

**REPORTE FINAL: RD-1406.1
DESARROLLO, ADAPTACIÓN Y
TRANSFERENCIA DE
SISTEMAS Y EQUIPOS PARA
LA MEDICIÓN VOLUMÉTRICA
DEL AGUA A NIVEL
PARCELARIO E
INTERPARCELARIO**

Contenido

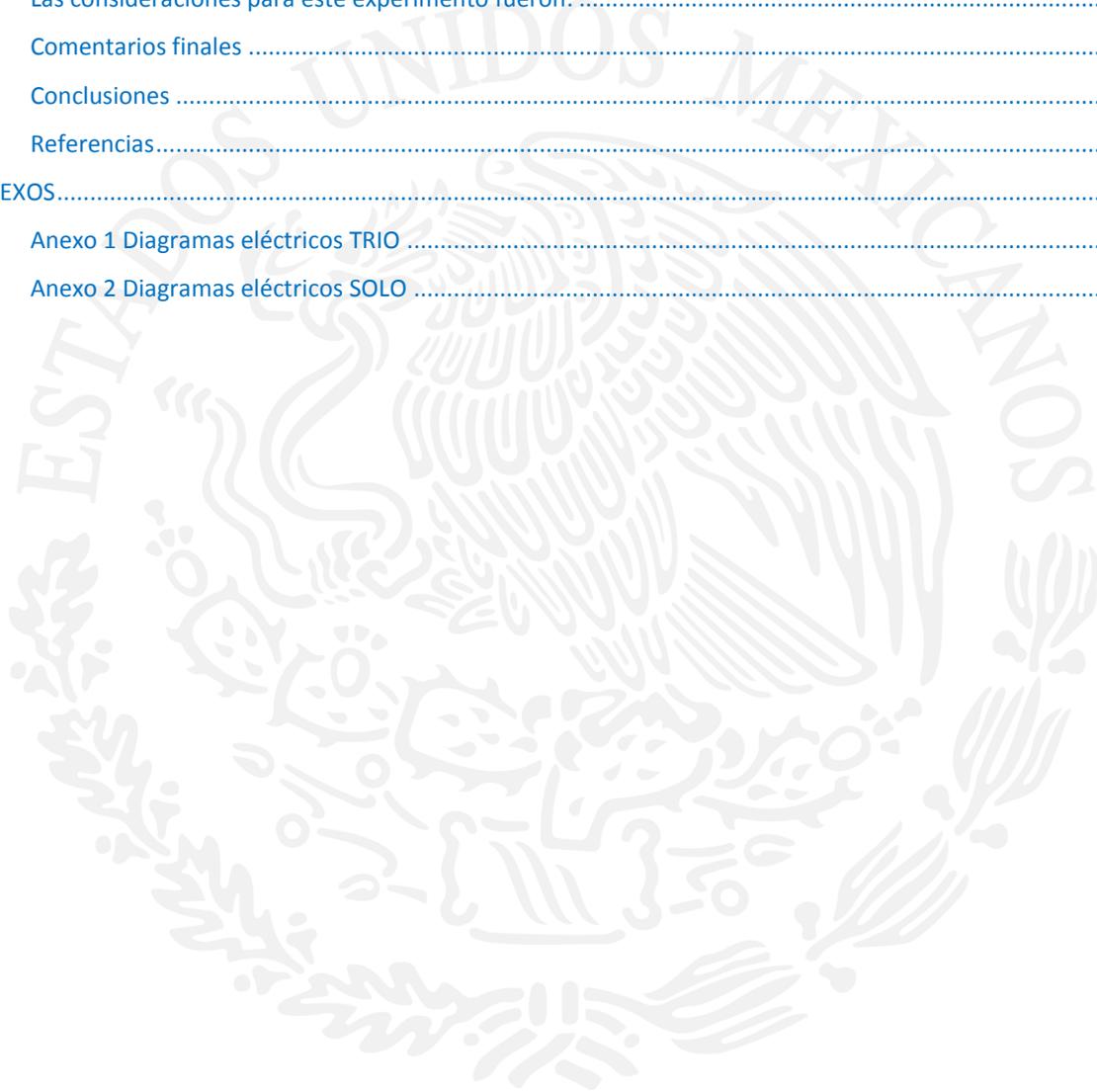
Antecedentes.....	1
1. Alternativas de medición de gasto en tuberías y canales abiertos	3
1.1. Ecuación de continuidad	4
1.2. Ecuación de Energía	5
1.3. Ecuación de cantidad de movimiento	6
1.4. ESTRUCTURAS TIPO VERTEDER	6
1.4.1. OBJETIVO	6
1.4.2. GENERALIDADES	6
1.4.3. CLASIFICACIÓN DE VERTEDEROS SEGÚN SU FORMA GEOMÉTRICA	7
1.5. Ecuación de funcionamiento típica según: Azevedo y Acosta (1976).	13
1.6. PERFIL CREAGER.....	16
1.7. REQUISITOS GENERALES DE INSTALACIÓN DE VERTEDEROS	17
1.7.1. CONSTRUCCIÓN	18
1.7.2. INSTRUCCIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN, INSTALACIÓN Y OPERACIÓN DEL S-M CANAL	19
1.8. COMPUERTA VERTICAL DESLIZANTE	23
1.8.1. INTRODUCCIÓN	23
1.9. Caudalímetros de presión diferencial	29
1.9.1. PRINCIPIO DE MEDICIÓN POR PASO REDUCIDO	29
1.9.2. Pérdidas de carga.....	31
1.9.3. VENTAJAS.....	32
1.9.4. DESVENTAJAS.....	33
1.10. TUBOS O TOBERAS VENTURI.....	33
1.10.1. Ventajas.....	33
1.10.2. Desventajas	34
1.11. Principio de medición en Tubos Pitot	34
1.12. Caudalímetros de sección variable	36
1.12.1. Modelos de flotador	38
1.12.2. Ventajas	39
1.12.3. Desventajas	39
1.13. Caudalímetros volumétricos	40
1.13.1. Principio de medición	40

1.13.2.	Modelos.....	42
1.14.	Medidores de molinete.....	42
1.15.	Medidores de ruedas de engranaje ovaladas	42
1.16.	Medidores de émbolo giratorio	43
1.16.1.	Ventajas.....	44
1.16.2.	Desventajas	45
1.17.	Medidores de turbina	45
1.17.1.	Principio de medición.....	45
1.17.2.	Modelos.....	49
1.17.3.	Ventajas.....	51
1.17.4.	Desventajas	51
1.18.	Caudalímetros Vortex	52
1.18.1.	Principio de medición.....	52
1.18.2.	Formación de vórtices y geometría del cuerpo sólido	53
1.18.3.	Modelos de sensores.....	55
1.18.4.	Sensores para la medición.....	56
1.18.5.	Sensores DSC (differential switched capacitor).....	56
1.18.6.	Ventajas:.....	57
1.18.7.	Desventajas	58
1.19.	Caudalímetros electromagnéticos	58
1.19.1.	Principio de medición.....	58
1.19.2.	Tubo de medición (a).....	60
1.19.3.	Revestimiento (b)	60
1.19.4.	Sistema de bobinas (c).....	60
1.19.5.	Electrodos (d1 - d3)	60
1.19.6.	Ventajas y desventajas	62
1.19.7.	Ventajas:.....	62
1.19.8.	Desventajas	63
1.20.	Caudalímetros ultrasónicos.....	63
1.20.1.	El método del efecto Doppler	63
1.20.2.	Método del tiempo de tránsito de la señal	65
1.20.3.	Tipos de sensores / Diseños	66

1.20.4.	Sensores de fijación externa, tipo "clamp-on"	66
1.20.5.	Sensores de inserción	66
1.20.6.	Tubo de medición/sensor en línea	67
1.20.7.	Ventajas	68
1.20.8.	Desventajas	68
1.20.9.	Limitaciones:.....	68
1.21.	Caudalímetros máscicos Coriolis	68
1.21.1.	Principio de medición	69
1.21.2.	Ventajas	73
1.21.3.	Desventajas:	73
1.22.	Caudalímetros máscicos térmicos	73
1.22.1.	El principio de "dispersión térmica"	73
1.22.2.	El principio del "tipo de perfil térmico" o del "aumento de temperatura"	73
1.22.3.	El principio de "dispersión térmica"	74
1.22.4.	Principio de medición del "perfil térmico / aumento de temperatura"	75
1.22.5.	Ventajas e inconvenientes de los diferentes modelos	76
1.22.6.	Anemómetro térmico	76
1.22.7.	Tipos por derivación	77
1.22.8.	Caudalímetros de inserción	78
1.22.9.	Caudalímetros máscicos de tipo térmico en línea	79
1.22.10.	Ventajas:.....	80
1.22.11.	Desventajas	80
1.23.	Canales abiertos / Tuberías sólo parcialmente llenas	81
1.23.1.	Principio de medición / ecuaciones de descarga de caudal	81
1.23.2.	Medición de niveles (nivel del agua, profundidad del agua).....	82
1.23.3.	Canales abiertos	83
1.23.4.	Ventajas	85
1.23.5.	Desventajas	86
1.24.	Vertedores	86
1.24.1.	Ventajas:.....	87
1.24.2.	Desventajas	88
1.24.3.	Método de los caudales diferenciales	88

1.24.4.	Tuberías parcialmente llenas (caudal a superficie libre)	90
1.24.5.	Ventajas:.....	91
1.24.6.	Desventajas	92
2.	Pruebas de laboratorio de equipos de medición de gasto en tuberías	94
3.	Prueba de equipos para canales a cielo abierto	101
3.1.	Desarrollos propios del IMTA (TRIO).....	101
4.	PROGRAMACIÓN SOLO.....	105
5.	ENSAMBLE DE EQUIPOS DE MEDICIÓN	110
5.1.	ARMADO DE EQUIPO DE MEDICIÓN TRIO	110
5.2.	ARMADO DE EQUIPO DE MEDICIÓN SOLO (ULTRASÓNICO E INFRARROJO)	118
5.3.	Diseño de estructura de medición	128
5.4.	Construcción e instalación de modelo de Aforador de Garganta Larga AGL	131
5.4.1.	Proceso de fabricación.....	131
5.5.	Instalación y pruebas de equipo de medición de gasto	134
5.6.	Pruebas realizadas	139
5.6.1.	Medidor de Flujo de Tiempo de Transito Multi-trayectoria	140
5.6.2.	Medidor de efecto Doppler Unidata.....	141
5.6.3.	Medidor de Gasto Solo e infrarrojo	142
5.6.4.	Medidor Unidata.....	143
5.6.5.	Series temporales de caudal	155
5.7.	Comparativo de medición de equipos con estructura	157
5.8.	Estructura tipo Orificio	160
5.9.	Descarga libre.....	161
5.10.	Descarga ahogada	163
5.11.	Estudio de Laboratorio.....	165
6.	Guía rápida	167
6.1.	Conclusiones	168
7.	Tecnología de video detección de trazadores y cuerpos flotantes para la determinación de caudales y volúmenes en canales pequeños	169
7.1.	Requerimientos del proyecto.....	169
7.2.	Desarrollo del proyecto.....	170
7.3.	Propuestas	172

7.4.	Antecedentes	187
7.5.	Software empleado como herramienta de evaluación	188
7.6.	Conclusiones preliminares:	191
7.7.	Trazador seleccionado	192
7.7.1.	Pruebas con el trazador seleccionado	193
7.8.	Las consideraciones para este experimento fueron:	194
7.9.	Comentarios finales	202
7.10.	Conclusiones	203
7.11.	Referencias.....	203
8.	ANEXOS.....	208
8.1.	Anexo 1 Diagramas eléctricos TRIO	208
8.2.	Anexo 2 Diagramas eléctricos SOLO	212



Índice de Figuras

<i>Figura 1.1 Sección transversal de tubería</i>	4
<i>Figura 1.2 Representación gráfica de la ecuación de Bernoulli</i>	5
<i>Figura 1.3 Vertedor de cresta delgada</i>	6
<i>Figura 1.4 Vertedores de cresta delgada sin contracciones</i>	7
<i>Figura 1.5 vertedor rectangular con y sin contracciones.</i>	9
<i>Figura 1.6 Vertedor</i>	10
<i>Figura 1.7 Vertedor trapezoidal</i>	10
<i>Figura 1.8 Vertedor circular</i>	11
<i>Figura 1.9 Vertedor rectangular de pared delgada con contracciones</i>	13
<i>Figura 1.10 Formula de la vena líquida a) Deprimida b) adherida c) ahogada</i>	14
<i>Figura 1.11 Vertedor rectangular. a) Cresta delgada b) Cresta gruesa.</i>	15
<i>Figura 1.12 Vertedor con perfil Creager.</i>	16
<i>Figura 1.13 Vista superior de S-M canal</i>	18
<i>Figura 1.14 Vista lateral de S-M canal</i>	18
<i>Figura 1.15 SM canal instalado en una acequia</i>	22
<i>Figura 1.16 canal instalado en una acequia</i>	22
<i>Figura 1.17</i>	23
<i>Figura 1.18 Esquema de una compuerta bajo descarga libre (a) y sumergido (b).</i>	24
<i>Figura 1.19 Principio de medición de los caudalímetros tipo paso reducido</i>	30
<i>Figura 1.20 Pérdida de presión residual con elementos primarios con orificio.</i>	31
<i>Figura 1.21 Rango de aplicación de la medición mediante elemento primario por paso reducido (placa orificio de 6:1 pasa a 36:1)</i>	32
<i>Figura 1.22 Modelo de tobera Venturi y modelo tubo Venturi</i>	33
<i>Figura 1.23 Modelos de tobera</i>	34
<i>Figura 1.24 Principio de medición de los tubos Pitot (modelo puerto múltiple)</i>	35
<i>Figura 1.25 Tubo de Pitot se observa claramente las tomas de presión (arriba), el colector (centro) y el transmisor de presión (abajo).</i>	36
<i>Figura 1.26 Principio de medición de los caudalímetros de sección variable</i>	37
<i>Figura 1.27 Modelos de flotador</i>	39
<i>Figura 1.28 Principio de funcionamiento de los caudalímetros volumétricos (engranes ovalados)</i>	40
<i>Figura 1.29 Caudalímetro de molinete</i>	42
<i>Figura 1.30 Medidor de engranes, entre los dientes de las ruedas dentadas pasan porciones de volumen del fluido exactas</i>	43
<i>Figura 1.31 Sección transversal de un medidor de embolo giratorio</i>	43
<i>Figura 1.32 Medidor volumétrico con dos tornillos helicoidales.</i>	44
<i>Figura 1.33 Medidor de Turbina</i>	46
<i>Figura 1.34 Curva característica de un medidor de Turbina</i>	47
<i>Figura 1.35 Curvas características de medidores de tipo turbina (línea continua) para distintas viscosidades y aspas de turbina de formas diferentes</i>	48
<i>Figura 1.36 Ejemplo de medidores mecánicos Woltmann típicos</i>	49

Figura 1.37 Modelo de medidor de caudal de tipo turbina para medición de caudales muy bajos	50
Figura 1.38 Izquierda, desprendimiento de vórtices detrás de un pilar de puente, derecha, foto satelital donde se aprecian los vórtices formados por las nubes por el efecto del pico de una montaña	52
Figura 1.39 Principio de Medición de los caudalímetros vortex.....	53
Figura 1.40 Formación y desprendimiento de vórtices	54
Figura 1.41 Número de Strouhal para diversos obstáculos en función del número de Reynolds	55
Figura 1.42 Caudalímetros Vortex	56
Figura 1.43 Diseño de un sensor DSC a= Pala del sensor, b= Punto focal del sistema sensor c= Electrodo central, d= Electrodo externo.....	57
Figura 1.44 Principio de inducción electromagnética	59
Figura 1.45 Principio de medición electromagnética de caudal	60
Figura 1.46 Diseño de un medidor electromagnético	61
Figura 1.47 Caudalímetros electromagnéticos fabricados en diferentes diámetros	62
Figura 1.48 Medición de caudal por efecto Doppler con ultrasonido	64
Figura 1.49 Medición de caudal por ultrasonido a través de tiempo de transito	65
Figura 1.50 Sensores de Fijación externa, se fijan directamente en el exterior de la tubería.....	66
Figura 1.51 Los sensores de inserción están inmersos en el fluido	67
Figura 1.52 Tubo de medición prefabricado	67
Figura 1.53 Causa y efecto de la fuerza de Coriolis en una plataforma circular giratoria	70
Figura 1.54 80 Principio de medición de Coriolis	71
Figura 1.55 Fuerza de Coriolis y geometría de la oscilación en los tubos de medición	72
Figura 1.56 Sonda de un caudalímetro másico de dispersión térmica	75
Figura 1.57 Caudalímetro basado en el principio del perfil térmico	76
Figura 1.58 Diferentes modelos de anemómetros térmicos	77
Figura 1.59 Caudalímetro másico de tipo térmico por derivación	77
Figura 1.60 Diseño de un caudalímetro en cadena.....	79
Figura 1.61 Caudalímetro térmico para medición de caudal másico	80
Figura 1.62 Medición de nivel, aguas arriba de una estructura de medición	83
Figura 1.63 Ejemplos de estructuras estándar para canales abiertos	84
Figura 1.64 Canales Venturi de varias dimensiones	85
Figura 1.65 Ejemplos de vertedores con diferentes perfiles de abertura.....	87
Figura 1.66 Principio de medición del método caudal diferencial	89
Figura 1.67 Instalación permanente en el puente de un río para medir la velocidad del caudal	89
Figura 1.68 Caudalímetro de corriente para determinar la velocidad del caudal a diferentes profundidades	90
Figura 1.69 Curvas de descarga y velocidad para tuberías de geometría circular parcialmente llenas	91
Figura 1.70 Medición de Caudal en tuberías parcialmente llenas con sensores para medir nivel	92
Figura 1.71 Monitoreo en tiempo real.....	93

Índice de Imágenes

<i>Imagen 2.1 Circuito de prueba usado, bomba y variador de velocidad.....</i>	<i>94</i>
<i>Imagen 2.2 Medidores de gasto electromagnético revisados.</i>	<i>95</i>
<i>Imagen 2.3 Medidores de tiempo de travesía analizados.</i>	<i>95</i>
<i>Imagen 3.1 Software MikroC.....</i>	<i>101</i>
<i>Imagen 3.2 ARM de 32 Bits STM32 M4</i>	<i>101</i>
<i>Imagen 3.3 Descripción ARM.....</i>	<i>102</i>
<i>Imagen 3.4 MikroProg</i>	<i>102</i>
<i>Imagen 3.5 Logo Inicial.....</i>	<i>103</i>
<i>Imagen 3.6 Mikro SD</i>	<i>103</i>
<i>Imagen 3.7 Tarjeta detectada</i>	<i>103</i>
<i>Imagen 3.8.....</i>	<i>103</i>
<i>Imagen 3.9 Botones Iniciales</i>	<i>104</i>
<i>Imagen 3.10 Calibrar equipo</i>	<i>104</i>
<i>Imagen 3.11 Ingresar Datos</i>	<i>104</i>
<i>Imagen 3.12 Teclado para ingresar datos</i>	<i>104</i>
<i>Imagen 3.13 Inicio de Medición</i>	<i>105</i>
<i>Imagen 4.1 El microcontrolador ARM STM M4</i>	<i>105</i>
<i>Imagen 4.2 Características ARM.....</i>	<i>106</i>
<i>Imagen 4.3 MikroProg</i>	<i>106</i>
<i>Imagen 4.4 Presentación de pantalla</i>	<i>107</i>
<i>Imagen 4.5 Memoria de almacenado en medidor solo</i>	<i>107</i>
<i>Imagen 4.6 Pantallas de tarjeta detectada</i>	<i>107</i>
<i>Imagen 4.7 Botones de inicio.....</i>	<i>108</i>
<i>Imagen 4.8 Eq. de gasto</i>	<i>108</i>
<i>Imagen 4.9 Teclado para ingresar datos</i>	<i>109</i>
<i>Imagen 4.10 Inicio en la medición</i>	<i>109</i>
<i>Imagen 5.1 ARM trio.....</i>	<i>110</i>
<i>Imagen 5.2 Gabinetes.....</i>	<i>110</i>
<i>Imagen 5.3 Cortes de Sintra.....</i>	<i>111</i>
<i>Imagen 5.4.....</i>	<i>111</i>
<i>Imagen 5.5 Acoplamiento.....</i>	<i>111</i>
<i>Imagen 5.6 Sensor ultrasonico.....</i>	<i>112</i>
<i>Imagen 5.7 Cable de 5m y conector molex</i>	<i>113</i>
<i>Imagen 5.8 Cubierta Nylacero y sensores</i>	<i>114</i>
<i>Imagen 5.9 Sensor ultrasonico armado</i>	<i>114</i>
<i>Imagen 5.10 Dispositivo para telemetria.....</i>	<i>115</i>
<i>Imagen 5.11 Estuche hermetico</i>	<i>116</i>
<i>Imagen 5.12 Instalacion de sensores y dispositivos.....</i>	<i>118</i>
<i>Imagen 5.13 ARM medidor solo</i>	<i>119</i>
<i>Imagen 5.14 Estuche vacio</i>	<i>119</i>

<i>Imagen 5.15 Sintra</i>	119
<i>Imagen 5.16 Cortes de Sintra</i>	120
<i>Imagen 5.17 Colocación de pantalla principal</i>	120
<i>Imagen 5.18 Armado sensor ultrasonico y cableado</i>	121
<i>Imagen 5.19 Cable de conexión de 5m</i>	122
<i>Imagen 5.20 Armado de sensor ultrasónico en Nylacero</i>	123
<i>Imagen 5.21 Armado final de sensor ultrasonico</i>	123
<i>Imagen 5.22 Dispositivo de comunicación</i>	124
<i>Imagen 5.23 Acoplamiento de estuche hermetico</i>	125
<i>Imagen 5.24 Base para sensor ultrasonico completo</i>	126
<i>Imagen 5.25 Ensamble de equipo</i>	128
<i>Imagen 5.26 Software WinFlume</i>	128
<i>Imagen 5.27 Secciones del canal</i>	129
<i>Imagen 5.28 Vista aguas arriba y aguas abajo</i>	129
<i>Imagen 5.29 Datos de diseño</i>	130
<i>Imagen 5.30 Ecuación de gasto</i>	130
<i>Imagen 5.31 Diseño de las piezas</i>	131
<i>Imagen 5.32 Cortes de acrílico</i>	132
<i>Imagen 5.33 Armado de piezas de acrílico</i>	132
<i>Imagen 5.34 Instalación del AGL</i>	133
<i>Imagen 5.35 Instalación completo AGL</i>	134
<i>Imagen 5.36 Base para sensor</i>	135
<i>Imagen 5.37 Instalación del sensor</i>	136
<i>Imagen 5.38 Instalación del equipo de medición</i>	136
<i>Imagen 5.39 Nivelación del sensor ultrasónico</i>	137
<i>Imagen 5.40 Conexión del equipo de medición</i>	137
<i>Imagen 5.41 Instalación Final</i>	138
<i>Imagen 5.42 Prueba en canal del gasto medido</i>	139
<i>Imagen 5.43 Medidor de nivel</i>	140
<i>Imagen 5.44 Rittmeyer (medidor de nivel)</i>	140
<i>Imagen 5.45 Sensor de Medidor de nivel</i>	141
<i>Imagen 5.46 Aforador y vertedor</i>	142
<i>Imagen 5.47 Medidor Rittmeyer</i>	143
<i>Imagen 5.48 Medidor Ultrasónico e infrarrojo</i>	143
<i>Imagen 5.49 Pruebas de imágenes comparativas</i>	145
<i>Imagen 5.50 Equipos funcionando</i>	147
<i>Imagen 5.51 Pruebas en laboratorio de diferentes medidores</i>	155

Índice de Ilustración

<i>Ilustración 5.1 Canal de pendiente variable del laboratorio de hidráulica del IMTA</i>	157
<i>Ilustración 5.2 Equipos de medición de gasto Rittmeyer</i>	157
<i>Ilustración 5.3 sensores ultrasónicos del UTG- 21DS, SOLO-IMTA y cinta de referencia.</i>	158
<i>Ilustración 5.4 Unidad electrónica de los equipos UTG-21DS y SOLO-IMTA</i>	158
<i>Ilustración 5.5 En cada sección (1, 2 y 3) hay tirante (y), velocidad (v), energía (E) y cantidad de movimiento (M), el caudal es el mismo en cada sección.</i>	160
<i>Ilustración 5.6</i>	164
<i>Ilustración 5.7 Gasto experimental a descarga libre y ahogada</i>	165
<i>Ilustración 7.1 Fuente de alimentación</i>	208
<i>Ilustración 7.2 Boton Resét</i>	209
<i>Ilustración 7.3 Voltaje de Referencia para ADC</i>	209
<i>Ilustración 7.4 Modulo para tarjeta de memoria SD</i>	210
<i>Ilustración 7.5 Conexiones LCD Táctil</i>	210
<i>Ilustración 7.6 Puertos de Múltiple propósito</i>	211
<i>Ilustración 7.7 Fuente de alimentación</i>	212
<i>Ilustración 7.8 Botón Reset</i>	212
<i>Ilustración 7.9 Tarjeta de Almacenamiento SD</i>	213
<i>Ilustración 7.10 Pantalla Táctil</i>	214
<i>Ilustración 7.11 Puerto's de Multiple propósito</i>	214

Índice de Tablas

<i>Tabla 1.1 Tipos y principios de medición</i>	3
<i>Tabla 1.2 Aplicación en canales y tuberías Como se observa para diferentes aplicaciones.</i>	4
<i>Tabla 1.3</i>	12
<i>Tabla 1.4 : Coeficiente de descarga para vertedores delgados con funcionamiento ahogado. Azevedo y Acosta (1976).</i>	14
<i>Tabla 1.5 Coeficiente ϵ_2 para vertedores de pared gruesa con descarga ahogada. Sotelo (1982).</i>	16
<i>Tabla 1.6 Norma BS EN 7405</i>	28
<i>Tabla 1.7</i>	31
<i>Tabla 1.8</i>	82
<i>Tabla 2.1 Error de medición promedio y desviación estándar de los equipos revisados</i>	97
<i>Tabla 2.2 Error de medición promedio y desviación estándar de los equipos revisados.</i>	98
<i>Tabla 2.3 Error promedio y estándar</i>	100
<i>Tabla 5.1 Datos comparativos de diferentes medidores</i>	144
<i>Tabla 5.2 Rittmeyer y medidor solo</i>	147
<i>Tabla 5.3 Rittmeyer, solo y sensor infrarrojo</i>	149
<i>Tabla 5.4 Valores de k y coeficientes de descarga</i>	162

Índice de Graficas

<i>Grafica 2.1 Comparación de equipo de medición de gasto para tuberías</i>	97
<i>Grafica 2.2 Detalles de la comparación de los equipos de medición para tuberías</i>	98
<i>Grafica 2.3 Detallas de la comparación de los equipos de medición para tuberías.</i>	98
<i>Grafica 2.4 Comparación de equipo de medición de gasto para tuberías.</i>	99
<i>Grafica 2.5 Datos recabados durante el ajuste de los parámetros “Sensor Factor” del equipo Kai 6 y Kai 7.</i>	99
<i>Grafica 2.6 Evaluación del funcionamiento de los medidores de gasto después de calibrar los equipo Kai 6 y Kai</i>	100
<i>Grafica 5.1 Grafica comparativa de medidores</i>	144
<i>Grafica 5.2 Dispersion de Medidores (comparativo)</i>	146
<i>Grafica 5.3 Direrencias de rittmeyer, medidor solo, unidata</i>	146
<i>Grafica 5.4 Comparativo Rittmeyer y medidor solo</i>	148
<i>Grafica 5.5 Comparativo medidor solo</i>	148
<i>Grafica 5.6 Diferencias entre rittmeyer y medidor solo</i>	149
<i>Grafica 5.7 Comparativo entre Rittmeyer, Solo e Infrarrojo</i>	150
<i>Grafica 5.8 Distancia reflectada de un objeto</i>	151
<i>Grafica 5.9 ADC STM32F</i>	151
<i>Grafica 5.10 Medidores rittmeyer, solo e infrarrojo</i>	152
<i>Grafica 5.11 Diferencias de caudal respecto a rittmeyer</i>	152
<i>Grafica 5.12 Diferencia de Rittmeyer - solo y Rittmeyer - infrarrojo</i>	153
<i>Grafica 5.13 Medidor infrarrojo tipo solo</i>	156
<i>Grafica 5.14 Medidor ultrasonico solo</i>	156
<i>Grafica 5.15 Datos de corrimiento correguido</i>	159
<i>Grafica 5.16 Resultados validos para canal abierto con aforo a descarga libre</i>	160
<i>Grafica 5.17 Grafica de valores de k y coeficientes de descarga</i>	162
<i>Grafica 5.18 Curva de cada coeficiente</i>	163

Antecedentes

Se han hecho esfuerzos por desarrollar un sistema para el seguimiento de la entrega volumétrica a nivel parcelario e interparcelario, sin embargo a la fecha no se tiene uno totalmente validado. Cabe señalar que el presente estudio se orienta a una validación en laboratorio por lo que efectos del viento, sólidos en suspensión y vandalismo no son tomados en cuenta. Existe una amplia gama de alternativas tecnológicas para medir el volumen en toma parcelaria, interparcelario y equipos de bombeo. Cada una de ellas presenta ventajas y desventajas. No es posible usar las alternativas disponibles de manera indiscriminada, ya que cada una de ellas requiere de condiciones hidráulicas específicas de operación.

Un sistema para el seguimiento de la medición está formado de tres componentes principales: medidor de la variable de interés; transmisor de la información; interfaz del operador. La primera componente se encarga de recabar la magnitud de la variable a medir usando algún principio físico o químico para ello. El transmisor toma el dato recabado y lo envía a un centro de colecta de datos. La interfaz del operador es la responsable de guardar los datos y acomodarlos para presentarlo a los usuarios del sistema de manera expedita.

Comercialmente existen varias empresas que venden sistemas para el seguimiento y facturación volumétrica en nivel urbano e industrial, para redes de tuberías. Badger Meter, Master Meter, Arad entre otros fabricantes de equipos de medición de gasto ofrecen sistemas de este tipo. Varios de estos sistemas se han aplicado con éxito en México. Actualmente se tiene parcialmente instalado un sistema para el seguimiento de la demanda en Ciudad Universitaria, UNAM, propuesto por la empresa Badger Meter.

Se requiere de una descripción de las componentes que integran un sistema de medición volumétrica a nivel parcelar, interparcelario y sistema de bombeo, con sus especificaciones y requerimientos de funcionamiento. De un estado del arte en cada una de las componentes del sistema, indicando los principios de mediciones usados y las condiciones físicas e hidráulicas necesarias para su aplicación y de temas a desarrollar para consolidar las componentes del sistema de medición y su implementación en campo.

Como parte del trabajo se prueban, del lado comercial, por lo menos tres alternativas de medición parcelaria, interparcelaria y/o tuberías que por sus características sean una de las alternativas más prometedoras en la medición, y por el lado de desarrollos propios del IMTA, el caudalímetro con estructura de apoyo 1) aforador de garganta larga a descarga libre, 2) en su aplicación con vertedor triangular y trapezoidal a descarga libre y una estructura tipo orificio, una compuerta calibrada con ecuación de descarga con corrección de cantidad de movimiento a descarga libre y ahogada. Estas últimas soluciones de medición de caudal en canal a cielo abierto. Guía para la selección rápida de equipos de medición parcelaria, interparcelarias y equipos de bombeo que considera tanto las características físicas del sitio como las hidráulicas de su operación. Esto como resultado de las pruebas de laboratorio, por ende no incluyen oleaje, azolve o intemperismo

Como parte de la metodología se deben determinar las componentes que conforman un sistema para el seguimiento de la medición volumétrica del agua y las especificaciones de cada componente.

Hacer una revisión de los sistemas, equipos desarrollados y necesidades del sector para la medición volumétrica del agua con el fin de determinar las componentes y establecer las especificaciones requeridas en cada componente. Revisar y documentar las características, ventajas y desventajas de sistemas desarrollados para aplicaciones particulares, así como productos comerciales disponibles en el mercado para la medición volumétrica.

Revisar las alternativas tecnológicas usadas en las componentes que integran los sistemas de medición volumétrica. Para cada una de las componentes que integran el sistema de medición volumétrica se revisan las alternativas disponibles. Para cada una de ellas se presentan sus ventajas, desventajas, rango de aplicación y limitaciones, así como la forma en la cual cumple las necesidades de medición volumétrica solicitada por usuarios del sector agrícola.

Evaluar tres alternativas tecnológicas usadas en la medición del volumen a nivel parcelario, interparcelario y tuberías. Se seleccionan tres alternativas tecnológicas de reciente introducción en el mercado que puedan ser usadas en la medición volumétrica, parcelaria, interparcelarias y bombeo. Como se mencionó tres comerciales y tres de tecnología propia. Los equipos se instalan en el laboratorio de Hidráulica del IMTA donde se evalúa su funcionamiento ante distintas condiciones de hidráulicas de operación. De acuerdo al tipo de aplicación, tubería o canal los equipos se prueban en el canal de pendiente variable o en un banco de prueba. La prueba considera tanto la precisión y exactitud del equipo en condiciones controladas como las necesidades de instalación del mismo. Guía rápida para la selección de sistema de medición volumétrica en sistema de bombeo y parcelario. En base a los datos colectados y los resultados de las pruebas realizadas se desarrolla una guía para la selección de un sistema de medición en bombas y tomas parcelarias. Con las condiciones físicas e hidráulicas presentes en cada sitio se implementan un conjunto de reglas que orientan al usuarios sobre el sistema de medición volumétrico más adecuado a usar en las condiciones presentes en su aplicación.

1. Alternativas de medición de gasto en tuberías y canales abiertos

En primer lugar se hace una extensión a la tecnología desarrollada que puede muy simple y fácilmente ser adaptada. Se incluye una parte teórica inicial para ubicar al lector.

Los diferentes tipos y principios de medición que se presentan en la siguiente tabla son abordados con detalle más abajo.

Grupo 1	Medidores de Presión Diferencial (Orificios)
Grupo 2	Otros medidores de presión diferencial (Sección variable, Pitot)
Grupo 3	Medidores de desplazamiento positivo
Grupo 4	Medidores de turbina
Grupo 5	Medidores Vortex
Grupo 6	Medidores Electromagnéticos
Grupo 7	Medidores Ultrasónicos (efecto doppler, tiempo de transito)
Grupo 8	Medidores máxicos Coriolis
Grupo 9	Medidores Térmicos
Grupo 10	Otros tipos de medidores (perfilador de velocidad, velocímetro laser de efecto doppler, de corriente cruzada)
Grupo 11	Medidores para caudales solidos (polvos, granos)
Grupo 12	Medidores para canales abiertos (nivel, profundidad del agua)

Tabla 1.1 Tipos y principios de medición

Para las aplicaciones en canales y tuberías, se presenta el siguiente resumen.

Aplicación tuberías	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 5	Gr 6	Gr 7	Gr 8	Gr 9	Gr 10	Gr 11	Gr 12
Líquidos limpios (agua)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X
Líquidos con caudales bajos (< 2 l/min)	X	X	X	X		X		X	X			
Líquidos con caudales altos (> 20,000 l/min)	X			X		X	X					X
Caudal en tubería de diámetro grande (24")	X					X	X			X		X
Líquidos no conductores (aceites, solventes)	X	X	X	X	X		X	X	X	X		
Líquidos calientes (> 200°C)	X			X	X			X		X		
Líquidos viscosos (> 50 cP, hidrocarburos, pinturas)			X			X		X		X		
Fluidos criogénicos (O ₂ líquido)				X	X		X	X		X		
Fluidos higiénicos (leche, cerveza, zumos)			X	X		X	X	X				
Aplicación en Canales abiertos												
Aplicaciones generales						X	X					X
Caudales con sedimentos (alcantarillas, aguas residuales)						X	X					X
Sistemas de riego						X	X					X

Tabla 1.2 Aplicación en canales y tuberías Como se observa para diferentes aplicaciones.

Tres leyes básicas que rigen la naturaleza del flujo de un fluido.

- La ecuación de continuidad
- La ecuación de Cantidad de movimiento
- La conservación de la energía

Algunas leyes se aplican para estimar el flujo.

1.1. Ecuación de continuidad

Esta ley se refiere a la velocidad del volumen del fluido que pasa por un punto determinado de una tubería.

La ley establece que el volumen de fluido Q_v que pasa por una sección transversal de una tubería A por unidad de tiempo siempre es constante, si la densidad es constante, como lo es en el caso de los líquidos.

$$Q_v = A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 = A_3 \cdot v_3$$

El volumen de fluido se obtiene de multiplicar la velocidad media del fluido por la sección transversal de la tubería por la que el fluido circula.

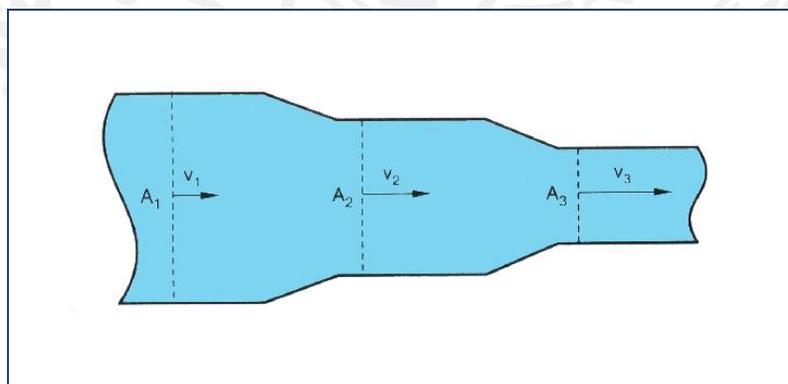


Figura 1.1 Sección transversal de tubería

1.2. Ecuación de Energía

La segunda ecuación básica es la ecuación de Bernoulli, que describe la relación entre los diferentes estados de la energía de un caudal. Los tres tipos de energía son:

La energía potencial:

- La energía dependiente de la posición "Z", es decir, la presión hidrostática entre dos niveles de tuberías diferentes, también conocido como elevación.
- La energía dependiente de una presión externa "P", es decir, la presión en una tubería producida por bombeo.

La energía cinética "K", es la energía por la circulación del fluido, velocidad del caudal.

Bernoulli demostró que la energía total en cualquier punto de una tubería es constante. Si además añadimos el concepto de la ecuación de continuidad, es evidente que la presión estática es mayor en las zonas en que la velocidad del flujo es más alta, que en las zonas donde el fluido circula a menor velocidad, se supone que en la tubería no se producen pérdidas de energía por rozamiento, la ecuación de energía es:

$$K_1 + P_1 + Z_1 = K_2 + P_2 + Z_2 = K_3 + P_3 + Z_3 = \text{constante}$$

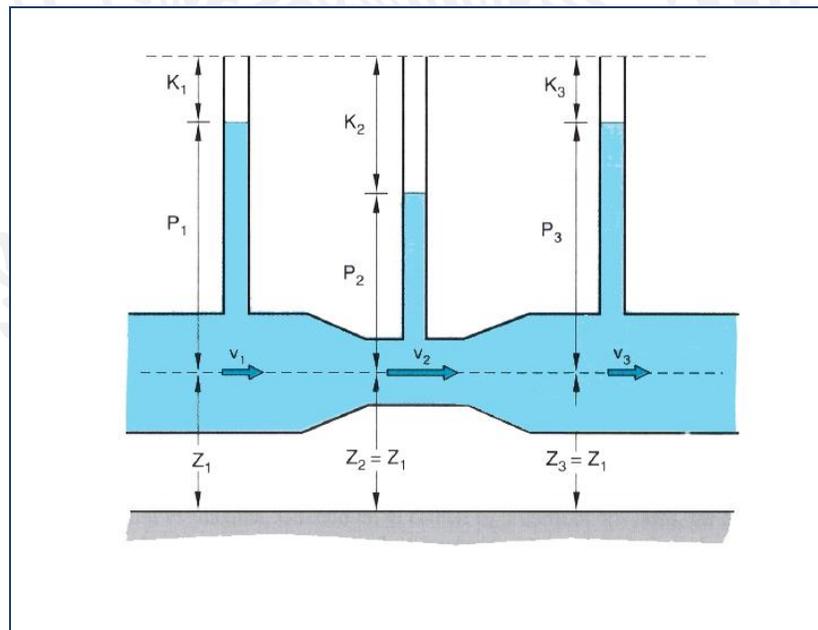


Figura 1.2 Representación gráfica de la ecuación de Bernoulli

1.3. Ecuación de cantidad de movimiento

Esta ecuación es muy importante en el cálculo de flujo con estructuras tipo orificio en canales a cielo abierto.

1.4. ESTRUCTURAS TIPO VERTEDER

1.4.1. OBJETIVO

- Estudiar experimentalmente los vertederos como estructuras hidráulicas concedidas para el control de niveles y medición de caudales.
- Definir la ecuación de comportamiento de un vertedor de cresta delgada.
- Observar y analizar el funcionamiento de diferentes tipos de vertederos.
- Determinar la utilización óptima del tipo vertedor estudiado de acuerdo a sus características.

1.4.2. GENERALIDADES

Un vertedor es un muro o una barra que se interpone ante el flujo, causando una sobre-elevación del nivel de la lámina de agua arriba y disminución de agua abajo (Figura siguiente). Las principales funciones de los vertederos son:

- Control de nivel en embalses, canales, depósitos, estanques, etc.
- Aforo o medición de caudales.
- Elevar el nivel del agua.
- Evacuación de crecientes o derivación de un determinado caudales.

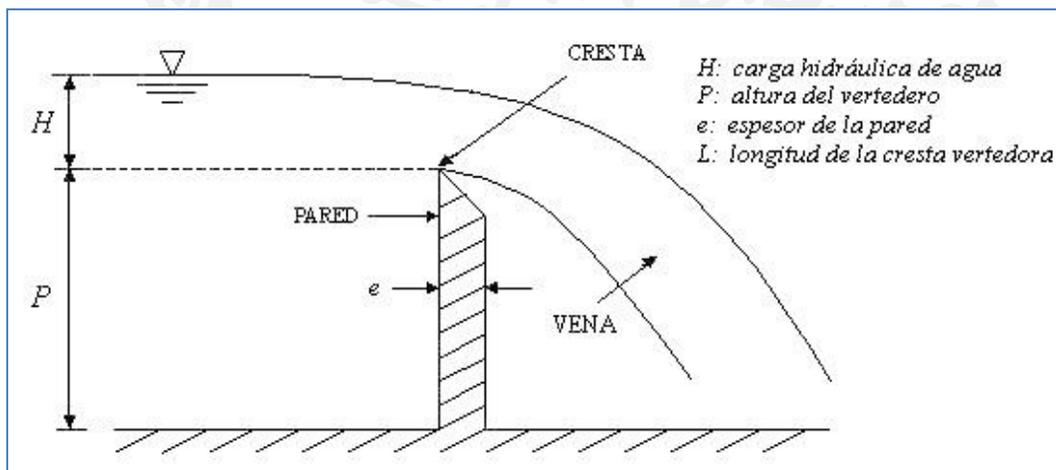


Figura 1.3 Vertedor de cresta delgada

Los vertedores son estructuras utilizadas para la medición de caudales; sin embargo, cuando se instalan en corrientes naturales tienen la desventaja de que se azolvan fácilmente.

Las variables básicas Q y H siguen un modelo matemático dado por la ecuación de funcionamiento (1.1)

$$Q = K \cdot H^m \quad (1.1)$$

Donde:

Q	= Caudal	H	=Carga hidráulica con relación a la cresta del vertedor
K	=Constante de calibración	m	=Exponente

Para determinar el caudal que pasa a través del vertedero se aplica la ecuación de la energía (Figura siguiente), considerando algunas suposiciones básicas, entre ellas:

- Distribución hidrostática de presiones.
- Las pérdidas por fricción y locales entre 1 y 2 son despreciables.
- El flujo aguas debajo de la estructura (vena) debe ser libre (no delgada) para garantizar que la presión en la vena sea la atmosférica (chorro libre).

1.4.3. CLASIFICACIÓN DE VERTEDORES SEGÚN SU FORMA GEOMÉTRICA

1.4.3.1. VERTEDORES RECTANGULARES

a) vertedores de pared delgada sin contracciones

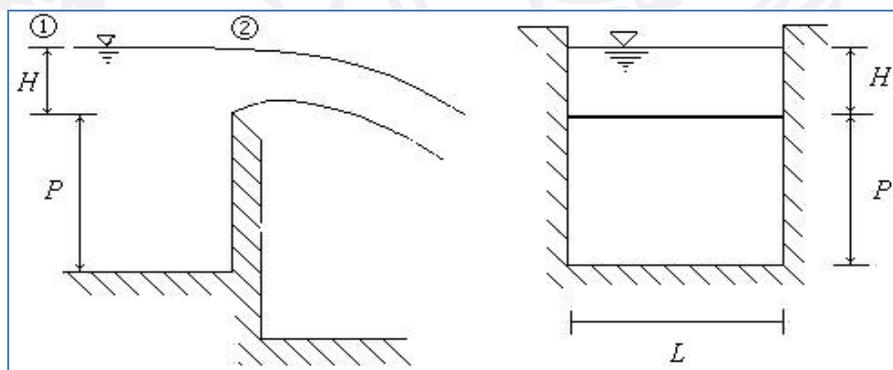


Figura 1.4 Vertedores de cresta delgada sin contracciones

Aplicando la ecuación de la energía entre los puntos 1 y 2, se obtiene una expresión para el caudal:

$$Q_T = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot L} \cdot \left(H + \frac{v^2}{2g} \right)^{3/2} \dots\dots\dots(1.2)$$

Donde:

- | | | | |
|-------|----------------------|---|--|
| Q_T | Caudal Teórico | L | Longitud |
| P | Altura del vertedor | H | Carga hidráulica sobre la cresta |
| V | Velocidad de llegada | g | Aceleración debida a la fuerza de gravedad |

La ecuación (1.2) no considera las pérdidas por fricción en el tramo, ni los efectos de tensión superficial, por lo tanto el caudal real es menor que caudal teórico, por tal razón se introduce un coeficiente que permita introducir estas consideraciones, como se indica en la ecuación (1.3).

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2gCd L} \left[H + \frac{v^2}{2g} \right]^{3/2} \dots\dots\dots(1.3)$$

Cd : Coeficiente de descarga, cuyos valores característicos deben estar entre 0.55 y 0.65.

Despreciando la influencia de la velocidad de llegada al vertedor la ecuación (1.3) se simplifica de la siguiente forma:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2gCd L} H^{3/2} \dots\dots\dots(1.4)$$

SOTELO (1982) presenta ecuaciones que permiten calcular los coeficientes de descarga para vertedores rectangulares con contracciones o sin ellas y también para vertedores triangulares.

Vertederos de pared delgada con contracciones

En la figura siguiente se representa un esquema con las diferentes posibilidades de un vertedor rectangular, con o sin contracciones. Para esta situación, la longitud efectiva del vertedor es L' .

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2gCd L'} H^{3/2} \dots\dots\dots(1.5)$$

El efecto de la contracción se tiene en cuenta restando a la longitud total de la cresta del vertedor L , el número de contracciones multiplicada por $0.1 H$.

$$L' = L - n (0.1 H) \quad (1.6)$$

Donde:

L' : Longitud contraída de la lámina.

L : Longitud real.

n : numero de contracciones laterales, obsérvese la Figura.

Reemplazando la ecuación (1.6) en la ecuación (1.5) se obtiene:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_d (L - 0.1nH) H^{3/2} \quad (1.7)$$

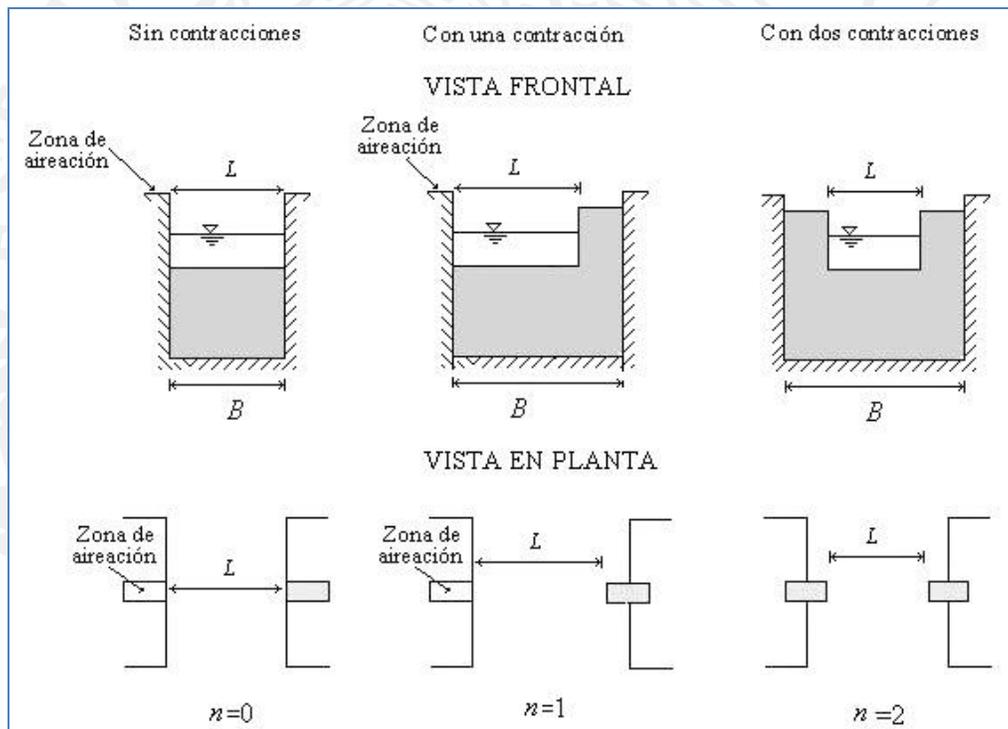
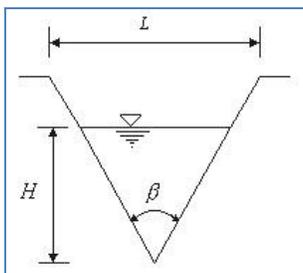


Figura 1.5 vertedor rectangular con y sin contracciones.

