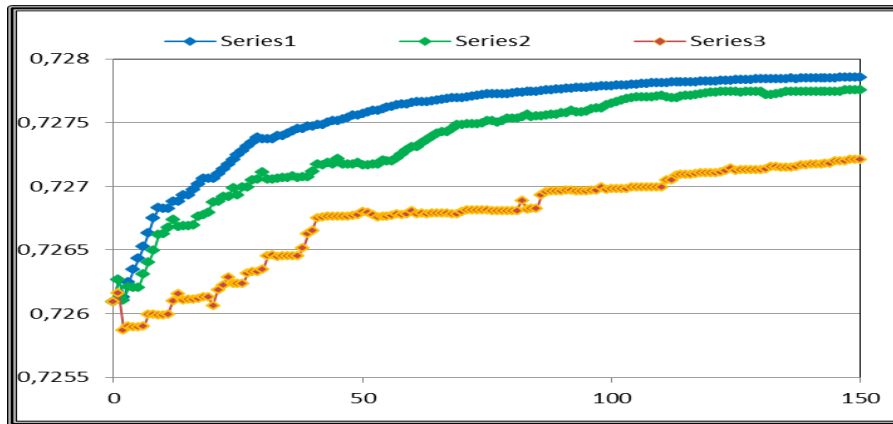
Índice de Resiliencia versus Numero de Cambios

Grafica 144: variación índice de Resiliencia versus Numero de Cambios VALVULA V_19115



Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios

Grafica 145: variación Coeficiente de Uniformidad versus Numero de Cambios VALVULA V_19115



Rango de Presiones versus Numero de Cambios

Grafica 146: variación Rango de Presiones versus Numero de Cambios VALVULA V_19115