Para el caso del vertedor sin contracciones laterales ($n = 0$), se requiere de una zona de aireación en los extremos de la estructura que permita el ingreso del aire y así para garantizar que la presión aguas abajo de la estructura sea la atmosférica, véase la Figura 1.5.

Vertedores triangulares Valores característicos de C



ÁNGULO β	Cd
15°	0.52 - 0.75
30°	0.59 - 0.72
45°	0.59 - 0.69
60°	0.50 - 0.54
90°	0.50 - 0.60

Figura 1.6 Vertedor

Cuando los caudales son pequeños es conveniente aforar usando vertedores en forma de V puesto que a pequeñas variaciones de caudal la variación en la lectura de la carga hidráulica H es más representativa.

$$Q = \frac{8}{15} Cd \sqrt{2g} \left(\frac{\tan \beta}{2} \right) H^{5/2} \quad \text{si } \beta = 90^\circ \rightarrow Q = 1.4 H^{5/2} \quad \text{en sistemas M. K. S} \quad (1.8)$$

Vertedores trapezoidales

Este vertedor ha sido diseñado con el fin de disminuir el efecto de las contracciones que se presentan en un vertedor rectangular contraído.

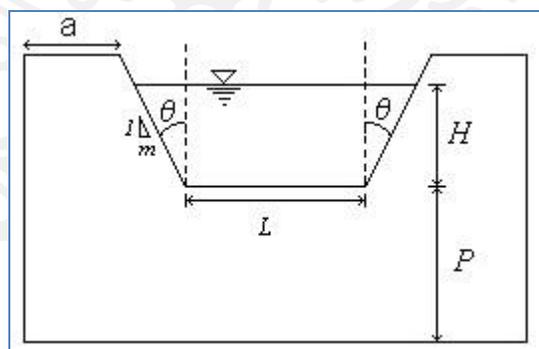


Figura 1.7 Vertedor trapezoidal

$$Q = \frac{2}{3} Cd1 \sqrt{2g} LH^{3/2} + \frac{8}{15} Cd2 \sqrt{2g} H^{5/2} \tan \theta \quad (1.9)$$

Donde:

$Cd1$: Coeficiente de descarga para el vertedor rectangular con contracciones.

$Cd2$: Coeficiente de descarga para el vertedor triangular.

L : Longitud de la cresta.

\emptyset : Ángulo de inclinación de los lados respecto a la vertical.

m : Inclinación lateral.

La ecuación anterior puede transformarse así:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} \left[Cd1 + \frac{4H}{5L} Cd2 \tan \emptyset \right] L H^{3/2} \quad (1.10)$$

Cuando la inclinación de los taludes laterales es de 4V:1H, el vertedero recibe el nombre de Cipolletti. La geometría de este vertedor ha sido obtenida de manera que las ampliaciones laterales compensen el caudal disminuido por las contracciones de un vertedero rectangular con igual longitud de cresta y carga de agua.

Sotelo (1982) afirma que el término entre paréntesis de la ecuación (1.10) es de: 0.63 lo que conduce a la siguiente ecuación de funcionamiento, en sistema M.K.S.:

$$Q = 1.861 H^{3/2} \quad (1.11)$$

La ecuación (1.11) es valida si $0.08m \leq H \leq 0.60m$; $a \geq 2H$; $L \geq 3H$ y $P \geq 3H$

1.4.3.2. VERTEDOR CIRCULAR

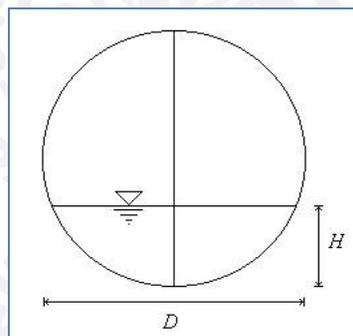


Figura 1.8 Vertedor circular

$$Q = \emptyset \left[0.55 + \frac{D}{110H} + 0.041 \frac{H}{D} \right] D^{5/2} \quad (1.12)$$

Donde:

H: carga hidráulica o altura de carga, expresada en decímetros.

D: Diámetro [decímetros]

Q: Caudal [1t/s]

∅: depende de la relación H/D dada por la tabla 1.3.

Tabla I.1: valores característicos de \emptyset para vertederos circulares utilizados en la ecuación (1.12). Sotelo (1982).

H/D	\emptyset	H/D	\emptyset
0.05	0.0272	0.55	2.8205
0.10	0.1072	0.60	3.2939
0.15	0.2380	0.65	3.7900
0.20	0.4173	0.70	4.3047
0.25	0.6428	0.75	4.8336
0.30	0.9119	0.80	5.3718
0.35	1.2223	0.85	5.9133
0.40	1.5713	0.90	6.4511
0.45	1.9559	0.95	6.9756
0.50	2.3734	1.00	7.4705

Tabla 1.3

La ecuación típica de funcionamiento, planteada por Azevedo y Acosta (1976) es:

$$Q = 1.518 D^{0.693} H^{1.087} \quad (1.13)$$

1.4.3.3. CLASIFICACIÓN DE LOS VERTEDORES SEGÚN EL ANCHO DE LA CRESTA

1.4.3.4. VERTEDOR DE CRESTA DELGADA

Este tipo de vertedores es el más usado, especialmente como aforador, por ser una estructura de fácil construcción e instalación, debidamente calibrados y patronados se obtienen ecuaciones o curvas en las cuales el caudal es función de la carga hidráulica H .

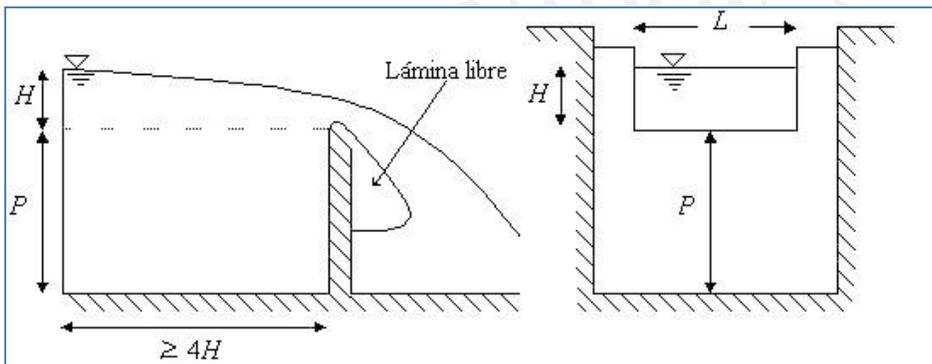


Figura 1.9 Vertedor rectangular de pared delgada con contracciones.

1.5. Ecuación de funcionamiento típica según: Azevedo y Acosta (1976).

Formula de Francis:

$$Q = 1.84 L H^{3/2}, \text{ sistema M. K. S} \quad (1.14)$$

El funcionamiento de los vertedores de pared delgada puede variar según la forma de la vena aguas abajo de la estructura, en situaciones en que no toda la lámina esté en contacto con la presión de la vena alterándose el caudal. Es por ello que cuando el vertedor es usado para medición de caudales de debe evitar la situación anterior.

Esta influencia se puede representar en vertedores sin contracción lateral que no dispongan de una adecuada aireación. En estas circunstancias la lamina líquida puede tomar una de las formas siguientes (Figura 1.10)

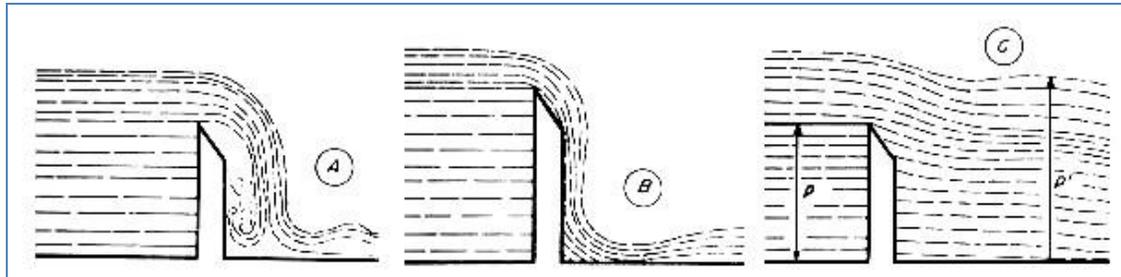


Figura 1.10 Formula de la vena liquida a) Deprimida b) adherida c) ahogada

- Lámina deprimida: el aire es arrastrado por el agua, ocurriendo un vacío parcial aguas abajo de la estructura, que modifica la posición de la vena, el caudal es mayor al previsto teóricamente.
- Lámina adherente, ocurre cuando el aire sale totalmente. En esta situación el caudal también es mayor.
- Lámina ahogada, cuando el nivel aguas abajo es superior al de la cresta $P' > P$. los cuales disminuyen a medida que aumenta la sumersión. En esta situación el caudal se puede calcular, teniendo como base los valores relativos a la descarga de los vertedores libres aplicándoles un coeficiente de reducción (Tabla 1.4), estimado con datos de U.S of Board Waterway presentada por Azevedo y Acosta, (1976).

h/HQ	Coeficiente	h/H	Coeficiente
0.0	1.000	0.5	0.937
0.1	0.991	0.6	0.907
0.2	0.983	0.7	0.856
0.3	0.972	0.8	0.778
0.4	0.956	0.9	0.621

Tabla 1.4 : Coeficiente de descarga para vertedores delgados con funcionamiento ahogado. Azevedo y Acosta (1976).

Siendo h la altura de agua por encima de la cresta, medida aguas abajo; $h = P' - P$, y H la carga hidráulica.

Otra forma de hacerlo es utilizando la siguiente expresión:

$$\frac{Q_{ahogado}}{Q_{vertedor}} = \left[1 - \left(\frac{h}{H} \right)^{1.84} \right] 0.385 \quad (1.15)$$

Los vertedores de cresta ancha tienen menor capacidad de descarga para igual carga de agua que los vertedores de cresta delgada y su uso más frecuente es como estructuras de control de nivel.

La mínima distancia a la cual se debe instalar los medidores de carga hidráulica (H) para que no esté afectada por la declinación de la lámina de agua $3.5 H$, como se observa en la figura siguiente.

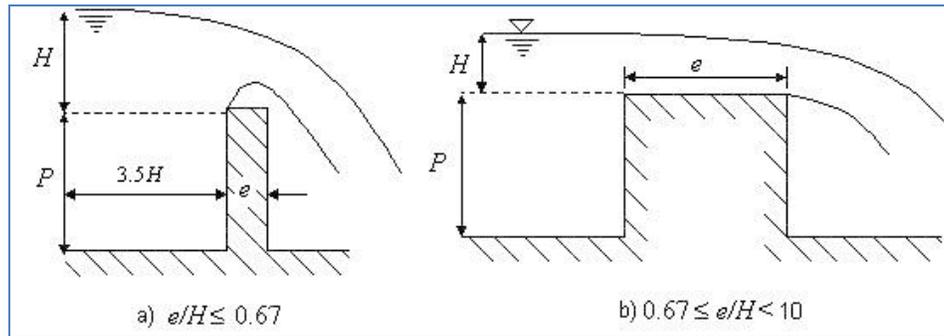


Figura 1.11 Vertedor rectangular. a) Cresta delgada b) Cresta gruesa.

Sotelo (1982), presenta una clasificación del funcionamiento de los vertedores, según la relación e/H , como se representa a continuación.

Cuando e/H es menor que 0.67 el chorro se separa de la cresta y el funcionamiento es idéntico al del vertedor de pared delgada.

Cuando e/H es mayor a 0.69 el funcionamiento es diferente, pues la lámina vertiente se adhiere a la cresta del vertedor.

Si la relación e/H es mayor que 10 se considera que el funcionamiento es un canal.

Ecuación de comportamiento típica.

Azevedo Y Acosta (1976) proponen:

$$Q = 1.7 LH^{3/2}, \text{ en sistema M.K.S.} \quad (1.16)$$

Cuando el vertedor es rectangular y la relación $e/H > 0.67$, Sotelo (1982) propone el tratamiento como un vertedor Bazin de cresta delgada, ecuación (1.17), afectado por un coeficiente de reducción ε_1 , ecuación (1.18). Si el funcionamiento hidráulico del vertedor es ahogado se utiliza un coeficiente de reducción ε_2 que depende de la relación $H-h/H$, siendo $h = P' - P$, como se representa en la tabla 1.3.

$$Q = 0.623 \varepsilon_1 \varepsilon_2 LH^{3/2}, \text{ en sistema M.K.S.} \quad (1.17)$$

$$\varepsilon_1 = 0.7 + \frac{0.185}{e/H} \quad \text{SI } 0.67 < e/H < 3$$

$$\epsilon_2 = 0.7 + \frac{0.1}{\epsilon_1 H} \quad \text{SI } 3 < \epsilon_1 H < 10 \quad (1.18)$$

Donde:

ϵ_1 : coeficiente de corrección para vertedores de cresta ancha.

ϵ_2 : coeficiente de corrección para vertedores ahogados.

La ecuación (1.17) es válida para velocidades de aproximación cercanas a cero y sin contracciones laterales. Para considerar el efecto de las contracciones laterales se debe utilizar la longitud L' obtenida en la ecuación (1.6), en lugar de L .

H- h/H	ϵ_2	H- h/H	ϵ_2
1.4	1.00	0.30	0.855
1.3	1.00	0.25	0.833
1.2	0.993	0.20	0.807
1.0	0.987	0.15	0.770
0.9	0.980	0.10	0.720
0.8	0.960	0.08	0.680
0.7	0.950	0.06	0.640
0.6	0.930	0.04	0.550
0.5	0.910	0.02	0.400
0.4	0.885	0.01	0.260

Tabla 1.5 Coeficiente ϵ_2 para vertedores de pared gruesa con descarga ahogada. Sotelo (1982).

1.6. PERFIL CREAGER

Se usa para evacuar caudales de creciente, pues la forma especial de su cresta permite la máxima descarga al compararlo con otra forma de vertedor para igual altura de carga de agua.

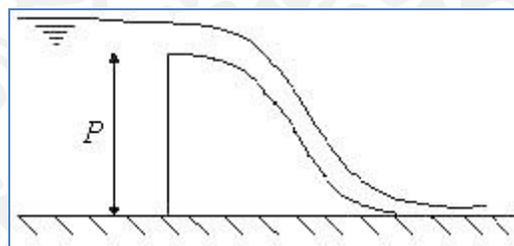


Figura 1.12 Vertedor con perfil Creager.

Ecuación de funcionamiento típica: Azevedo y Acosta (1976).

$$Q = 2.2LH^{3/2}, \text{ en sistema M.K.S.} \quad (1.19)$$

1.7. REQUISITOS GENERALES DE INSTALACIÓN DE VERTEDORES

- El vertedor deberá ubicarse en canales de sección uniforme y alineamiento recto aguas arriba, en una longitud mayor a $20 H$.
- El vertedor debe instalarse normalmente al flujo y la cresta debe estar perfectamente lisa y nivelada.
- La lectura de la carga H sobre la cresta se mide con una regla graduada o limnómetro ubicado por lo menos a una distancia de 3.5 veces la carga máxima hacia aguas arriba.
- Para asegurar su funcionamiento con descarga libre, debe instalarse un dispositivo de ventilación que comunique la cara aguas abajo del vertedero con la atmósfera.
- Si la instalación del vertedor es permanente, debe dejarse un dispositivo de drenaje para evacuar los sedimentos depositados.
- Se recomienda que la cresta sea de material resistente a la corrosión como bronce, acero, plástico y con la arista viva.

Todas las aplicaciones anteriores pueden ser utilizadas con el equipo SOLO.

La estructura siguiente es de más reciente manufactura y puede realizarse un tratamiento como el realizado para el Aforador de Garganta Larga, solo es más simple de construir y se basa en el mismo principio de funcionamiento que el AGL.

Se proporciona una guía para la construcción y el funcionamiento de un dispositivo de medición simple de agua para los canales abiertos. Por lo que, se describirá la construcción, instalación y operación de un dispositivo de medición de flujo simple y barato (comúnmente llamado un canal de flujo), que puede ser construido usando metal o de madera contrachapada y un pequeño trozo de tubo de PVC.

Si el canal de descarga está construido, instalado y operado correctamente, el dispositivo proporcionará una medición muy precisa del caudal, puede ser comparable con otros dispositivos de medición de caudal, como el Canal Parshall (Bureau of Reclamation EE.UU., 1984) o aforador de garganta larga (Bos et al., 1984) con las ventajas añadidas de bajo costo y de construcción simple.

1.7.1. CONSTRUCCIÓN

El dispositivo es el S-M canal (Samani y Magallanez, 2000). El canal de flujo se compone de una sección rectangular de conducto contraído por ambos lados por el PVC vertical u tubo de metal. La sección transversal del canal está restringido el uso de secciones media de PVC o de metal tubería (vista desde arriba). La vista lateral del canal de flujo como se muestra en las siguientes figuras.

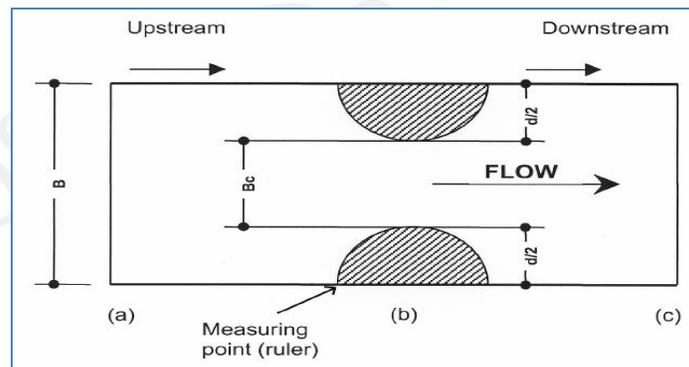


Figura 1.13 Vista superior de S-M canal

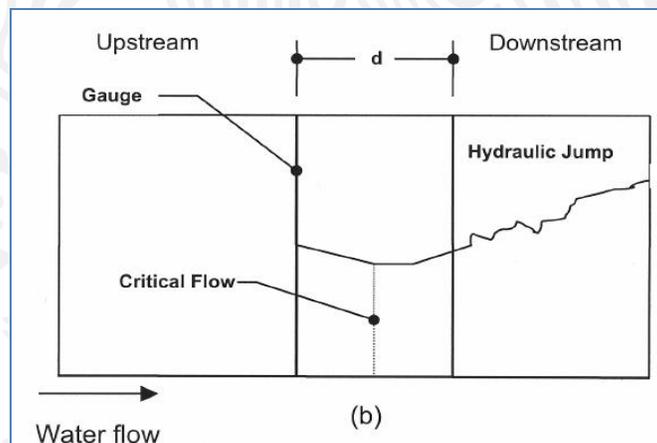


Figura 1.14 Vista lateral de S-M canal

La sección central, estrecha del canal de flujo (BC) es la garganta. La relación de la anchura de la garganta a la anchura del canal rectangular (B) es la relación de contracción. La relación de contracción (B_c / B) debe ser superior a 0,40 (40%). El propósito de la contracción es la creación de un flujo crítico, lo que hace que sea posible calcular el flujo de agua por simple medición de la profundidad del agua en la esquina aguas arriba de la tubería de PVC.

1.7.2. INSTRUCCIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN, INSTALACIÓN Y OPERACIÓN DEL S-M CANAL

1.7.2.1. CONSTRUCCIÓN DEL CANAL

- Medir la profundidad máxima del agua en el canal. La altura del canal de flujo debe ser igual a la profundidad máxima del agua en el canal.
- Calcular la longitud del canal de flujo (de corriente alterna). Esta longitud debe ser igual a 1.5 veces la altura de la canal.
- Instalar tubos de PVC o de metal 2/3, de la distancia desde la entrada aguas arriba del agua en el canal de flujo. Por ejemplo, si la profundidad máxima del agua es de 2 m, la altura del canal de flujo es de 2 m, y la longitud sería 3 ft La distancia desde el centro de la tubería de contratación (es decir, la posición vertical de la tubería de PVC o de metal) a la entrada de aguas arriba sería 2 pies, y la distancia desde el centro de la tubería de PVC en posición vertical o la tubería de metal al extremo de aguas abajo sería 1 pie. Los valores dados aquí para la longitud, aguas abajo y aguas arriba, son requisitos mínimos. Si las longitudes son más largas, no afectarán los resultados de la medición.
- Corte el tubo longitudinalmente en dos mitades iguales. En la fig. 1.13, la medición D es igual que el PVC o el diámetro del tubo de metal, y $d / 2$ ilustra el igualmente dividir mitades de tubería.
- La sección rectangular del canal de flujo puede ser construido a partir de láminas de madera contrachapadas, de acero o de aluminio. Construcción de madera contrachapada es útil para la medición de flujo a corto plazo, pero no durará mucho tiempo. El acero sería más apropiado para la medición permanente. Si el canal se va a mover, la construcción de aluminio es mejor, ya que proporciona un dispositivo ligero que puede ser transportado fácilmente.
- Una regla de medición de agua (medidor) debe estar instalado en la esquina superior de la tubería como se muestra en las figuras anteriores.
- El PVC en posición vertical o tubo de metal también puede funcionar como un pozo de amortiguación. Una perforación, puede ser perforado en la esquina superior de la tubería para convertir el tubo de PVC en un pozo de amortiguación. Un pozo de amortiguación se puede utilizar para medir la profundidad de flujo manual o electrónicamente usando un transductor de presión y registrador de datos.
- La tubería de PVC se fija a la pared mediante una tira de metal que se envuelve alrededor de la tubería y atornillado a la pared en ambos extremos. La regla (calibre) se une a la tubería usando pegamento epoxi.

- Las barras transversales de metal, pueden colocarse sobre la parte superior del canal de flujo con el fin de estabilizar las paredes durante y después de la instalación.

1.7.2.2. INSTALACIÓN

- El canal de flujo debe ser nivelado, tanto lateral como longitudinalmente dentro del canal en el que está instalado.
- El área que rodea el canal y debajo del canal debe ser sellado con tierra u otro material como el hormigón, de forma que todo el flujo de agua puede pasar a través del canal y no debilitar la posición nivelada del canal en el canal.

1.7.2.3. MANEJO

- La profundidad del agua en el canal de flujo se mide en el punto indicado en la figura 1 para medir el flujo de agua a través del canal.
- La relación entre la profundidad del agua en el canal de flujo y la velocidad de descarga (o el flujo de agua a través del canal de flujo) es la siguiente:

$$Q = 0.701(\sqrt{g})(Bc)^{0.91}(H)^{1.59}$$

Las variables en la ecuación anterior se definen como:

Q = caudal en m³/seg o ft³/sec (m = metros, ft = pies, s = segundos)

g = aceleración de la gravedad, 9,81 m/s² (unidad SI) o 32,2 m/s² en unidades inglesas.

Bc = canal ancho de la garganta en metros (unidad SI) o los pies en unidades inglesas

H = profundidad del flujo de agua en el calibre, en metros (unidad SI) o los pies en unidades inglesas.

- La velocidad de descarga puede ser calculado en unidades SI o en unidad de Inglés. Por ejemplo, si H se mide como 0,5 m, en un canal con un ancho de la garganta (Bc) igual a 2 m, a continuación, la velocidad de descarga de la ecuación anterior se puede calcular como:

$$Q = 0.701 * (\sqrt{32.2}) * (2^{0.91}) * (0.5^{1.59}) = 2.483 \text{ cfs}$$

Dónde: cfs = pies cúbicos por segundo

- Una vez que el canal se construye, la ecuación de canal de flujo se puede utilizar para generar una tabla de clasificación que consta de dos columnas, que muestra la relación entre H y Q .
- Para que el canal funcione correctamente, tiene que estar bajo condición de flujo libre. Esto significa que la profundidad del agua en el extremo aguas abajo del canal de flujo (punto c en la fig. 1) dividida por la profundidad del agua en el medidor debe ser inferior a 0.85 (85%). Si la proporción es de más de 0.85, la parte inferior del canal de flujo debe ser elevado con el fin de reducir la relación de profundidad. Este ajuste se hace normalmente una sola vez, cuando se instala el canal.
- La vista lateral del canal de flujo se ilustra el movimiento del agua a medida que fluye a través del canal. La regla (calibre) se coloca con el fin de medir el agua en la unión aguas arriba de la pared del canal de flujo y el tubo en posición vertical. El flujo de agua a la regla es la profundidad crítica, la cual es la misma que la profundidad del agua en el interior del pozo de amortiguación. Si la profundidad se mide en la regla, normalmente hay algo de turbulencia que provoca la profundidad para moverse hacia arriba y hacia abajo. En tal caso, una profundidad media se debe utilizar para calcular el flujo. Se recomienda para medir la profundidad en el interior del pozo de amortiguación para evitar error causado por las fluctuaciones de nivel de agua. Distancia d es de nuevo el diámetro de la PVC en posición vertical o tubería de metal. El salto hidráulico es una turbulencia temporal en el agua, ya que se mueve fuera del canal y se remonta a la profundidad normal en el canal.

1.7.2.4. INSTALACIÓN DEL CANAL S-M

Las figuras siguientes son imágenes de acequias S-M que se utilizan actualmente para medir los flujos. Se muestra un canal S-M instalado en un canal abierto en una zanja de tierra en una acequia. El canal es de aluminio y está a 2 metros de ancho y 3 metros de largo. El canal S-M de flujo se instala en una participación de un pozo revestido de concreto, en La Unión. Este canal está construido de acero (incluyendo las mitades de tubo vertical) y se encuentra a 1,5 metros de ancho y 4 pies de largo. Hormigón ha sido derramado en el cruce de la canal y el canal con el fin de estabilizar el canal y evitar que el agua sin pasar por el canal.

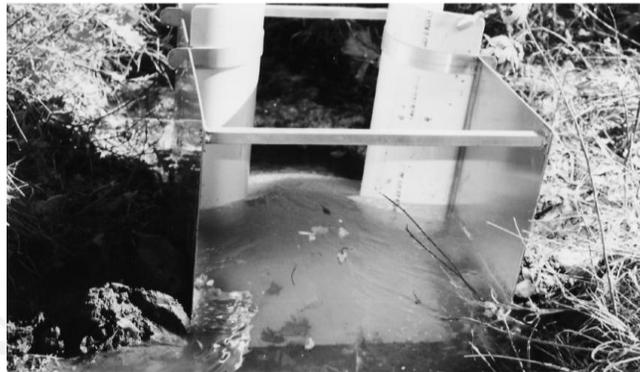


Figura 1.15 SM canal instalado en una acequia



Figura 1.16 canal instalado en una acequia

Otra de las aplicaciones del sensor TRIO de medición de caudal es la compuerta deslizante en canal rectangular que se muestra a continuación.

1.8.COMPUERTA VERTICAL DESLIZANTE

1.8.1. INTRODUCCIÓN

Para medir las descargas de agua es conveniente utilizar estructuras hidráulicas, para controlar la descarga y la profundidad del agua, ya que se crea uno-a-uno la relación entre la profundidad y la descarga. Sus aplicaciones incluyen canales de riego, canales de drenaje y desbordamiento de vertederos. En particular, otro dispositivo de medición de descargas son los costosos, por ejemplo, el láser Anemómetro Doppler. Atención, la comprensión del funcionamiento de la estructura de control de flujo del tipo vertedor y vertedores de cresta afilada, es relativamente mejor que las compuertas estándar. El conocimiento básico de las actuaciones hidráulicas de las estructuras cerradas es más pobre que la vibración de estas compuertas.

El software de canal abierto para modelado de flujo se ha convertido en las herramientas de diseño estándar para los canales de riego. En los últimos años, la investigación se centró en el desarrollo de esquemas numéricos, para la solución de ecuaciones para de aguas poco profundas, pero a veces esto era pasar por alto la importancia de otros componentes, por ejemplo, el desempeño de las compuertas. El modo de flujo asociado con las estructuras cerradas es a menudo compleja en condiciones de tiempo real, pero su sistema hidráulico se dividen en dos regímenes que son: (I) los flujos modulares, cuando la descarga es independiente de la profundidad del agua de descarga, y (II) sumergida fluye cuando hay dependencia.

Esta distinción ha establecido como el sumergimiento reduce la descarga a través de las compuertas y esto se refleja en los valores del coeficiente de descarga. La Figura 1.17 muestra que el flujo sumergido que se produce cuando la profundidad del agua de descarga a la salida es mayor a la profundidad de aguas abajo del salto hidráulico, y_3 .

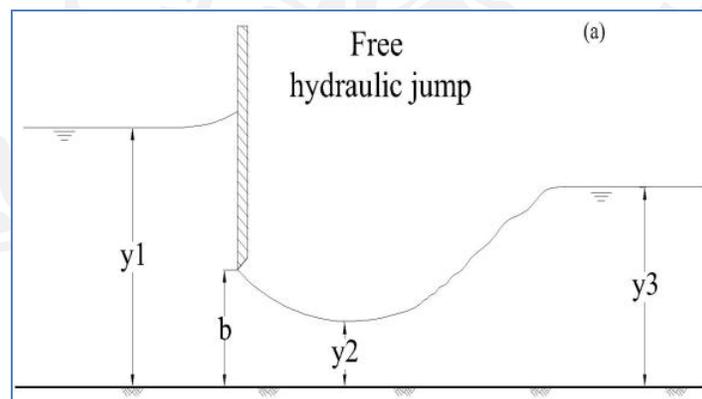


Figura 1.17

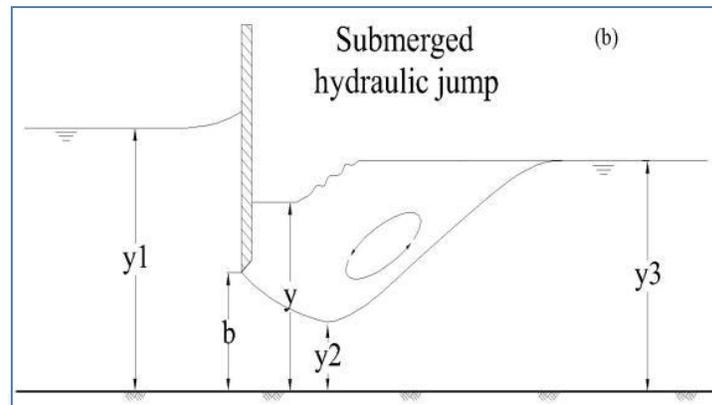


Figura 1.18 Esquema de una compuerta bajo descarga libre (a) y sumergido (b).

Una descripción de las ecuaciones de flujo ha sido abordada por teóricos, empíricos de las fórmulas y métodos gráficos. Swamee (1992) presenta dos fórmulas para distinguir el flujo modular y sumergido en función de las condiciones de flujo de las curvas de Henry (1950). Yen et al (2001) presenta una fórmula teórica y algunas gráficas experimentales para determinar la profundidad máxima permitida para el flujo de agua a descarga libre (o la profundidad del agua de descarga mínima permitida para el flujo sumergido). Ellos son los que definen el estado de flujo libre y sumergido en términos de flujo de las contracciones en la puerta y derivar ecuaciones de coeficiente de descarga en términos de descarga a dimensional, sumergido profundidad del agua, apertura de la puerta máxima permitida.

Ellos son los que definen el estado de circulación de flujo libre y el flujo sumergido en términos de contracción del flujo en la compuerta y se derivan las ecuaciones de coeficiente de descarga en términos de: descarga a dimensional, profundidad de agua sumergida y apertura de compuerta máxima permitida. También comparan sus resultados con otro enfoque y los investigadores reportan una buena forma física. En este estudio hemos utilizado el enfoque de Swamee (1992) para determinar si el salto hidráulico será libre o sumergido.

Flujo libre: (1)

$$y_1 \geq 0.81y_3 \left(\frac{y_3}{b} \right)^{0.72}$$

Flujo sumergido: (2)

$$y_3 < y_1 < 0.81y_3 \left(\frac{y_3}{b} \right)^{0.72}$$

Donde:

y_1 = Profundidad aguas arriba.

y_3 = profundidad del agua a la salida.

y_b = apertura de la compuerta.

FORMULA DE DESCARGA:

Uso de la fórmula de Bernoulli y de ecuaciones de continuidad en compuertas de descarga para el flujo de salto hidráulico, es posible derivar la siguiente expresión ampliamente conocida para calcular la compuerta de descarga para una sección transversal rectangular:

$$q = C_d b \sqrt{2gy_1}$$

Donde:

q = descarga por unidad de ancho del canal

g = aceleración por gravedad

b = apertura de la compuerta

y_1 = profundidad de agua anterior.

C_d = coeficiente de descarga.

C_d = depende de diferentes parámetros, tales como profundidad de aguas arriba, profundidad de aguas abajo, la apertura de la compuerta, el coeficiente de contracción de la compuerta y el estado de flujo.

Ecuación. (3) es aplicable para las condiciones hidráulicas. Henry (1950) utiliza la ecuación. (3) y C_d evaluados experimentalmente. Los resultados de ese estudio son conocidos como la famosa Curva de Henry.

Henderson (1966) derivan dos ecuaciones para calcular C_d para cada estado de flujo:

Flujo libre:

(4)

$$C_d = \frac{C_c}{\sqrt{1+\eta}}$$

Flujosumergido:

(5)

$$C_d = C_c \frac{\left(\xi - \sqrt{\xi^2 - \left(\frac{1}{\eta^2} - 1 \right)^2 \left(1 - \frac{1}{\lambda^2} \right)} \right)^{1/4}}{\frac{1}{\eta} - \eta}$$

Donde:

$$\eta = C_c b / y_1, \quad \lambda = y_1 / y_3, \quad \xi = ((1/\eta) - 1)^2 + 2(\lambda - 1)$$

C_c = coeficiente contracción. El coeficiente de contracción, se define como la relación entre la profundidad del agua en vena contracta, y_2 la apertura de la compuerta.

$$(C_c = y_2 / b).$$

Para la compuerta vertical deslizante con arista afilada, C_c varía entre 0.598 y 0.611 basado sobre razones teóricas [5]. Dado que el coeficiente de contracción depende de la apertura de la compuerta, la forma del labio de la compuerta, profundidad de agua aguas arriba, el tipo de entrada, y así sucesivamente, es muy difícil conocer su valor real para todas las condiciones de funcionamiento en la práctica [7]. Para fines de prácticas, seleccionando $C_c = 0,61$ tienen un resultados precisos y muchos investigadores han utilizado este valor [6].

Otro estudio de cálculo de compuertas de descarga de, se realizó en Rajaratnam y Subramanya (1967). Expresaron la descarga a través de una compuerta como

$$q = C_d b \sqrt{2g(y_1 - C_c b)} \quad (6)$$

$$q = C_d b \sqrt{2g(y_1 - y)} \quad (7)$$

Un valor de 0,61 fue utilizado para C_c y el análisis de los datos experimentales indica que el C_d estaba relacionado únicamente para condiciones de flujo para b/y_1 . Para $b/y_1 < 0,3$ esta relación fue casi lineal con la ecuación. (8).

$$C_d = 0.0297 \frac{b}{y_1} + 0.589 \quad (8)$$

Como se puede observar, la ecuación. (7) hace uso de la compuerta de profundidad de inmersión, y (véase la fig. 1). Ya que es muy difíciles medir con precisión su valor (esta zona tiene corrientes de recirculación d flujos), que debe ser previsto. Después de ciertas simplificaciones se obtuvieron:

$$y = b C_d \left[2 \left(1 - \frac{b C_d}{y_3} \right) + \sqrt{4 \left(1 - \frac{b C_d}{y_3} \right)^2 + \left(\frac{y_3}{b C_d} \right)^2} - 4 \left(\frac{y_1}{b C_d} - \frac{y_1}{y_3} \right) \right] \quad (9)$$

Swamee (1992) obtuvo las ecuaciones de coeficiente descarga para el flujo libre y sumergido, mediante la realización de regresión no lineal en (1950) por la Curva de Henry.

Flujo libre:

$$C_d = 0.611 \left(\frac{y_1 - b}{y_1 + 15b} \right)^{0.072} \quad (3) \quad (10)$$

Flujo sumergido:

$$C_d = 0.611 \left(\frac{y_1 - b}{y_1 + 15b} \right)^{0.072} \left(0.32 \left(\frac{0.81 y_3 \left(\frac{y_3}{b} \right)^{0.72} - y_1}{y_1 - y_3} \right)^{0.7} + 1 \right)^{-1} \quad (11)$$

Finalmente se habla de todos los equipos comerciales disponibles para medición del agua. Es decir de lo que existe a nivel comercial. Se emiten sus principios de funcionamiento.

El documento no hace mención de marcas ni modelos para que no se constituya en una recomendación.

El caudal es una de las variables que se mide con más frecuencia ya sea en la industria o en el sector agrícola, siendo agua el principal fluido a medir. No hay una única tecnología que satisfaga la gran variedad de aplicaciones, se dispone, en cambio de varios diseños basados en unos cuantos principios de funcionamiento, cada tecnología o diseño presenta sus beneficios y desventajas particulares, en conjunto todas estas tecnologías cubren el diverso ámbito de condiciones de funcionamiento que se puedan presentar en campo.

La norma BS EN 7405 trata de la clasificación, la selección y las reglas de optimización de la selección para caudalímetros en sistemas cerrados de tuberías. Esta norma propone 10 grupos básicos que clasifican todas las formas de medición de caudales

Grupo	Descripción	Categoría (... Energía)
1	Medidores de presión diferencial (PD)	Extrae
2	Otros Medidores PD (VA, Pitot, etc.)	Extrae
3	Medidores Volumétricos	Extrae
4	Medidores de Turbina	Extrae
5	Contadores Vortex	Extrae
6	Medidores Electromagnéticos	Añade
7	Medidores por ultrasonidos	Añade
8	Medidor másico de efecto Coriolis	Añade / Extrae
9	Medidores Térmicos	Añade
10	Otros tipos	Añade / Extrae
11	Medidores de flujos solidos	Añade / Extrae
12	Medidores para canales abiertos	Extrae

Tabla 1.6 Norma BS EN 7405

La tabla 1.6 establece una diferencia entre dos tipos de medidores:

- Los que extraen energía del fluido
- Los que añaden algo al fluido para deducir la velocidad del caudal a partir de la propiedad añadida.

Una extracción de energía lleva asociada una caída de presión. La mayoría de medidores pertenecen a esta categoría. Al añadir energía, la caída de presión, si se produce, es mínima. Los métodos de extracción de energía consisten en colocar en la corriente un estrangulamiento, un cuerpo solido o un rotor, estos convierten la energía potencial del fluido en energía cinética que se emplea para deducir la velocidad del fluido.

El segundo tipo de métodos, los que añaden energía, la energía puede introducirse en forma de flujo magnético, de ondas sonoras o de calor, el fluido reacciona ante ese incremento de energía y ese cambio permite deducir el caudal.

1.9.Caudalímetros de presión diferencial

Daniel Bernoulli estableció la base teórica para este método al desarrollar algunos de los principios de circulación de fluidos. Todos los caudalímetros de presión diferencial, comúnmente llamados medidores PD, utilizan la diferencia de presión provocada por elementos primarios como placas orificio, toberas, tubos Venturi, tubos Pitot, etc. Esta presión diferencial se deriva hacia un paso reducido, donde la presión se mide y a partir de ella se puede determinar la velocidad para un fluido de densidad constante.

El diseño y el cálculo diferencial fueron mejorando considerablemente a medida que se iban obteniendo nuevos resultados tras décadas de investigación, se publicaban descubrimientos fundamentales y continuaba el trabajo de estandarización. Los dispositivos de presión diferencial aun representan una gran proporción de los caudalímetros vendidos en todo el mundo. Disponibles en una amplia variedad de modelos y tamaños, los caudalímetros de presión constituyen en general un medio económico y fiable para medir caudales de líquidos y gases. Los dos diseños principales más comunes en aplicaciones son de dos tipos:

- Paso reducido (placas orificio, toberas, tubos Venturi)
- Tubos Pitot

1.9.1. PRINCIPIO DE MEDICIÓN POR PASO REDUCIDO

Los dispositivos de este tipo conllevan la instalación de algún elemento que reduzca el paso del fluido en un tramo de la tubería. Hay de tres tipos todos ellos detallados en normas y códigos prácticos ratificados (ISO 5167-1 / A1, AGA, ASME / L.H. Spink):

- Placa orificio
- Toberas
- Tubos / Toberas Venturi

Estos diseños abarcan un amplio espectro de requisitos de funcionamiento y se adaptan con facilidad a las diversas condiciones de proceso. Las diferencias entre ellos se cuentan en términos de la pérdida de carga, tramos rectos de entrada y salida, costes y gastos generales de instalación y mantenimiento.

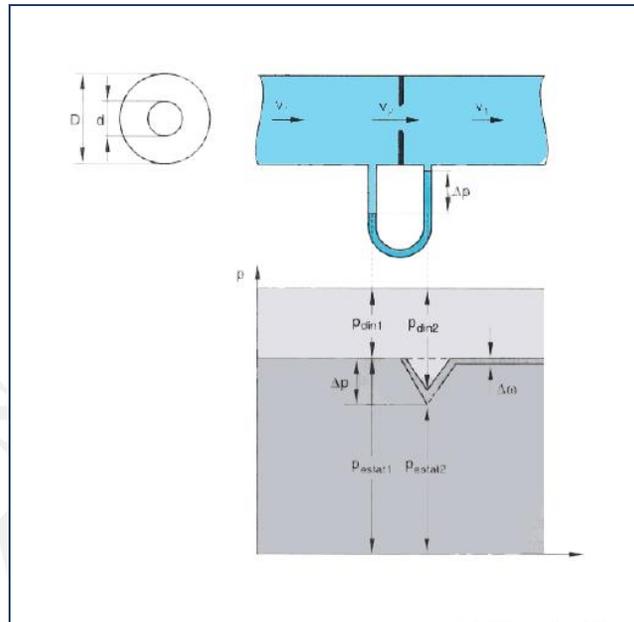


Figura 1.19 Principio de medición de los caudalímetros tipo paso reducido

La figura anterior muestra los efectos que causa en el flujo un paso reducido de la tubería, en este caso con una placa orificio crea un paso estrecho (d). Según la ecuación de Bernoulli, la velocidad del fluido aumenta de v_1 en la tubería general a v_2 en el paso estrecho. En consecuencia, la presión dinámica P_{din} aumenta a la presión estática P_{estat} disminuye en relación correspondiente a las diferentes velocidades del fluido. La caída de presión provocada de este modo se suele denominar comúnmente presión diferencial ($\Delta p = P_{estat1} - P_{estat2}$). Esta presión diferencial en función de la velocidad del fluido principal es una medida directa del caudal que circula por la tubería. Dos tubos capilares comunican la presión diferencial al transmisor, donde la medición se procesa y se convierte a las señales de salida correspondientes.

Si se combina la ecuación de Bernoulli con otras y se aplican los correspondientes coeficientes empíricos de corrección, se obtiene una única fórmula para calcular el caudal másico Q_m o el caudal volumétrico Q_v .

$$Q_m = C \cdot E \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho}$$

$$Q_v = C \cdot E \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot 1/\rho}$$

$$E = \sqrt{\frac{1}{1 - \beta^2}}$$

Donde:

C	Coeficiente de descarga	ρ	Densidad del fluido
E	Coeficiente de velocidad de aproximación (depende de β)	Δp	Presión diferencial
ε	Coeficiente de Expansión	P_{estat1}	Presión estática antes de la placa orificio
D	Diámetro exterior de la tubería	P_{estat2}	Presión estática después de la placa orificio
d	Diámetro del orificio	P_{din1}	Presión dinámica antes de la placa orificio
β	Relación de diámetros d/D	P_{din2}	Presión dinámica después de la placa orificio
v_1	Velocidad del fluido antes de la placa orificio	P_{tot}	Presión total
v_2	Velocidad del fluido en el centro de la placa orificio	$\Delta \omega$	Pérdida de carga residual (permanente) después de la placa orificio

Tabla 1.7

1.9.2. Pérdidas de carga

El fluido recupera velocidad original aguas abajo del paso estrecho. El exceso de presión dinámica se convierte casi por completo en presión estática. La pérdida de carga residual depende de la razón entre los diámetros β y, en consecuencia, de la geometría particular del estrechamiento. Esta pérdida de carga $\Delta \omega$, sin embargo es considerablemente inferior a la presión diferencial Δp .

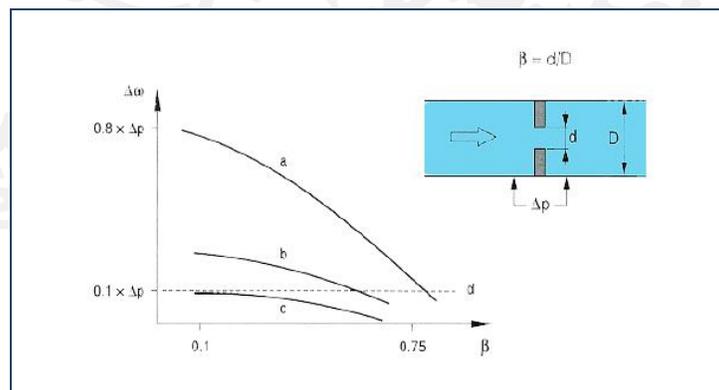


Figura 1.20 Pérdida de presión residual con elementos primarios con orificio.

En términos generales podemos afirmar que los medidores de presión diferencial permiten medir caudales de “cero en adelante”. La incertidumbre tiende a ser superior en el extremo inferior del campo de medida por la raíz cuadrada que aparece en la expresión del cálculo de caudal. El aumento en la incertidumbre del transmisor de presión diferencial es cuadrático. La razón entre los valores de caudal máximo q_{max} y el caudal mínimo q_{min} se conoce como rangeabilidad (turndown). Pro caudal mínimo se suele entender el caudal más bajo que puede medirse con una exactitud específica. Los valores típicos de rangeabilidad en la mayoría de las aplicaciones se hayan comprendidos entre 3:1 y 6:1.

El rango de aplicación se puede ampliar significativamente se conecta en paralelo un segundo transmisor de presión diferencial con un rango de aplicación más reducido. Por ejemplo una configuración de transmisores como la que se muestra en la figura siguiente basta para ampliar el rango de aplicación hasta un valor de 36:1.

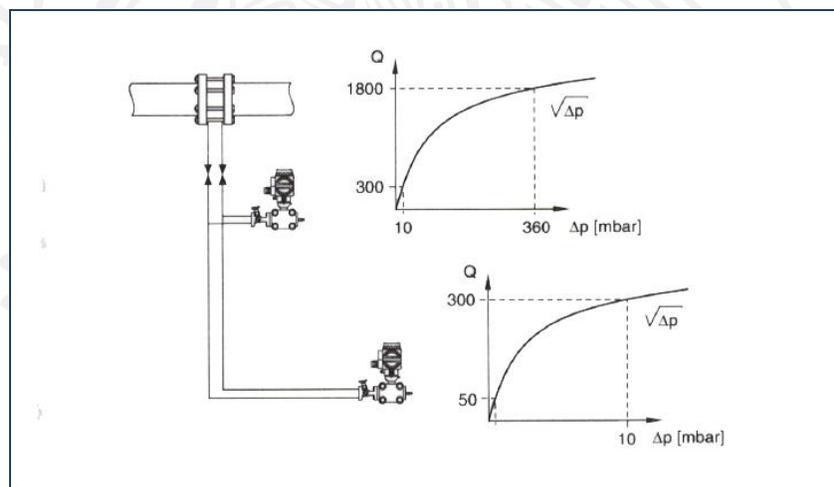


Figura 1.21 Rango de aplicación de la medición mediante elemento primario por paso reducido (placa orificio de 6:1 pasa a 36:1)

1.9.3. VENTAJAS

- Diseño simple y robusto
- Norma estándar de ámbito mundial desde más de 60 años
- Amplia variedad de materiales Acero, PVDF, Teflón, etc. Para aplicaciones muy diversas
- Diámetros nominales disponibles desde ½" hasta 40"
- Inversión inicial baja (dependiendo del modelo)

1.9.4. DESVENTAJAS

- Mayor pérdida de carga que en las toberas y tubos Venturi
- De desgaste comparativamente fácil, y por tanto, distorsión de la medición si la abrasión o las deposiciones afectan la geometría del diafragma
- Los costos de instalación y mantenimiento se incrementan si se incluyen la instalación de capilares y las válvulas asociadas

1.10. TUBOS O TOBERAS VENTURI

Se emplean principalmente para medir caudales de líquidos, por ejemplo en sistemas de distribución de agua. Estos elementos primarios originan pérdidas de carga mucho menores que las placas orificio, por lo que requieren menor presión de bombeo, sin embargo su precisión es ligeramente superior que con las placas orificio por las presiones diferenciales menores que suelen involucrar. Los tubos Venturi y las toberas Venturi disponen de un difusor de salida divergente que constantemente reduce la velocidad del fluido mientras la presión aumenta.

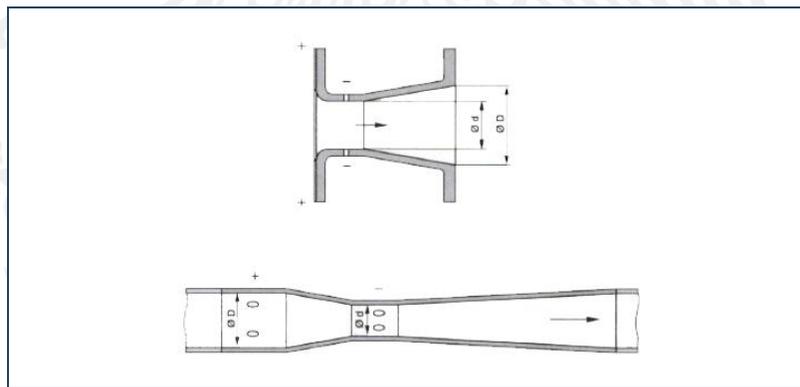


Figura 1.22 Modelo de tobera Venturi y modelo tubo Venturi

1.10.1. Ventajas

- Pérdidas de carga menores que con las placas orificio
- Resistente al desgaste interno
- Menos sensibles a perturbaciones originadas aguas arriba
- Buena ejecución para valores de β elevados y para tamaños grandes

1.10.2. Desventajas

- Mayores dimensiones en general
- Costos de instalación mantenimiento elevado
- Los diámetros nominales grandes presentan problema de manejo

Las toberas son un buen compromiso entre los tubos Venturi y las placas orificio por que combinan un diseño compacto con unas pérdidas de presión razonablemente bajas. Has de dos tipos, toberas según ISA 1932 y toberas de radio largo según ISO 5167/A1.

Por su sección de entrada redondeada, las toberas pueden tolerar velocidades de circulación de fluidos muy altas y también resultan una buena elección para fluidos abrasivos. La presión diferencial es inferior que en las placas orificio, y en consecuencia, las pérdidas de presión también, pero la precisión en la medición es ligeramente superior.

La presión se detecta en tubos o ranuras anulares, de modo muy parecido al caso de las placas orificio.

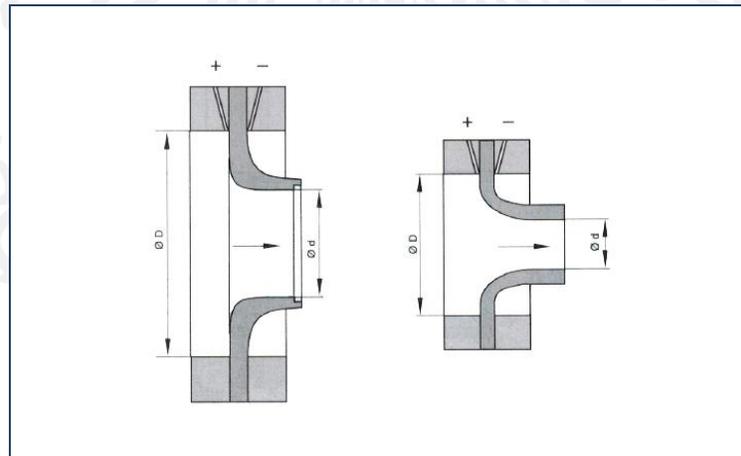


Figura 1.23 Modelos de tobera

1.11. Principio de medición en Tubos Pitot

Los tubos Pitot también se basan en diferencias de presión. El tubo de Pitot se instala en tuberías transversalmente a la dirección de circulación del fluido o en conductos de sección rectangular (figura siguiente).

El elemento medidor, un detector en forma de varilla, tiene una o varias hendiduras en la parte anterior y posterior, conectados a un transmisor de presión diferencial por dos canales independientes.

Las hendiduras en la parte anterior registran la carga total de presión (presión dinámica más presión estática). Las hendiduras en la parte posterior solo detectan la presión estática. En consecuencia, la presión diferencial entre la parte anterior y la parte posterior corresponde a la presión dinámica en la tubería, de donde se puede calcular el caudal directamente a partir de las tres leyes básicas que rigen la naturaleza del flujo de un fluido. El detector atraviesa todo el diámetro de la tubería y las hendiduras están distribuidas de tal modo que registren un promedio representativo de la velocidad del fluido. Esto no significa, sin embargo, que estos detectores sean totalmente inmunes a los efectos derivados del perfil de velocidades y las turbulencias. Los tubos Pitot originan una pequeña presión diferencial que los transmisores de presión diferencial modernos son capaces de detectar con un alto grado de exactitud. En consecuencia, el empleo de tubos Pitot va siendo cada vez más habitual.

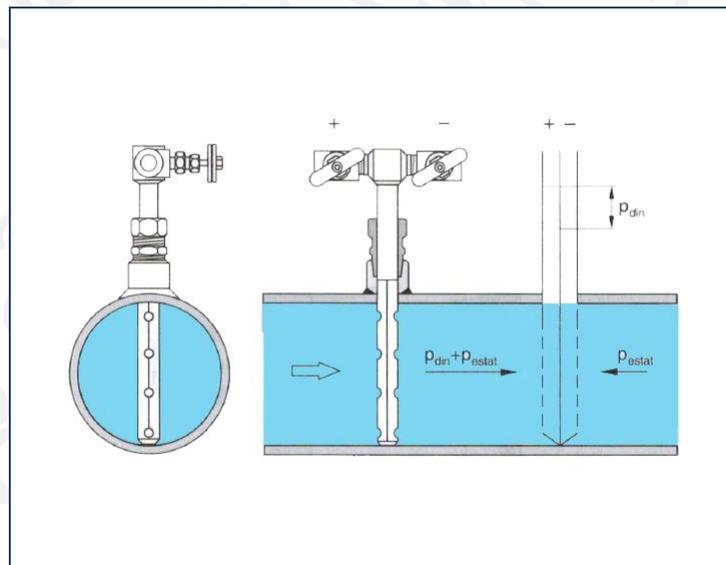


Figura 1.24 Principio de medición de los tubos Pitot (modelo puerto múltiple)

Las ecuaciones para el cálculo del caudal másico Q_m y el caudal volumétrico Q_v se pueden escribir de manera simplificada:

$$Q_m = K \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho} \text{ y } Q_v = K \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot 1/\rho}$$

El parámetro K depende de las características de diseño del detector y del diámetro interior de la tubería. El valor de este parámetro se obtiene por métodos empíricos mediante un proceso de calibración.

Las pérdidas de carga en los tubos Pitot son significativamente inferiores que en los métodos de estrechamiento, en particular, en tuberías de diámetros muy grandes. No

obstante, los efectos debidos al perfil de velocidades y turbulencia pueden ser más significativos para diámetros mayores a 40”.



Figura 1.25 Tubo de Pitot se observa claramente las tomas de presión (arriba), el colector (centro) y el transmisor de presión (abajo).

1.12. Caudalímetros de sección variable

Un caudalímetro de sección variable es un instrumento relativamente simple y eficaz para la medición de caudales de gases y fluidos. El dispositivo consiste en un tubo vertical graduado hacia arriba en cuyo interior hay un flotador de vidrio o metal en suspensión en el fluido, que entra desde abajo. La fuerza que ejerce el fluido sobre el flotador depende de la densidad, la viscosidad y la velocidad del fluido.

Cuanto mayor es la velocidad del fluido y por lo tanto la fuerza que desarrolla, más alto flotara el flotador en el interior del tubo graduado. El espacio que queda entre el flotador y la pared del tubo se ensancha a medida que el flotador se mueve hacia arriba, hasta que las fuerzas que actúan se equilibran y el flotador permanece suspendido a una altura constante (figura siguiente).

$$F_G = F_A + F_S$$

$$F_G = V_S \cdot \rho_S \cdot g = \text{Peso del flotador}$$

$$F_A = V_M \cdot \rho_S \cdot g = \text{Flotabilidad del flotador}$$

$$F_S = c_w \cdot A_S \cdot 1/2 \cdot \rho_M \cdot v^2 = \text{Arrastre del fluido}$$

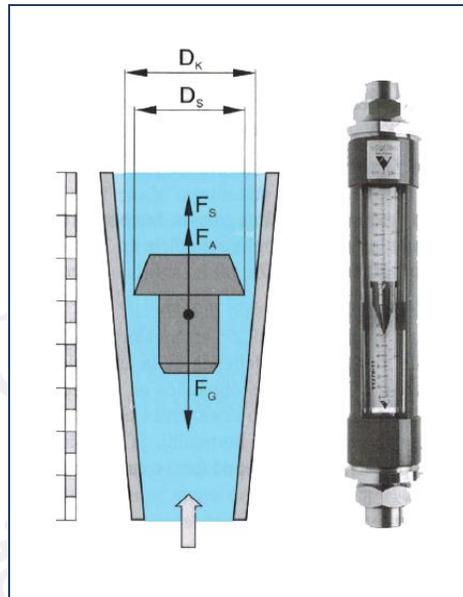


Figura 1.26 Principio de medición de los caudalímetros de sección variable

El caudal volumétrico Q_v se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$Q_v = v \cdot A_R = v \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_K^2 - D_S^2)$$

Al introducir el coeficiente de flujo $\alpha = \sqrt{\frac{1}{c_w}}$ la expresión para el caudal volumétrico queda descrito según la siguiente expresión:

$$Q_v = \frac{\alpha}{\rho_m} \cdot D_S \cdot \sqrt{g \cdot m_s \cdot \rho_m \cdot \left(1 - \frac{\rho_m}{\rho_s}\right)}$$

Donde:

V_S	Volumen del flotador	ρ_s	Densidad del flotador
m_s	Masa del flotador	ρ_m	Densidad del fluido
α	Coeficiente de flujo		
c_w	Coeficiente de arrastre (depende de la geometría del flotador y del número de Reynolds)		
A_S	Área de la sección transversal del flotador a la altura de la superficie de lectura		
A_R	Área del espacio circular entre el flotador y la pared graduada		
v	Velocidad del fluido		
g	Aceleración de la gravedad		
D_K	Diámetro interior del tubo a la altura de la superficie de lectura del flotador		
D_S	Diámetro del flotador a la altura de la superficie de lectura		

Los caudalímetros de sección variable obedecen el mismo fenómeno físico que los caudalímetros de presión diferencial, sin embargo, los principios de medición en que se basan ambos tipos de medidores son opuestos. En los medidores de presión diferencial el área es constante y una variación en la presión diferencial indica una variación en la velocidad del fluido. En los medidores de sección variable, por el contrario la presión diferencial que experimenta el flotador es constante y una variación en la sección transversal, indica un cambio en la velocidad del fluido.

Si el tubo es de vidrio cumple con la función de mirilla y permite leer el caudal directamente, siempre y cuando el flujo sea transparente, pues en caso contrario el flotador no es visible.

Si el tubo es metálico la posición del flotador puede ser transmitida por medios magnéticos a una escala en el exterior del tubo o bien detectada por inducción magnética y convertida en señal eléctrica.

Algunos caudalímetros de sección variable también incorporan conmutadores de nivel integrados a salidas analógicas para conexión a un medidor de caudal. Además de los medidores de tubo graduado habituales en multitud de aplicaciones, todos los tipos de unidades se pueden encontrar en materiales altamente resistentes para condiciones de uso duras, los materiales pueden ser, acero, acero inoxidable, plástico, vidrio, etc.

1.12.1. Modelos de flotador

El flotador ha de mantenerse correctamente centrado en el tubo de medición, en caso contrario el caudalímetro no dará una lectura correcta. Con este propósito, en el interior del tubo existen algunas guías, o bien la cabeza del flotador esta estriada de tal modo que la circulación del fluido le obligue a girar para mantener su estabilidad. Por este motivo, este tipo de caudalímetro también se conoce como Rotameter. Los múltiples modelos de flotador y formas de los tubos de medición permiten adaptar el campo de valores a medida de diversas aplicaciones.

Se puede elegir un modelo y una forma específica del flotador que tenga en cuenta los efectos de la viscosidad del fluido en la lectura. Se dispone de una amplia variedad de materiales para el flotador, pues la densidad d de este componente permite determinar campo de vectores de medida del sistema, acero inoxidable, tantalio, vidrio, zafiro sintético, plástico, níquel, además de aleaciones especiales.

La sonda de toma de presión en el tubo de medición linealiza el movimiento del flotador. El escalado depende del tipo de fluido, si las condiciones de trabajo del caudalímetro cambian, dentro de unos límites es posible volver a ajustar a calcular la escala para que se adapte a la nueva situación.

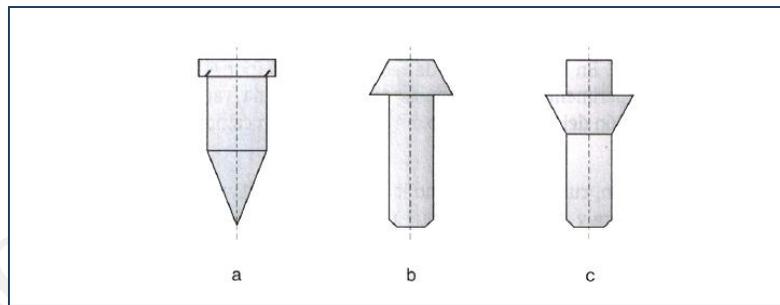


Figura 1.27 Modelos de flotador

a=Flotador giratorio (de lectura directa, las estrías en ángulo causan el giro)

b=Flotador insensible a la viscosidad

c=Flotador diseñado para ampliar el campo de valores a medida en un +30%, sensible a la viscosidad

1.12.2. Ventajas

- Para aplicaciones de líquidos, gases o vapor.
- Método de medición del caudal de bajo costo por su diseño simple
- No requiere fuente de alimentación
- Pérdidas de carga baja

1.12.3. Desventajas

- La exactitud de la medición depende de las condiciones de la aplicación y de las propiedades del fluido
- Requiere calibración específica para cada fluido
- Sensible a la intrusión de materiales, no adecuado para fluidos que transporten sólidos
- Solo aptos para fluidos de baja densidad
- No dispone de función de totalización

1.13. Caudalímetros volumétricos

Los caudalímetros volumétricos, o de desplazamiento positivo son el único tipo de caudalímetros que indica el caudal volumétrico. Hay modelos de todos los tipos y medidas. Son los mejores dispositivos de medición de caudal volumétrico. Sin embargo, solo se pueden emplear con fluidos limpios y presentan limitaciones de tamaño y velocidad de caudal en comparación con otros tipos de caudalímetros. Son conocidos en todo el mundo simplemente como medidores PD.

1.13.1. Principio de medición

Los dispositivos que funcionan según este tipo de principio disponen de cámaras desplazables que dividen el fluido en volúmenes fijos conocidos con precisión, a medida que éste pasa por el caudalímetro (figura siguiente). El recuento de los volúmenes individuales de fluido da el valor total del caudal. Las cámaras de medición internas (sistemas de engranes, émbolos u otros elementos) se mueven por la propia presión de la tubería. El número de giros es el indicador del volumen que ha pasado por el caudalímetro.

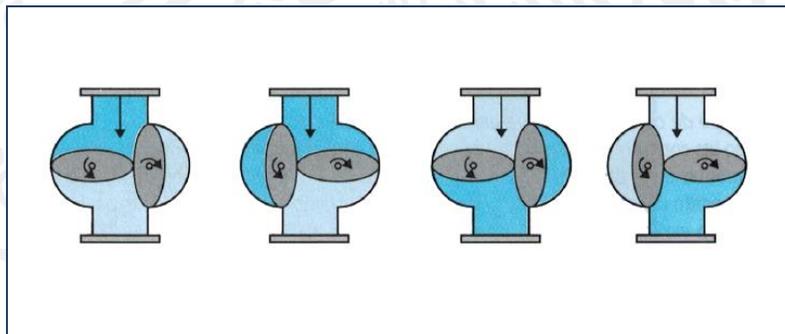


Figura 1.28 Principio de funcionamiento de los caudalímetros volumétricos (engranes ovalados)

Los caudalímetros volumétricos son únicamente dispositivos de medición del volumen de caudal y solo pueden registrar el caudal en un único sentido, son unidireccionales. El llenado y el vaciado cíclicos de las cámaras imponen un cierto grado de pulsación al fluido. La intensidad de la pulsación a la salida depende de la velocidad del caudal y del modelo de caudalímetro. Por ello es necesario acomodar las señales analógicas a estas pulsaciones antes de ser utilizadas como funciones de control.

El movimiento interno de las cámaras de medición se puede transmitir directamente a un contador mecánico, o alternativamente, los caudalímetros volumétricos pueden estar

equipados con bobinas inductivas otros tipos de generadores de señal. Al contrario que otros tipos de medidores, los caudalímetros volumétricos pueden funcionar sin energía eléctrica externa.

Los caudalímetros volumétricos son una de las pocas clases de medidores en que su exactitud aumenta al aumentar la viscosidad del fluido, además su funcionamiento no se ve afectado por turbulencias, vórtices u otros perfiles de velocidad distorsionantes. Sin embargo la presencia de una segunda fase (aire o sólidos en el líquido) puede perturbar significativamente la medición.

Para velocidades de fluido bajas, la resistencia por rozamiento en el caudalímetro es grande en comparación con la fuerza de impulsión. Parte del fluido puede quedar sin registrar al escurrirse por los intersticios entre las partes mecánicas. Estas pérdidas se denominan “deslizamientos del fluido” y también son habituales en algunos medidores de turbina. A medida que la velocidad del fluido aumenta, el error de medición incrementa hasta un valor máximo y luego disminuye. A velocidades de fluido altas el error también aumenta por los efectos inerciales que se producen en el interior del cuerpo de caudalímetro. El uso prolongado a altas velocidades provoca desgaste de los componentes y con ello mayores deslizamientos de fluido a través del caudalímetro.

Algunos tipos de medidores PD ofrecen exactitudes superiores a $\pm 0,1\%$, y en algunos casos proporcionan valores cercanos incluso a los conseguidos por un sistema de calibración. En el extremo opuesto de la escala, muchos de modelos de bajo costo menos exactos se emplean por todo el mundo para el control rutinario de caudales de líquidos.

Todos estos dispositivos se ven fácilmente afectados por la intrusión de cuerpos sólidos, que tienen tendencia a obturar los intersticios del caudalímetro. Si la intrusión de materia extraña constituye un problema recurrente (como es el caso cuando se efectúan con frecuencia trabajos de instalación), es aconsejable instalar un filtro de red fina aguas arriba del caudalímetro.

1.13.2. Modelos

Algunos de los diversos tipos de medidores volumétricos reciben el nombre por el elemento que utilizan para la medición. Hay cuatro modelos básicos:

- Rotativos (elemento de medición de tipo rueda dentada, tornillo o molinete)
- Alternativos (elemento de medición de tipo émbolo de movimiento alternativo)
- De disco oscilante (elemento de medición de acción rotativa)
- De nutación (elemento de medición de tipo disco de nutación)

1.14. Medidores de molinete

Los medidores del primer grupo son los caudalímetros de este tipo más precisos. Su diseño se muestra abajo en la figura. Un molinete ajustado a la cavidad de medición desplaza una cantidad de volumen fija al barrer un cuarto de circunferencia, como se muestra en la figura.

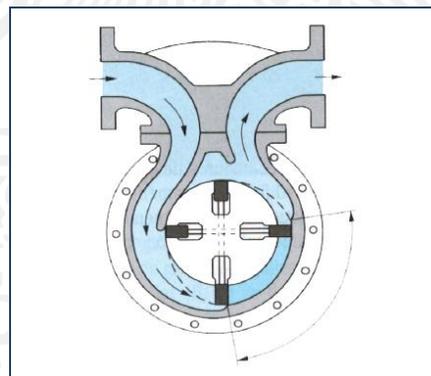


Figura 1.29 Caudalímetro de molinete

1.15. Medidores de ruedas de engranaje ovaladas

Un medidor de ruedas de engranaje ovaladas consiste en un cabezal que aloja dos ruedas dentadas ovaladas engranadas. La acción de cierre positivo evita efectivamente las fugas entre los dos engranajes. El momento de fuerza producido por la acción del caudal varía según las posiciones relativas de las dos ruedas de engranaje ovaladas. Dicho momento provoca el giro de cada engranaje alrededor del otro y hace pasar por el contador porciones de fluido de volumen conocido. Este principio es característico de muchos diseños de medidores volumétricos, incluso de aquéllos cuyos engranajes no tienen forma ovalada (Figura. siguiente).

Los materiales empleados para las cámaras de desplazamiento, las ruedas de engranajes ovaladas, las levas y pivotes diversos pueden variar según las condiciones de proceso. Los materiales típicos empleados para las ruedas de engranaje ovaladas incluyen fundición gris, aceros Cr-Ni-Mo, acero colado y bronce. Estos materiales son de uso habitual en muchos otros diseños.

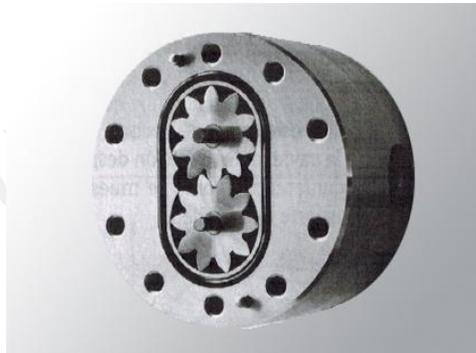


Figura 1.30 Medidor de engranes, entre los dientes de las ruedas dentadas pasan porciones de volumen del fluido exactas

1.16. Medidores de émbolo giratorio

Los modelos más comunes del tercer grupo son los medidores de émbolo giratorio, utilizados para la supervisión del consumo de agua en edificios, apartamentos e industrias. El émbolo oscila alrededor de un eje central. La estanqueidad del volumen de fluido se da entre la lámina de partición y el borde exterior del elemento de medición en contacto con el cuerpo del caudalímetro.

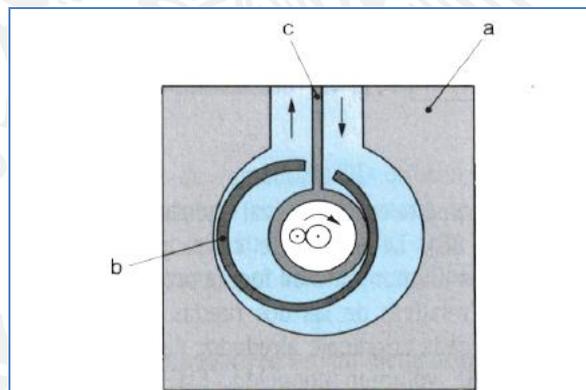


Figura 1.31 Sección transversal de un medidor de embolo giratorio

- a= Cuerpo de caudalímetro
- b= Cámara de medición
- c= Lamina de partición

Los otros dos tipos de medidores mencionados (de émbolo alternativo y de diafragma o disco oscilante / nutación) basan su principio de medición en que actúan como desplazadores de un volumen de fluido fijo en cada revolución.

En todos estos modelos, el eje central transmite el movimiento giratorio a unos contadores de rueda dentada, o simplemente a unos sensores externos, que cuentan las revoluciones. La Figura siguiente muestra la configuración básica de un contador de tornillo helicoidal.

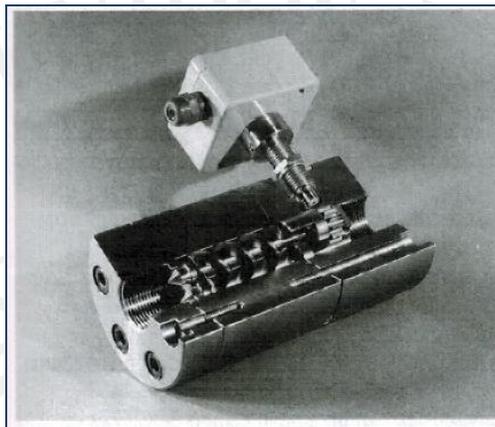


Figura 1.32 Medidor volumétrico con dos tornillos helicoidales

La lista de ventajas y desventajas que ofrece este principio de medición ha de darse inevitablemente en términos generales, debido a los innumerables tipos y modelos distintos disponibles en el mercado. El resumen siguiente, pues, no contempla más que generalidades. Para conocer la información detallada acerca de las condiciones límite particulares para cada tipo de contador siempre será necesario dirigirse al fabricante correspondiente.

1.16.1. Ventajas

- Método de medición en uso desde hace más de 100 años. Ampliamente aceptado y fiable.
- De gran exactitud (hasta 0,1% o superior) y alta repetibilidad, particularmente cierto para medidores de tipo molinete y émbolo.
- Se pueden emplear con líquidos conductivos y no conductivos.
- Especialmente adecuados para la medición del caudal de fluidos altamente viscosos.
- La medición es independiente de la viscosidad en un amplio campo de valores de medida.
- Algunos modelos no necesitan alimentación eléctrica.

- Un amplio abanico de materiales disponibles.
- Las condiciones a la entrada y a la salida no influyen en la medición.

1.16.2. Desventajas

- No aptos para fluidos contaminados o para dos fases fluidas.
- Por su diseño inherente, algunos modelos provocan caudales pulsantes en la tubería.
- Sólo permiten medir el caudal en un único sentido.
- Los diámetros nominales deben ser grandes en comparación con otros métodos.
- Restricciones de temperatura y presión para evitar los efectos de fugas intersticiales en el cuerpo del contador.
- Pérdida de carga por filtros corriente arriba, aumento de la viscosidad y/o velocidades más altas.
- Un mal uso puede acabar por bloquear el sistema de tuberías.
- El rozamiento mecánico impone una carga adicional si el contador se emplea para medir caudales de sustancias químicamente agresivos.
- Riesgo de congelación (formación de hielo) si se emplea al aire libre.
- Posibilidad de daños mecánicos por entrada de aire o vapor en el fluido.
- No especialmente económicos en comparación con otras tecnologías equivalentes de medición de velocidades de circulación de fluidos.

1.17. Medidores de turbina

Este tipo de medidores es uno de los más exactos que se han desarrollado. Por este motivo, su uso está ampliamente difundido en aplicaciones de medición de recuento de caudal de hidrocarburos refinados. Los modelos de precisión son caros de fabricar y calibrar. No obstante, otros modelos más económicos están disponibles para consumo de agua y aplicaciones rutinarias de medición de caudal. Todos los modelos se caracterizan por su alto nivel de repetibilidad, pero son sensibles a los efectos perturbadores debidos a las propiedades del fluido y del flujo.

1.17.1. Principio de medición

La Figura siguiente muestra los elementos básicos. Todos los tipos de medidores de turbina constan de un grupo de aspas giratorias fijado con pivotes a un eje central. El grupo va montado en el centro del cuerpo del caudalímetro. La energía cinética del fluido se transmite a la rueda de la turbina, que gira con una velocidad proporcional al caudal.

La rueda de la turbina se conoce con el nombre de "rotor" en los medidores de turbina convencionales y "molinete" en los medidores mecánicos.

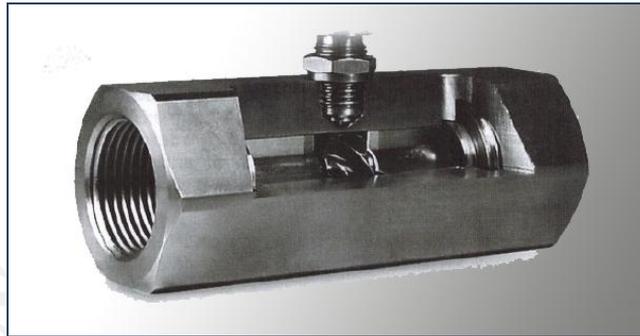


Figura 1.33 Medidor de Turbina

La velocidad del rotor se cuenta por medios mecánicos o inductivos según el modelo. En medidores de turbina convencionales, cada vez que un aspa de la hélice pasa por el sensor, se genera un impulso que corresponde a un volumen fijo de fluido. El número de impulsos da la cantidad de fluido que ha circulado en un intervalo de tiempo conocido y la frecuencia de los impulsos es un indicador de la velocidad del caudal.

El eje del rotor suele ser paralelo a la dirección de circulación del fluido. En algunos modelos, sin embargo, el rotor está montado en posición vertical respecto a la dirección del caudal. Las aspas están inclinadas un ángulo (β) respecto a la dirección del caudal para que el fluido ejerza un momento de fuerza sobre el rotor. El caudal volumétrico se calcula a partir de la rotación resultante, según la expresión siguiente:

$$Q_v = V_m \cdot A = 2\pi \cdot n \cdot r_m \cdot \cot \beta \cdot A$$

Q_v	Caudal volumétrico	N	Numero de revoluciones del rotor
V_m	Velocidad media del caudal	r_m	Radio del rotor
A	Sección transversal del caudal	β	Inclinación de las aspas

Esta expresión tan simple muestra que el número y la forma de las aspas de la turbina son los factores más importantes en la velocidad del rotor. Por otra parte, la velocidad del fluido no es constante para todo el diámetro de la tubería. Lo cual nos permite observar que las fuerzas que actúan sobre las aspas de la turbina son complejas. La mayor velocidad se genera cerca del centro y en las puntas se produce un cierto arrastre. El equilibrio entre la fuerza impulsora y la fuerza de arrastre (a la cual contribuye también el rozamiento de los pivotes) mantiene el rotor a velocidad constante para un caudal fijo.

La teoría permite escribir una expresión general que relaciona el número de impulsos generados (n) y el caudal (Q). La siguiente ecuación expresa esta relación:

$$\frac{n}{Q} = A + \frac{B}{Q} - \frac{C}{Q^2}$$

El primer sumando del segundo miembro (A) depende de la cantidad de movimiento lineal y es el término dominante para velocidades altas del caudal. El segundo sumando (B/Q) da cuenta de los efectos de la viscosidad y del flujo en los extremos de las aspas. Adquiere importancia en el tercio inferior de la curva característica. El último sumando (C/Q^2) depende de las fuerzas de arrastre mecánicas, aerodinámicas y de los pivotes sobre el sensor. Es el sumando dominante a velocidades bajas del caudal y es un término de retardo.

El balance relativo de estos tres sumandos se corresponde con un valor bajo de n/Q para caudales bajos que aumenta hasta alcanzar un máximo y luego tiende hacia un valor constante de n/Q para caudales altos. La teoría completa es en realidad mucho más compleja porque la influencia del perfil de velocidades y de la geometría de las aspas implica el cálculo de complicadas integrales para hallar los valores de las constantes A, B y C de la ecuación anterior. La Figura 1.34 siguiente muestra la curva característica de un caudalímetro de turbina. La pérdida de carga (Δp) se corresponde con la ecuación de Bernoulli, aumentando con el cuadrado del caudal Q.

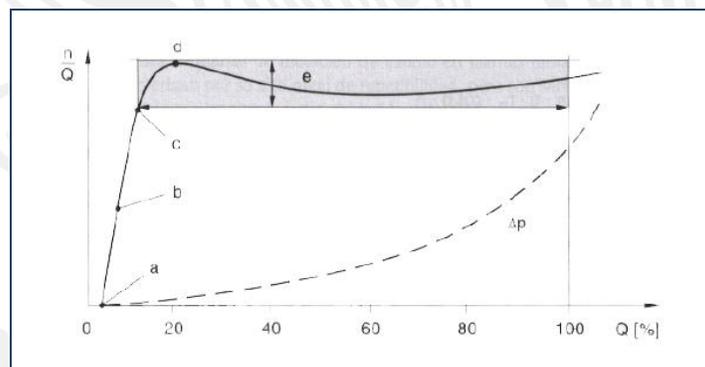


Figura 1.34 Curva característica de un medidor de Turbina

a= Caudal Inicial, b= Caudal mínimo para repetibilidad, c= Caudal mínimo para comportamiento lineal
d= Posición del factor de recuento máximo, e= Campo de comportamiento lineal de los valores de medida

En el extremo inferior de la curva (Figura anterior, punto a), está el caudal por debajo del cual el rotor no gira porque no ejerce suficiente momento de fuerza impulsora. Por encima de este caudal, el rotor gira pero no ofrece repetibilidad. Una buena repetibilidad sólo se alcanza cuando se sobrepasa un cierto valor (b) del caudal. Para caudales mayores,

llega al punto (d) y se alcanza la zona de funcionamiento lineal (e), en que el factor de recuento (n/Q) no cambia significativamente con el caudal.

El campo de valores de comportamiento lineal para los medidores de turbina empleados en el recuento de caudal puede estar en 20:1 o superior, según el tamaño y el fabricante. La característica principal de los medidores de turbina es una alta repetibilidad, con valores típicos de 0.02%. El comportamiento lineal suele darse en una zona de $\pm 0.25\%$ en torno al campo de valores de medida especificado, pero en campos de valores de medida restringidos (5 o 6:1), se consiguen mejoras en torno al 0.1% en fluidos poco viscosos. Por esta característica, este tipo de medidores se emplea para el recuento de caudales de hidrocarburos.

De lo dicho se deduce que los medidores de turbina son sensibles a los efectos de la viscosidad, en particular en relación con los distintos modelos de aspas. Las aspas en ángulo recto proporcionan mayor velocidad angular, pero las helicoidales (oblicuas) son mucho menos sensibles a los efectos de la viscosidad. Todos los modelos deberían mantenerse por debajo de un valor de viscosidad máximo de 30 cP o, de lo contrario, el contador pierde comportamiento lineal. La Figura 1.35 siguiente muestra el cambio en la curva característica para dos tipos de aspa para varios fluidos viscosos.

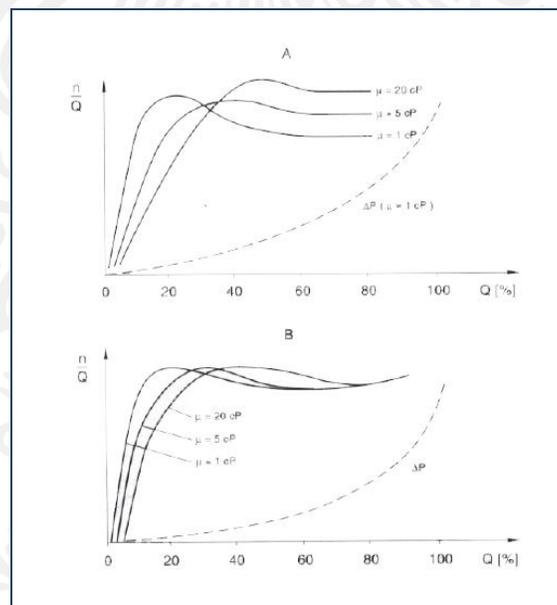


Figura 1.35 Curvas características de medidores de tipo turbina (línea continua) para distintas viscosidades y aspas de turbina de formas diferentes

Arriba (A) Efecto de la viscosidad sobre rotores con aspas en ángulo recto
Abajo (B) Efecto de la viscosidad sobre rotores con aspas helicoidales

En general, los medidores pequeños ($DN < 50/2''$) se ven más afectados por la viscosidad y no alcanzan campos de valores de medida tan amplios como los grandes, incluso con fluidos poco viscosos como los aceites ligeros. Esto es porque los momentos de fuerza de retardo y del pivote son proporcionalmente superiores.

1.17.2. Modelos

La Figura 46 muestra, entre otras cosas, un transductor inductivo empleado para generar una señal eléctrica. Algunos diseños utilizan sensores de radiofrecuencia, que tienen la ventaja de que no producen arrastre en los caudales más bajos. En otros modelos, el giro del eje se transmite a un contador mecánico por medio de engranajes. Son los medidores de tipo molinete o Woltmann.

Estos modelos requieren un momento de fuerza considerable, lo cual provoca problemas de arranque y de comportamiento no lineal con caudales bajos. Los medidores domésticos de consumo de agua, por ejemplo, suelen presentar "deslizamientos de fluido" a caudales muy bajos, como los que origina un grifo que gotea. Algunos medidores Woltmann con el molinete montado en vertical presentan ciertas ventajas, entre las que se cuenta un menor efecto de los pivotes y del rozamiento y una sensibilidad reforzada, con lo que se consigue un campo de valores de medida más amplio. También contribuye a ello el efecto de la fuerza ascensional del fluido, que compensa en parte el peso del rotor y reduce su masa efectiva. La Figura 1.36 siguiente muestra dos modelos de este tipo. El primero se emplea para líquidos o gases, el segundo sólo para líquidos.

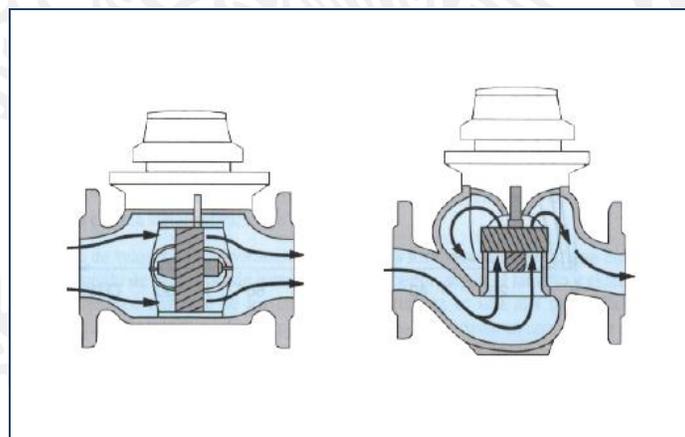


Figura 1.36 Ejemplo de medidores mecánicos Woltmann típicos

Los materiales habituales de fabricación son aceros austeníticos para el cuerpo, acero inoxidable para las bridas e interiores y materiales de larga duración como carburos de tungsteno o aceros pretensados para los pivotes. Para aplicaciones a altas presiones se dispone de bridas de alta tensión (PN > 1,500 bar/21.750 psi). Además, tanto el cuerpo como el resto de componentes pueden fabricarse de plástico resistente para aplicaciones en la industria química. No obstante, es evidente que cada material presenta una temperatura y una presión de trabajo límites. Por este motivo es aconsejable seguir en todos los casos el consejo del fabricante.

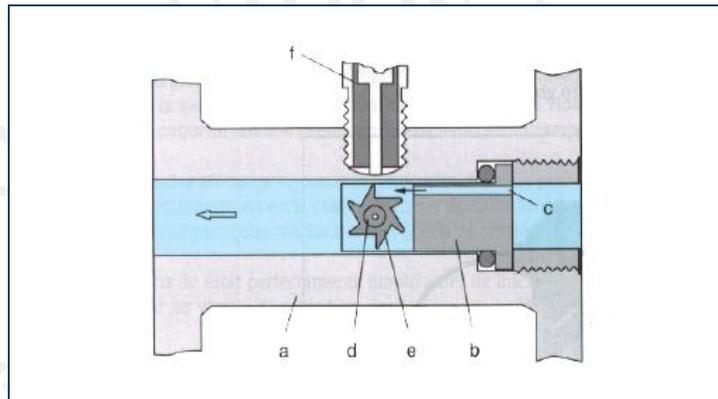


Figura 1.37 Modelo de medidor de caudal de tipo turbina para medición de caudales muy bajos

a=Cuerpo del caudalímetro, b= Adaptador intercambiable, c= Abertura para las mediciones
d= Pivote, e= Rotor de la turbina, f= Sensor de inducción

Para aplicaciones con caudales muy bajos, el fluido de entrada se hace pasar por una abertura estrecha para que aumente su velocidad (Figura 1.37). A la salida de la abertura, el chorro de fluido impacta sobre un pequeño rotor. Unos sensores magnéticos (o a veces ópticos) registran su movimiento. Estos modelos utilizan rotores ligeros montados sobre pivotes de piedras finas que ofrecen una resistencia de rozamiento mínima. La Figura anterior muestra un modelo con adaptadores de abertura intercambiables a la entrada. Los adaptadores se pueden cambiar y permiten cubrir diferentes campos de valores de medida del caudal con un mismo contador. Sin embargo, el comportamiento lineal y la repetibilidad de estos caudalímetros no es tan buena como en los medidores de turbina convencionales.

1.17.3. Ventajas

- Ofrecen una excelente repetibilidad a corto plazo.
- Algunos modelos presentan un amplio campo de valores de medida y un buen comportamiento lineal.
- Disponen de salida digital tanto para la cantidad total del caudal como para la velocidad del fluido.
- Hay modelos de diseño compacto para velocidades de caudal establecidas.
- Ofrecen alta exactitud en determinadas condiciones (de campo de valores de medida, de viscosidad).
- La temperatura y la presión no imponen virtualmente límites de usabilidad.
- Alta fidelidad y resultados positivos en aplicaciones de fluidos lubricantes.
- Permiten la medición con fluidos agresivos y fluidos no conductores, incluidos los gases.
- Pérdidas de carga bajas.
- Ofrecen una respuesta puntual excelente.

1.17.4. Desventajas

- Requieren tramos de entrada y de salida largos (20 veces el diámetro nominal para los tramos de entrada y 5 veces para los de salida, respectivamente).
- Los vórtices en el flujo les afectan fácilmente (esta situación se puede rectificar con acondicionadores de flujo).
- El desgaste de los pivotes (en general, por velocidades del fluido demasiado altas) causa desviaciones en la ejecución de estos caudalímetros y reduce su vida operativa.
- Los modelos de pequeño tamaño presentan limitaciones en su campo de valores de medida.
- Los fluidos pulsantes afectan a su correcto funcionamiento. En general, los valores dados por el caudalímetro en estos casos suelen ser demasiado altos.
- Si el fluido contiene partículas sólidas intrusas (caída de presión) es necesario un filtro aguas arriba.
- Todo el equipo ha de estar perfectamente limpio antes de iniciar los trabajos en el sistema (eliminar las virutas de soldadura, etc.).

1.18. Caudalímetros Vortex

1.18.1. Principio de medición

Este principio de medición se basa en el hecho de que corriente abajo de un obstáculo se forman vórtices en el fluido, tanto en una tubería cerrada como en un canal abierto. Es posible observar este fenómeno, por ejemplo, en los vórtices ("zona de turbulencia") que se forman corriente abajo del pilar de un puente (Figura 1.38

). La frecuencia de desprendimiento de los vórtices a cada lado del pilar (cuerpo sólido) es proporcional a la velocidad media de circulación del fluido y, por lo tanto, al caudal volumétrico. Ya en 1513, Leonardo da Vinci describió la formación y el desprendimiento de vórtices estacionarios detrás de un obstáculo en una corriente de fluido.

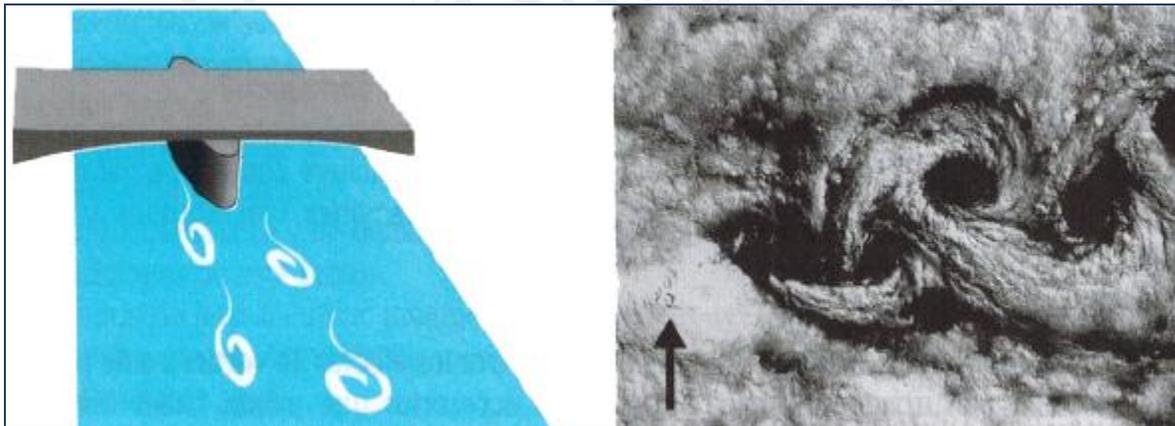


Figura 1.38 Izquierda, desprendimiento de vórtices detrás de un pilar de puente, derecha, foto satelital donde se aprecian los vórtices formados por las nubes por el efecto del pico de una montaña

En 1878, Strouhal estudiaba una descripción científica de los vórtices que se formaban detrás de los obstáculos sólidos. Sus estudios revelaron que un cable tensado de través en un chorro de aire oscilará. Encontró que la frecuencia de esta oscilación es proporcional a la velocidad del chorro de aire. Podemos observar este fenómeno en nuestro propio coche o casa: el silbido que produce el viento al pasar por alguna rendija se debe al desprendimiento de vórtices, y aumenta o disminuye según cambia la velocidad. Este fenómeno se denomina "tono eólico".

El número de Strouhal empleado en este contexto describe la relación entre la frecuencia de desprendimiento de vórtices, la velocidad del fluido y el diámetro del cuerpo sólido (Figura 1.39).

$$S_t = \frac{f \cdot d}{v}$$

S_t	Número de Strouhal	v	Velocidad del fluido
f	Frecuencia de desprendimiento de vórtices	d	Diámetro del cuerpo sólido

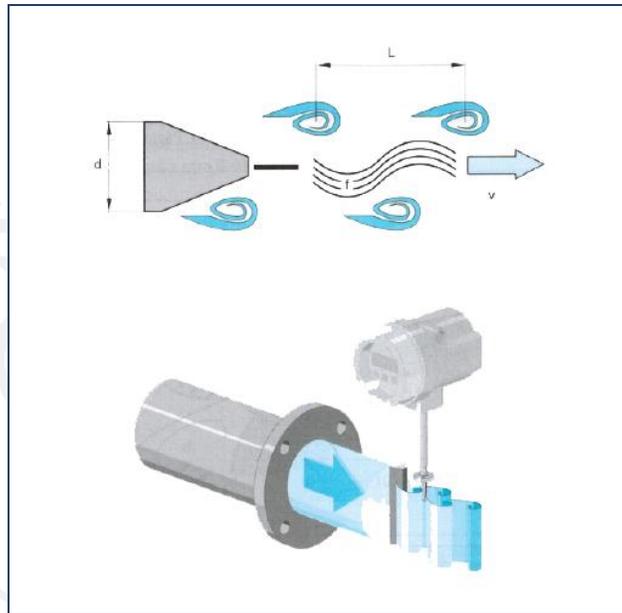


Figura 1.39 Principio de Medición de los caudalímetros vortex

El físico Theodore von Kármán asentó las bases teóricas para la medición de caudales con caudalímetros Vortex en 1912, cuando describió lo que se ha venido en llamar "zona de turbulencia". Su análisis de la doble hilera de vórtices formados detrás de un cuerpo sólido en un flujo de fluido revelaba una relación fija entre la distancia transversal (d) de separación de las dos hileras y la distancia longitudinal (L) de separación entre vórtices en una misma hilera. Si, por ejemplo, el obstáculo es cilíndrico, esta relación es de 0.281. Así, para un diámetro de tubería uniforme, el volumen de cada remolino es constante. Si admitimos que los vórtices son del mismo tamaño independientemente de las diferentes condiciones de ejecución, entonces el recuento del número de vórtices por unidad de tiempo nos da directamente una estimación del caudal.

1.18.2. Formación de vórtices y geometría del cuerpo sólido

El fluido alcanza su velocidad máxima en la parte más ancha del cuerpo sólido; a partir de ese punto pierde parte de su velocidad. El flujo intenta desprenderse del contorno del cuerpo (a), en lugar de bordearlo. Más allá del punto (a) la presión disminuye y se producen reflujos, y en última instancia, vórtices (b). Estos vórtices se desprenden alternativamente por cada lado del cuerpo sólido y son transportados por el fluido

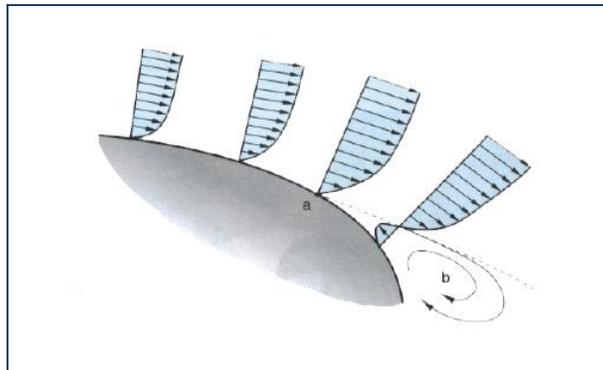


Figura 1.40 Formación y desprendimiento de vórtices

Los obstáculos sólidos de los caudalímetros Vortex varían según el fabricante. Los hay de forma rectangular, triangular, esférica, en delta o en formas más específicas, correspondientes a los diversos modelos patentados. En cada modelo, el número de Strouhal se debe mantener constante para todo el campo de valores de medida; en otras palabras, para todo este campo de valores de medida, la frecuencia de desprendimiento de vórtices ha de ser independiente de la presión, la temperatura y la densidad. En este campo de valores de medida con número de Strouhal constante ($Re > 20.000$) trabajan los caudalímetros Vortex (Figura siguiente).

Los obstáculos sólidos en forma de delta presentan un comportamiento lineal casi ideal y han demostrado ser particularmente fiables. Los ingenieros de la NASA han sometido este modelo de cuerpo sólido a estudios exhaustivos. La exactitud de la medición con esta geometría puede llegar a ser de $\pm 1\%$, y su reproducibilidad se sitúa en torno al 0.2% .

Las características de los caudalímetros Vortex se suelen definir en términos del "parámetro K". Este parámetro representa el número de vórtices que se detectan por unidad de tiempo (impulsos por unidad de volumen). El fabricante obtiene dicho parámetro K durante el proceso de calibración del aparato e incluye esta información en la placa de características del instrumento. Este parámetro depende de la geometría del cuerpo sólido y del tamaño de la tubería.

En un caudalímetro Vortex (DN 50/2") cuyo parámetro K es 10 impulsos por litro, cada impulso corresponde a un volumen de 0.1 litros, independientemente de que el fluido sea agua, vapor o cualquier otro fluido.

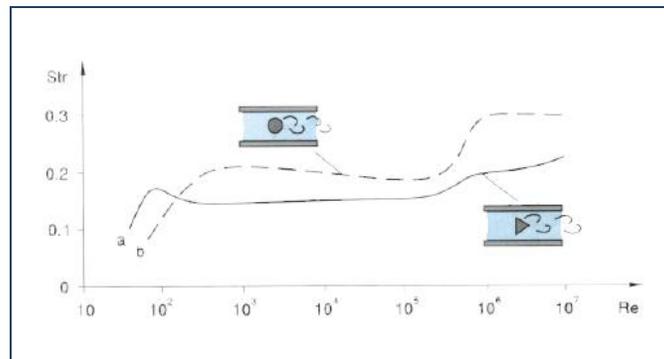


Figura 1.41 Número de Strouhal para diversos obstáculos en función del número de Reynolds

1.18.3. Modelos de sensores

Los caudalímetros Vortex constan de diversos componentes, que incluyen el tubo de medición, el cuerpo sólido, el sensor, el preamplificador y la electrónica del contador (Figura siguiente). En la mayoría de medidores, los sensores no tienen partes móviles, por lo que no se desgastan ni se requiere ningún tipo de mantenimiento.

Los dos caudalímetros Vortex más comunes son los de brida y los que no son de brida. Estos últimos se conocen como medidores para instalación entre bridas (modelo "sandwich" o "wafer") y están diseñados para ser instalados entre dos bridas de tubería. Algunos modelos para instalación entre bridas tienen una longitud total estandarizada de 65 mm (2.5"), lo cual les permite sustituir directamente grupos de disco de diafragma completos.

El campo de valores de medida estándar disponible en el mercado abarca diámetros nominales desde DN 15 hasta 300 (desde 1/2 hasta 12"), y algunas versiones alcanzan hasta DN 400 (16"). Los rangos para la presión pueden llegar hasta PN 250 (ANSI Clase 2500). Las frecuencias de desprendimiento de vórtices para diámetros nominales superiores a DN 300 (12") son muy bajas y requieren un cierto tratamiento de la señal para conseguir una señal estable. Para aplicaciones con diámetros grandes, los caudalímetros Vortex son relativamente caros en comparación con los de disco de diafragma.

Muchos fabricantes ofrecen también modelos para temperaturas muy altas o muy bajas (de -200 a +400 °C / de -330 a +750 °F).

Los dispositivos con dos sensores y electrónicas independientes constituyen un caso especial (Figura siguiente). Este modelo se emplea principalmente en aplicaciones en que las mediciones redundantes se consideran importantes.



Figura 1.42 Caudalímetros Vortex

1.18.4. Sensores para la medición

Para medir la fluctuaciones locales de la presión en el caudal originadas por los vórtices generados en el cuerpo sólido y convertirlas en señales eléctricas existen varios tipos de sensores. Cada fabricante recomienda su tipo de sensor favorito de entre la amplia gama de los que existen, que incluyen sensores de tipo capacitivo, piezo-resistivo, por ultrasonidos, termistores, mecánicos y de presión y tensiones. En la mayoría de casos, el sensor está integrado en el mismo cuerpo sólido o bien se sitúa inmediatamente detrás. Hoy en día, la mayoría de sensores hoy miden el desprendimiento de vórtices con sensores de tipo capacitivo o piezo-eléctrico.

1.18.5. Sensores DSC (differential switched capacitor)

Los sensores DSC (conmutadores de capacitancia diferencial) consisten en un sensor en forma de pala que penetra en el interior del cuerpo sólido (Figura 43). Esta pala (a) transmite las fluctuaciones de presión debidas a los vórtices a un electrodo central en forma de manguito (c) que junto con el electrodo externo (d), conforman los condensadores C1 y C2 semilaminares. Una variación en la amplitud de separación de las dos láminas provoca una variación de la capacitancia proporcional a la presión diferencial originada por el vórtice, que cambia periódicamente y es procesada por la electrónica del contador. Estos sistemas de medición son altamente insensibles a las vibraciones de la tubería por el hecho de hallarse el sensor en equilibrio mecánico.

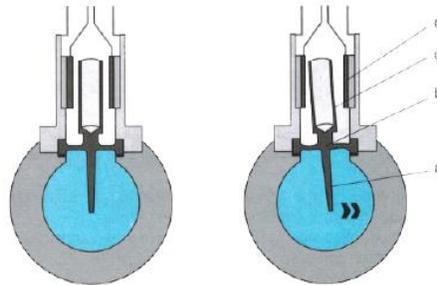


Figura 1.43 Diseño de un sensor DSC a= Pala del sensor, b= Punto focal del sistema sensor c= Electrodo central, d= Electrodo externo

A continuación mencionamos las principales ventajas de los sensores DSC:

Son resistentes a las variaciones extremas de temperatura, por ejemplo, en las aplicaciones de criogenia o en sistemas de tratamiento de vapor. Los sensores DSC de acero inoxidable no tienen partes móviles ni componentes excesivamente sensibles, por lo que resultan extremadamente robustos.

Son resistentes ante las ráfagas de flujos pulsantes, por ejemplo, en sistemas de vapor.

Son insensibles a las vibraciones de la tubería. Las aceleraciones debidas a las vibraciones no tienen efecto sobre la distancia entre el electrodo central y los electrodos exteriores. La pala del sensor y el electrodo central se hallan en equilibrio relativo y las fuerzas de aceleración debidas a las vibraciones actúan siempre sobre el centro de gravedad del sistema sensor, por lo que las vibraciones no generan señales adicionales.

Son bastante insensibles a la presencia de cuerpos extraños, porque el sensor DSC está montado libremente en el tubo de medición. En el peor de los casos, las deposiciones sobre la propia pala del sensor podrían provocar una ligera reducción (turndown) del campo de los valores de medida, pero no afectarían a la exactitud de la medición.

1.18.6. Ventajas:

- Son de aplicación universal para medición de caudales volumétricos de vapor, líquidos y gases.
- Resultan prácticamente insensibles a los cambios de presión, temperatura y viscosidad.
- Su instalación es simple.
- Ofrecen un amplio rango de diámetros nominales, de DN 15 (1/2") a 300 (12"); y hasta DN 450 (18') a petición.

- Presentan un campo reducido grande, típicamente de 1:10 a 1:30 para gases/vapor o 1:40 para líquidos.
- Las pérdidas de carga son bajas (típicamente 30 mbar).
- Sin partes móviles.
- Amplio rango de temperaturas: -200 a +400 °C (-330 a +750 °F).
- El comportamiento lineal de la frecuencia es independiente de las condiciones de la aplicación y del fluido.
- Presentan una alta estabilidad a largo plazo (su parámetro K se mantiene durante toda la vida útil), no experimentan desviaciones del punto cero.
- La exactitud de medición puede alcanzar valores tan buenos como $\pm 0.75\%$ con líquidos ($Re > 20.000$).
- Su reproducibilidad está entre el 0.2 y el 0.3%.

1.18.7. Desventajas

- Los flujos pulsantes y los vórtices afectan negativamente a la exactitud de la medición.
- Según el tipo de accesorio que pueda haber corriente arriba, se necesitan tramos de entrada y de salida largos.
- No sirven para fluidos altamente viscosos.
- No pueden medir velocidades del fluido demasiado bajas ($Re < 4.000$).

1.19. Caudalímetros electromagnéticos

1.19.1. Principio de medición

Los caudalímetros electromagnéticos (medidores magnéticos) existen desde aproximadamente 1939. El clérigo e inventor suizo Padre Bonaventura Thüriemann (1909-1997) fue un pionero en el uso industrial de este principio de medición.

El fenómeno físico en el que esta técnica se basa se conoce, sin embargo, desde mucho antes. El físico inglés Michael Faraday (1791-1867) se percató de que al mover una barra metálica conductora de longitud (L) con velocidad (v) en el seno de un campo magnético (B), se induce una corriente eléctrica que genera entre los dos extremos de la barra una tensión (U_e) de algunos mili volts (Figura siguiente). Faraday también descubrió que la magnitud de la tensión inducida de este modo es directamente proporcional a la velocidad (v) de movimiento y a la intensidad (B) del campo magnético.

$$U_e = B \cdot L \cdot v$$

- U_e Tensión inducida
- B Intensidad del campo magnético
- L Longitud del conductor eléctrico (corresponde a la distancia entre los electrodos en el tubo de medición)
- V Velocidad de movimiento del conductor (corresponde a la velocidad del fluido en el tubo de medición)

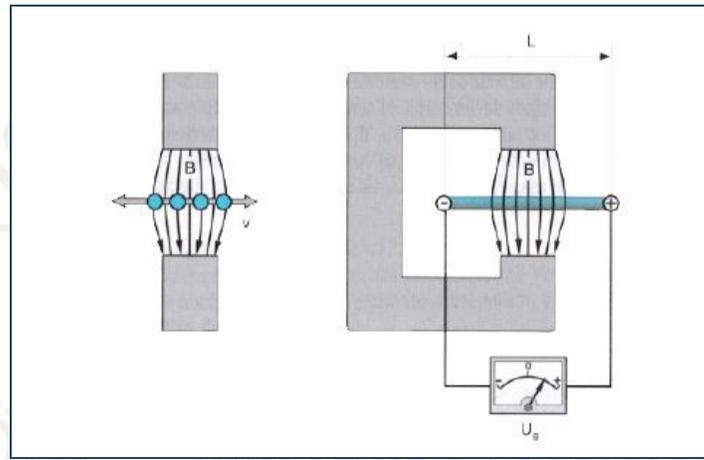


Figura 1.44 Principio de inducción electromagnética

En un caudalímetro magnético (Figura siguiente), el fluido conductor que circula por el interior del tubo de medición corresponde a la barra metálica del experimento de Faraday. Dos bobinas situadas a ambos lados del tubo de medición generan un campo magnético de intensidad constante. Dos electrodos en la pared interior de la tubería detectan la tensión inducida por el fluido en movimiento al circular en el seno del campo magnético. El tubo de medición está eléctricamente aislado del fluido y del electrodo por un revestimiento no conductor (por ejemplo, goma, teflón, etc.).

Dado un campo magnético de intensidad constante (B), la ecuación anterior muestra que la tensión de medición inducida (U_e) es directamente proporcional a la velocidad del fluido (v). Por otra parte, la sección transversal de la tubería (A) es un parámetro conocido, de modo que el caudal volumétrico (Q_v) se calcula directamente a partir de la expresión siguiente:

$$Q_v = v \cdot A = \frac{U_e}{B \cdot L} \cdot A$$

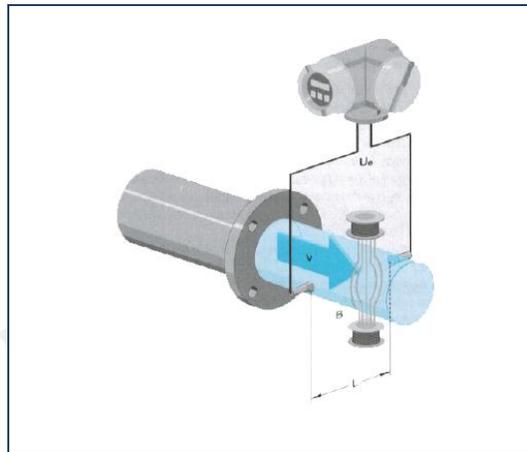


Figura 1.45 Principio de medición electromagnética de caudal

1.19.2. Tubo de medición (a)

En términos físicos, es importante que el tubo de medición no amortigüe ni distorsione el campo magnético. Evidentemente, pues, no vamos a elegir tuberías electromagnéticas. Los materiales empleados con más frecuencia son el acero inoxidable y el plástico.

1.19.3. Revestimiento (b)

El revestimiento es el aislante necesario entre los electrodos y el tubo de medición, que impide que la tensión inducida se descargue por la tubería. También es importante tener en cuenta las propiedades físicas y químicas de resistencia del revestimiento al fluido. El poliuretano, la goma dura y el PFA/PTFE (por ejemplo, teflón) están entre los materiales de uso más habitual.

1.19.4. Sistema de bobinas (c)

El campo magnético está generado por dos bobinas de hilo de cobre con núcleo magnético montadas fuera del tubo de medición. Los sistemas de excitación pueden ser indistintamente de CC y de CA.

1.19.5. Electrodo (d1 - d3)

Además de los electrodos de medición habituales, algunos fabricantes ofrecen tipos de electrodos especiales:

- Electrodo de medición (d1) para la detección de tensión inducida. Las condiciones de proceso imponen el material de fabricación del electrodo, que puede ser de acero inoxidable, hastelloy, tantalio o platino/rhodio. Electrodo capacitivo
- Electrodo de referencia o tierra (d2) para unión equipotencial entre el caudalímetro y el fluido. Para el mismo propósito se pueden instalar también discos (anillos) de toma de tierra independientes.

- Electrodo de detección de tubería vacía (d_3) para detectar si el tubo de medición se halla vacío o parcialmente lleno. El transmisor dispara una alarma si el electrodo queda descubierto.

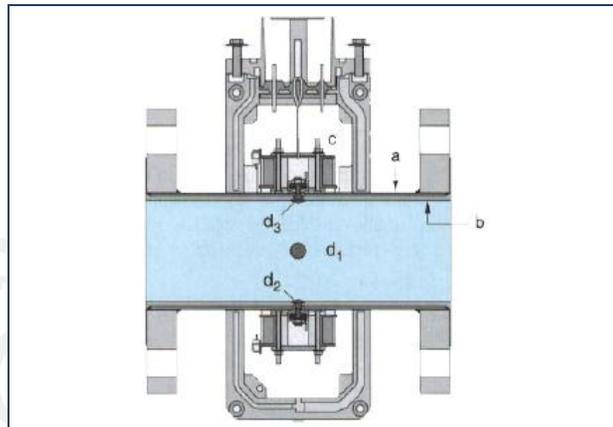


Figura 1.46 Diseño de un medidor electromagnético

En la práctica, la señal detectada en los electrodos proviene de diversas fuentes de tensión que interfieren con la tensión inducida y que es necesario filtrar antes de su procesamiento. Las fuentes de interferencia típicas incluyen el campo magnético terrestre, cargas eléctricas en la pared interior de la tubería y en el fluido y de efectos galvánicos superficiales entre los electrodos y el fluido.

La ventaja principal de este principio de medición es que es insensible a la presión, la temperatura y la viscosidad. El perfil de velocidades del flujo tiene un efecto mínimo en el resultado de la medición. Estas propiedades hacen a los caudalímetros magnéticos extremadamente atractivos para un amplio abanico de aplicaciones de medición de caudales. En realidad, este principio de medición se emplea en todo el mundo.

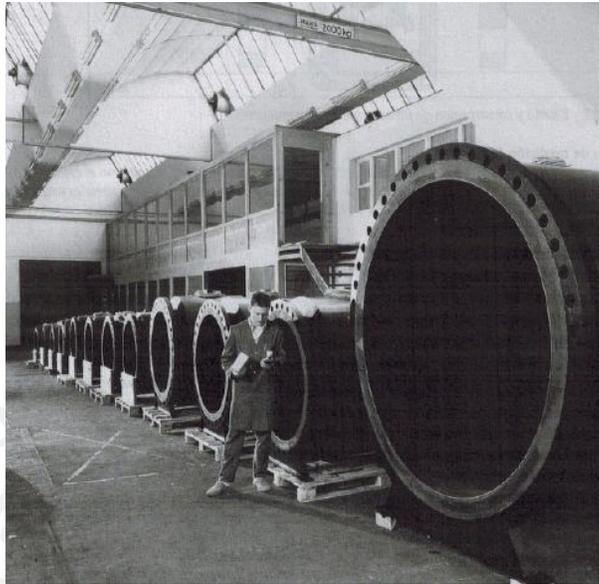


Figura 1.47 Caudalímetros electromagnéticos fabricados en diferentes diámetros

1.19.6. Ventajas y desventajas

Los caudalímetros basados en este principio se emplean en todos los ámbitos de la industria y en todos los países del mundo. La gran diversidad de modelos permite su aplicación incluso en procesos altamente corrosivos que involucren lodos abrasivos. Las posibles limitaciones de presión y temperatura que puedan presentar se deben fundamentalmente a las propiedades del material de revestimiento o a las características particulares de algunos modelos de caudalímetro específicos.

1.19.7. Ventajas:

- El principio de medición en que están basados es virtualmente independiente de la presión, la temperatura y la viscosidad.
- Permiten mediciones incluso en presencia de partículas sólidas (p. ej., lodos).
- Disponen de un amplio rango de diámetros nominales: DN 2 (1/12") hasta 3,000 (120").
- Tubo de medición de instalación longitudinal sin partes móviles.
- No experimenta pérdidas de carga
- No requiere estrangulamientos en la sección transversal de la tubería (de fácil limpieza - CIP- y esterilización -SIP-, apto para limpieza con cepillo).
- Alto grado de fiabilidad y reproducibilidad de medición, buena estabilidad a largo plazo.
- Gasto mínimo en mantenimiento y renovación.

1.19.8. Desventajas

- Sólo funciona con líquidos conductores.
- Las mediciones son menos exactas y más difíciles con líquidos poco conductores, por ejemplo, con agua desmineralizada.
- Las deposiciones en el interior del tubo de medición o en los electrodos pueden generar errores.

1.20. Caudalímetros ultrasónicos

El ámbito de la medición por ultrasonidos abarca muchos modelos y tipos de caudalímetros muy distintos. El término "ultrasónicos" no es una característica inequívoca de un tipo de caudalímetros. "Ultrasónicos" indica solamente que la velocidad del caudal se mide por medio de ultrasonidos. El caudal se mide en realidad por alguno de los dos métodos siguientes:

- El método por efecto Doppler
- El método por tiempo de tránsito de señal

1.20.1. El método del efecto Doppler

Un caudalímetro de efecto Doppler se sirve del efecto Doppler (conocido también como corrimiento Doppler) para medir caudales. Este fenómeno físico nos resulta familiar porque pertenece al ámbito de nuestra experiencia cotidiana. Es el efecto que se produce cuando un frente de ondas se refleja en un objeto en movimiento. La frecuencia de las señales acústicas de, digamos, una ambulancia que se aproxima a nosotros se reduce sensiblemente una vez que nos ha sobrepasado. El efecto Doppler es, pues, un incremento o una disminución) de la frecuencia de las ondas sonoras a medida que la distancia entre una fuente sonora y un receptor aumenta o disminuye.

Una condición previa para que el caudalímetro de efecto Doppler funcione es que el fluido contenga partículas, burbujas de gas u otras inhomogeneidades similares, que reflejen las ondas de sonido. Con este propósito, un caudalímetro de efecto Doppler requiere dos sensores. El primero emite por el fluido una onda de ultrasonidos a una frecuencia determinada y el segundo recibe la onda reflejada (Figura 1.48).

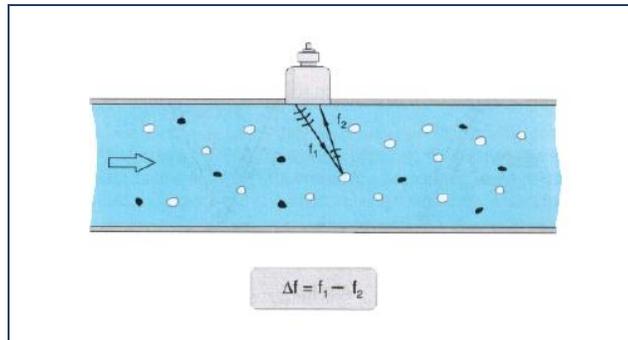


Figura 1.48 Medición de caudal por efecto Doppler con ultrasonido

La variación producida en la frecuencia del haz de ondas sonoras reflejadas es directamente proporcional a la velocidad de las partículas o burbujas del flujo en movimiento. Se asume que la velocidad de las partículas o burbujas de gas es la misma que la velocidad del fluido. Entonces, el cálculo del caudal viene dado por la expresión siguiente:

$$Q = K \cdot \Delta f$$

- Δf Variación de la frecuencia ($f_1 - f_2$)
 K Constante = f (ángulo de incidencia/reflexión, posición de la partícula reflejante, sección transversal)

El método del efecto Doppler es simple y bastante exacto cuando se mide la velocidad de una sola partícula. Pensemos en un agente de la policía de tráfico con su radar que circula por la carretera. Cada vez puede determinar la velocidad de un único vehículo, pero no puede medir la velocidad promedio del flujo de tráfico.

La situación es parecida en el caso de querer medir un caudal de fluido. En este caso también es necesario medir la velocidad de muchas partículas. Pero la velocidad de cada partícula es distinta según su orientación y su posición en el perfil de velocidades del fluido. Calcular el caudal exige hacer un promedio ponderado de los resultados de cada medición en función de la posición de cada partícula en el fluido. Además, hay que tener en cuenta que una señal reflejada puede verse afectada por más partículas/burbujas en su camino de vuelta.

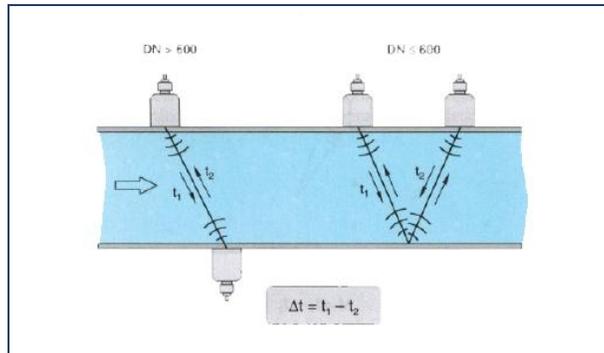


Figura 1.49 Medición de caudal por ultrasonido a través de tiempo de tránsito

1.20.2. Método del tiempo de tránsito de la señal

Este método se basa en el hecho de que la velocidad del fluido influye directamente en la velocidad de propagación de las ondas sonoras en dicho fluido. Este fenómeno se puede entender en términos sencillos a partir de una analogía: nadar contra corriente requiere más esfuerzo y tiempo que nadar en el sentido de la corriente. El método de medición de caudales por ultrasonidos a partir del tiempo de tránsito de la señal se basa en esta evidencia física (Figura anterior).

Dos sensores instalados en la tubería emiten y reciben impulsos de ultrasonidos simultáneamente. A "caudal cero", ambos sensores reciben las ondas sonoras transmitidas al mismo tiempo, es decir, sin ningún retardo en los tiempos de tránsito de la señal. Pero con un fluido en circulación, las ondas sonoras procedentes de cada sensor necesitan intervalos de tiempo distintos (dependencia en el caudal) para llegar al otro sensor. Si la distancia entre los dos sensores es conocida, la diferencia en los tiempos de tránsito de la señal es directamente proporcional a la velocidad del fluido. Ambos sensores están conectados a un transmisor. El transmisor induce a los sensores a generar ondas sonoras y medir el tiempo de tránsito de estas ondas que se propagan de uno a otro sensor.

$$Q = K \cdot \frac{t_1 - t_2}{t_1 \cdot t_2}$$

- t_1 Tiempo de tránsito de la señal t_1 (en el sentido de la corriente)
- t_2 Tiempo de tránsito de la señal t_2 (contra corriente)
- K $K =$ Constante = f (longitud del camino acústico, razón entre las distancias radiales y axiales de los sensores, distribución de velocidades (perfil de velocidades de flujo), sección transversal)

1.20.3. Tipos de sensores / Diseños

Actualmente disponemos de varios tipos de sensores de ultrasonidos, que permiten su instalación directamente en la tubería o que pueden venir ya preinstalados en un tubo de medición. Distinguimos dos subgrupos de este tipo de sensores, según se empleen con el método del efecto Doppler o con el método de tiempo de tránsito de la señal:

- Los sensores de fijación externa, tipo "clamp-on"
- Los sensores de inserción

1.20.4. Sensores de fijación externa, tipo "clamp-on"

Las ondas sonoras pueden atravesar la materia sin causarle efectos perjudiciales. Gracias a esta propiedad, las ondas sonoras resultan de gran utilidad para aplicaciones en diagnósticos médicos, en pruebas de resistencia de materiales y en medición de caudales.

En lo que concierne a la medición de caudales, dicha propiedad permite que el sensor pueda hallarse en el exterior de la tubería y no tenga que estar necesariamente en contacto con el fluido. Nos referimos normalmente a los dispositivos montados de esta manera como sensores de fijación externa (Figura siguiente). Una característica de los sensores de fijación externa es que las ondas ultrasónicas siempre atraviesan todo el diámetro central de la tubería porque la pared de la tubería permite el paso de las ondas ultrasónicas.

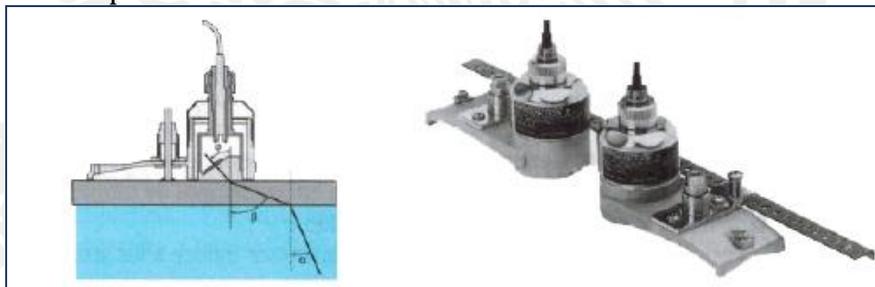


Figura 1.50 Sensores de Fijación externa, se fijan directamente en el exterior de la tubería

1.20.5. Sensores de inserción

Los sensores que se hallan en contacto directo con el fluido se conocen como "sensores de inserción o de inmersión". Los sensores de inserción se emplean cuando la tubería está hecha de materiales como el hormigón granular, que no dejan pasar las ondas sonoras. También se emplean en caudalímetros con sistema por tiempo de tránsito de la señal multicamino, es decir, que miden caminos acústicos distintos del que pasa por el plano medio de la tubería. Un ejemplo de ello son los sistemas de camino acústico dual (Figura siguiente).

Los sistemas multicamino ofrecen un mejor comportamiento lineal y son menos susceptibles a las perturbaciones en el perfil de velocidades de flujo.

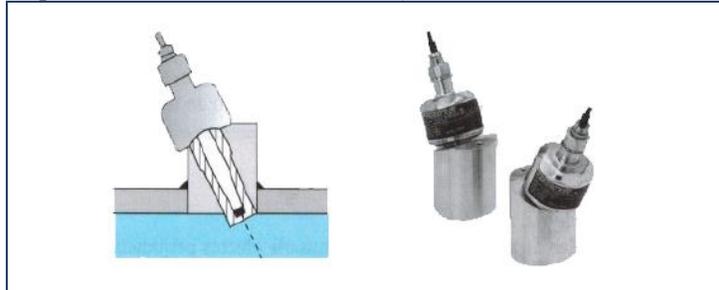


Figura 1.51 Los sensores de inserción están inmersos en el fluido

1.20.6. Tubo de medición/sensor en línea

Los sensores de ultrasonidos pueden sujetarse directamente a la tubería (sensores de fijación externa) o bien pueden ir soldados a la pared de la tubería (sensores de inserción). Así, los tubos de medición prefabricados no resultan imprescindible para los caudalímetros de ultrasonidos. Un tubo de medición actúa básicamente como soporte para los sensores.

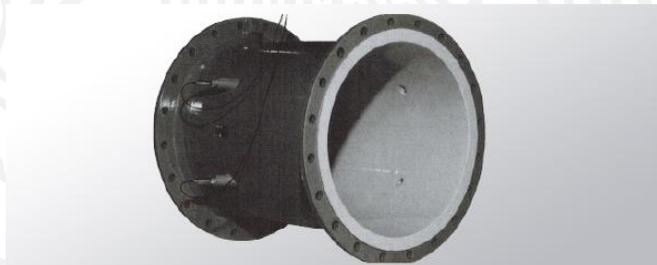


Figura 1.52 Tubo de medición prefabricado

Los tubos de medición prefabricados (Figura anterior) resultan ideales para trasladar exactitudes de medición determinadas en el laboratorio directamente al lugar de ejecución. Un sensor en línea consiste en un tubo de medición prefabricado completo con sensores de inserción preinstalados. Las configuraciones de este tipo suelen emplear sensores en línea con un sistema multicamino que consta de dos, tres o cinco pares de sensores.

1.20.7. Ventajas

- Se pueden emplear con diámetros nominales muy pequeños (DN desde 15 hasta 4,000 / desde 1/2 hasta 160”).
- Permiten medir fluidos muy corrosivos sin que haya contacto directo.
- No experimentan pérdidas de carga
- Esperanza de vida útil alta.
- Constante de tiempo mínima: 1 a 20 ms para caudalímetros de alto nivel.
- El principio de medición es independiente de las propiedades físicas del fluido, si éste es homogéneo

1.20.8. Desventajas

- Los resultados de la medición son altamente dependientes del perfil de velocidades del flujo porque la velocidad del fluido se mide a lo largo de un estrecho camino acústico, o pequeña zona en que se lleva a cabo la medición.
- Grado de exactitud intermedio a bajo. La exactitud es fuertemente dependiente de las propiedades de propagación de las ondas sonoras del fluido.
- Las deposiciones en la tubería o en el sensor provocan fallos del equipo y errores de medición.
- El método de medición por efecto Doppler sirve sólo para algunos tipos de aplicaciones, por ejemplo, el control de caudales.

1.20.9. Limitaciones:

- Grandes cantidades de materia intrusa en el fluido.
- Campo de valores de temperaturas del fluido.
- Perfiles de velocidades de flujo excesivamente perturbados

1.21. Caudalímetros másicos Coriolis

En muchos ámbitos de la industria es más interesante medir caudales másicos que caudales volumétricos. En algunos procesos de la industria alimentaria, por ejemplo, productos como las pastas, las pulpas o el yogur se suelen envasar por peso, y no por volumen. Por este motivo, en las etiquetas de los envases de estos productos se informa al consumidor del peso del producto en lugar de su volumen. El motivo de ello es que el volumen de la mayoría de líquidos puede variar notablemente por influencia de las condiciones físicas de presión, temperatura y densidad.

Por el contrario, la masa de un fluido no se ve afectada por estas influencias de modo que la medición del caudal másico presenta algunas ventajas que el caudal volumétrico simplemente no puede ofrecer. Este es un aspecto de particular importancia en el recuento de caudales para el envasado y la facturación.

El modo habitual de determinar la masa de un cuerpo es pesarlo. Pero desde el punto de vista de la ingeniería surgen grandes dificultades cuando se intenta pesar directamente una masa que fluye de manera continua por un sistema de tuberías. Sin embargo, en las últimas décadas ha aparecido un principio de medición que posibilita medir de forma directa y continúa caudales másicos en tuberías, a saber: la medición de caudales másicos por principio Coriolis. En algunas aplicaciones es más razonable aplicar este principio que determinar la masa por métodos indirectos a partir de la medición del caudal volumétrico y la densidad (volumen x densidad = masa).

1.21.1. Principio de medición

La primera descripción de este principio se atribuye comúnmente al físico y matemático francés por cuyo nombre se conoce: Gaspar Gustave de Coriolis (1792-1843). El efecto ocurre solamente en sistemas en rotación, por ejemplo en la superficie en rotación de nuestro propio planeta; pero no debe confundirse con la fuerza centrífuga. Aunque el uso del término "fuerza de Coriolis" está muy difundido, la descripción de dicha fuerza suele ser complicada, y mucho su explicación. Esta fuerza aparece cuando en un sistema se superponen movimientos en línea recta y movimientos rotativos.

En la Figura siguiente se ilustra un ejemplo práctico, una persona quieta sobre una plataforma circular giratoria a medio camino entre el centro y el borde sólo tiene que tumbar su peso ligeramente hacia adentro para contrarrestar la fuerza centrífuga (izquierda). Sin embargo, si la persona se desplaza desde el centro hacia el borde de la plataforma giratoria, a medida que avanza percibe un aumento de la velocidad de giro y aparece la fuerza de Coriolis como reacción a las fuerzas de inercia. La fuerza de Coriolis tiende a desviar la persona de la trayectoria más corta sobre la plataforma giratoria (es decir, la línea recta sobre el radio de la plataforma circular). Cuanto mayor sea la velocidad de giro de la plataforma, mayor el peso de la persona y mayor su velocidad de desplazamiento hacia el borde de la plataforma circular (su "caudal másico"), mayor será el efecto de la inercia y mayor se percibirá el efecto de la fuerza de Coriolis.

En términos matemáticos, el valor de la fuerza de Coriolis (F_c) es directamente proporcional a la masa en movimiento (\dot{m}), a la velocidad angular de rotación (ω) y a la velocidad radial (v_r) en el sistema en rotación:

$$F_c = 2 \cdot \dot{m} \cdot \omega \cdot v_r$$

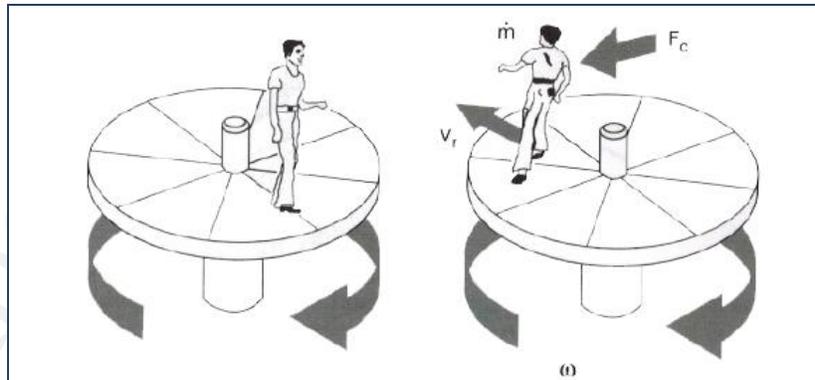


Figura 1.53 Causa y efecto de la fuerza de Coriolis en una plataforma circular giratoria

En un caudalímetro de caudal másico de efecto Coriolis, cada partícula individual de masa se halla sometida a la misma influencia que el cuerpo de la persona en la plataforma giratoria que vemos en la ilustración anterior (Figura siguiente). El movimiento de giro que origina la fuerza de Coriolis en la descripción anterior se sustituye en el caudalímetro por un movimiento de oscilación del tubo de medición en su frecuencia de resonancia.

- A caudal cero, cuando el fluido está en reposo, no hay movimiento lineal (a). Por lo tanto, no se observan fuerzas de Coriolis.
- Por el contrario, cuando la masa de fluido circula, el movimiento inducido por la oscilación (equivalente a una rotación) del tubo de medición se superpone al movimiento lineal del fluido en circulación, los efectos de la fuerza de Coriolis "retuercen" los tubos de medición (b, c), y los sensores (A, B) a la entrada y a la salida registran una diferencia de tiempos en este movimiento, es decir, una diferencia de fase. Cuanto mayor sea el caudal másico, mayor será la diferencia de fase (Figura siguiente).

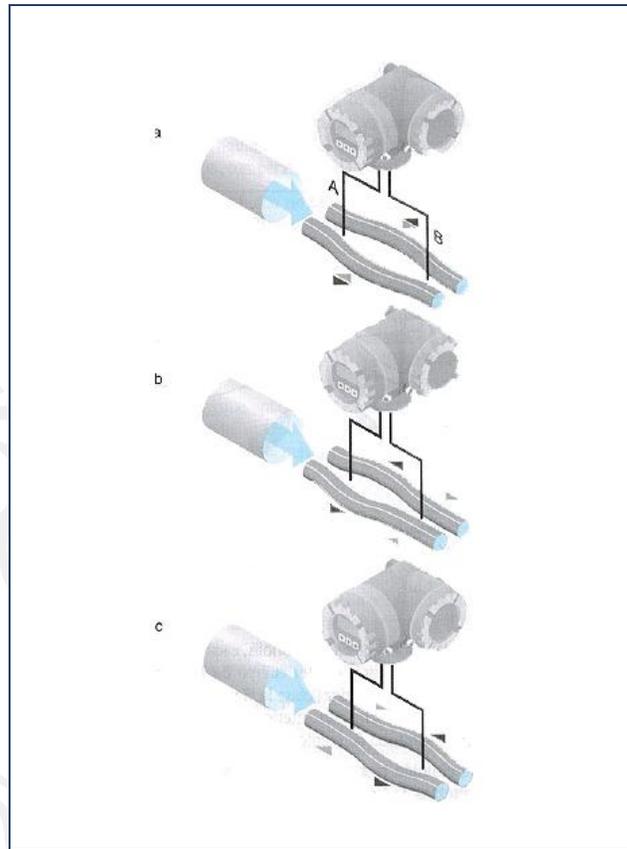


Figura 1.54 80 Principio de medición de Coriolis

a= Caudal cero, estado de oscilación de los tubos de medición a caudal cero

b= Circulación del caudal, estado de oscilación de los tubos de medición en el intervalo y tiempo 1

c= Circulación del caudal, estado de oscilación de los tubos de medición en el intervalo y tiempo 2

Cuando el fluido circula, las partículas de masa se mueven a lo largo del tubo de medición y están sometidas a una aceleración lateral sobrepuesta debida a las fuerzas de Coriolis (F_c).

A la entrada del tubo, las partículas de masa (m) experimentan un desplazamiento que las aleja del centro de rotación (Z_1), y regresan de nuevo al centro (Z_2) a medida que se aproximan al extremo de salida. Las fuerzas de Coriolis actúan en sentidos opuestos a la entrada ya la salida y el tubo de medición empieza a "torcerse". Este cambio de geometría en la oscilación inducida en el tubo de medición se registra en los sensores (A, B) a cada extremo del tubo como una diferencia de fase. Esta diferencia de fase ($\Delta\omega$) es directamente proporcional a la masa del fluido y la velocidad de circulación (v) del mismo; por lo tanto también al caudal másico.

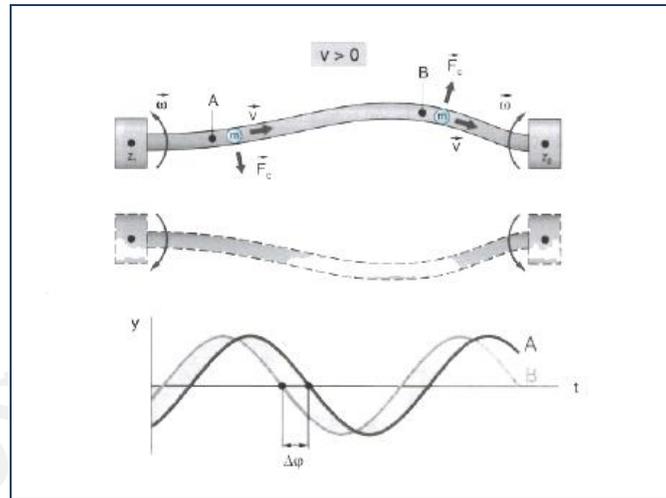


Figura 1.55 Fuerza de Coriolis y geometría de la oscilación en los tubos de medición

Un aspecto importante al aplicar los caudalímetros de efecto Coriolis es la posible presencia de influencias externas, como por ejemplo vibraciones de la tubería. Las vibraciones en los sistemas de tuberías suelen tener frecuencias de vibración entre 50 y 150 Hz. Por otra parte, las frecuencias de resonancia típicas de los caudalímetros de efecto Coriolis de E+H están entre 600 y 1,000 Hz; estos caudalímetros son, por lo tanto, inmunes a las vibraciones inducidas en el sistema de esta naturaleza. Además, por el mismo motivo, estos dispositivos de medición no necesitan ningún tipo de montaje especial inhibidor de vibraciones.

El campo de valores de los diámetros nominales habituales disponibles va desde DN 1 hasta 300 (1/24 hasta 12"). Sin embargo, en la práctica podemos hallar desde dosificadores de cantidades muy pequeñas en aplicaciones farmacéuticas hasta aplicaciones de carga y descarga de navíos mercantes. La elección de los modelos es correspondientemente amplia.

1.21.2. Ventajas

- Principio de aplicación universal para medir caudales de líquidos y gases.
- Medición directa del caudal másico (no requiere compensación de presión y temperatura).
- El principio de medición no depende de la densidad ni de la viscosidad del fluido.
- La exactitud de medición es muy alta (típicamente $\pm 0.1\%$).
- El sensor es multivariable: mide a la vez el caudal másico, la densidad y la temperatura.
- Es insensible a los cambios en el perfil de velocidades.
- No requiere tramos de entrada y salida.

1.21.3. Desventajas:

- La inversión económica inicial es relativamente alta.
- El costo de instalación puede ser considerable, según el tipo de modelo y el fabricante.
- El rango de temperaturas es limitado: típicamente de -50 a $+350$ °C (-60 a $+660$ °F).
- Su uso se restringe a fluidos con bajo contenido en gases y a fluidos en una sola fase.
- Algunos modelos de gran tamaño son muy pesados.

1.22. Caudalímetros másicos térmicos

Los caudalímetros másicos térmicos son relativamente recientes en la industria de la medición de caudales. Sin embargo, han tenido una rápida aceptación y un comité de la norma ISO ya trabaja en unos primeros documentos. Como clase de caudalímetros distintiva, los equipos térmicos de medición de caudal másico se pueden dividir en dos grupos principales.

1.22.1. El principio de "dispersión térmica"

Un elemento calentado se sumerge en el caudal. El ritmo de enfriamiento es una medida de la velocidad local, y por lo tanto, del caudal.

1.22.2. El principio del "tipo de perfil térmico" o del "aumento de temperatura"

Se suministra calor a una zona limitada del fluido. La temperatura local aumenta y la cantidad de energía añadida permite estimar el caudal másico.

Ambos tipos de dispositivos se hallan en el mercado. La alta sensibilidad de algunos modelos ha favorecido su amplia difusión en aplicaciones de investigación. Sin embargo, esta gran sensibilidad también significa que las propiedades físicas del fluido, como la conductividad térmica, la capacidad calorífica o su composición gaseosa en caso de mezclas, pueden afectar fácilmente a la medición.

1.22.3. El principio de "dispersión térmica"

Los caudalímetros de dispersión térmica pueden funcionar de dos modos. En ambos casos, los elementos calentados o enfriados del sensor están conectados en una disposición de puente de Wheatstone. Si se mantiene constante la intensidad de corriente que circula por el elemento calentado por ejemplo, un cable, la relación entre la temperatura (resistencia) y el caudal es directamente proporcional. Por otra parte, se puede mantener constante la resistencia, en cuyo caso la potencia varía al aumentar o disminuir el caudal. En todos los modelos, el ritmo de disipación de calor en un cable se expresa por la ecuación de King.

$$Q_L = \Delta T \{ K + (2\pi \cdot K \cdot c_v \cdot \rho \cdot v \cdot d) \}^{0.5}$$

Q_L	Disipación de calor en el cable	ρ	Densidad del fluido
ΔT	Diferencia de temperatura entre el cable y el fluido	v	Velocidad del fluido
K	Conductividad térmica del fluido	d	Diámetro del cable calentado
c_v	Capacidad calorífica del fluido a volumen constante		

La forma de esta ecuación muestra la sensibilidad a las propiedades del fluido y la importancia que el segundo término adquiere al aumentar el caudal. Esta ecuación es no lineal, pero afortunadamente las técnicas DSP permiten fácilmente su linealización. Algunos modelos emplean un simple cable calentado (los clásicos anemómetros), mientras que otros utilizan dos termistores, uno como sonda y el otro como referencia. La Figura siguiente muestra la punta de estas sondas térmicas. Para medir el ritmo de disipación de calor, el fluido ha de circular por los elementos calentado (a) y no calentado (b).

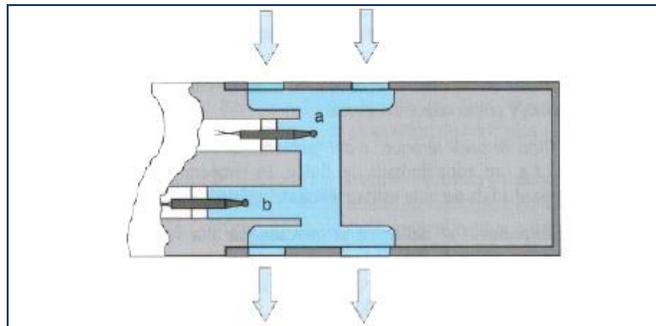


Figura 1.56 Sonda de un caudalímetro másico de dispersión térmica

a= Elemento del sensor calentado

b= Elemento de referencia no calentado

1.2.2.4. Principio de medición del "perfil térmico / aumento de temperatura"

La Figura siguiente ilustra el segundo principio de medición, del "perfil térmico / aumento de temperatura", en que están basados varios modelos comerciales.

El calor se genera en el interior del caudalímetro y se inyecta en el fluido. En su interior dos elementos sensibles miden la diferencia de temperaturas entre puntos diferentes. A veces se utilizan dos puntos de calentamiento y tres sensores para obtener un perfil de temperaturas más completo. Cuando el fluido no circula, todos los sensores indican la misma temperatura.

Cuando el fluido circula, los sensores se calientan o se enfrían con respecto al otro y detecta una diferencia de temperatura ΔT , que está directamente relacionada con el caudal. La ecuación que caracteriza este tipo de caudalímetros es la siguiente.

$$Q_m = \frac{H}{A \cdot c_p \cdot \Delta T}$$

Q_m	Ritmo del caudal másico	ΔT	Diferencia de temperatura media
H	Cantidad de calor suministrado	c_p	Capacidad caloríficas a presión constante
A	Constante		

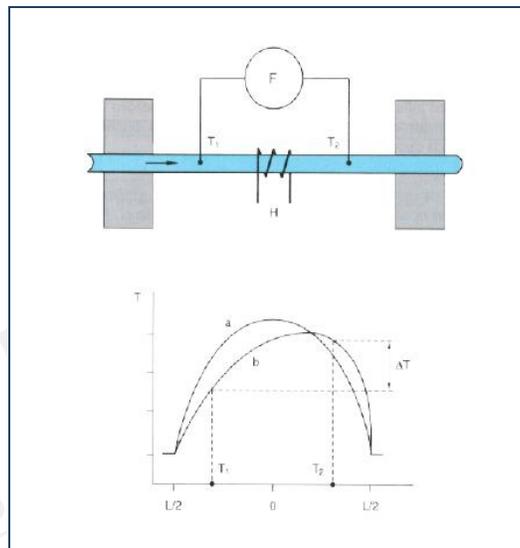


Figura 1.57 Caudalímetro basado en el principio del perfil térmico

La última ecuación es menos dependiente de las propiedades del fluido, aunque la constante "A" incluye tanto los efectos de la conductividad como los de la viscosidad.

Para ambos métodos de medición (dispersión térmica y perfil térmico) se han desarrollado modelos con sensores de detección en uno o varios puntos, para instalación tanto en líneas principales como en derivaciones (by-pass). Ello permite cubrir un amplio campo de valores de caudal, desde caudales residuales de gases limpios en usos médicos hasta grandes volúmenes de gases de antorcha en chimeneas de alivio.

1.22.5. Ventajas e inconvenientes de los diferentes modelos

Los dos principios descritos se aplican comercialmente a sensores para instalación en líneas principales y en circuitos de derivación. Los dos principios operativos y los dos modelos comerciales básicos se solapan considerablemente, sobre todo cuando se consideran los campos de velocidades del fluido y las dimensiones de las tuberías. Otros factores que pueden influir en la elección del modelo final dependen de la aplicación particular y de la naturaleza del fluido que se va a medir.

1.22.6. Anemómetro térmico

El tipo más simple de caudalímetro de dispersión térmica es el anemómetro térmico. El sensor de velocidad es un fino cable de tungsteno, platino o níquel. Existen modelos comerciales tanto de tipo intensidad constante como de tipo resistencia constante. Típicamente, el cable es de 0.02 mm de diámetro y va montado entre dos soportes. Su pequeño tamaño evita una distorsión apreciable del flujo, de modo que se preservan

tanto la sensibilidad del equipo como su correcta ejecución. Puede haber un único sensor o más de uno orientados en cualquier dirección (Figura siguiente). Los modelos más sofisticados se suelen emplear en aplicaciones de investigación.

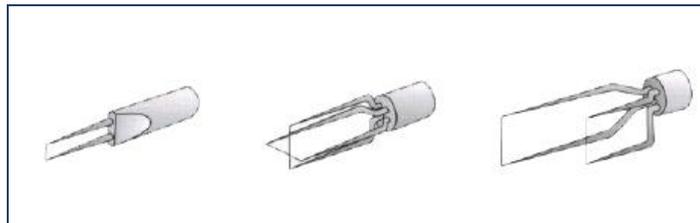


Figura 1.58 Diferentes modelos de anemómetros térmicos

1.22.7. Tipos por derivación

Los tipos de caudalímetros térmicos por derivación (o CTMF = capillary thermal mass flowmeters o caudalímetros másicos térmicos por derivación, como se les conoce comúnmente) se suelen emplear junto con algún dispositivo de flujo laminar. Una pequeña cantidad de caudal se desvía por un tubo de derivación conectado a la entrada a la salida de algún dispositivo de flujo laminar y se muestra (Figura siguiente). El diseño del caudalímetro asegura que el ritmo de caudal total de gas que pase por el tubo de derivación donde se efectúa la medición sea constante. El calentador y los sensores de temperatura no se suelen hallar en el conducto principal, sino en un tubo de derivación. Algunos modelos no tienen tubo de derivación ni dispositivo de flujo laminar, y los sensores se hallan directamente en el conducto principal (en la tubería). Puede haber uno o dos calefactores y hasta tres sensores dispuestos de diversas formas a lo largo del tubo.

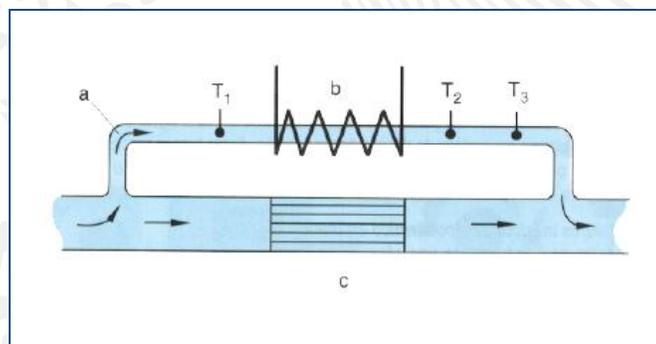


Figura 1.59 Caudalímetro másico de tipo térmico por derivación

En general, el caudalímetro CTMF se suministra con los accesorios necesarios para su acoplamiento, aunque se pueden proporcionar accesorios de acoplamiento a brida. Este modelo de caudalímetros suele ir combinado con un controlador de caudal corriente abajo del sensor. Esta configuración se denomina controlador de caudal másico.

Típicamente, la interfaz electrónica se halla ubicada en la misma unidad que el circuito de derivación.

1.22.8. Caudalímetros de inserción

Los caudalímetros de inserción se suelen utilizar para tuberías largas. Sin embargo, algunos modelos están preparados para funcionar también con diámetros inferiores a DN 50/2". Los sensores se hallan en el extremo de una sonda que se inserta en la corriente de gas en circulación. El ritmo del caudal másico total se determina a partir de ritmo del caudal detectado en el punto de medición, la sección transversal y la compensación del perfil de velocidades de flujo.

Los sensores incluyen comúnmente algunos niveles de protección física. Muchas adaptaciones de montaje incluyen accesorios de acoplamiento de tipo brida, caja prensaestopas para la contención de la empaquetadura y accesorios para aplicaciones sanitarias y de alta pureza. La disposición de los sensores en la sección transversal de la tubería es crucial para una ejecución óptima. Si no es posible disponer la instalación recomendada por el fabricante, será necesario efectuar medidas de adaptación.

Algunos modelos de caudalímetros de inserción permiten ajustar la posición de los sensores en la tubería para colocarlos en la posición de medición óptima. Para instalar caudalímetros de tipo de inserción en tuberías existentes se suelen emplear adaptadores soldados a la superficie externa de la tubería. Los caudalímetros de inserción se instalan en la tubería con ayuda de este adaptador. Los accesorios de acoplamiento del adaptador deben corresponderse con los de la sonda de inmersión.

En algunas aplicaciones se emplean modelos de inserción múltiple. Un uso común de estos modelos es, por ejemplo, el control de gases en chimeneas de alivio o de contaminación en procesos gaseosos. Algunos modelos pueden presentar un aspecto muy parecido a los tubos Pitot de puerto múltiple cuyas sondas térmicas reemplazan los puntos de detección de presión. Estos toscos modelos requerirán ser retirados periódicamente para su limpieza, pero han demostrado ser métodos aceptables para estas difíciles aplicaciones.

1.22.9. Caudalímetros másicos de tipo térmico en línea

Los caudalímetros másicos de tipo térmico en línea (in-line thermal mass flowmeters, ITMF) comprenden tres elementos: el cuerpo, el elemento sensor y la electrónica, que puede hallarse en una ubicación remota, lejos del sensor primario. Como en la mayoría de instrumentos modernos, el procesamiento de señales permite una gran variedad de funciones asociadas a la medición de caudales y de alarma en cualquier tipo de formato de salida. Los cuerpos disponen de una amplia variedad de conexiones a proceso (ANSI, DIN, NPT roscada o sanitaria) para que se adapten a cada aplicación particular.

La Figura siguiente muestra la disposición esquemática de uno de estos caudalímetros en cadena. Los sensores pueden ser de un diseño parecido al que se muestra en la Figuras anteriores.

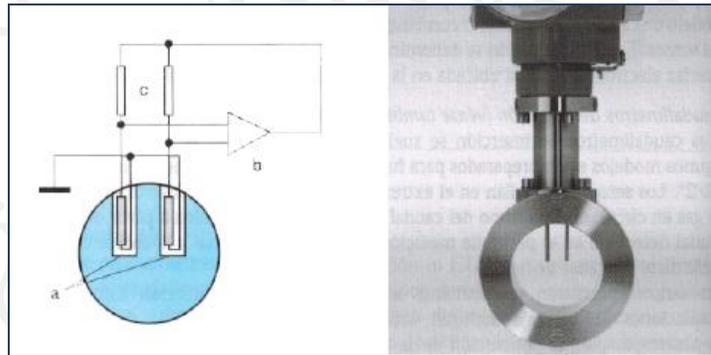


Figura 1.60 Diseño de un caudalímetro en cadena

Considerados en conjunto, las características genéricas que los caudalímetros térmicos de caudal másico presentan son bastante buenas, con ventajas e inconvenientes. Su campo de ejecución general va desde un 2%, hasta un 1% para reducciones de campo (turndowns) de 50:1 y superiores. Su repetibilidad suele estar en torno a un 0.25%. Los distintos modelos abarcan caudales de entre 2 y 10,000 kg/h (4.4 y 22,000 lb/h) e incluso superiores.

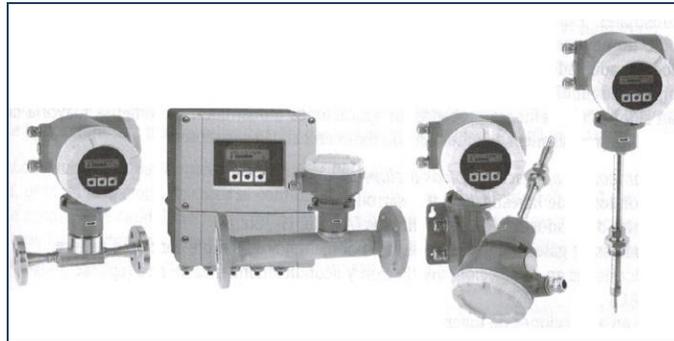


Figura 1.61 Caudalímetro térmico para medición de caudal másico

1.22.10. Ventajas:

- Presentan una amplia reducción de campo (turndown) del caudal
- No tienen partes móviles.
- La salida del caudal másico es directa.
- Las pérdidas de carga son despreciables.
- Algunos modelos ofrecen la posibilidad de detección en un solo punto o en más de uno.
- Ofrecen una característica de respuesta rápida a las variaciones de caudal.
- Su sensibilidad de medición es alta.
- Hay modelos disponibles para una amplia variedad de tamaños de tubería.
- Hay modelos disponibles para un amplio campo de valores de presión y temperatura.

1.22.11. Desventajas

- Los tipos ITMF son sensibles a las condiciones de instalación.
- Requieren una atención regular en aplicaciones con fluidos contaminados.
- Algunos modelos son sensibles a la composición del gas.
- Requieren una calibración cuidadosa.
- Los cambios rápidos de la temperatura de proceso pueden causar efectos de transferencia de calor variables.

1.23. Canales abiertos / Tuberías sólo parcialmente llenas

1.23.1. Principio de medición / ecuaciones de descarga de caudal

El nivel de agua (altura hidrostática h) en un canal abierto se relaciona directamente con el caudal de descarga (Q). Cuanta más agua circule por un canal abierto, mayor será el nivel de agua. La fórmula básica para el caudal de descarga es sencillamente:

$$Q = f(h)$$

- Q Caudal o volumen de descarga
h Nivel del agua (profundidad de la corriente de agua corriente arriba)

Si conocemos la curva Q/h de un canal abierto, es posible determinar el ritmo de descarga para cualquier nivel de agua. La forma de la curva de descarga depende principalmente de la geometría del canal abierto y de su sección transversal. A menudo, el caudal fundamental (Q) se calcula a partir de determinar la velocidad del fluido (v) y multiplicarla por la sección transversal del área que queda sumergida (A). Sin embargo, hay diversas maneras de hallar la curva Q/h .

- Con el empleo de caudalímetros u otros sensores de medición de velocidad de caudales.
- Por métodos de medición con trazadores para determinar el caudal general.
- A partir del método de los caudales diferenciales.
- Con la ayuda de métodos de medición estandarizados como vertederos y canales abiertos con curvas de caudal conocidas, tomadas a partir de tablas y gráficos de valores empíricos determinados en laboratorios.
-

Se han desarrollado diseños estandarizados de vertederos y canales abiertos para acondicionar el nivel del agua y así poder efectuar mediciones de nivel fiables de un modo controlado. Los vertederos y los canales abiertos elevan el nivel del agua de manera que la descarga corriente abajo no influye en la medición del nivel del agua corriente arriba. Los vertederos y los canales abiertos obedecen ecuaciones básicas del tipo.

$$Q = C \cdot R^a \cdot h^b$$

C	Coefficiente de flujo
R	Factor dependiente de la geometría del canal
H	Nivel del agua
h	Nivel del agua
a, b	Exponentes, dependientes del método empleado para la medición (vertederos, canales abiertos, etc.)

Tabla 1.8

De la ecuación se desprende que para estimar la descarga de un canal abierto basta una medición del nivel de agua fiable. El resto de términos se han determinado empíricamente o se hallan documentados en diversos estándares. El método de medición de nivel es independiente del dispositivo de medición de caudales empleado.

1.23.2. Medición de niveles (nivel del agua, profundidad del agua)

Disponemos de muchas técnicas de medición de niveles de agua (altura hidrostática)

- Medición por ultrasonidos o por microondas
- Flotadores
- Medición de presiones (presión hidrostática)
- Método del burbujeo (por ejemplo, con burbujas de aire)

Cada uno de los métodos enunciados tiene sus puntos fuertes y sus puntos débiles. Sin embargo, en los últimos años, los sistemas de medición por ultrasonidos y por microondas han ganado terreno frente a los antiguos métodos de burbujeo o de medición de presión. Esto es por la facilidad de instalación y los bajos costos de mantenimiento que ofrecen los primeros

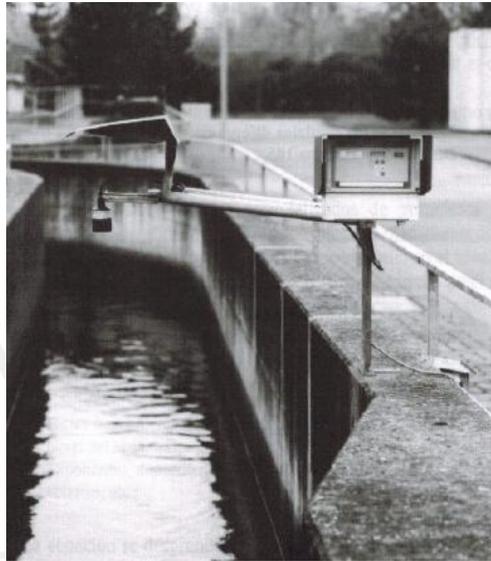


Figura 1.62 Medición de nivel, aguas arriba de una estructura de medición

1.23.3. Canales abiertos

Los canales abiertos son pasos estrechos de control de caudal en el conducto, cuyas secciones pueden presentar distintas formas (Figura siguiente). Estos pasos estrechos son simétricos respecto al eje del canal. Hay canales abiertos con y sin alzamientos del lecho. Se recomienda una verificación del diseño en caudales elevados para evitar que se acumulen sedimentos en el paso estrecho.

Los pasos estrechos en un canal con caudales de descarga crean en principio un "canal Venturi". En este tipo de pasos estrechos, el agua se ve obligada a remansarse en el frente de entrada al canal abierto. El nivel de esta entrada de agua permite determinar el caudal o el volumen de descarga.

Para asegurar el correcto funcionamiento de este tipo de sistema de medición, el canal, el paso estrecho y el nivel aguas abajo deben cumplir unos principios de diseño determinados. Las dimensiones del canal abierto deben establecerse de modo que en el paso estrecho tenga lugar un cambio en el estado de circulación del fluido por ejemplo, que se dé una transición de circulación "tranquila" a "rápida" y otra vez a tranquila.

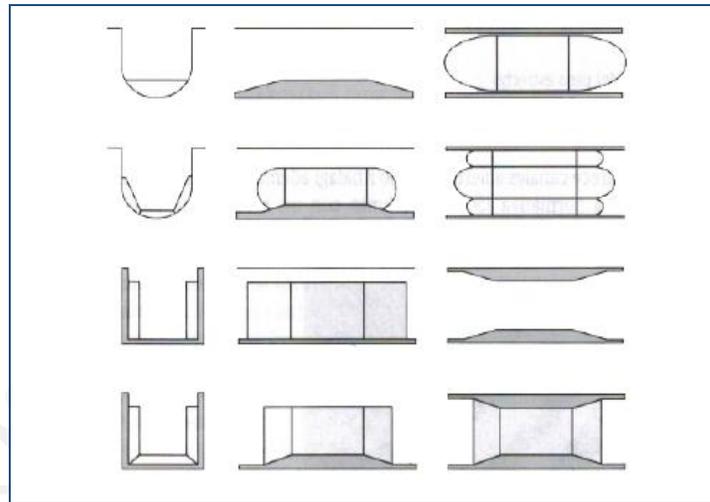


Figura 1.63 Ejemplos de estructuras estándar para canales abiertos

Los propios usuarios pueden construir canales abiertos en concordancia con los estándares conocidos o bien los mismos fabricantes de sistemas de medición lo ofrecen como una unidad de medición más (Figura 1.63). Para los modelos de canales abiertos ya establecidos, como los de tipo Parshall, Palmer Bowlus o Khafagi, los fabricantes disponen de ecuaciones de descarga especiales deducidas empíricamente a partir de los ya construidos. La forma general de estas ecuaciones es.

$$Q = K \cdot b \cdot h^n$$

- K Coeficiente (dependiente de la geometría del canal abierto, de la velocidad de incidencia y del factor de descarga dependiente del rozamiento)
- b Anchura del paso estrecho
- h Nivel del agua (altura hidrostática) antes del paso estrecho (el valor del exponente "n" suele estar entre 1,5 y 1,8)

El coeficiente "K" está documentado en las respectivas publicaciones ISO para una gran cantidad de tamaños y geometrías. Los canales abiertos Parshall están muy difundidos en Norteamérica, y en Europa los canales abiertos Venturi. Comúnmente, los canales abiertos Khafagi-Venturi son considerados los más precisos de este tipo. Estos modelos consiguen errores de medición inferiores al 2%. La altura hidrostática enfrente del paso estrecho también obedece a una relación perfectamente definida con el caudal.

$$Q = 0.01744 \cdot b \cdot h^b + 0.00091 \cdot h^{2.5}$$

- b Anchura del paso estrecho
- H Nivel del agua (altura hidrostática) antes del paso estrecho

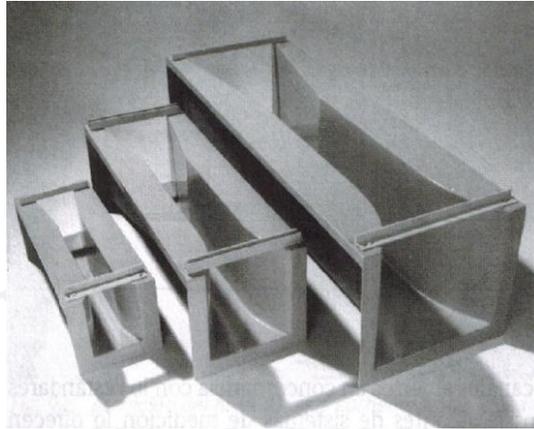


Figura 1.64 Canales Venturi de varias dimensiones

El nivel del agua en el caudal incidente siempre empieza a caer antes de que el agua entre en la garganta (paso estrecho), por lo que la medición de nivel debería llevarse a cabo algo más allá aguas arriba por lo menos unas cuatro veces la anchura del canal, incluidos los posibles cilindros amortiguadores en la pared del canal. Los cilindros amortiguadores presentan la ventaja de eliminar en la medición la influencia de las olas en la superficie y la "espuma".

1.23.4. Ventajas

- Dispone de estándares universales. Es un sistema de medición con una gran aceptación.
- Ofrece incertidumbres típicas de entre 2 y 5%.
- Resulta prácticamente inmune a los efectos perturbadores aguas arriba si se observan correctamente las instrucciones de instalación.
- Es de mantenimiento fácil.
- Los canales abiertos son altamente resistentes a la contaminación, y hasta cierto punto "se limpian solos" (aspecto importante en relación con la descarga de sedimentos).

1.23.5. Desventajas

- Los canales abiertos presentan limitaciones de caudal y de tamaño en comparación con los vertederos.
- Requieren prácticas de ingeniería civil extensiva.
- Los costes de instalación son altos (más caros que los vertederos).
- Las corrientes sumergidas afectan a la medición. Tamaño crítico en función de la pendiente.

1.24. Vertedores

Los vertedores constituyen las estructuras de medición de caudales de descarga en canales abiertos más comunes después de los canales. Un vertedor consiste normalmente en una pared transversal a un canal que contiene una sección de medición. Esta pared mantiene el nivel del agua corriente arriba. El caudal o volumen de descarga se obtiene midiendo la altura de descarga antes del vertedor. Existen ecuaciones de caudal empíricas para los vertedores, que dependen de la geometría del borde de la pared de medición. A continuación se describen dos

$$Q = K \cdot b \cdot h^{1.5} \text{ (Para vertedores rectangulares)}$$

$$Q = K \cdot b \cdot h^{2.5} \text{ (Para vertedores rectangulares)}$$

- K Factor de descarga (depende de los cocientes anchura de la sección de medición/anchura del canal, altura de descarga/ altura y ángulo de abertura α para vertedores en V)
- b Anchura de la sección de medición
- h Altura de descarga

A partir de su diseño es evidente que se produce un cambio brusco en la altura hidrostática al caer el agua por encima del vertedor, y una disipación de energía en el proceso. La pérdida de altura hidrostática en los vertedores es mayor que en los canales abiertos. Dado que el nivel del agua es constante hasta casi el mismo borde del vertedor, la posición del sensor de nivel es menos crítica. Sin embargo, en este caso también se recomienda una distancia de hasta cuatro veces la anchura del vertedor, incluida la posición de cilindros amortiguadores en la pared lateral.

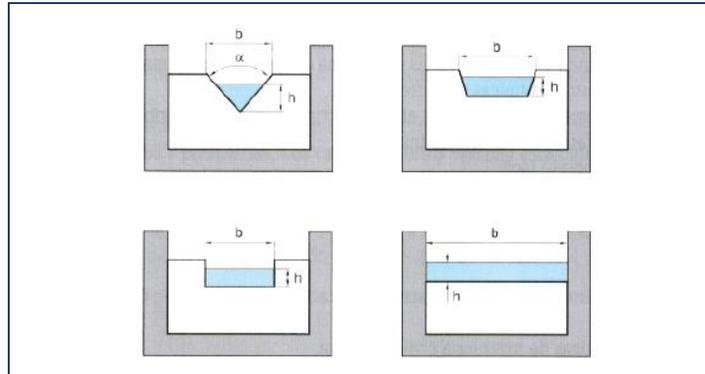


Figura 1.65 Ejemplos de vertedores con diferentes perfiles de abertura

Se han desarrollado muchos diseños distintos de vertederos, muchos más que canales abiertos. Esto es porque los vertederos pueden cubrir campos de valores de caudal mucho mayores y muchos más tamaños de canal. Para caudales bajos, el vertedero es una simple estructura en forma de V. Si además dispone de una placa de borde fino, la incertidumbre en la medición es menor (siempre que la placa se mantenga en buenas condiciones). Si por algún motivo el borde de esta placa resulta dañado (por sedimentos o escombros arrastrados por la corriente), la incertidumbre de la medición se incrementa.

En la mayoría de ríos se emplean vertederos rectangulares o vertederos de sección de paso poligonal. Los obstáculos laterales o una combinación de varias geometrías (vertederos compuestos) sirven para definir y separar las descargas con más claridad, por ejemplo, en condiciones de diversos niveles de agua bajos, medios y altos.

1.24.1. Ventajas:

- Dispone de estándares universales. Es un sistema de medición de gran aceptación.
- Hay numerosos tipos de vertederos disponibles para un amplio campo de valores de caudal.
- La incertidumbre de la medición es: típicamente entre 2 y 4%.
- Resulta prácticamente inmune a los efectos perturbadores corriente arriba si se observan correctamente las instrucciones de instalación.
- Su construcción es sencilla (más fácil que los canales abiertos).

1.24.2. Desventajas

- Los vertedores representan obstrucciones, por lo que no son adecuadas para fluidos que arrastren grandes cantidades de sedimentos. Los escombros arrastrados por la corriente pueden bloquear el vertedor.
- Los vertedores no sirven si hay remansos de agua (susceptibles a las corrientes sumergidas).
- Requieren prácticas de ingeniería civil extensiva.
- La pérdida de altura hidrostática es de 3 a 4 veces mayor que en los canales abiertos.

1.24.3. Método de los caudales diferenciales

Este es un método de medición de caudales estandarizado y bien probado en canales, viaductos de transporte y ríos de todos los tamaños. La descarga se obtiene como una suma sobre toda la sección del río de los productos de las velocidades y las áreas de las secciones transversales correspondientes a una serie de observaciones, ya sea matemáticamente o por métodos gráficos.

El río se divide primero en una serie de secciones de igual anchura (Figura siguiente). Para cada sección se mide la velocidad de la corriente (v) a distintas alturas (h) y se calcula la velocidad para un diferencial de superficie correspondiente. Las velocidades de cada diferencial de superficie se integran para toda la anchura del río (b) y se obtiene el caudal volumétrico total. Cálculo de la velocidad de cada diferencial de superficie (q_i) para toda la altura del agua (h_i):

$$q_i = \int_0^{h_i} (v_i \cdot dh) \quad [m^2/s]$$

El caudal volumétrico total resulta de integrar todos los diferenciales de caudal (q_i) para toda la anchura del canal (b):

$$Q = \int_0^b (q_i \cdot db) \quad [m^3/s]$$

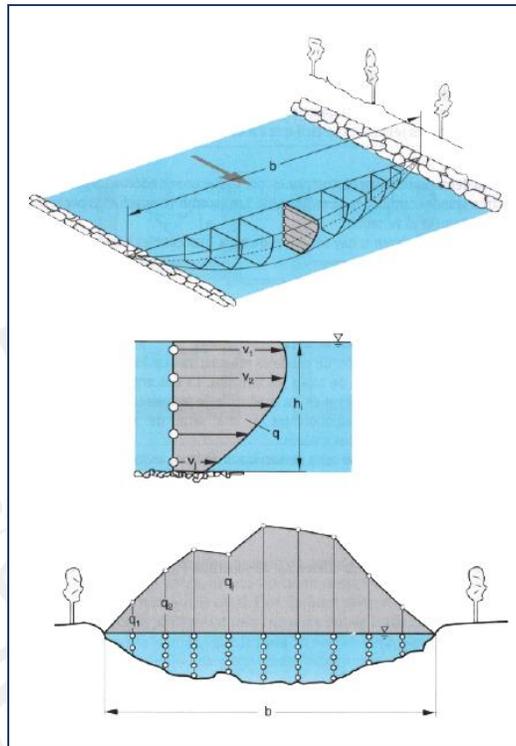


Figura 1.66 Principio de medición del método caudal diferencial



Figura 1.67 Instalación permanente en el puente de un río para medir la velocidad del caudal

La medición por este método se lleva a cabo tradicionalmente con caudalímetros de corriente según ISO 2537 y ISO 3455 (Figura 1.68). Estos dispositivos son muy sensibles cuando son manejados por manos expertas. En vías de agua de cierta importancia suelen adecuarse instalaciones de medición especiales para su control práctico permanente (figura anterior) En determinadas circunstancias, también se efectúan mediciones de velocidad con flotadores de superficie o con barras de velocidad.

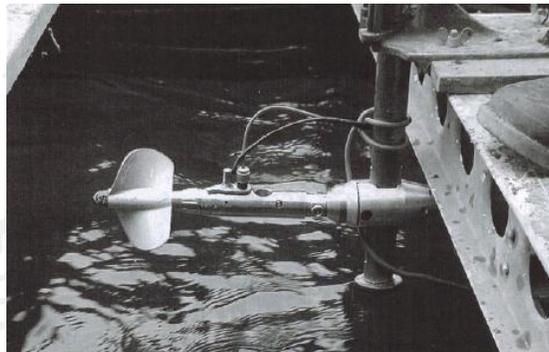


Figura 1.68 Caudalímetro de corriente para determinar la velocidad del caudal a diferentes profundidades

Por otra parte, también se puede determinar la velocidad del caudal con la ayuda de una serie de haces de ultrasonidos a través del río. Este método es más moderno, pero se basa en las mismas ecuaciones que hemos detallado en esta sección para estimar la descarga total. Los sensores por ultrasonidos miden la velocidad y la profundidad de acuerdo con los estándares ISO 3354 e ISO 3966, en que se detalla dónde hay que colocar los haces en conductos con formas circular y rectangular, respectivamente. Recientemente se ha comercializado una adaptación de esta técnica. El método de determinación del perfil de corriente por efecto Doppler acústico (ADCP, es decir: Acoustic Doppler Current Profiler).

1.24.4. Tuberías parcialmente llenas (caudal a superficie libre)

En muchos casos el uso de canales abiertos o vertederos no es practicable. En estas situaciones, podemos recurrir a un método de medición basado en el caudal de superficie libre. En circuitos cerrados, el agua de drenaje circula principalmente a varios niveles por tuberías circulares. Dado que la velocidad del agua en la tubería (v) es una función de la altura hidrostática (h_p), el caudal volumétrico se puede deducir a partir de la determinación de ese nivel. Sin embargo, este método no debería emplearse a menos que se satisfagan las condiciones siguientes:

- La pendiente del canal ha de ser conocida con exactitud.
- La geometría de la sección transversal (D) ha de estar bien definida.
- Las condiciones y la calidad del canal deben ser conocidas.
- El fluido no ha de estar sometido a presión.

Los ritmos de descarga para las tuberías parcialmente llenas pueden hallarse en las tablas que proporciona la literatura especializada. En los libros de texto, los ritmos de descarga se presentan tanto en forma de tablas como en forma de nomogramas (Figura 1.69) para diversos diámetros nominales, para diferentes pendientes de desagüe y para distintas rugosidades de la superficie de la tubería. Si conocemos los ritmos de descarga de la tubería totalmente llena (Q_f, v_f), a partir del nomograma siguiente podemos leer directamente el ritmo de descarga y la velocidad de flujo (Q_p, v_p) para la tubería sólo parcialmente llena. Para secciones transversales de geometría no circular (ovaladas y de otros tipos), los manuales de referencia ofrecen curvas y nomogramas análogos.

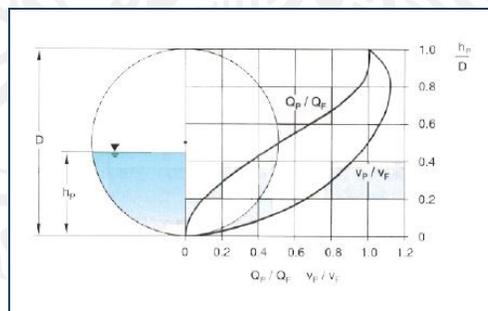


Figura 1.69 Curvas de descarga y velocidad para tuberías de geometría circular parcialmente llenas

Una técnica más "moderna" consiste en utilizar sensores para medir la profundidad del agua y la velocidad del caudal en tuberías parcialmente llenas. La Figura siguiente muestra un posible equipo de medición de este tipo el nivel del agua se determina por ultrasonidos, y la velocidad del caudal con un Caudalímetro magnético. Otras combinaciones disponibles comercialmente utilizan microondas. A continuación ofrecemos una lista de las ventajas y los inconvenientes que presentan estos métodos:

1.24.5. Ventajas:

- Presentan una buena relación costo-efectividad porque sólo precisan una o dos simples mediciones.
- Los distintos accesorios de medición pueden ajustarse en cualquier momento.
- No requieren remanso del agua.
- Permiten medir el agua represada y los reflujos.

1.24.6. Desventajas

- Presentan una incertidumbre si no se conocen con exactitud todos los detalles de las condiciones de medición.
- Pueden requerir calibración o ajuste local.
- Algunas condiciones como la rugosidad de la tubería o la sedimentación en el conducto pueden cambiar con el tiempo.
- El montaje del sensor en canales puede ser complicado en la práctica.

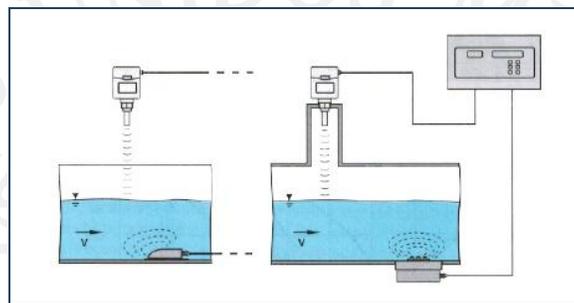


Figura 1.70 Medición de Caudal en tuberías parcialmente llenas con sensores con sensores para medir nivel

Recientemente, se han desarrollado caudalímetros electromagnéticos que funcionan en tuberías sólo parcialmente llenas. Las bobinas de estos dispositivos admiten dos modos de excitación en serie que dan un valor promedio para la velocidad y uno para la profundidad. Para medir estos dos parámetros se emplean diversos conjuntos de electrodos, a partir de éstos se estima la descarga total. Esta tecnología es relativamente nueva y los datos hasta el momento sobre esta aplicación aún son escasos.

Por contra, la importancia de la medición por ultrasonidos en tuberías parcialmente llenas por el método ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) continúa aumentando. Solo se menciona son muy caros para medición parcelaria, los hay en perfiladores verticales y horizontales así como fijos y móviles. Algunos de estos equipos se muestran en la siguiente imagen.

- Monitoreo en tiempo real de caudales para la estimación de eficiencias de conducción
- Tecnología Doppler
- Barcos grandes y chicos



- Procesamiento mediante software

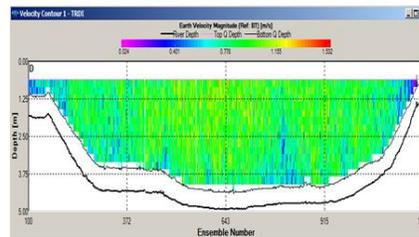


Figura 1.71 Monitoreo en tiempo real

A continuación se presentan los resultados de las pruebas de equipos comerciales en tuberías.

2. Pruebas de laboratorio de equipos de medición de gasto en tuberías.

En el Laboratorio de Hidráulica, Enzo Levi, del IMTA se evaluaron cinco diferentes equipos de medición usados en tuberías. Los equipos se instalaron en un circuito cerrado de tubería de PVC de 6" de diámetro. El circuito presenta 12 metros de largo y 2 de ancho. El agua es impulsada en el circuito mediante una bomba de 7 HP la cual es operada mediante un variador de velocidad Telemecanique. En la Imagen 1 se presenta el circuito de prueba usado.

Circuito

Bomba

Variador de Velocidad



Imagen 2.1 Circuito de prueba usado, bomba y variador de velocidad

Los equipos probados fueron tres medidores de tipo electromagnéticos y dos de tiempo de travesía. Los medidores electromagnéticos fueron dos unidades de Keifeng Kaide Flow Instrument Co. Ltd modelo KDL-D-150 y una unidad Arkon X2. Los medidores de tiempo de travesía usados fueron el equipo Sun- 200S de Sunny Instrument y el equipo AT-868 de Panametrics – General Electric.

Los medidores electromagnéticos, miden el voltaje inducido por el agua al moverse en una tubería expuesta a un campo electromagnético. El voltaje inducido es proporcional a la velocidad del agua en la sección transversal de la tubería. Los equipos de tiempo de travesía determinan la velocidad del agua como la diferencia en tiempo que tarda una señal de ultrasónica al viajar entre dos sensores cuando este viaje en la dirección de flujo y contra la dirección del flujo. Los medidores electromagnéticos toman una muestra completa de la sección transversal del ducto, mientras los de tiempo de travesía solo toman una muestra de la velocidad del agua a lo largo del cono de sonido emitido por los sensores. Lo anterior hace que los medidores electromagnéticos sean más precisos y las recomendaciones de instalación indican tramos rectos aguas arriba y aguas abajo de menor longitud que uno de tiempo de travesía. En la Imagen 2 se muestran los medidores electromagnéticos analizados. En la imagen 3 están los medidores de tiempo de travesía.

Equipos Keifeng Kaide Flow Instrument y pantalla remota.



Unidad Arkon X2 con pantalla local



Imagen 2.2 Medidores de gasto electromagnético revisados.

Unidad Electrónica

Sensores de velocidad TM1



Medidor de Flujo AT868

Unidad electrónica

Sensores de Velocidad de 1 Mhz

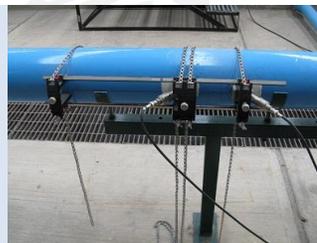


Imagen 2.3 Medidores de tiempo de travesía analizados.

Los medidores de tiempo de travesía instalados se calibraron. Durante el proceso de configuración de los medidores de tiempo de travesía el medidor calcula la distancia de separación con la cual se deben instalar los sensores sobre la tubería en función del arreglo seleccionado “Z”, “V” o “W”. La calibración consiste en hacer un pequeño ajuste a la distancia de separación de tal forma que la velocidad de la señal ultrasónica determinada por el medidor corresponda con la reportada en la literatura para la temperatura del agua presente en la tubería. La temperatura del agua se midió con un sensor infrarrojo de Fluke. La configuración de sensores usada fue la “V”, dos trayectorias.

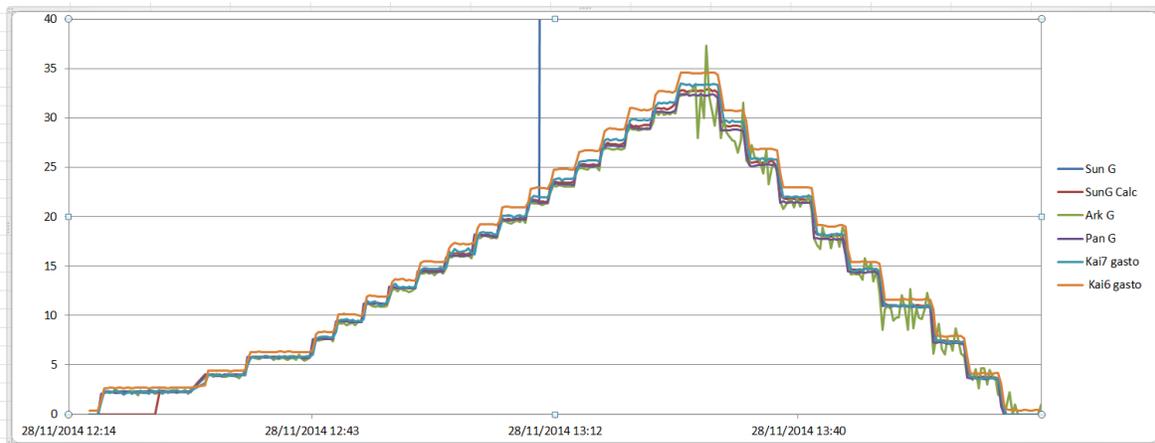
En la instalación de todos los sensores evaluados se respetaron las recomendaciones de dejar tramos rectos de tubería de 10 diámetros y 5 diámetros aguas arriba y aguas abajo respectivamente.

Durante las pruebas de evaluación se varió el gasto de 0 a 33 l/s. El gasto se varió ajustando el potenciómetro de 10 vueltas del variador de velocidad. Para cada cambio de gasto se giró 180° el potenciómetro. Los datos medidos por los equipos se recuperaron usando el protocolo MODBUS o bien el protocolo propietario de Panametrics. Los datos fueron recabados cada 10 segundos y almacenados cada 20 segundos en una unidad Lassen de ILinks.

Durante las pruebas preliminares se observó que después de algunos minutos de operación el equipo Sun 200S tomaba el gasto máximo que puede circular en la tubería ingresado en la configuración (parámetro M31). Después de revisar los datos se observó, que si bien el gasto reportado es erróneo, la velocidad es correcta. Por lo cual se optó por mostrar dos gastos por el equipo Sun 200S, el calculado por el equipo (Sun G) y el calculado por el datalogger Lassen a partir de la velocidad determinada por el medidor y el área de la tubería (SunG Calc).

En la Gráfica 1 se muestra la primera prueba realizada. En ésta, además del equipo Sun medido y calculado se tienen los gastos medidos por el equipo Arkon (Ark G), Panametrics (Pan G) y el reportado por los medidores electromagnéticos Keifeng Kaide Flow Instrument (Kai7 y Kai6). El número en el medidor Kaifeng es el asociado a la dirección MODBUS usada para identificar el equipo.

En la prueba reportada en la Gráfica 1 en la segunda etapa, disminución de gasto, se activó el detector de tubería vacía de medidor Arkon, esto ocasionó que se presentaran fuertes variaciones en el gasto determinado por este equipo.



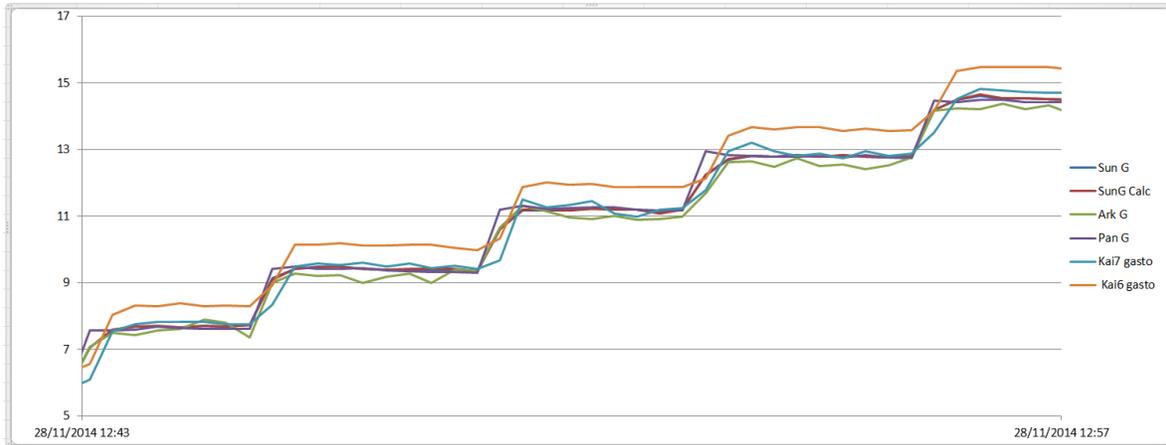
Grafica 2.1 Comparación de equipo de medición de gasto para tuberías

Revisando la Gráfica 1 se observa que la mediciones del equipo Arkon, Panametrics y Sun son similares, no así los datos reportados en los equipos Kai 7 y Kai 6. Las Gráficas 2 y3 presentan detalles de la Gráfica 1. Tomando como referencia el equipo Panametrics los porcentajes del error de medición promedio y su desviación estándar para los equipos revisados aparece en la Tabla 1.

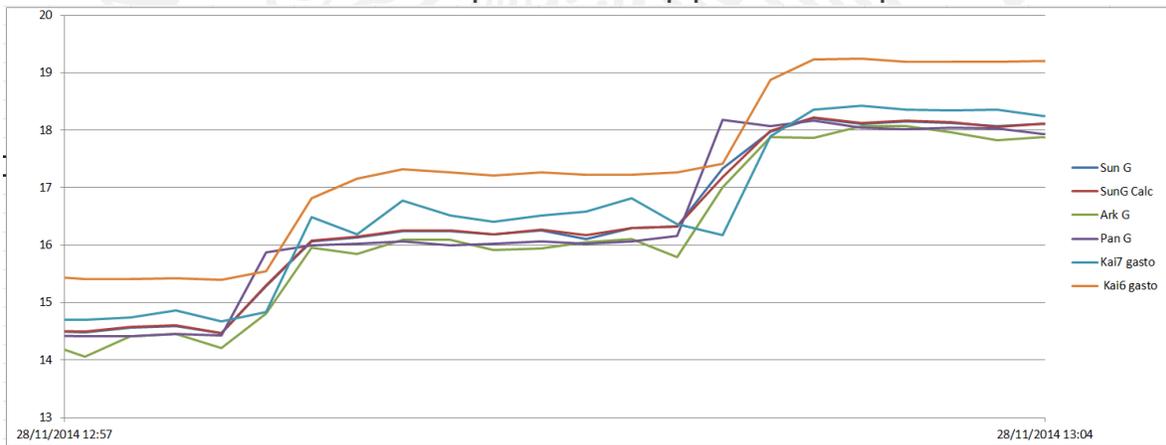
	Sun 6"	Arkon	Joy 7	Joy 6	Arkon P.
Error Promedio	0.06716	0.68239	1.91566	8.48139	0.65873
Desviacion Standard	1.23165	7.21053	1.64368	3.39543	2.69317

Tabla 2.1 Error de medición promedio y desviación estándar de los equipos revisados

En la Tabla 2.1 se presentan dos casos para el medidor Arkon. En el primer caso Arkon se consideró la prueba completa, tanto con el detector de tubería vacía activado como sin activar. En el caso Arkon P. solo se tomaron los datos cuando el detector de tubería vacía está apagado. En la Tabla 1, el medidor de tiempo de travesía Sun Cal es el que presenta el menor error de medición y la desviación estándar más baja. El equipo Sun y el equipo Panametrics fueron calibrados para la temperatura presente al inicio de la prueba en la tubería. Por otro lado se observa que el medidor Arkon es el que presenta la mayor desviación estándar, debido al problema de medición introducido por la activación del detector de tubería vacía. Los equipos Kai y Kai 6 presentan un importante error de medición lo cual hace suponer que es debido a una mala calibración de fábrica. Los equipos Kai 6 y Kai 7 presentan una precisión similar al equipo Arkon.



Grafica 2.2 Detalles de la comparación de los equipos de medición para tuberías.

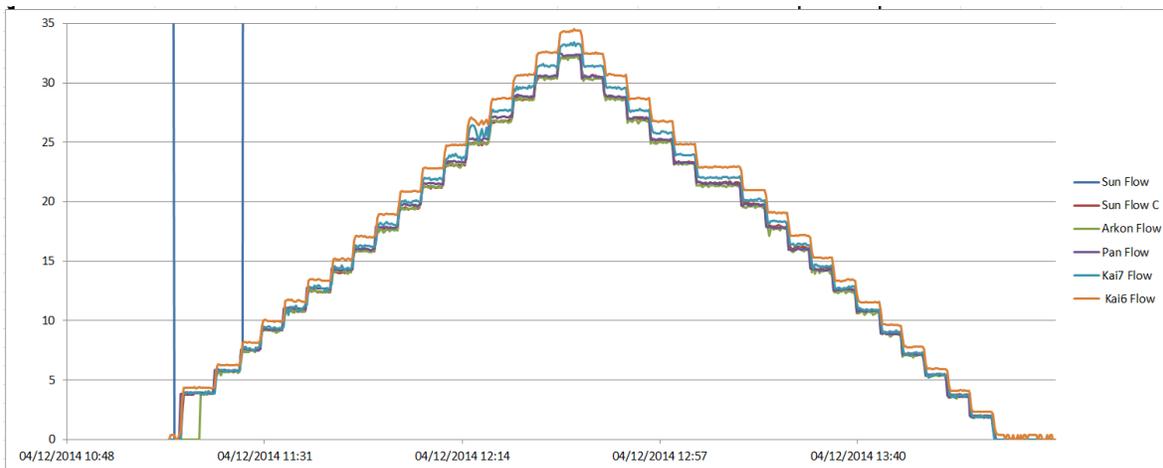


Grafica 2.3 Detalles de la comparación de los equipos de medición para tuberías.

Un segundo grupo de pruebas se realizó con el fin de confirmar la información obtenida en la primera prueba (Gráfica 2.4). Los equipos Kai6 y Kai7 presentan el mayor error de medición. En esta prueba se desactivo el detector de tubería vacía del equipo Arkon. Los errores de medición y desviación estándar se muestran en la Tabla 2.

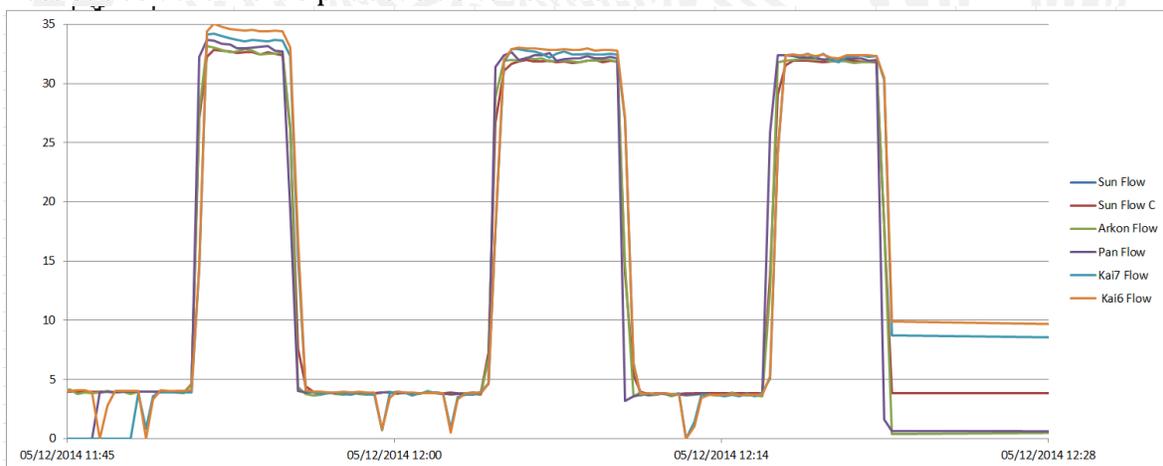
	Sun Calc	Arkon	Kai 7	Kai 6
Error Prom	0.26730	0.91167	-1.76763	-6.98851
Des Estand	1.30982	1.28421	1.28287	1.71574

Tabla 2.2 Error de medición promedio y desviación estándar de los equipos revisados.



Grafica 2.4 Comparación de equipo de medición de gasto para tuberías.

Nuevamente se confirma que los equipos Kai7 y Kai 6 presentan un importante error de medición del orden de 2 y 7.4 % respectivamente. Con esto en mente se revisó el equipo y se encontró un parámetro “Sensor Factor” el cual permite corregir el error de medición. El valor del “Sensor Factor” fue de modificado de 1.4385 y 1.4063 para Kai6 y Kai 7 respectivamente a 1.365 para los dos equipos. El ajuste se realizó mediante prueba y error procurando minimizar el error cuando el gasto en la tubería es de aproximadamente 3 l/s y 33 l/s. En la Gráfica 2.5 se ven los datos recabados durante las pruebas de calibración.



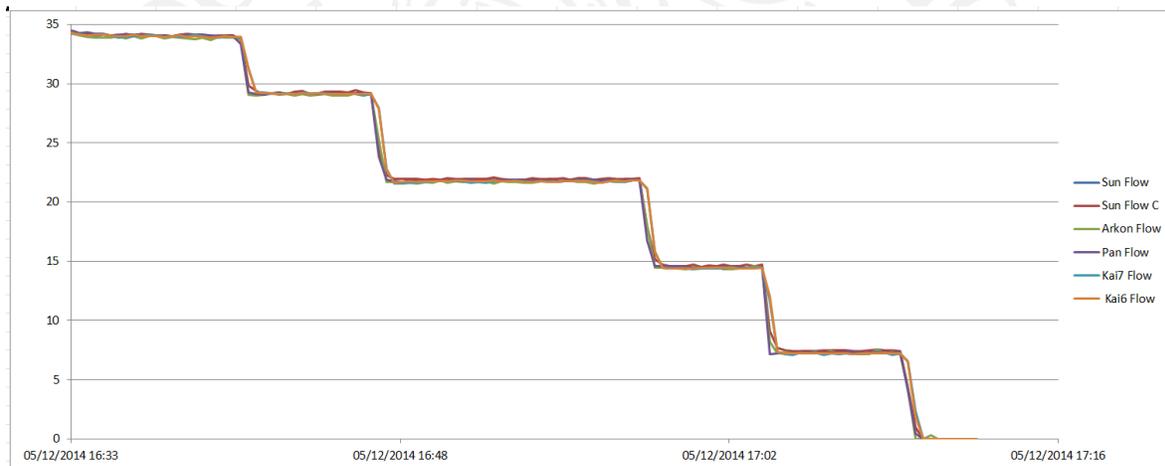
Grafica 2.5 Datos recabados durante el ajuste de los parámetros “Sensor Factor” del equipo Kai 6 y Kai 7.

Realizada la calibración se realizó una comparación en la cual se bajó el gasto de 34 a 7 l/s. (Gráfica 6). Con los equipos Kai 6 y Kai 7 calibrados, los errores de medición y desviación estándar encontrados se encuentra en la Tabla 3. Se observa que los tres medidores electromagnéticos presentan los mismos errores, sin embargo los equipos Kai 6 y Kai 7

presentan desviación estándar más bajas, indicando que son ligeramente más precisos. El medidor del tiempo de travesía Sun 200 es el que presenta como el menos exacto y preciso lo cual era de esperarse. Sin embargo es importante notar que todos los equipo presentan errores de medición y desviación estándar menor al 1% de la medida realizada, indicando que son una buena opción para la medición de gasto en tuberías.

	Sun Cal	Arkon	Kai 7	Kai 6
Error Prom.	-0.73646	0.49357	0.52693	0.43513
Desv. Estan.	0.82856	0.67999	0.60331	0.43892

Tabla 2.3 Error promedio y estándar



Grafica 2.6 Evaluación del funcionamiento de los medidores de gasto después de calibrar los equipo Kai 6 y Kai 7

Las pruebas realizadas ponen de manifiesto la necesidad de revisar con los fabricantes de los equipos Sun y Kai 6 y kai 7 su funcionamiento. El equipo Sun 200S presenta un error en la programación que hace que el gasto determinado por él equipo no sea el correcto, sin embargo la velocidad obtenida es altamente confiable para determinar el gasto en la tubería como los muestras los resultados obtenidos con Sun Calc. Es importante mencionar que el parámetro fundamental en la medición de gasto en tuberías es la velocidad. Si está es correcta, la determinación del gasto es una simple multiplicación por el área de la sección transversal de la tubería. Por otro lado, los medidores electromagnéticos deben ser correctamente calibrados en fábrica con el fin de tener un producto confiable para la medición de gasto.

Los equipos probadores fueron configurados y puestos en servicio usando los manuales proporcionados por el fabricante de los equipo. La información es completa y correcta.

Por desgracia el soporte para solucionar el problema encontrado en los equipos Sun 200S y Kaifeng, deja que desear. A pesar de los correos enviados al fabricante no se tiene una solución a los mismos.

3. Prueba de equipos para canales a cielo abierto

3.1.Desarrollos propios del IMTA (TRIO)

La programación de los distintos equipos de medición (Trio y Solo) se hizo con ayuda del software MikroC que es una versión modificada del lenguaje de programación C, especial para trabajar con microcontroladores, los microcontroladores utilizados pertenecen al tipo ARM de 32 bits.

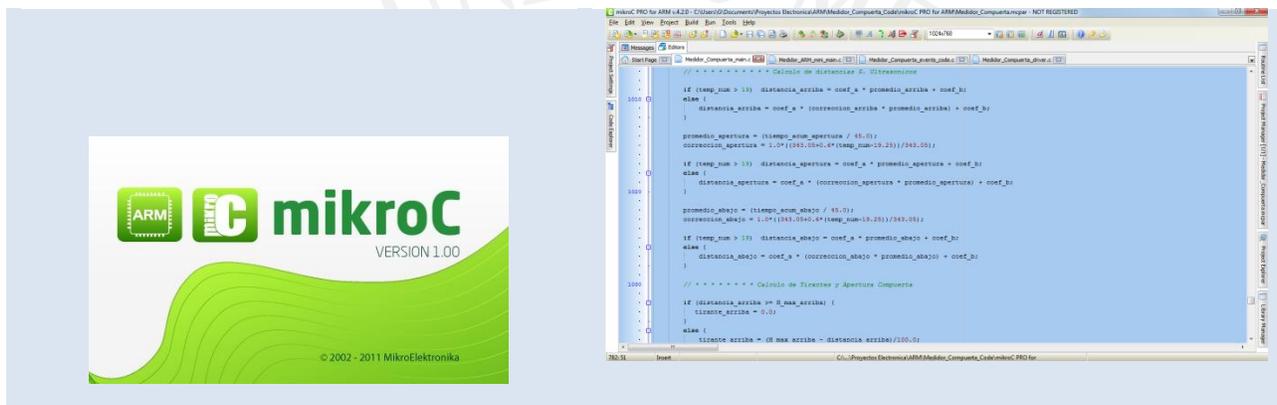


Imagen 3.1 Software MikroC

El medidor trio funciona en base a un microcontrolador ARM de 32 Bits STM32 M4, que cumple con las características de hardware necesarias para el correcto funcionamiento de este medidor

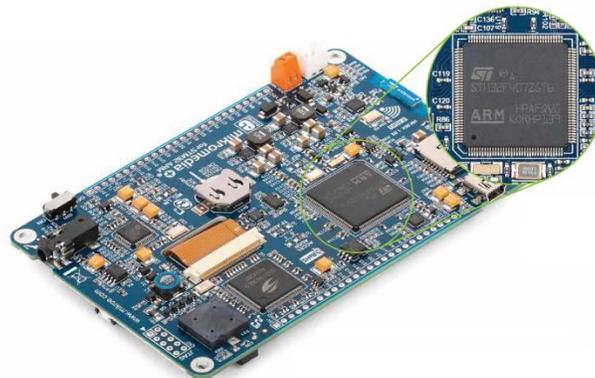


Imagen 3.2 ARM de 32 Bits STM32 M4

En cuanto a la programación se anexa copia del código fuente de manera digital, y a continuación se explicara el funcionamiento del medidor de gasto TRIO.

El medidor cuenta con una pantalla LCD táctil a color de 4.5 pulgadas con una resolución de 480 por 275 pixeles, un ADC de 12 bits, protocolos de comunicación RS-232, I²C, SPI, OneWire, para

manejar los distintos componentes que conforman el medidor (Sensores ultrasónicos, sensores de temperatura, tarjeta de memoria para el almacenamiento de información, módulo GSM/GPRS para la telemetría, entre otros).

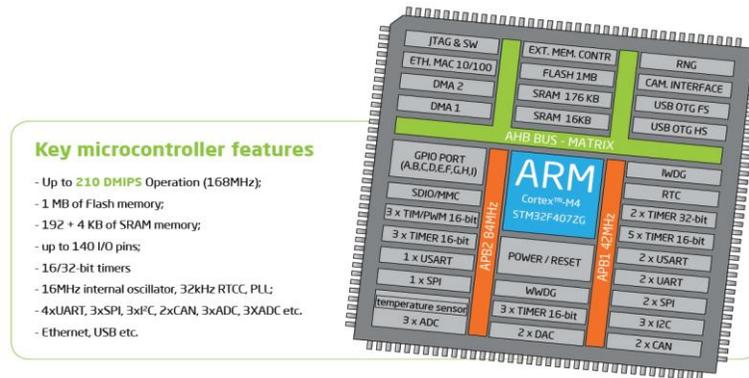


Imagen 3.3 Descripción ARM

El proceso de grabar el microcontrolador es el siguiente, primero debemos escribir nuestro programa en mikroC esto con todas las funciones y algoritmos necesarios para el correcto funcionamiento del equipo de medición, al compilar el código fuente se generan varios archivos, dentro de estos el que destaca es el que tiene la extensión .EXE que es el que tiene la información convertida a instrucciones que entiende el microcontrolador.

Con ayuda del software mikroProg y el programador se copia este archivo en la memoria del programa del microcontrolador, quedando listo para trabajar.



Imagen 3.4 MikroProg

El medidor cuenta con una pantalla de presentación en la cual aparece el logotipo del IMTA la cual solo dura 5 segundos dando tiempo a que el equipo configure las conexiones necesarias para su funcionamiento.



Imagen 3.5 Logo Inicial

Seguido de la presentación se muestra una pantalla en la que se espera a que la tarjeta de memoria sea introducida de lo contrario el equipo no continúa, esto es con la finalidad de que en todo momento la información censada sea almacenada de manera local (punto de medición).



Imagen 3.6 Mikro SD



Imagen 3.7 Tarjeta detectada



Imagen 3.8

Al detectar la tarjeta de memoria el medidor manda el mensaje de que se ha detectado y continúa a la siguiente pantalla, donde nos da la opción de configurar el equipo, esto es agregar las características geométricas de la estructura de medición, un número de celular para la telemetría, un procedimiento para calibrar los sensores ultrasónicos, etc.



Imagen 3.9 Botones Iniciales

Como la pantalla es táctil solo basta con tocar cualquiera de los dos botones. El botón CONFIG. De la figura anterior despliega la siguiente pantalla, donde nos da la opción de calibrar los sensores ultrasónicos.

El botón de datos da la opción de ingresar información de la estructura de medición y un número de celular para hacer consultas de manera remota a través de llamadas perdidas y mensajes de texto y el botón regresar, nos regresa a la pantalla anterior



Imagen 3.10 Calibrar equipo



Imagen 3.11 Ingresar Datos

Al presionar el recuadro de cada elemento a configurar se despliega un teclado numérico para agregar las dimensiones o valor de cada campo.

El teclado se muestra en la siguiente figura.

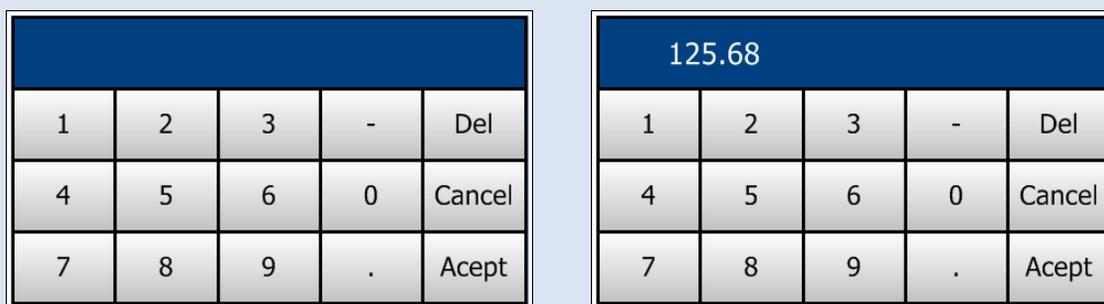


Imagen 3.12 Teclado para ingresar datos

El botón Del sirve para borrar un valor, el botón cancelar regresa a la pantalla anterior sin guardar el valor actual, el botón aceptar guarda el valor actual para la variable que se esté configurando y los botones numéricos despliegan su valor en la pantalla.

Y por último el botón medir despliega la pantalla principal de medición donde se muestran los valores de los tirantes medidos por los sensores ultrasónicos la temperatura y el gasto.



Imagen 3.13 Inicio de Medición

4. PROGRAMACIÓN SOLO

El medidor solo funciona en base a un microcontrolador ARM de 32 Bits STM32 M4, que cumple con las características de hardware necesarias a para el correcto funcionamiento de este medidor, de este equipo se programaron dos versiones, la única diferencia es el sensor que se utiliza para la lectura del tirante, la primera versión funciona con un sensor ultrasónico, y la segunda con un sensor óptico infrarrojo.

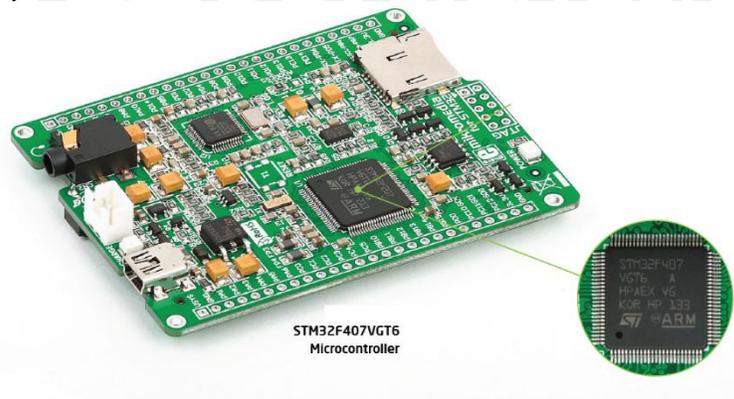


Imagen 4.1 El microcontrolador ARM STM M4

En cuanto a la programación se anexa copia del código fuente de manera digital, y a continuación se explicara el funcionamiento del medidor de gasto SOLO.

El medidor cuenta con una pantalla LCD táctil a color de 3 pulgadas con una resolución de 320 por 240 pixeles, un ADC de 12 bits, protocolos de comunicación RS-232, I²C, SPI, OneWire, para manejar los distintos componentes que conforman el medidor (Sensores ultrasónicos, sensores de temperatura, tarjeta de memoria para el almacenamiento de información, módulo GSM/GPRS para la telemetría, entre otros).

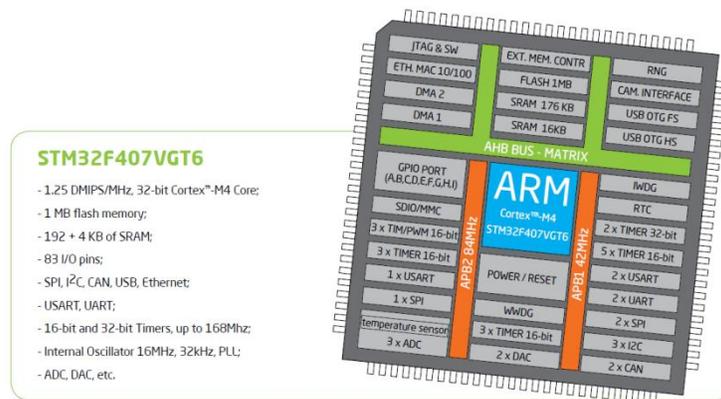


Imagen 4.2 Características ARM

El proceso de grabar el microcontrolador es el siguiente, primero debemos escribir nuestro programa en mikroC esto con todas las funciones y algoritmos necesarios para el correcto funcionamiento del equipo de medición, al compilar el código fuente se generan varios archivos, dentro de estos el que destaca es el que tiene la extensión .EXE que es el que tiene la información convertida a instrucciones que entiende el microcontrolador.

Con ayuda del software mikroProg y el programador se copia este archivo en la memoria del programa del microcontrolador, quedando listo para trabajar.



Imagen 4.3 MikroProg

El medidor cuenta con una pantalla de presentación en la cual aparece el logotipo del IMTA la cual solo dura 5 segundos dando tiempo a que el equipo configure las conexiones necesarias para su funcionamiento.



Imagen 4.4 Presentación de pantalla

Seguido de la presentación se muestra una pantalla en la que se espera a que la tarjeta de memoria sea introducida de lo contrario el equipo no continúa, esto es con la finalidad de que en todo momento la información sensada sea almacenada de manera local (punto de medición).

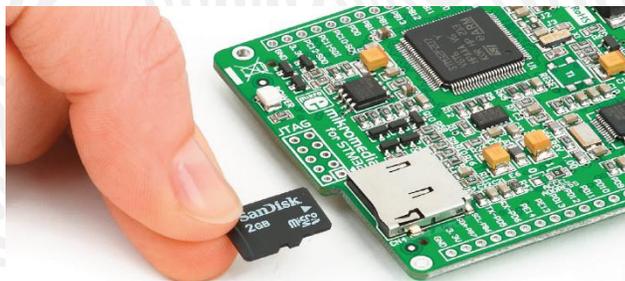


Imagen 4.5 Memoria de almacenado en medidor solo

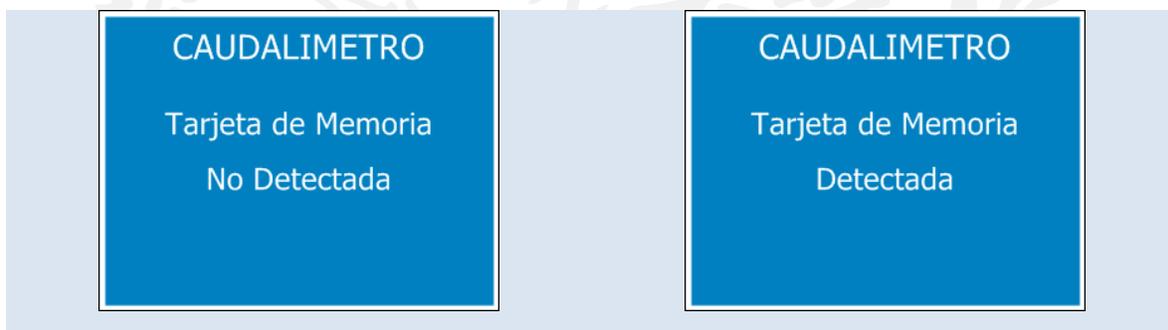


Imagen 4.6 Pantallas de tarjeta detectada

Al detectar la tarjeta de memoria el medidor manda el mensaje de que se ha detectado y continúa a la siguiente pantalla, donde nos da la opción de configurar el equipo, esto es agregar las características geométricas de la estructura de medición, un número de celular para la telemetría, un procedimiento para calibrar los sensores ultrasónicos, etc.



Imagen 4.7 Botones de inicio

Como la pantalla es táctil solo basta con tocar cualquiera de los dos botones. El botón CONFIG. De la figura anterior despliega la siguiente pantalla, donde nos da la opción de calibrar los sensores ultrasónicos u infrarrojo según sea la versión.

El botón de Eq. Gasto da la opción de ingresar información de la ecuación de gasto para la medición y un número de celular para hacer consultas de manera remota a través de llamadas perdidas y mensajes de texto y el botón regresar, nos regresa a la pantalla anterior

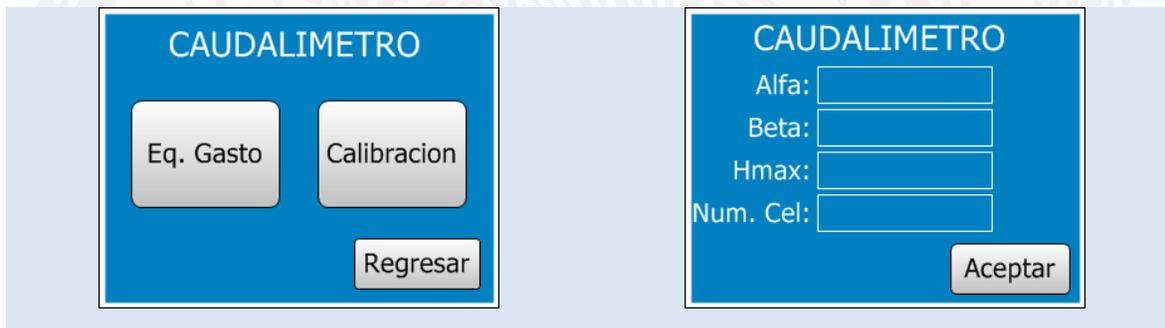


Imagen 4.8 Eq. de gasto

Al presionar el recuadro de cada elemento a configurar se despliega un teclado numérico para agregar las dimensiones o valor de cada campo.

El teclado se muestra en la imagen 4.9.

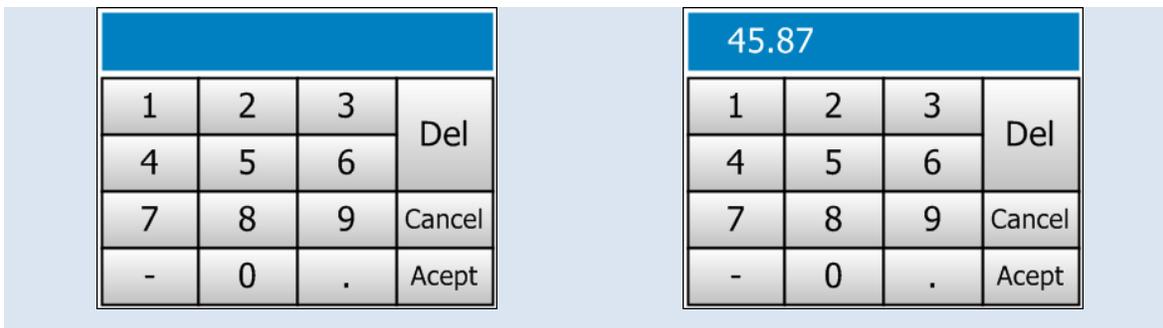


Imagen 4.9 Teclado para ingresar datos

El botón Del sirve para borrar un valor, el botón cancel regresa a la pantalla anterior sin guardar el valor actual, el botón acept guarda el valor actual para la variable que se esté configurando y los botones numéricos despliegan su valor en la pantalla.

Y por último el botón medir despliega la pantalla principal de medición donde se muestran los valores de los tirantes medidos por los sensores ultrasónicos la temperatura y el gasto.

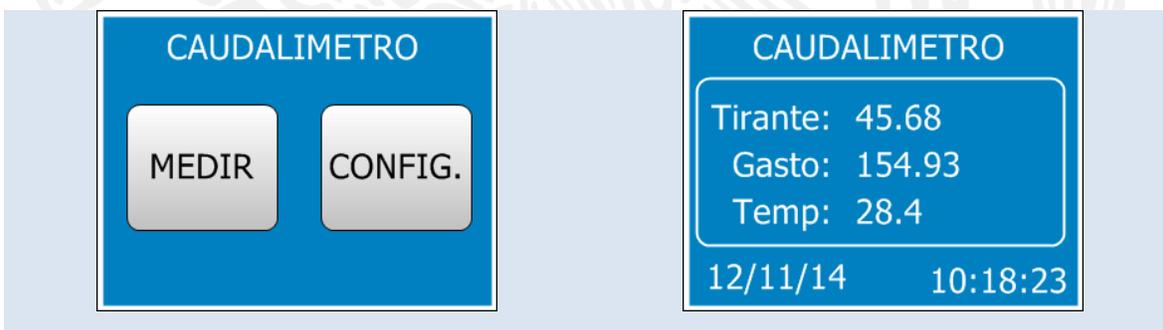


Imagen 4.10 Inicio en la medición

5. ENSAMBLE DE EQUIPOS DE MEDICIÓN

5.1.ARMADO DE EQUIPO DE MEDICIÓN TRIO

Para el armado de los equipos de medición se seleccionaron los componentes necesarios y los más adecuados para poder medir lo más preciso posible, como lo son, microcontrolador, LCD, convertidor analógico digital de 12 bits, conectores y cableado de diferentes tipos, etc.

El equipo de medición trio funciona en base a la tarjeta que contiene un microcontrolador ARM y una pantalla LCD táctil a color de 4.5 pulgadas con una resolución de 480 por 275 pixeles, entre otros componentes que se describirán conforme al desarrollo del ensamble del equipo.

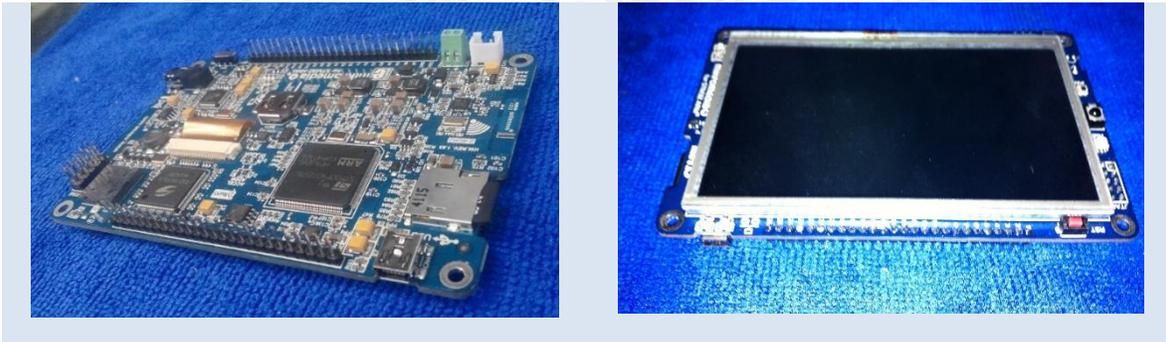


Imagen 5.1 ARM trio

Se toman las dimensiones de la caja o gabinete donde será protegida la electrónica de control, en este caso se seleccionó un estuche de plástico que cierra herméticamente.



Imagen 5.2 Gabinetes

Con las dimensiones interiores de la caja, procedemos a cortar el Sintra que servirá como caratula del equipo de medición.

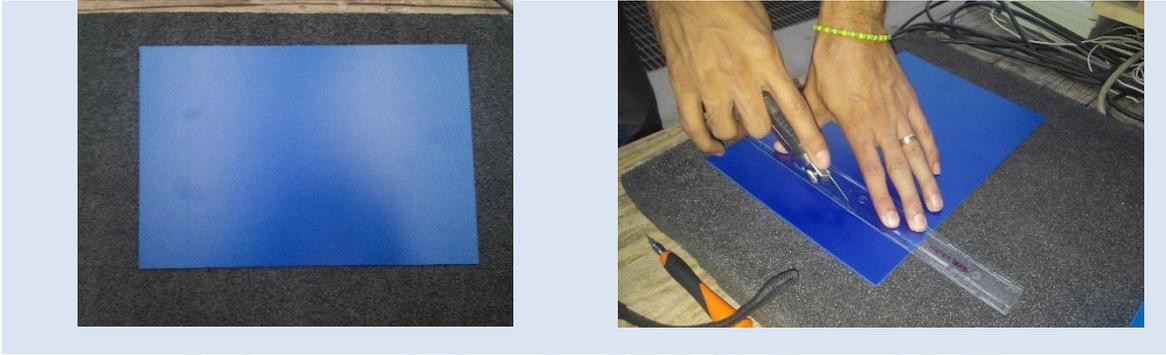


Imagen 5.3 Cortes de Sintra

Se redondean las esquinas para ajustar el Sintra a las dimensiones y formas de la caja de plástico, posterior a esto se marca y se corta el Sintra con las dimensiones de la pantalla táctil.

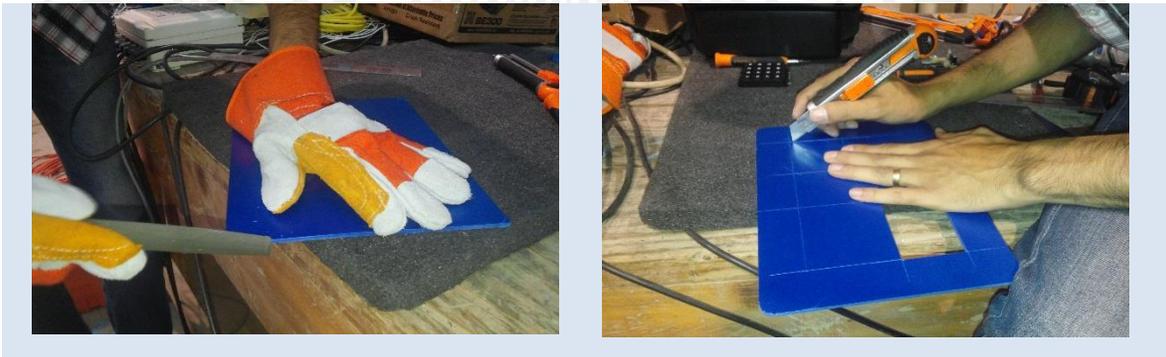


Imagen 5.4

Con los cortes realizados sobre el Sintra se fija la pantalla a este.



Imagen 5.5 Acoplamiento

Continuamos con el armado de los sensores ultrasónicos y el cableado que llevara la información sensada hasta el equipo de control.

Se soldan con el cautín los conectores molex y los pines a los sensores ultrasónicos y a la tarjeta para este sensor, a la cual también va integrado el sensor de temperatura.

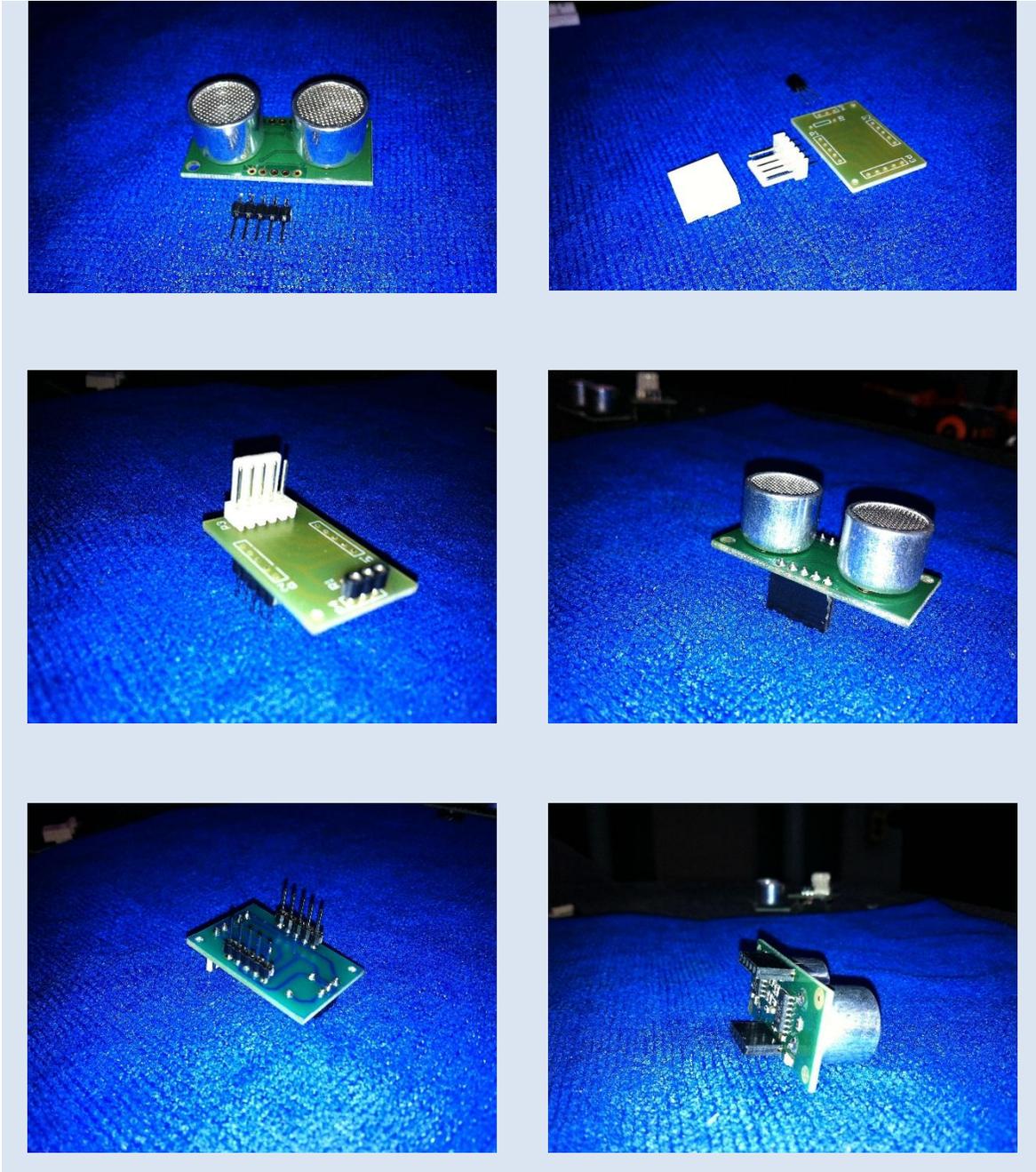


Imagen 5.6 Sensor ultrasonico

Continuamos con el armado del cable de datos, el cual lleva un conector molex hembra de 5 pines en una de sus puntas

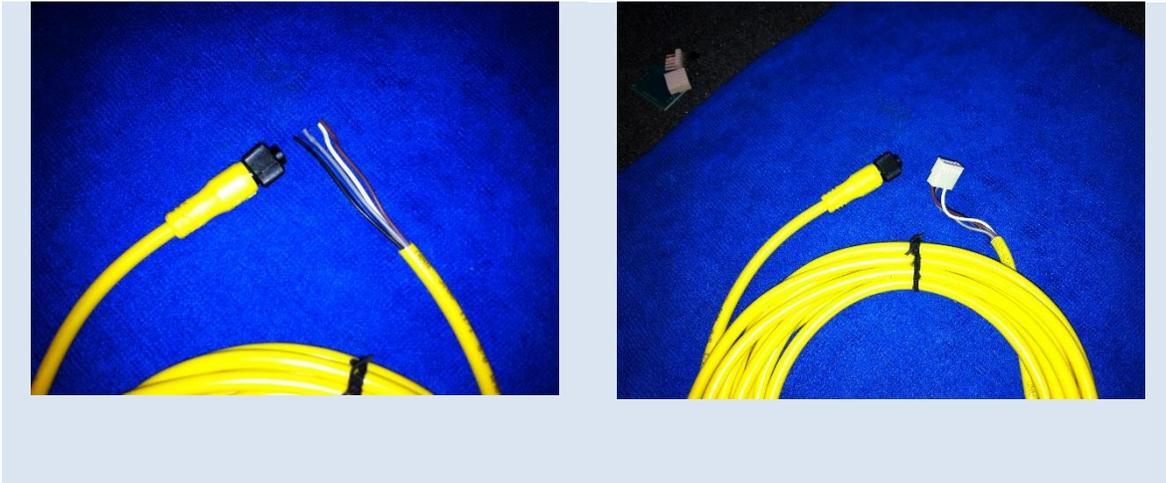


Imagen 5.7 Cable de 5m y conector molex

Con los cables armados y los sensores y tarjetas soldadas se integran en la cubierta para el sensor, la cual está fabricada en Nylacero, y está compuesta de dos partes, una almacena los sensores y la otra es una tapa que va complementada con un conector glándula para no dejar pasar polvos, agua o humedad dentro de esta cubierta.



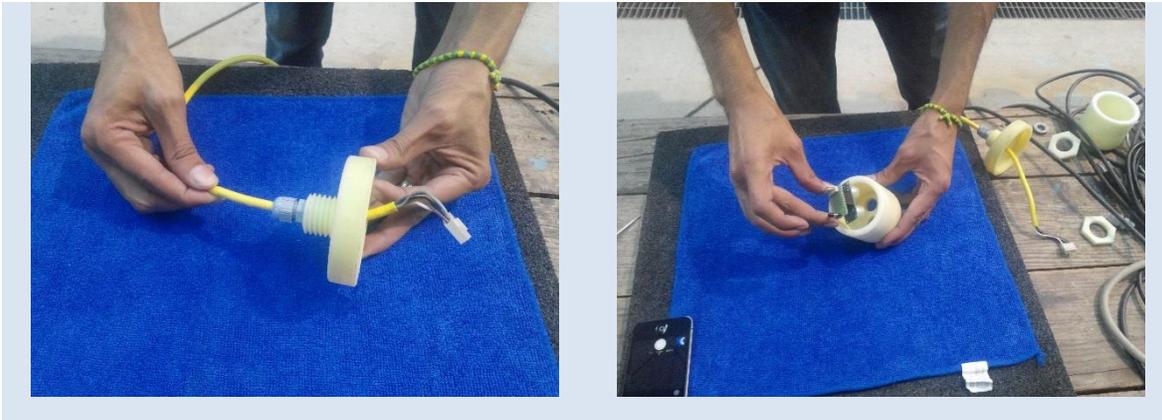


Imagen 5.8 Cubierta Nylacero y sensores

Colocación del sensor ultrasónico y de temperatura dentro de la cubierta de protección de Nylacero.



Imagen 5.9 Sensor ultrasonico armado

Se diseñaron y construyeron dos tarjetas adicionales, una para bajar los niveles de voltaje de una batería de 12 Volts a 5 y a 3.3V que son los voltajes con los cuales funciona toda la electrónica de este medidor de gasto, la segunda es para la comunicación entre la parte de la telemetría GSM/GPRS y el equipo de control.

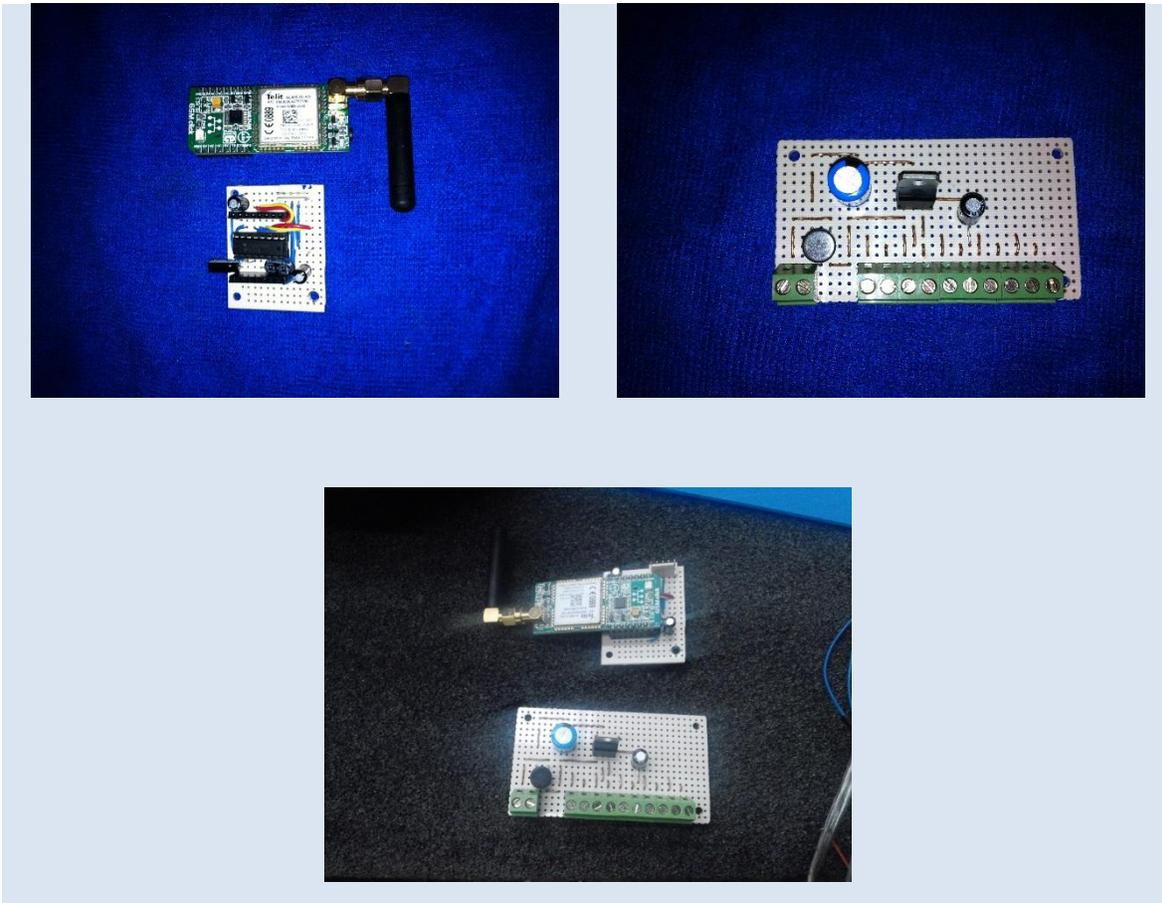


Imagen 5.10 Dispositivo para telemetría

Se perfora el estuche de plástico con el taladro para la colocación de los conectores hembra que complementan el cable que comunica los sensores con la parte del control, a estos, se coloca un conector molex hembra de tres vías.

Al estuche se le hacen tres perforaciones de $\frac{3}{4}$ de pulgada para los tres sensores ultrasónicos, y uno de $\frac{1}{2}$ pulgada para el cable de alimentación eléctrica.

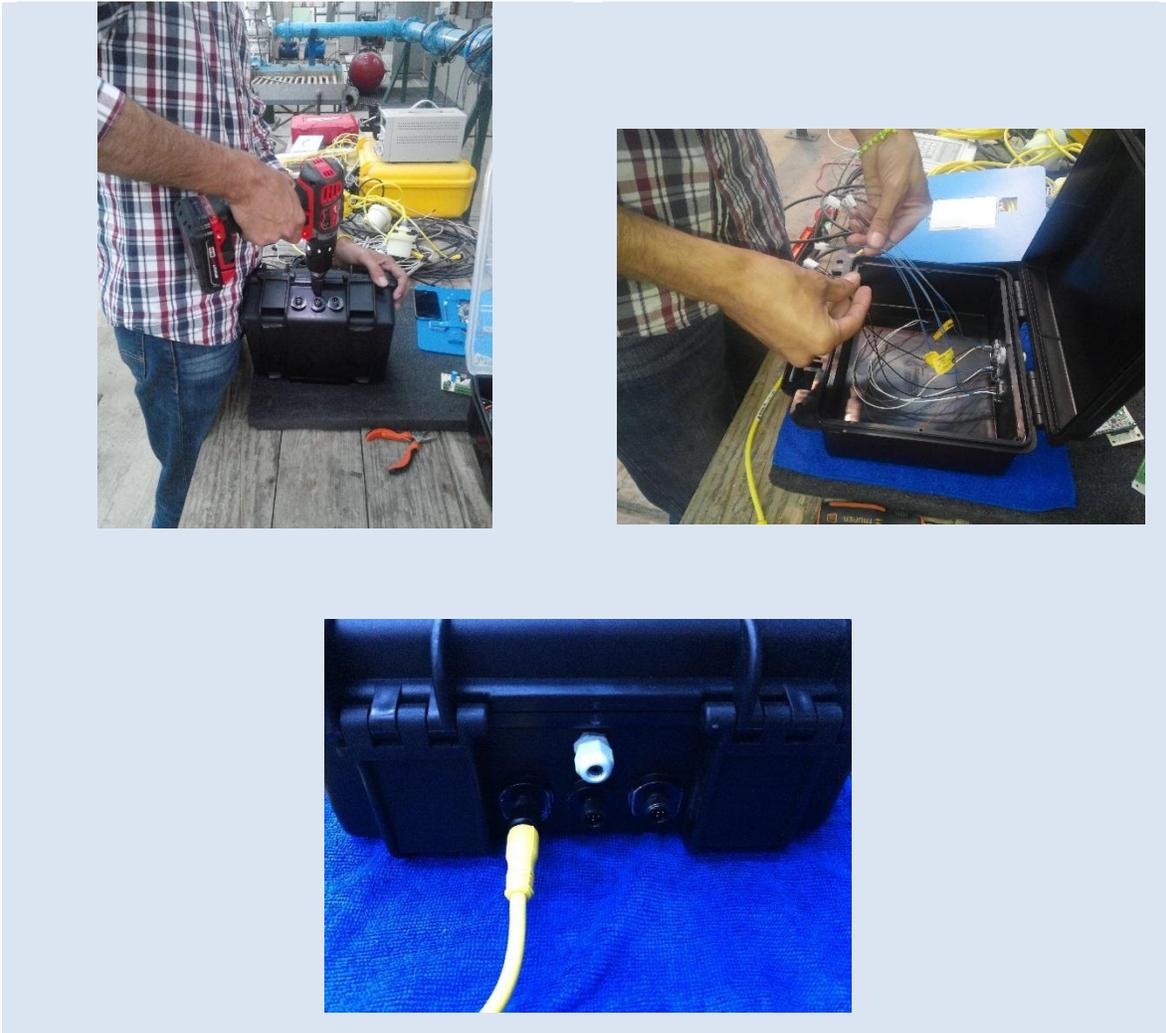


Imagen 5.11 Estuche hermetico

Con todos los elementos listos, caratula del medidor, tarjetas de comunicación GSM, Niveles de voltaje, Cables, Cubiertas y sensores armados se agrupan para finalizar el armado del equipo.

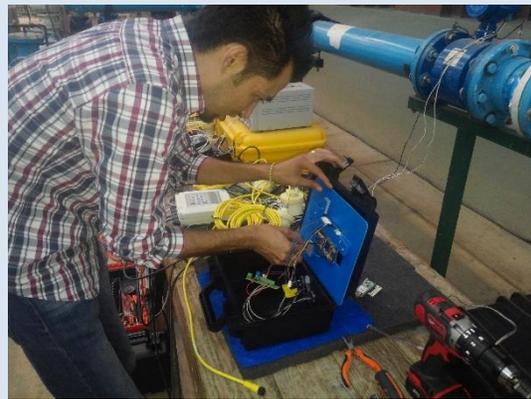




Imagen 5.12 Instalación de sensores y dispositivos

5.2.ARMADO DE EQUIPO DE MEDICIÓN SOLO (ULTRASÓNICO E INFRARROJO)

Para el armado de los equipos de medición se seleccionaron los componentes necesarios y los más adecuados para poder medir lo más preciso posible, como lo son, microcontrolador, LCD, convertidor analógico digital de 12 bits, conectores y cableado de diferentes tipos, etc.

El equipo de medición solo funciona en base a la tarjeta que contiene un microcontrolador ARM y una pantalla LCD táctil a color de 3 pulgadas con una resolución de 320 por 240 pixeles, entre otros componentes que se describirán conforme al desarrollo del ensamble del equipo.

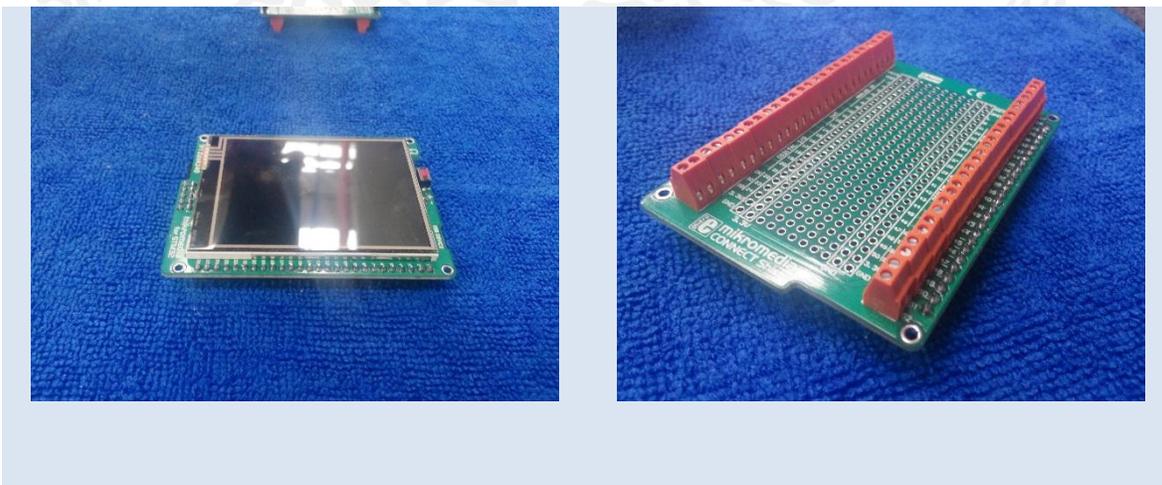




Imagen 5.13 ARM medidor solo

Se toman las dimensiones de la caja o gabinete donde será protegida la electrónica de control, en este caso se seleccionó un estuche de plástico que cierra herméticamente.



Imagen 5.14 Estuche vacío

Con las dimensiones interiores de la caja, procedemos a cortar el Sintra que servirá como caratula del equipo de medición.

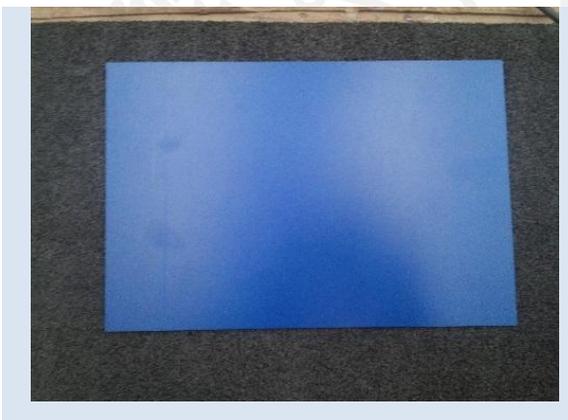


Imagen 5.15 Sintra

Se redondean las esquinas para ajustar el Sintra a las dimensiones y formas de la caja de plástico, posterior a esto se marca y se corta el Sintra con las dimensiones de la pantalla táctil.

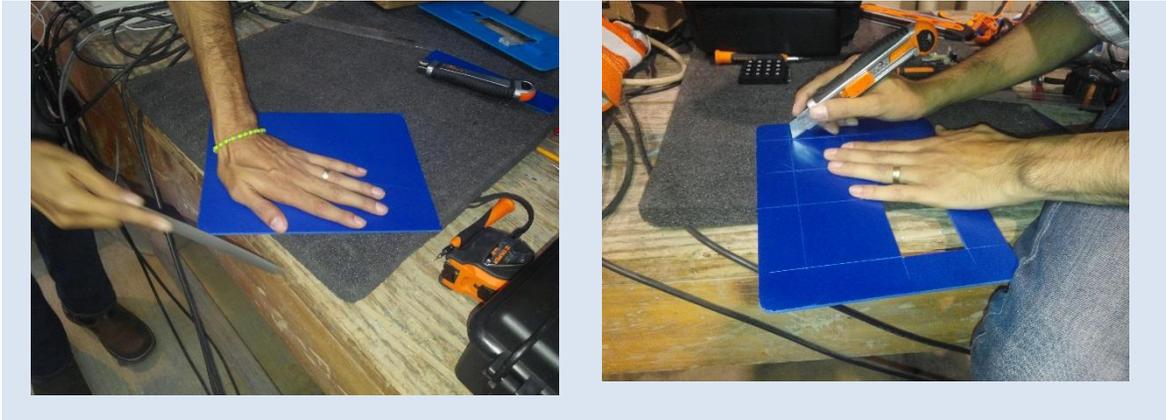


Imagen 5.16 Cortes de Sintra

Con los cortes realizados sobre el Sintra se fija la pantalla a este.

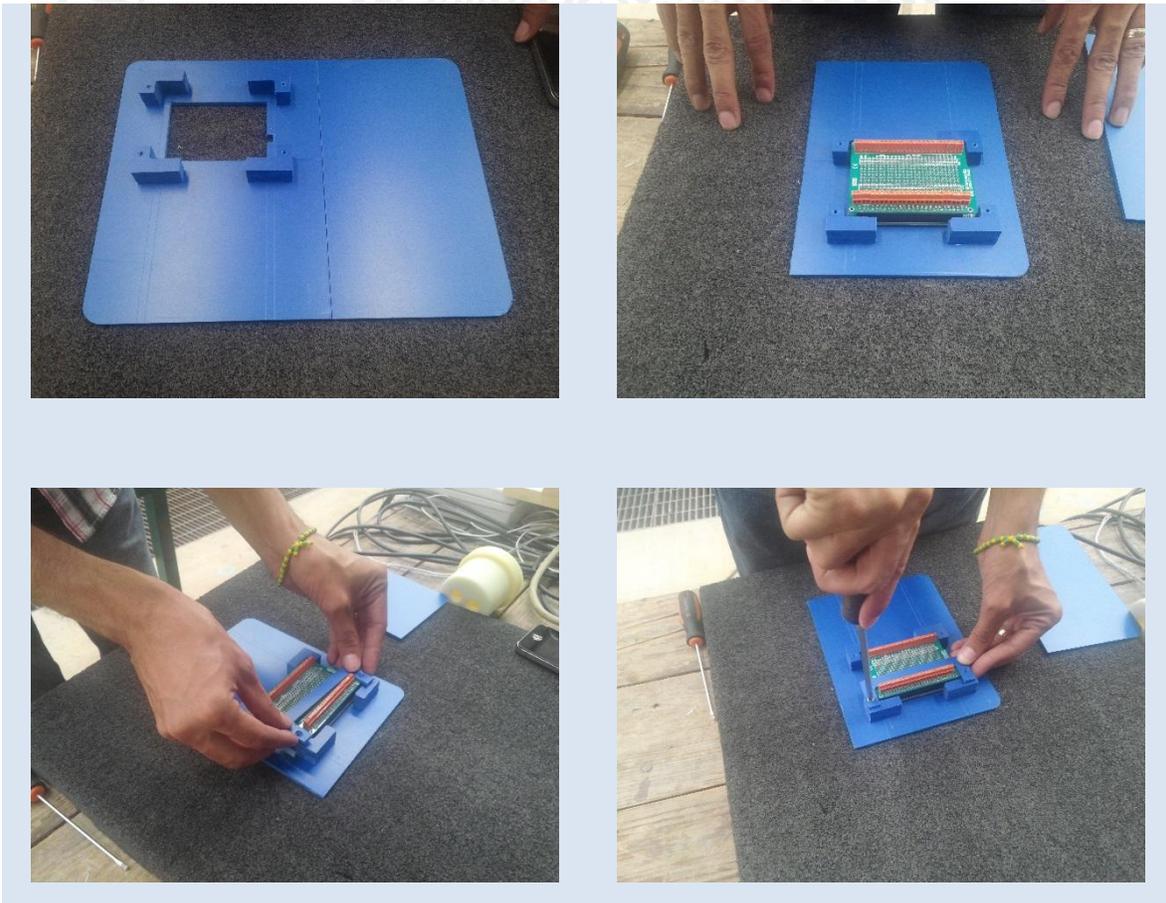


Imagen 5.17 Colocación de pantalla principal

Continuamos con el armado de los sensores ultrasónicos y el cableado que llevara la información sensada hasta el equipo de control.

Se soldan con el caudín los conectores molex y los pines a los sensores ultrasónicos y a la tarjeta para este sensor, a la cual también va integrado el sensor de temperatura.

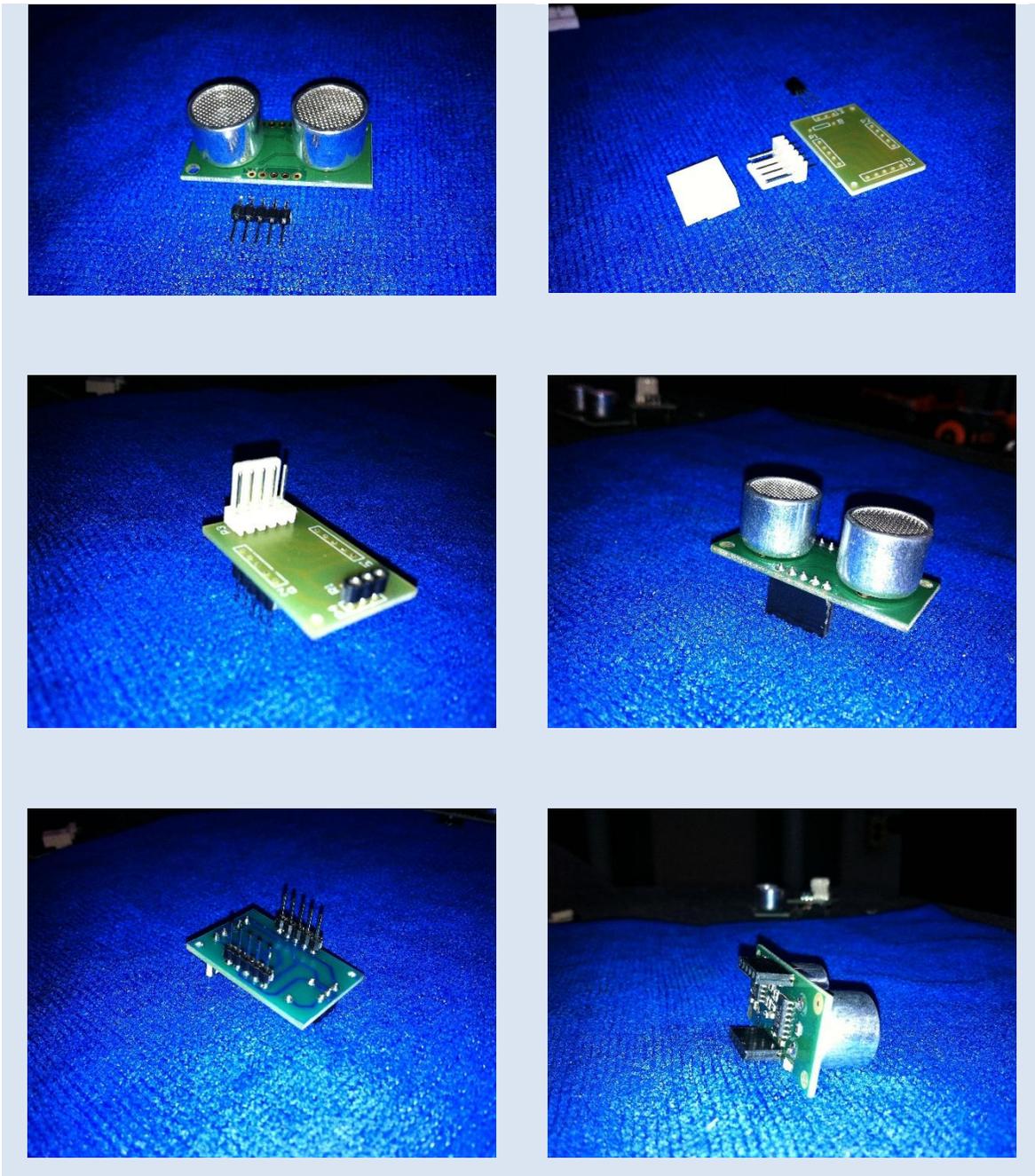


Imagen 5.18 Armado sensor ultrasonico y cableado

Continuamos con el armado del cable de datos, el cual lleva un conector molex hembra de 5 pines en una de sus puntas

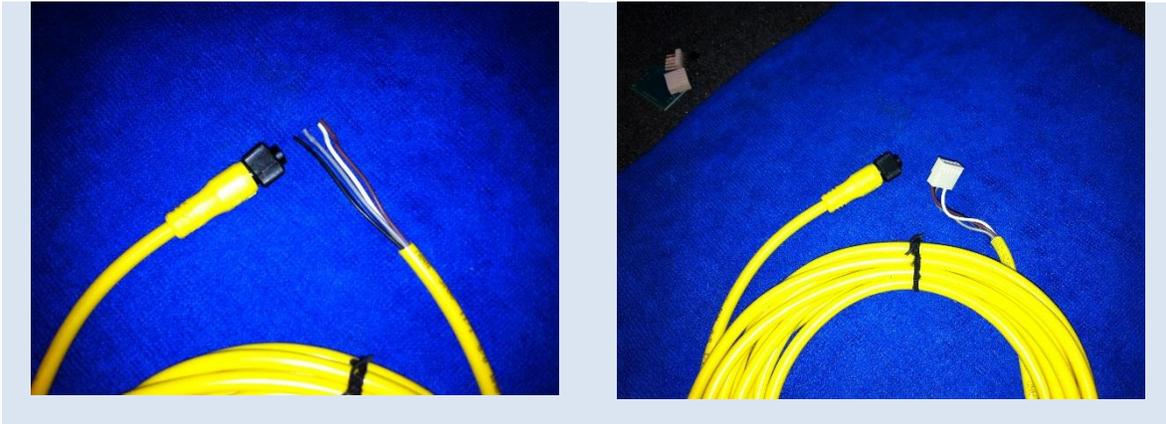
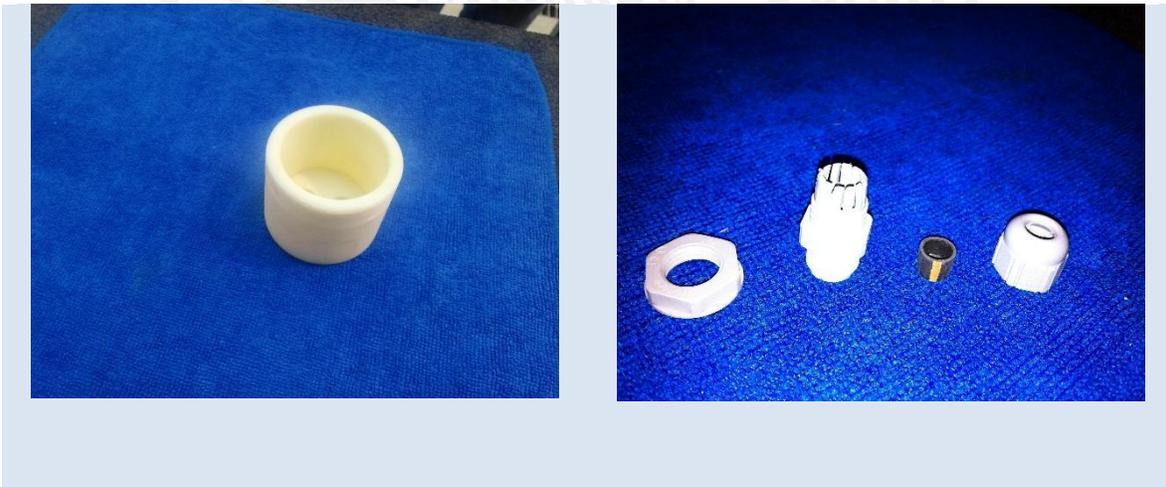


Imagen 5.19 Cable de conexión de 5m

Con los cables armados y los sensores y tarjetas soldadas se integran en la cubierta para el sensor, la cual está fabricada en Nylacero, y está compuesta de dos partes, una almacena los sensores y la otra es una tapa que va complementada con un conector glándula para no dejar pasar polvos, agua o humedad dentro de esta cubierta.



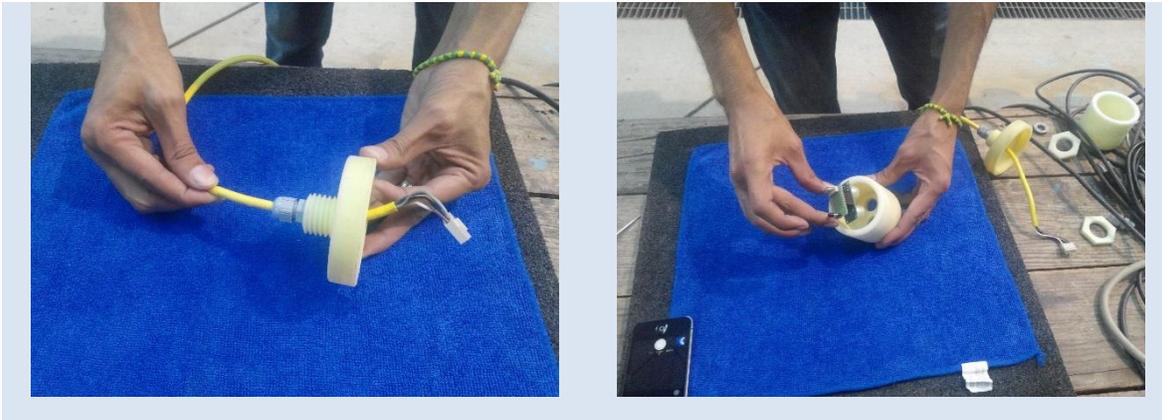


Imagen 5.20 Armado de sensor ultrasónico en Nylacero

Colocación del sensor ultrasónico y de temperatura dentro de la cubierta de protección de Nylacero.



Imagen 5.21 Armado final de sensor ultrasonico

Se diseñaron y construyeron dos tarjetas adicionales, una para bajar los niveles de voltaje de una batería de 12 Volts a 5 y a 3.3V que son los voltajes con los cuales funciona toda la electronica de este medidor de gasto, la segunda es para la comunicación entre la parte de la telemetria GSM/GPRS y el equipo de control.

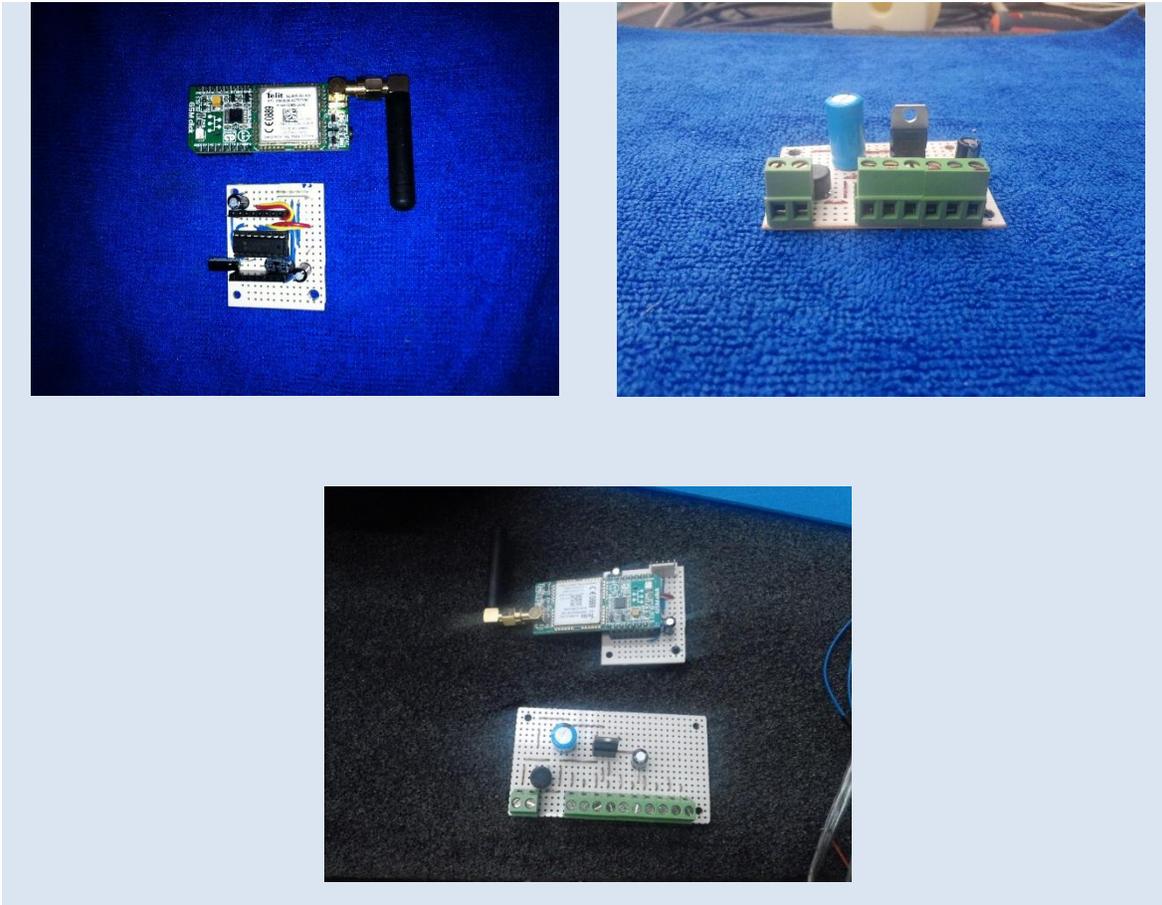


Imagen 5.22 Dispositivo de comunicación

Se perfora el estuche de plástico con el taladro para la colocación del conector hembra que complementa el cable que comunica los sensores ultrasónicos y de temperatura con la parte del control, a este, se le coloca un conector molex hembra de tres vías.

Al estuche se le hace una perforaciones de $\frac{3}{4}$ de pulgada para el sensor ultrasónico y de temperatura, y uno de $\frac{1}{2}$ pulgada para el cable de alimentación eléctrica.

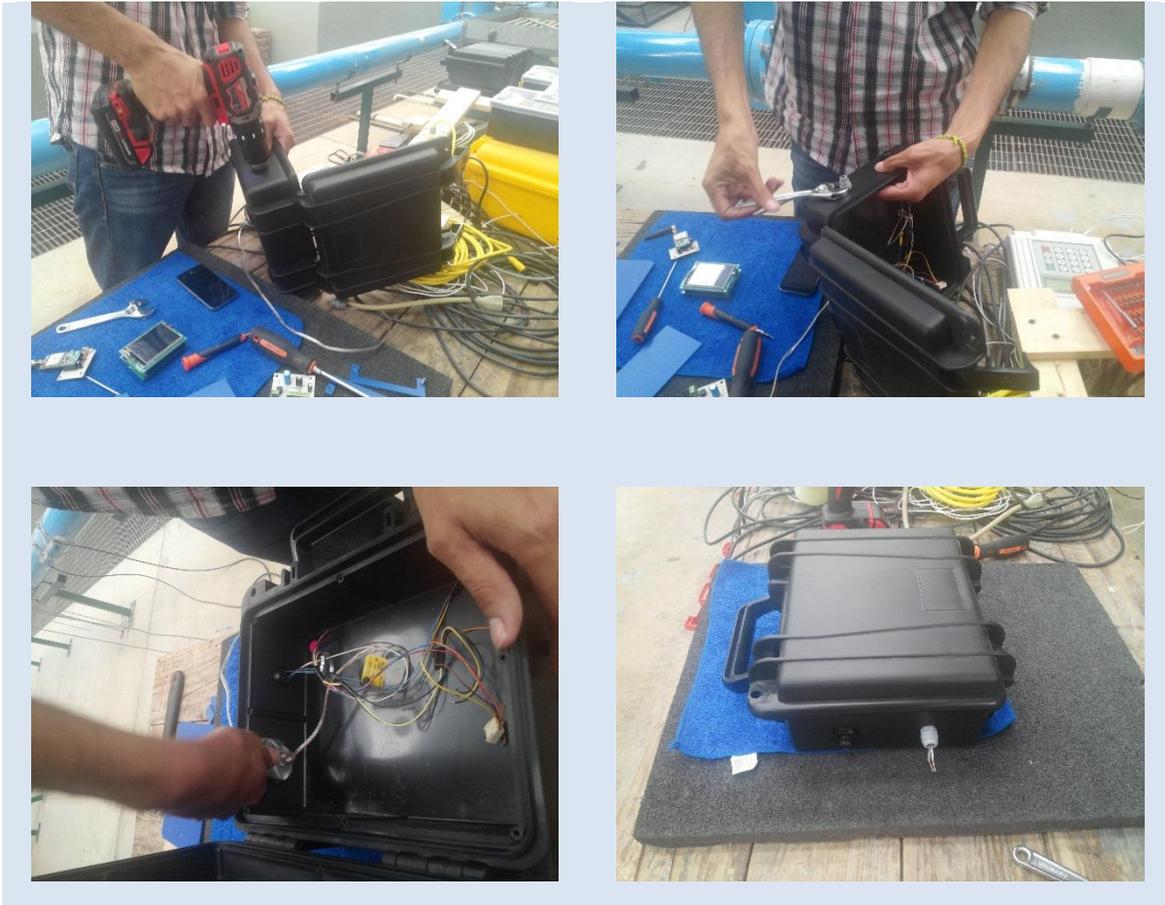


Imagen 5.23 Acoplamiento de estuche hermetico

Para la protección de los sensores se recubren con foam, que es una espuma suave y fácil de trabajar, esta se recorta de acuerdo a las dimensiones de la cubierta del sensor.

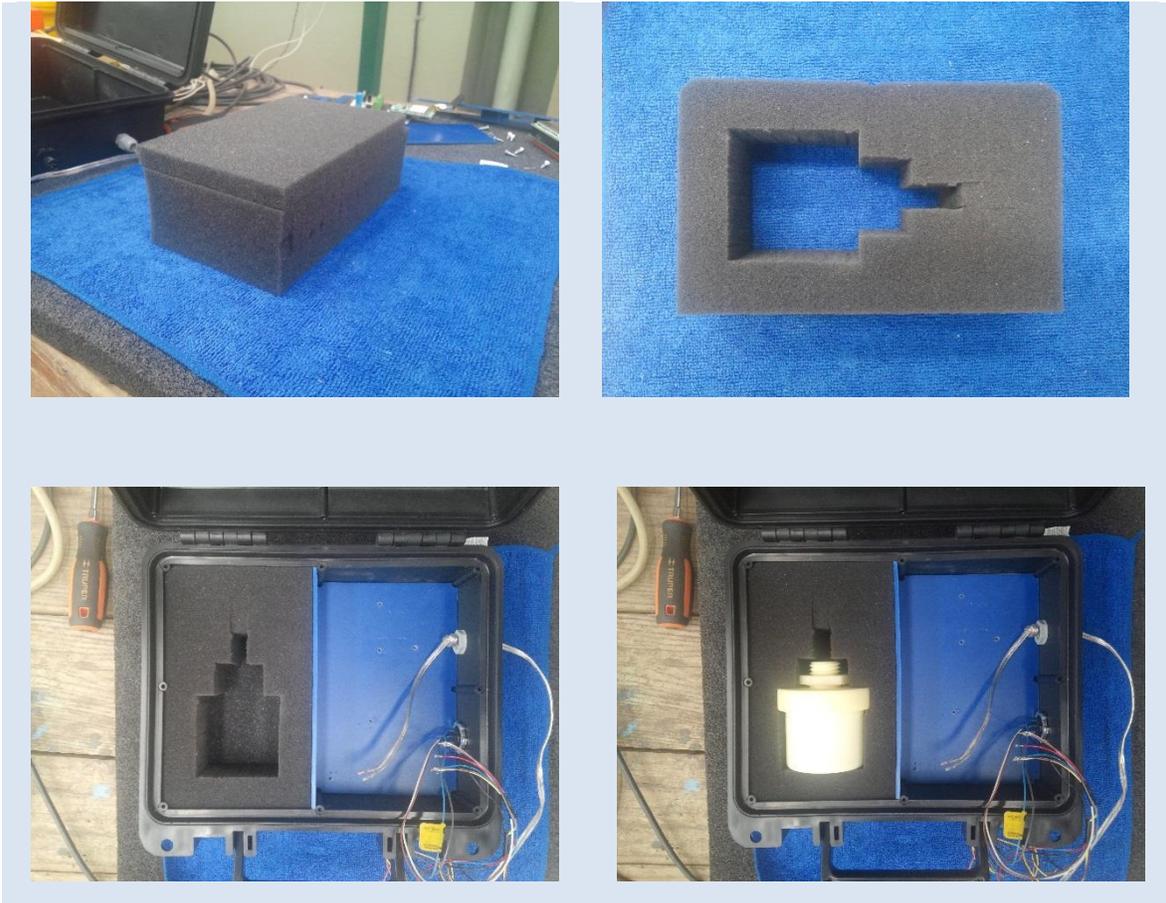


Imagen 5.24 Base para sensor ultrasonico completo

Con todos los elementos listos, caratula del medidor, tarjetas de comunicación GSM, Niveles de voltaje, Cables, Cubiertas y sensores armados se agrupan para finalizar el armado del equipo.

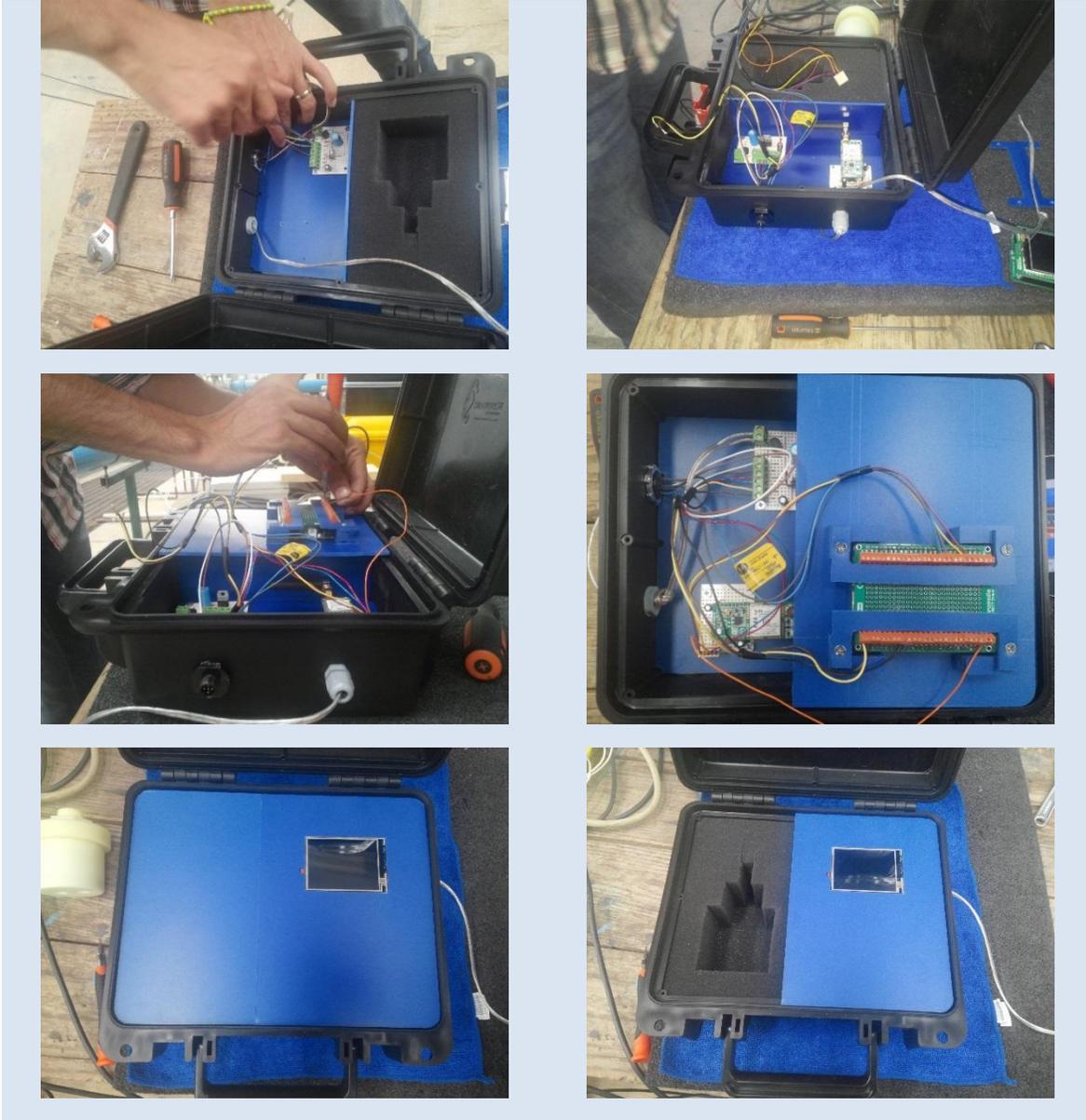




Imagen 5.25 Ensamble de equipo

5.3.Diseño de estructura de medición

Se diseñó una estructura de medición tipo Aforador de Garganta Larga (AGL) para poder hacer pruebas de funcionamiento y precisión del equipo de medición ultrasónico e infrarrojo.

Con ayuda del software de diseño winflume, se establecieron las dimensiones del aforador, y su ecuación de gasto.

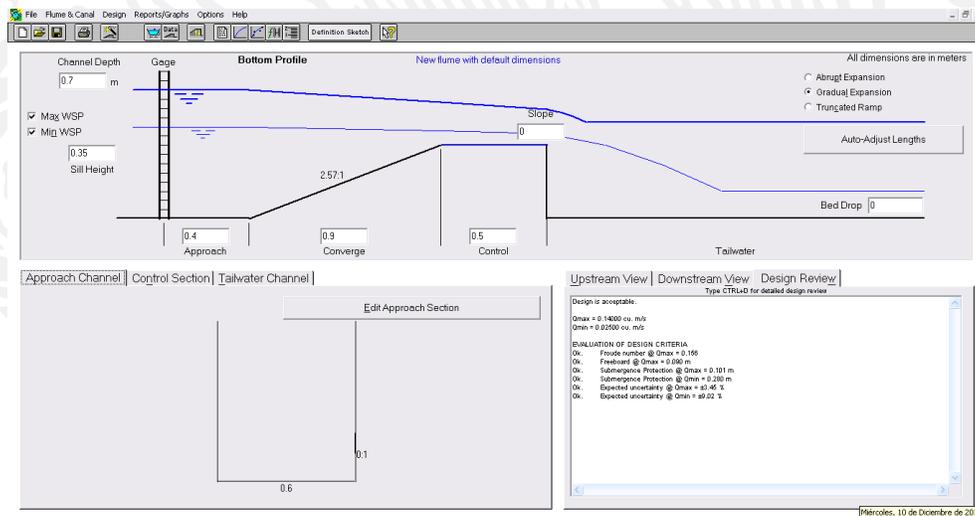


Imagen 5.26 Software WinFlume

En las siguientes figuras se muestran las secciones del canal para la construcción del aforador de garganta larga

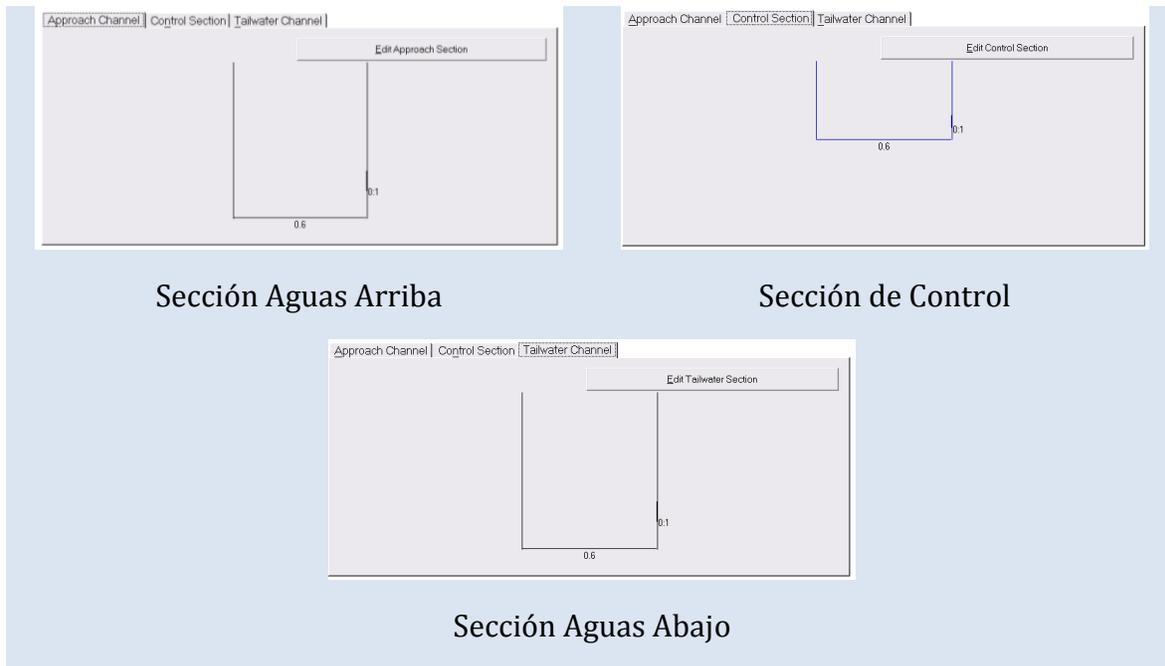


Imagen 5.27 Secciones del canal

Las siguientes figuras muestran el aforador visto de aguas arriba y visto de aguas abajo

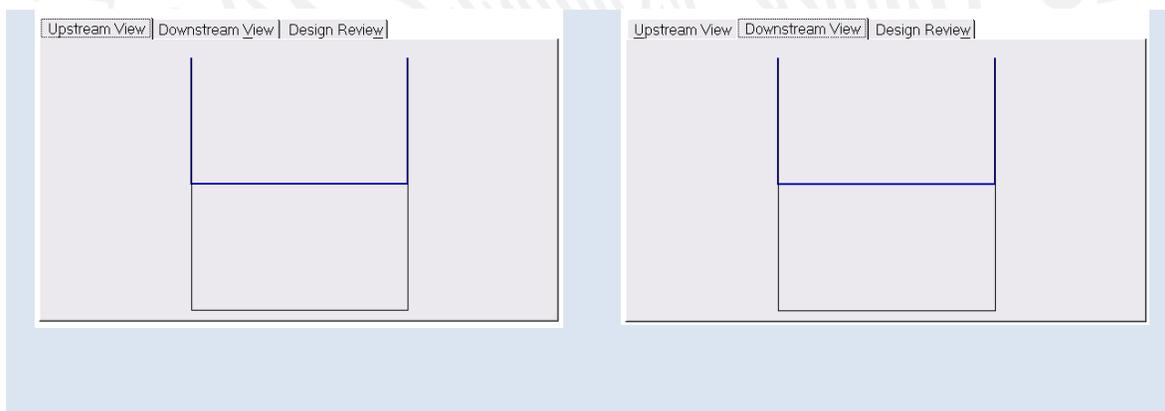


Imagen 5.28 Vista aguas arriba y aguas abajo

La siguiente figura muestra los datos de diseño como son gasto mínimo, máximo, coeficiente de rugosidad de Manning y pendiente.

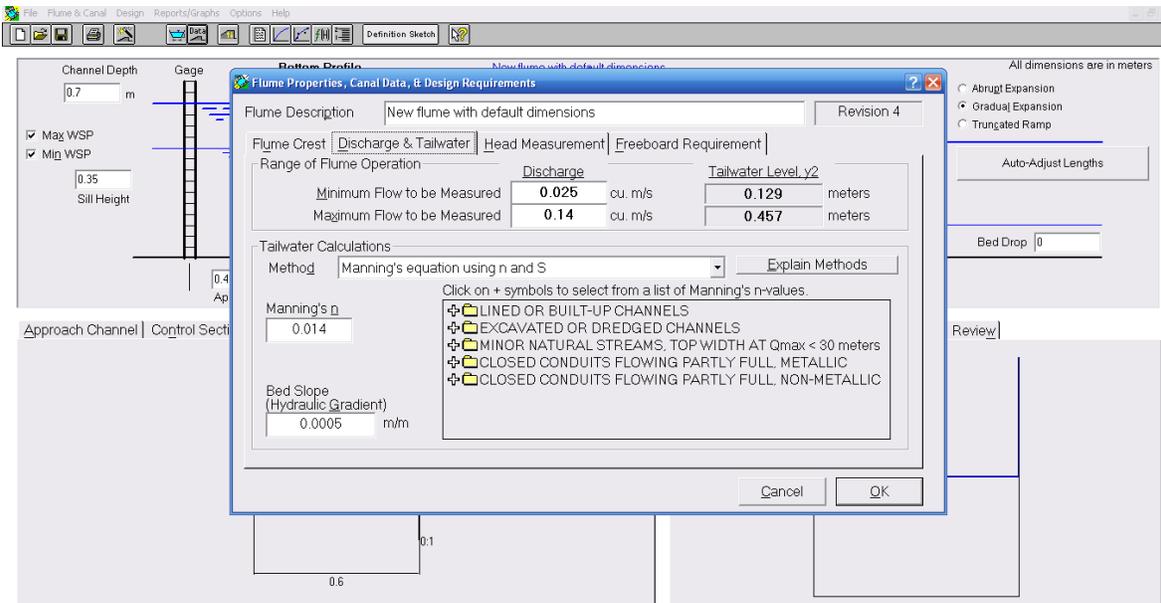


Imagen 5.29 Datos de diseño

Con el diseño aceptable se genera una ecuación para calcular el gasto a través del aforador, las figuras siguientes muestran la ecuación de gasto de tipo potencial y la curva de gasto generada con esta.

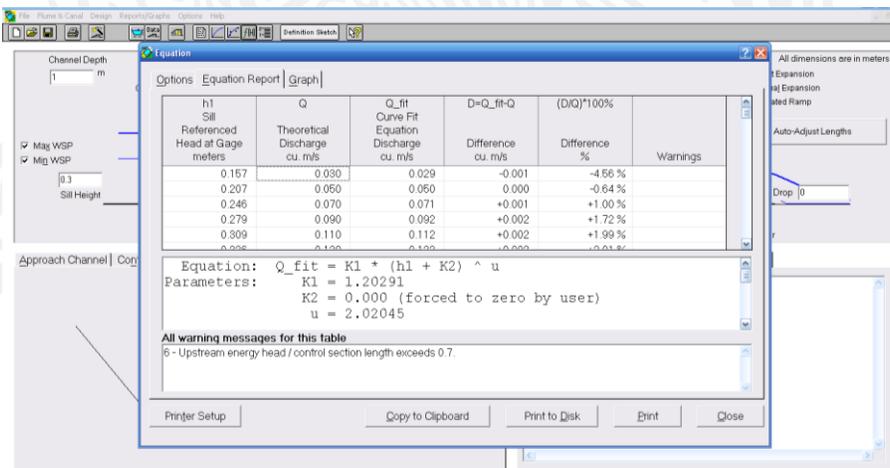
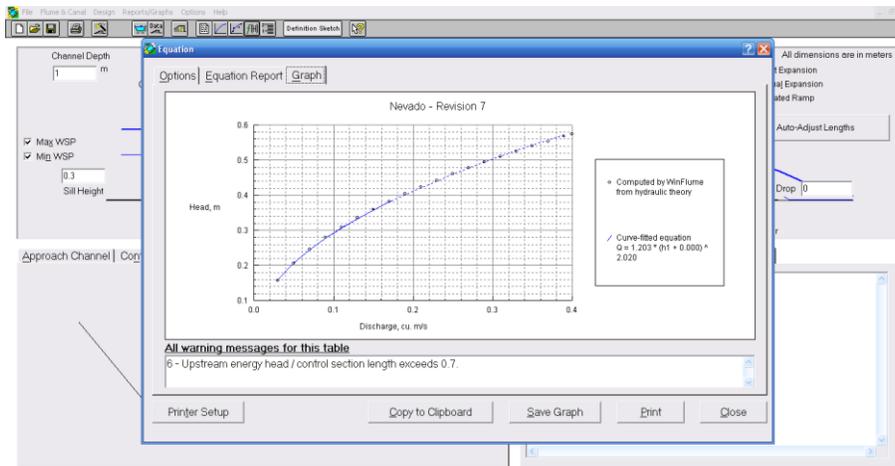


Imagen 5.30 Ecuación de gasto



5.4. Construcción e instalación de modelo de Aforador de Garganta Larga AGL

Para el armado del modelo del AGL se eligió acrílico transparente de 6 mm de espesor por ser fácil de cortar y maquinar.

El modelo está pensado para instalarse en un canal rectangular de 60 cm de ancho fabricado en una base de acrílico y paredes de vidrio templado.

5.4.1. Proceso de fabricación.

Se trazó en papel milimétrico el modelo para tener en cuenta las dimensiones reales del modelo a la hora de cortar las piezas en el acrílico y no tener problemas a la hora de ensamblar todo el modelo y reducir el desperdicio de material.

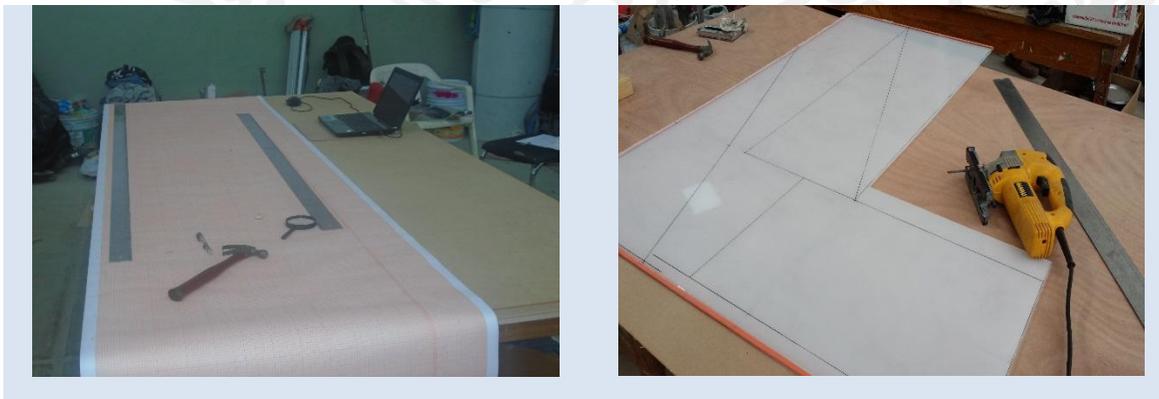


Imagen 5.31 Diseño de las piezas

El acrílico se cortó con una sierra caladora y se rectificó con un router.



Imagen 5.32 Cortes de acrílico

Para el ensamble de todas las piezas previamente cortadas y rectificadas se utilizó pegamento para acrílico y silicón frío.

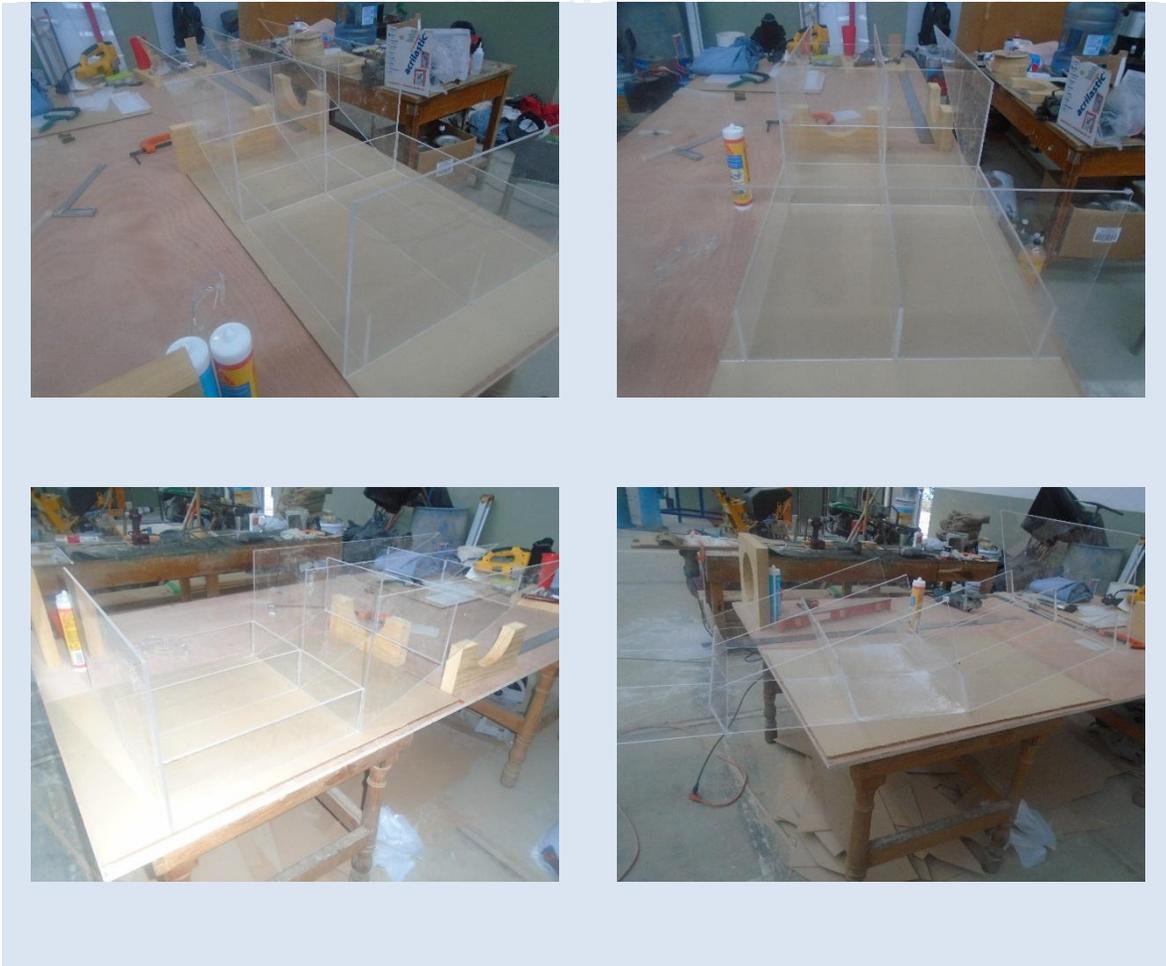


Imagen 5.33 Armado de piezas de acrílico

Con el modelo del AGL ensamblado en su totalidad se instala en el canal indicado en la figura, y se pegó con silicón.



Imagen 5.34 Instalación del AGL

Ya pegado el modelo sobre el canal se retiran las protecciones que trae el acrílico





Imagen 5.35 Instalación completo AGL

5.5. Instalación y pruebas de equipo de medición de gasto

Primero se fabricó la base para la colocación del sensor ultrasónico e infrarrojo. Para esta base se utilizó madera, por ser fácil de trabajarla, se cortó, perforó y se hicieron ranuras de acuerdo a las dimensiones de la base para los sensores y el paso libre de los cables que comunican los sensores con el equipo de control.



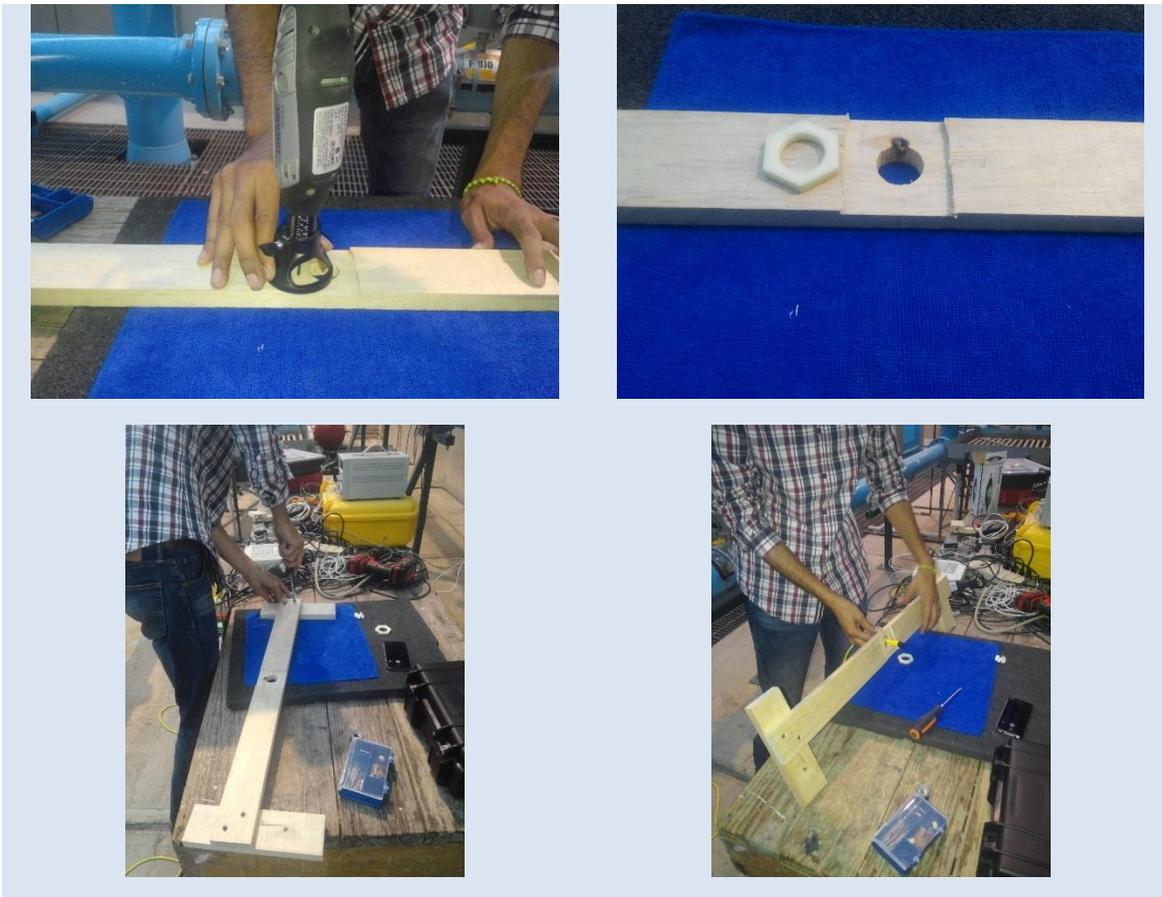
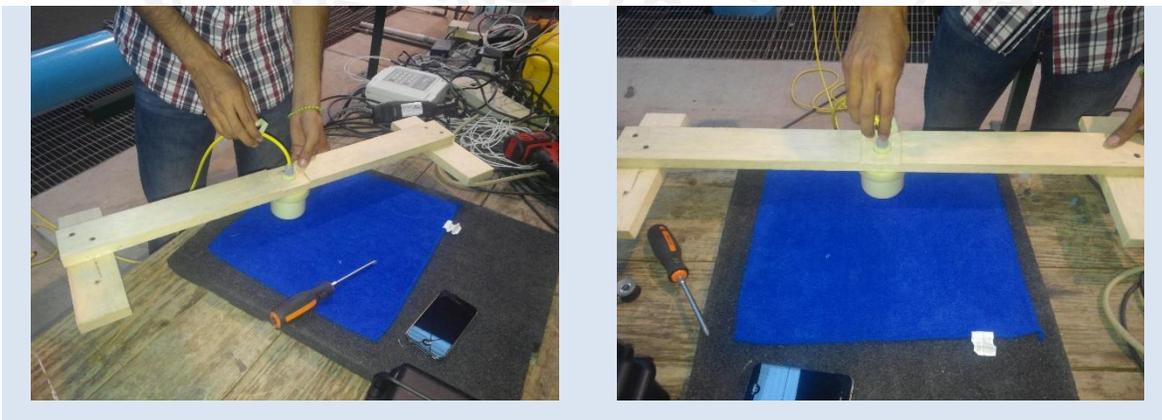


Imagen 5.36 Base para sensor

Con todos los cortes ensamblados y perforados se instalan los sensores en la base y quedan listos para instalarlos sobre el canal y hacer las pruebas de funcionamiento.



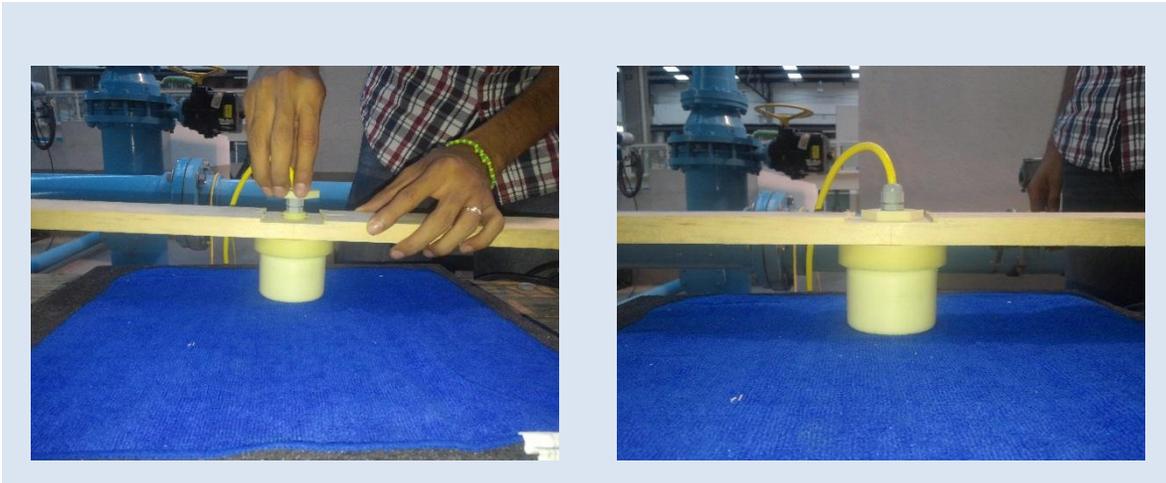


Imagen 5.37 Instalación del sensor

Instalación del equipo de medición sobre canal.



Imagen 5.38 Instalación del equipo de medición

Nivelación de los sensores y determinación del 0 para la medición referida a la altura de la garganta del AGL.



Imagen 5.39 Nivelación del sensor ultrasónico

Conexiones del equipo de medición, estas son muy sencillas solo se conecta a una batería o una fuente de alimentación de 12V.



Imagen 5.40 Conexión del equipo de medición

Vista general del sensor ya instalado sobre la estructura del canal.

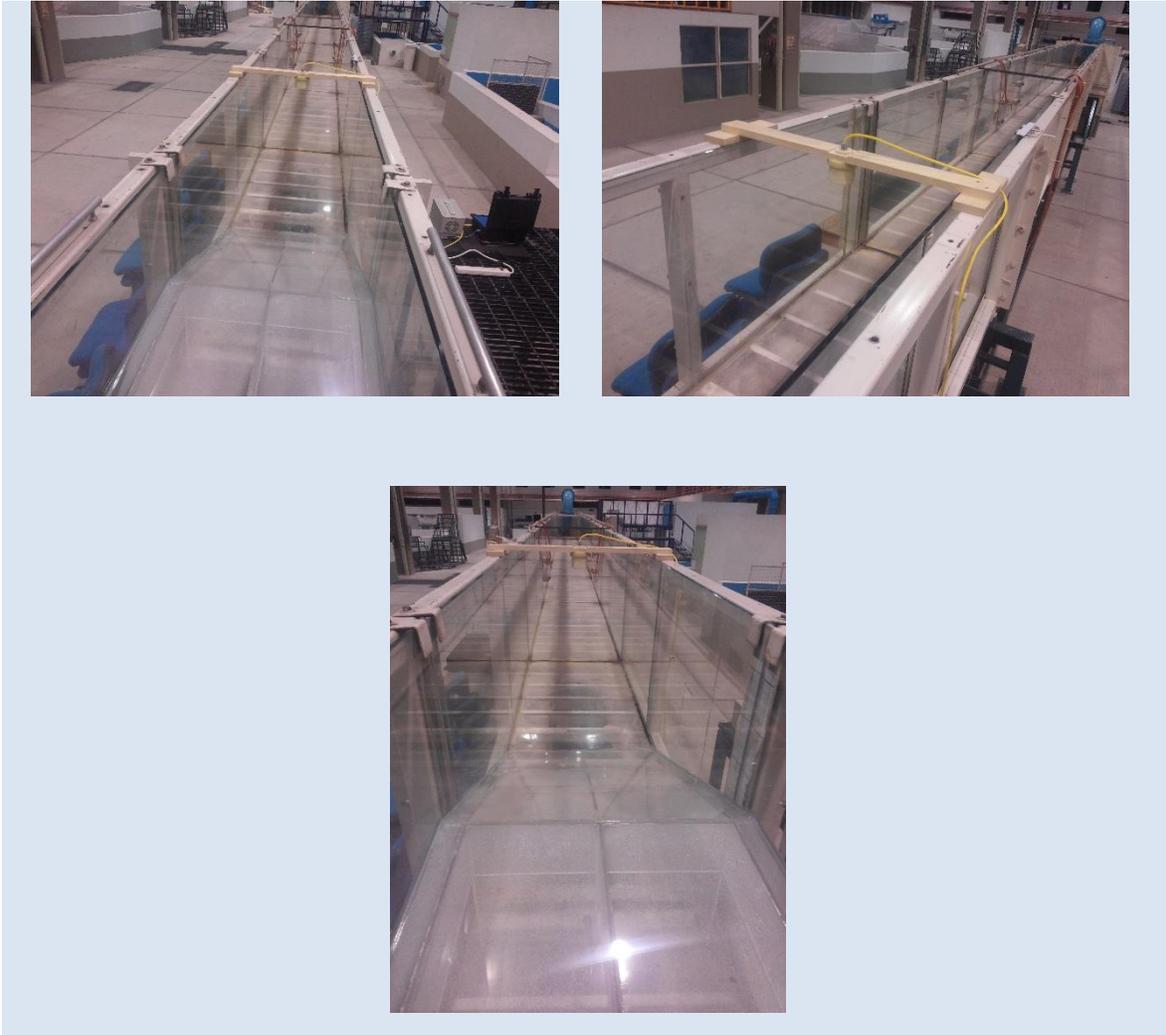


Imagen 5.41 Instalacion Final

5.6. Pruebas realizadas

Las pruebas fueron realizadas en un ambiente controlado, en el canal cuya longitud es de 18 metros y una sección rectangular de 60 cm en la base y una altura de 75 cm, construido en su base de acrílico y las paredes en vidrio templado, reforzado por una estructura metálica para mayor resistencia a la deformación a cargas grandes.

El aforador está diseñado para medir gastos de 0 a 160 l/s



Imagen 5.42 Prueba en canal del gasto medido

Para dicha prueba se utilizaron los siguientes equipos (el mencionar el nombre de los equipos no implica su recomendación).

- Medidor de tiempo de travesía Rittmayer
- Medidor de efecto Doppler Unidata
- Medidor de gasto ultrasónico "Solo"
- Medidor de gasto Infrarrojo del tipo "Solo"

5.6.1. Medidor de Flujo de Tiempo de Transito Multi-trayectoria

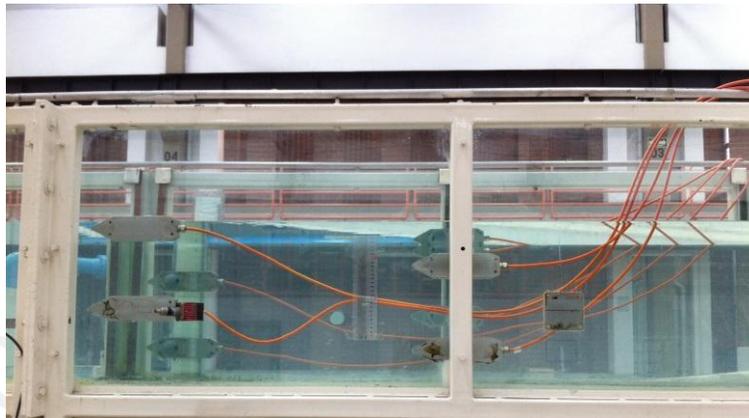


Imagen 5.43 Medidor de nivel

Se trata de un equipo Rittmeyer que se utiliza como patrón de medida comparativa del flujo, es un equipo de alta precisión de la medida (0.5% del caudal medido) de caudal con dos trayectorias que se encuentra instalado en el sitio de prueba. La electrónica completa se muestra en la siguiente figura.

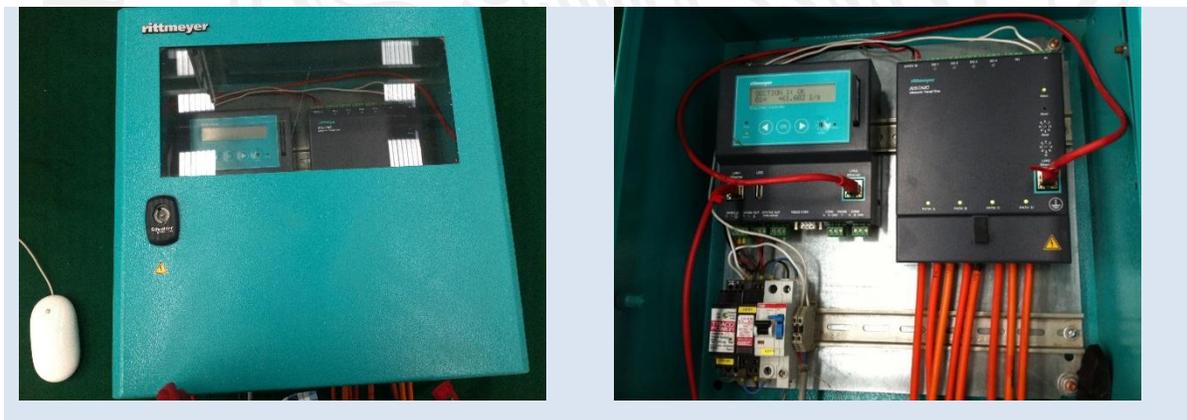


Imagen 5.44 Rittmeyer (medidor de nivel)

Siendo los medidores Solo e infrarrojo los equipos a validar, y el medidor de tiempo de travesía Rittmeyer el equipo testigo, este por ser un equipo con alta confiabilidad y precisión al medir con menos del 0.5% al gasto medidor de error, y el medidor de efecto Doppler ubicado al fondo del canal, como testigo también a comparar.

5.6.2. Medidor de efecto Doppler Unidata

El medidor calcula el gasto en función de dos variables principales: el área hidráulica y la velocidad media. Sin embargo, cada una de esas variables tampoco se mide directamente; más bien, se miden otras variables físicas.

El medidor de efecto doppler calcula el área hidráulica en función del tipo de sección y de la profundidad de agua. Para medir la profundidad se utiliza un transductor. Un transductor es un dispositivo que proporciona una salida eléctrica en respuesta a una magnitud física que se desea medir. Para este caso se desea medir la profundidad del agua y lo que realmente se mide es la presión. Después que se tiene la profundidad del agua se puede calcular el área hidráulica.

El ultrasonido es un sonido con frecuencia mayor que la perceptible por el oído humano. El medidor tiene unos emisores de ondas de ultrasonido y unos receptores de las mismas. Primeramente el emisor envía una onda a una determinada frecuencia y el receptor capta las onda que son reflejadas en el agua, inclusive, la onda puede reflejarse en partículas de sólidos en suspensión o en burbujas de aire. Si el agua está en movimiento, las ondas reflejadas tendrán una frecuencia diferente de la emitida; la diferencia de frecuencia indica al dispositivo la velocidad de la corriente.



Imagen 5.45 Sensor de Medidor de nivel

5.6.3. Medidor de Gasto Solo e infrarrojo

El medidor Solo e infrarrojo son equipos que miden gasto de manera indirecta al igual que los equipos anteriores, y se auxilian de la medición de otras variables para tal fin, en este caso los equipos Solo e infrarrojo miden tirante que con ayuda de una estructura de medición ya sea un aforador de garganta larga o un vertedor logran medir gasto con muy buena precisión.

Los siguientes esquemas ilustran la instalación de este tipo de medidores

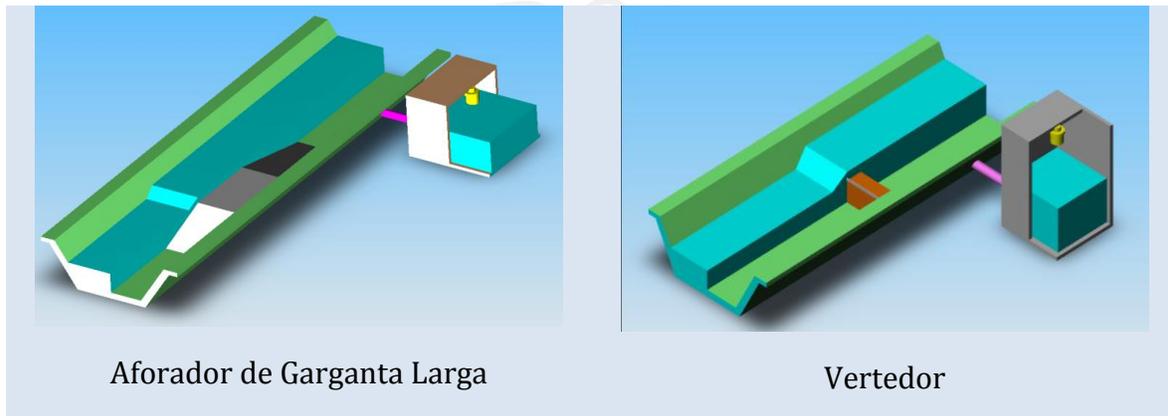


Imagen 5.46 Aforador y vertedor

Las siguientes fotografías ilustran los equipos involucrados en la prueba



Imagen 5.47 Medidor Rittmeyer



Imagen 5.48 Medidor Ultrasónico e infrarrojo



5.6.4. Medidor Unidata

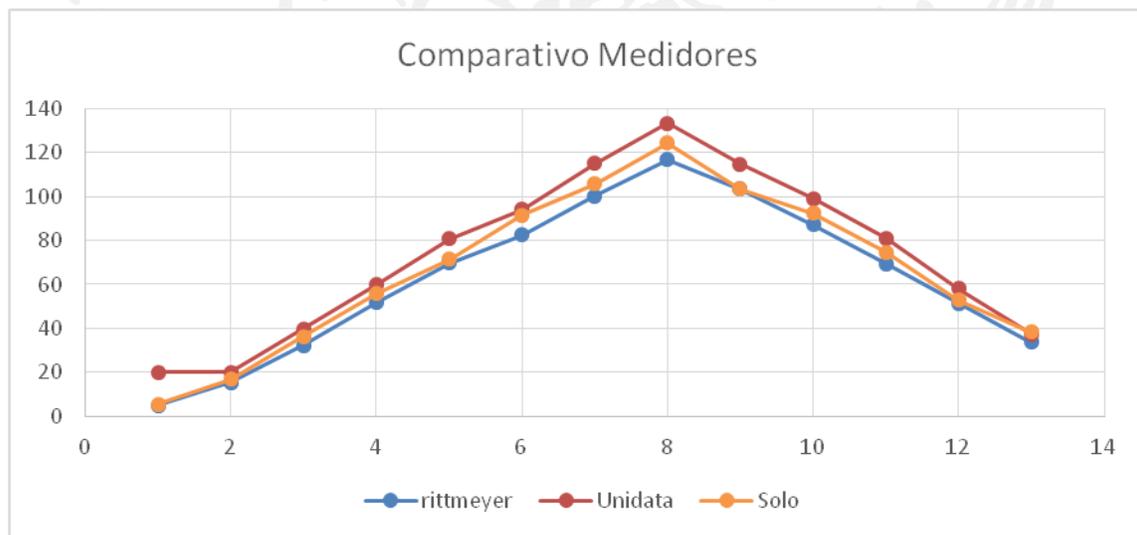
En la siguiente prueba intervienen los equipos: Rittmeyer, Unidata y Solo, teniendo gastos entre 0 y 140 l/s, el control de gasto se hizo con una válvula a la cual se le abría o cerraba para incrementar y reducir el gasto respectivamente.

La siguiente tabla contiene datos de algunos gastos comparados durante la prueba, todos los datos están en l/s.

	5.042	20	5.41
	15.371	20	16.96
	32.247	39.858	36.34
	51.586	59.803	55.68
	69.611	80.65	71.4
	82.6	94.068	91.46
	100.315	115.124	105.69
	116.715	133.256	124.24
	103.364	114.849	103.47
	87.041	99.116	92.33
	69.476	80.96	74.71
	51.483	58.036	52.83
	33.698	37.577	38.3

Tabla 5.1 Datos comparativos de diferentes medidores

La grafica siguiente es un comparativo de los 3 medidores donde se observa que el medidor Unidata presenta dificultades al medir gastos muy pequeños dado que la velocidad es de aproximadamente 0.02 m/s, y el medidor solo es más preciso en gastos pequeños y se despega un poco del equipo de multitrayectoria Rittmeyer para gastos más grandes.

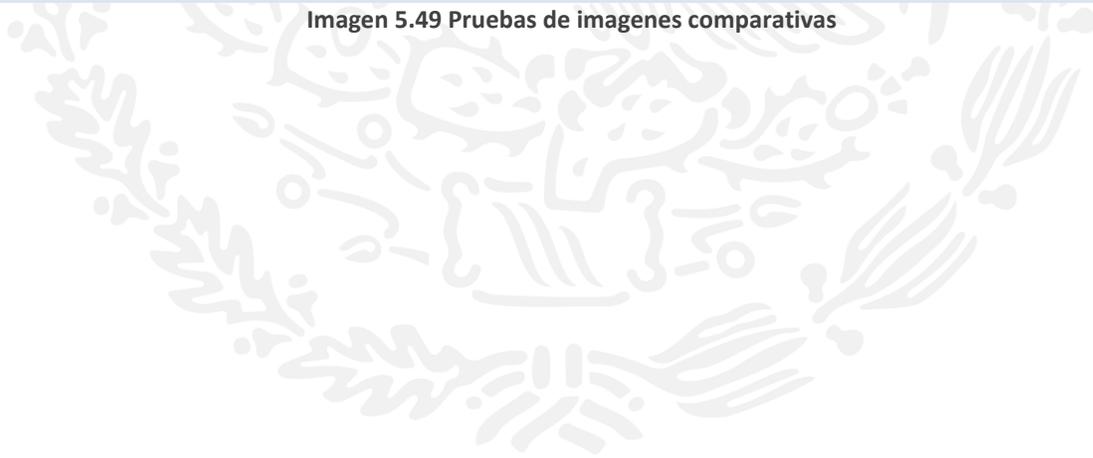


Grafica 5.1 Grafica comparativa de medidores

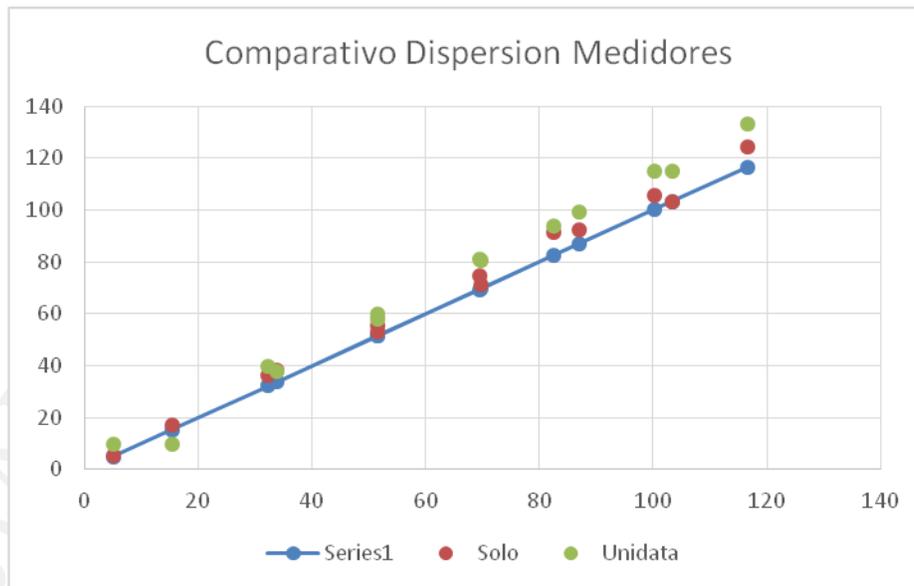
Las fotografías siguientes muestran algunos perfiles de las pruebas realizadas en el canal.



Imagen 5.49 Pruebas de imágenes comparativas

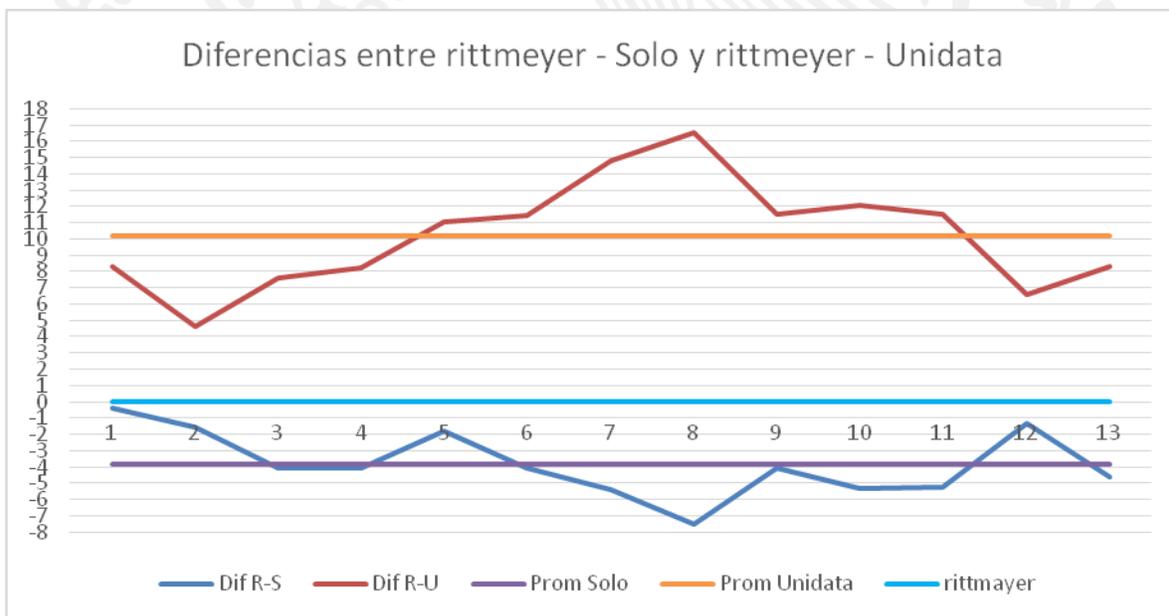


La siguiente grafica muestra la dispersión de los datos tomados en la prueba, donde se observa claramente que el medidor Solo es más cercano al Rittmeyer (Series1) que el medidor Unidata.



Grafica 5.2 Dispersion de Medidores (comparativo)

La siguiente grafica muestra las diferencias entre los equipos, tomando como referencia el Rittmeyer, en la gráfica se puede observar que para el Unidata la media es de aproximadamente 10 l/s, mientras que para el medidor solo es de aproximadamente 4 l/s



Grafica 5.3 Diferencias de rittmeyer, medidor solo, unidata

Esto significa que si el medidor Rittmeyer mide al 0.5%, en promedio el medidor SOLO, es un buen equipo para medir caudal, en este caso a nivel parcelario.

Las siguientes fotografías muestran los equipos midiendo

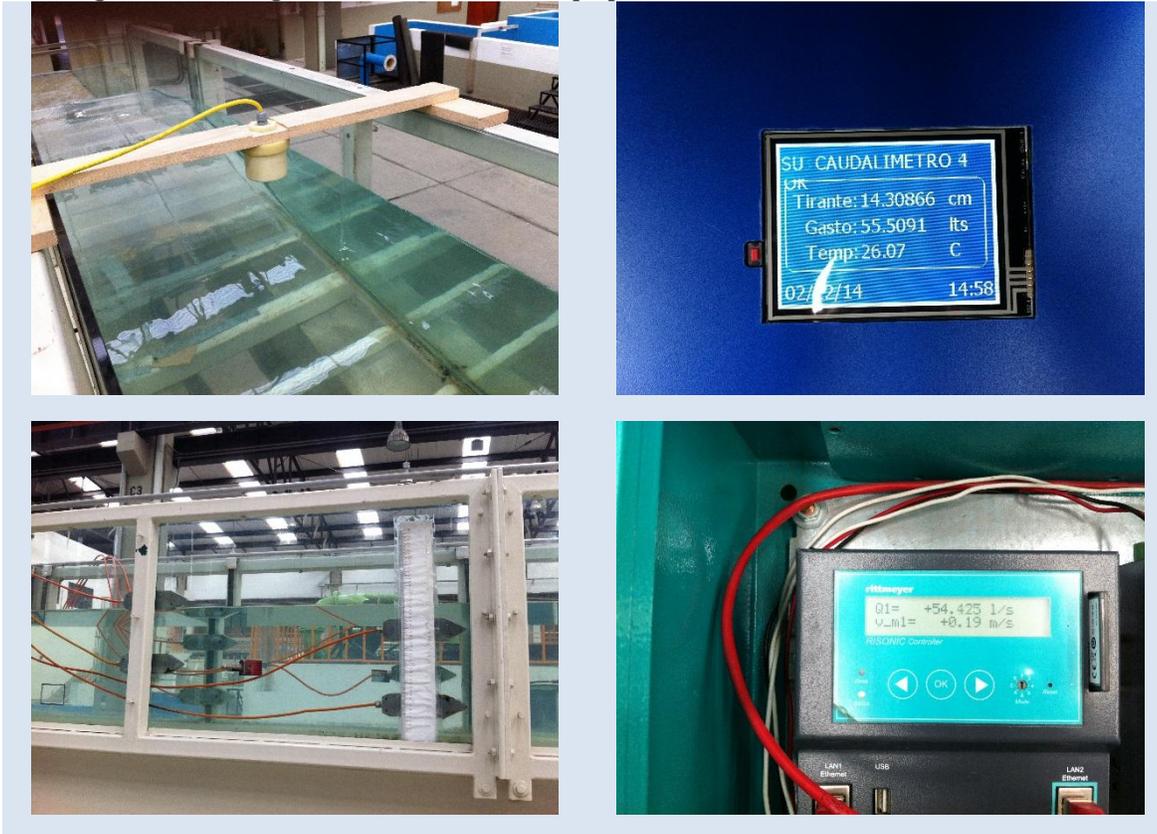


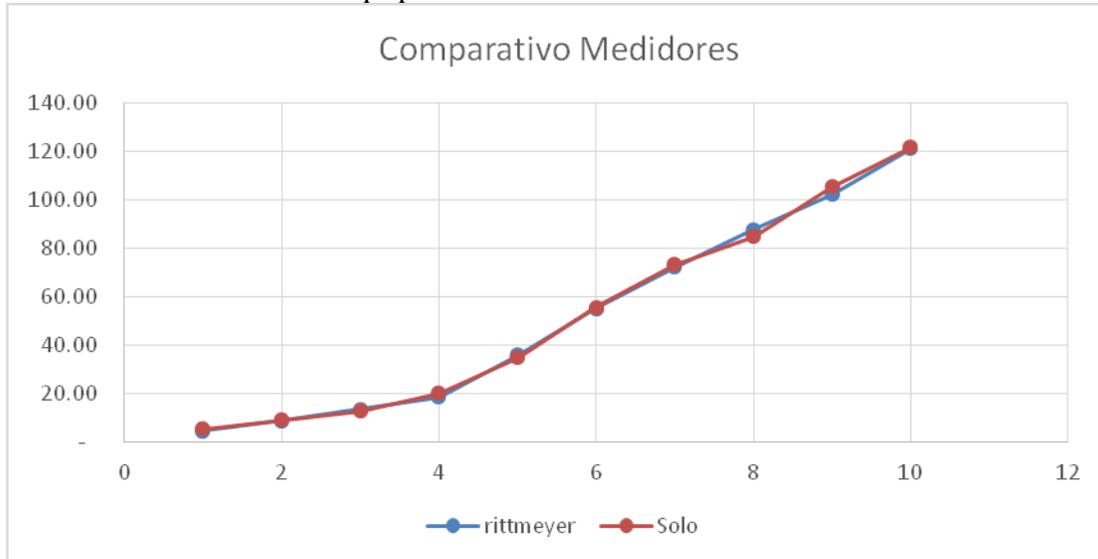
Imagen 5.50 Equipos funcionando

Los siguientes datos son de una segunda prueba realizada entre el medidor Rittmeyer contra el medidor Solo

	4.53	5.28
	8.72	8.78
	13.47	12.54
	18.39	19.85
	35.64	34.75
	54.94	55.50
	72.05	73.05
	87.73	84.68
	102.04	105.32
	121.08	121.50

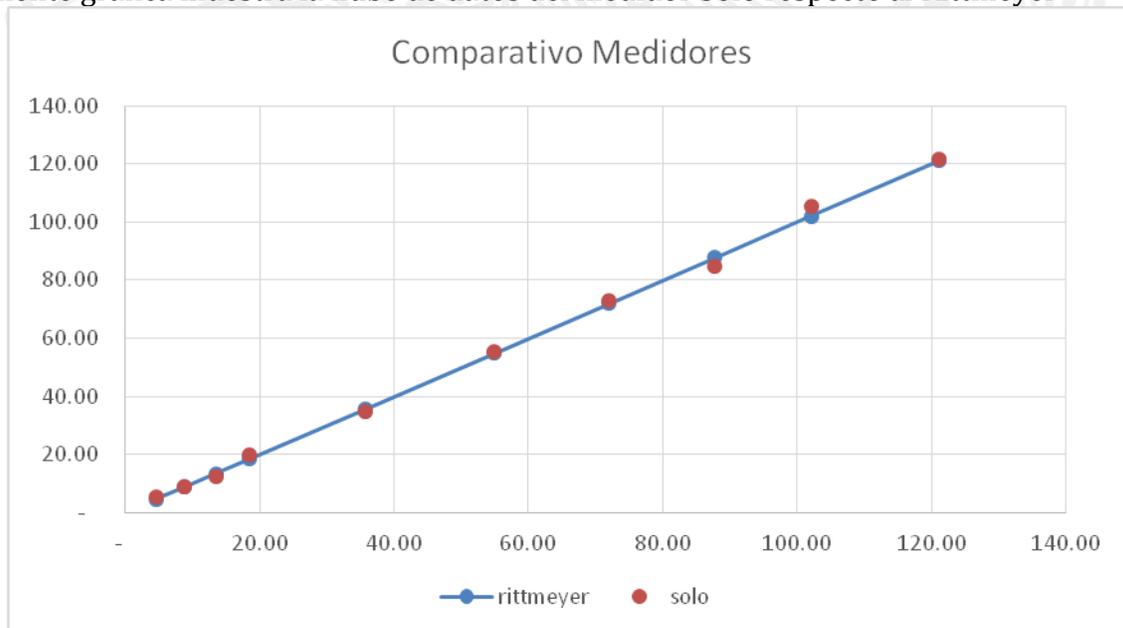
Tabla 5.2 Rittmeyer y medidor solo

La grafica muestra como los dos equipos miden de manera similar



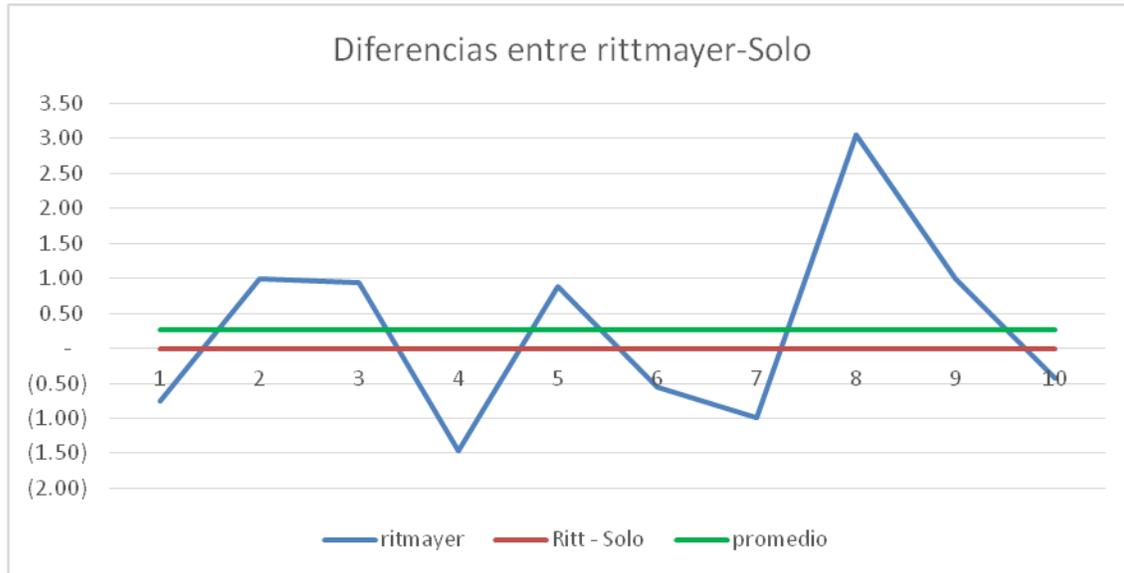
Grafica 5.4 Comparativo Rittmeyer y medidor solo

En este ejemplo los datos son equivalentes, la media de la diferencia es de 0.27 lps y la desviación estándar diferencia es de la dicha es de 1.35 lps. Esto significa que en general el equipo SOLO mide con diferencias, respecto al equipo Patrón de apenas 1.7% con una desviación estándar de 5.8%. Es decir, el equipo SOLO mide el caudal en el orden de 6% respecto al caudal medido. La siguiente grafica muestra la nube de datos del medidor Solo respecto al Rittmeyer



Grafica 5.5 Comparativo medidor solo

La siguiente grafica muestra las diferencias entre las diferentes lecturas de los medidores y se observa que la media del solo es aproximadamente de 0.25 l/s, teniendo como máxima diferencia 3 l/s.



Grafica 5.6 Diferencias entre rittmeyer y medidor solo

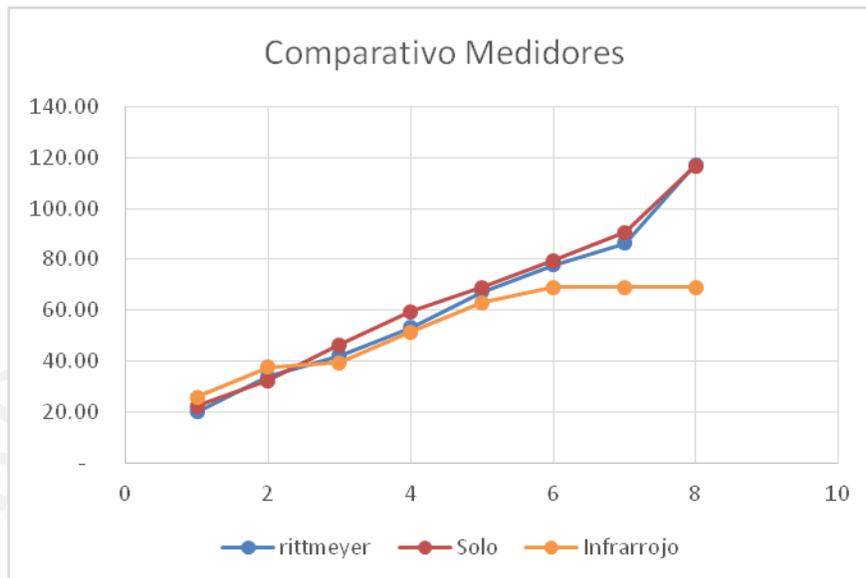
Ahora se muestra la prueba realizada entre el medidor Rittmeyer como testigo contra medidor solo e infrarrojo

Tabla con datos de prueba

	20.16	22.48	25.98
	33.91	32.49	37.65
	42.13	46.50	39.53
	53.35	59.60	51.44
	67.33	68.97	63.08
	77.82	79.57	69.07
	86.47	90.71	69.07
	117.24	116.59	69.07

Tabla 5.3 Rittmeyer, solo y sensor infrarrojo

En la gráfica se observa que el medidor Solo sigue pegado del Rittmeyer para toda la prueba, mientras que el infrarrojo se despega para gastos grandes.



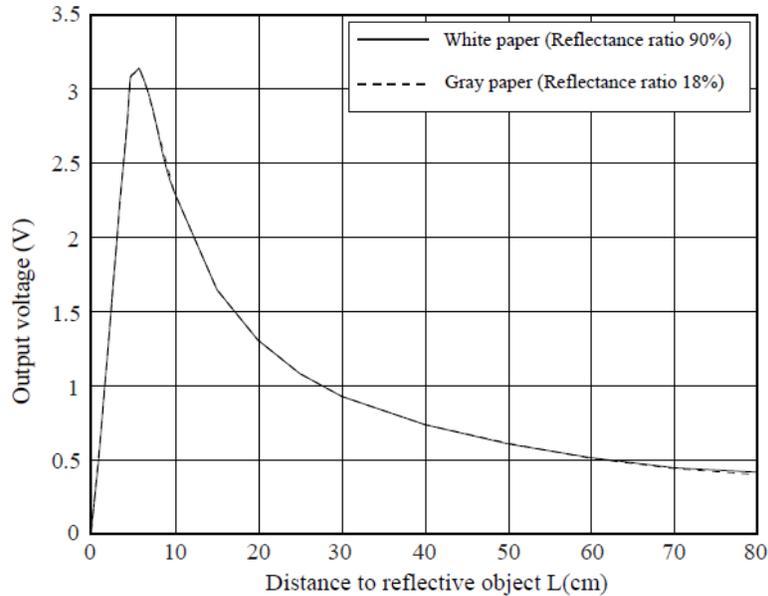
Grafica 5.7 Comparativo entre Rittmeyer, Solo e Infrarrojo

La explicación a este comportamiento está en el principio de funcionamiento del sensor infrarrojo, el cual mide la distancia de un objeto que flota en la superficie libre del canal bajo el sensor, después con la referencia de la garganta del aforador la cual es el cero y por diferencia calcula un tirante.

Las condiciones físicas o eléctricas del sensor lo limitan a solo medir en un rango de 10 cm a 80 cm, según consta en la ficha técnica del fabricante, la cual se agregara de manera digital a este reporte para su consulta.

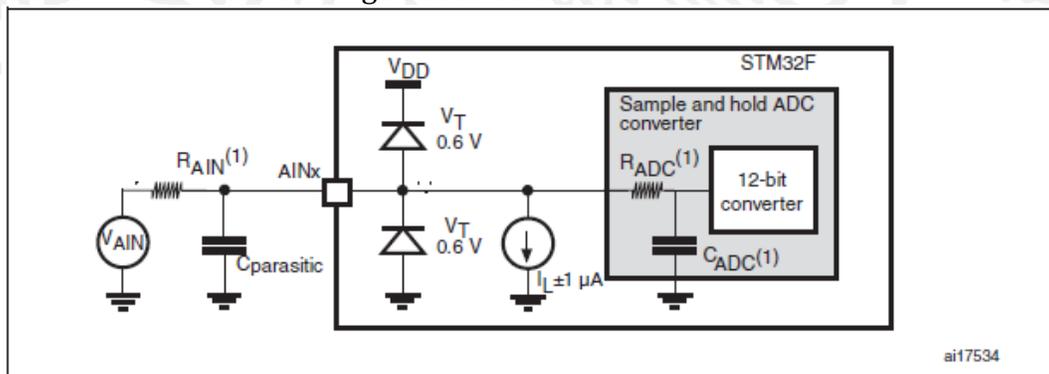
En las pruebas realizadas el equipo comenzó a tener un comportamiento errático a partir de que media menos de 15 cm, por lo cual, en esta prueba realizada se concluye que el equipo tiene un blanking de al menos estos 15 cm, los cuales deben quedar libres al momento de diseñar alguna estructura para su colocación, esto tomado en cuenta a la hora de medir gasto máximo.

En la gráfica que proporciona el fabricante se observa que a distancias cercanas a cero hay un valor de voltaje para dos distancias diferentes, por lo cual el fabricante recomienda medir de 10 cm en adelante.



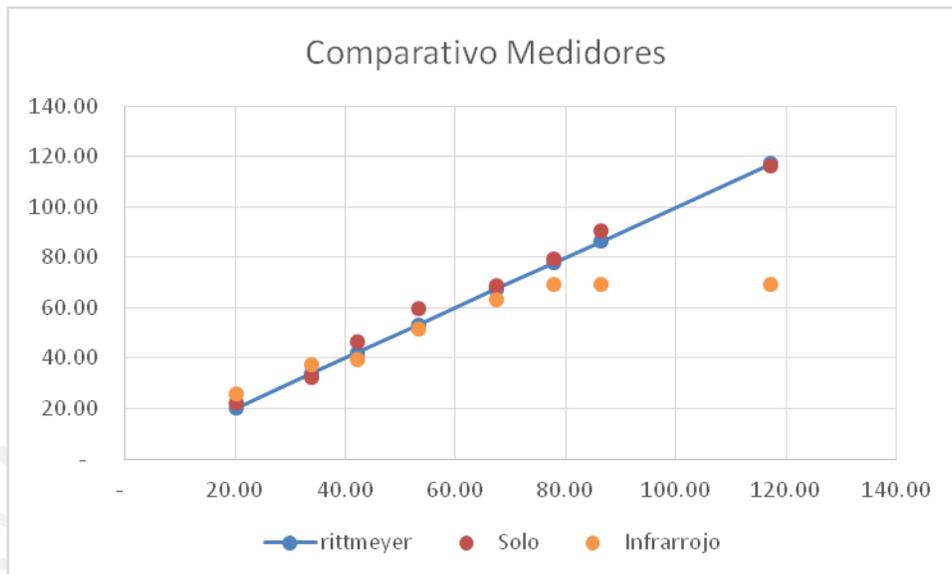
Grafica 5.8 Distancia reflectada de un objeto

Otro detalle respecto a este comportamiento es que la señal de salida del sensor infrarrojo es analógica y va de 0 a 3.1V aproximadamente, dicha señal es procesada por un convertidor analógico digital (ADC) de 12 bits, el cual tiene un voltaje de referencia de 2.027V por lo tanto al querer procesar una señal de mayor rango a este voltaje de referencia, el ADC se satura y para todos estos valores mayores manda una señal de la misma intensidad indicando que este está trabajando en un modo fuera de rango o saturación.



Grafica 5.9 ADC STM32F

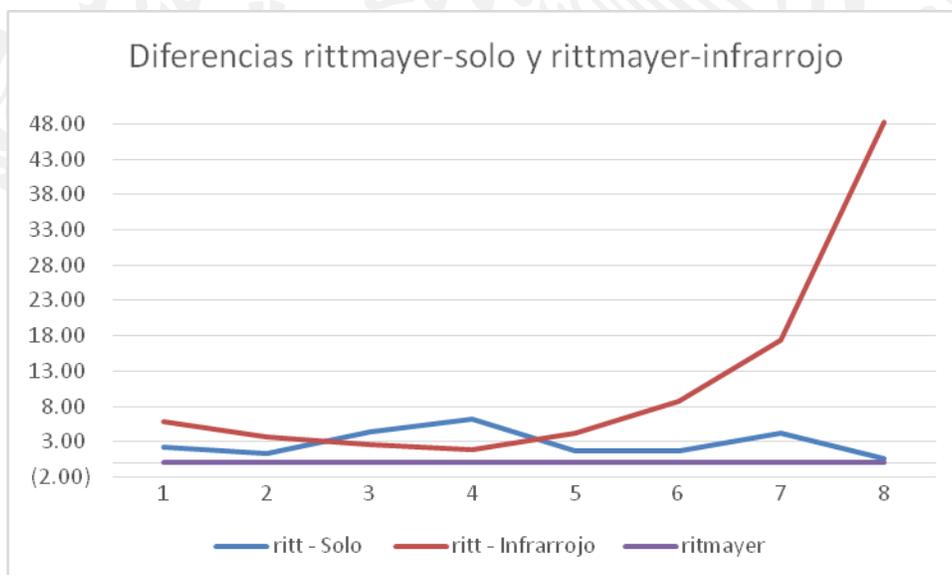
La gráfica de dispersión de datos de los medidores Solo e infrarrojo respecto al Rittmeyer, se muestra a continuación.



Gráfica 5.10 Medidores rittmeyer, solo e infrarrojo

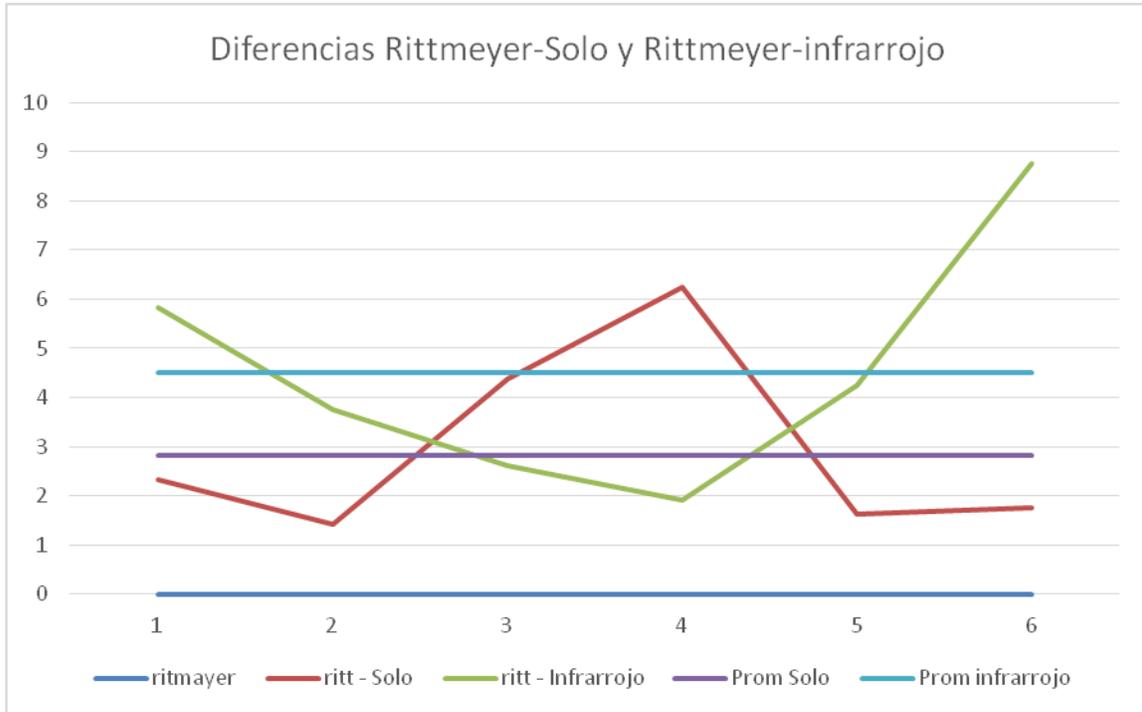
En esta gráfica también se observa el comportamiento de saturación o fuera de rango del medidor infrarrojo.

Gráfica con las diferencias de caudal respecto al medidor Rittmeyer



Gráfica 5.11 Diferencias de caudal respecto a rittmeyer

Si eliminamos los datos de saturación del medidor infrarrojo con fines de comparar errores o diferencias respecto al medidor Rittmeyer, se obtiene la siguiente gráfica, en la cual se puede observar que el medidor Solo, su media sigue siendo de aproximadamente 3 l/s respecto al Rittmeyer teniendo muy buena repetibilidad, mientras que el infrarrojo es de aproximadamente 4.5 l/s respecto al Rittmeyer.



Grafica 5.12 Diferencia de Rittmeyer - solo y Rittmeyer - infrarrojo

Las siguientes fotografías muestran las pruebas realizadas en el laboratorio



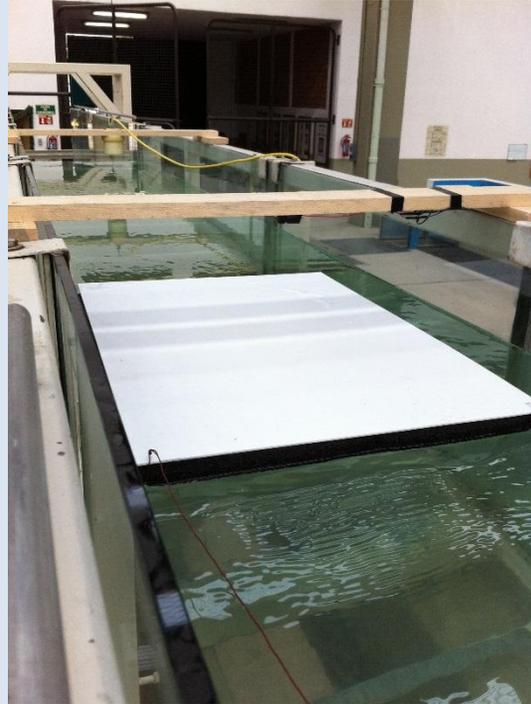
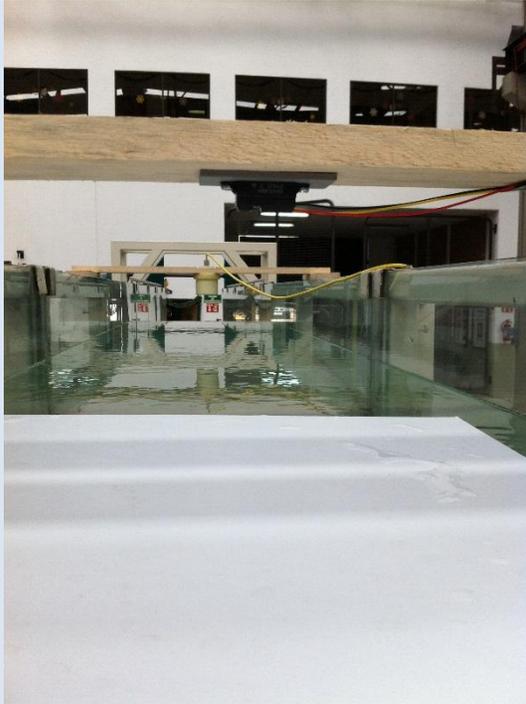


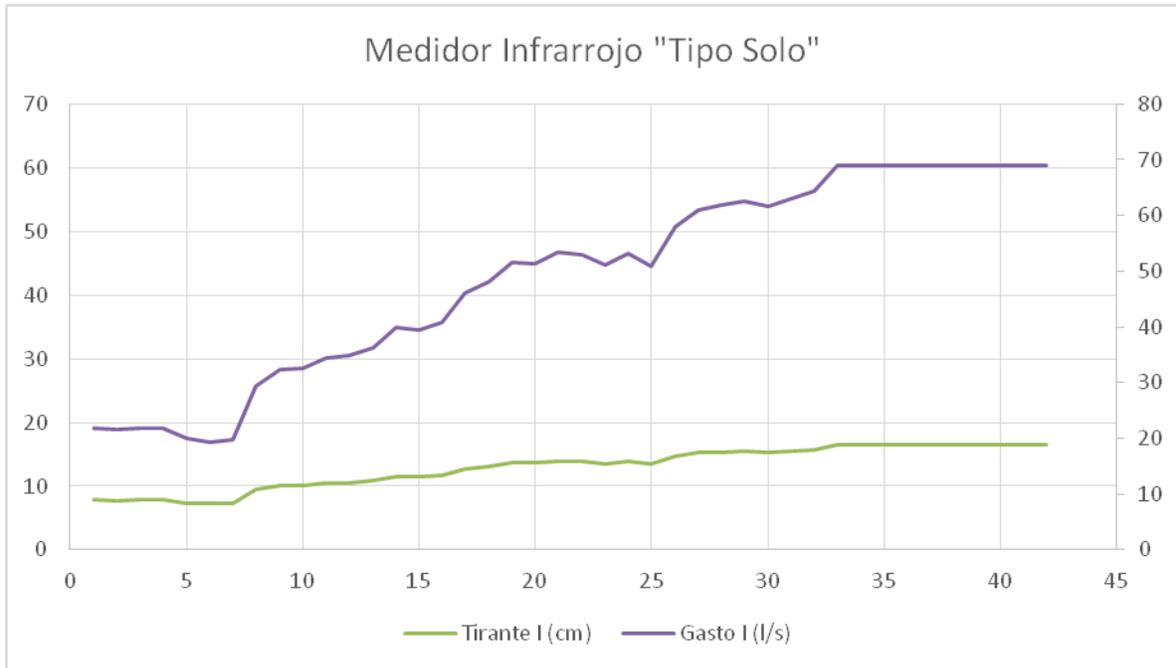


Imagen 5.51 Pruebas en laboratorio de diferentes medidores

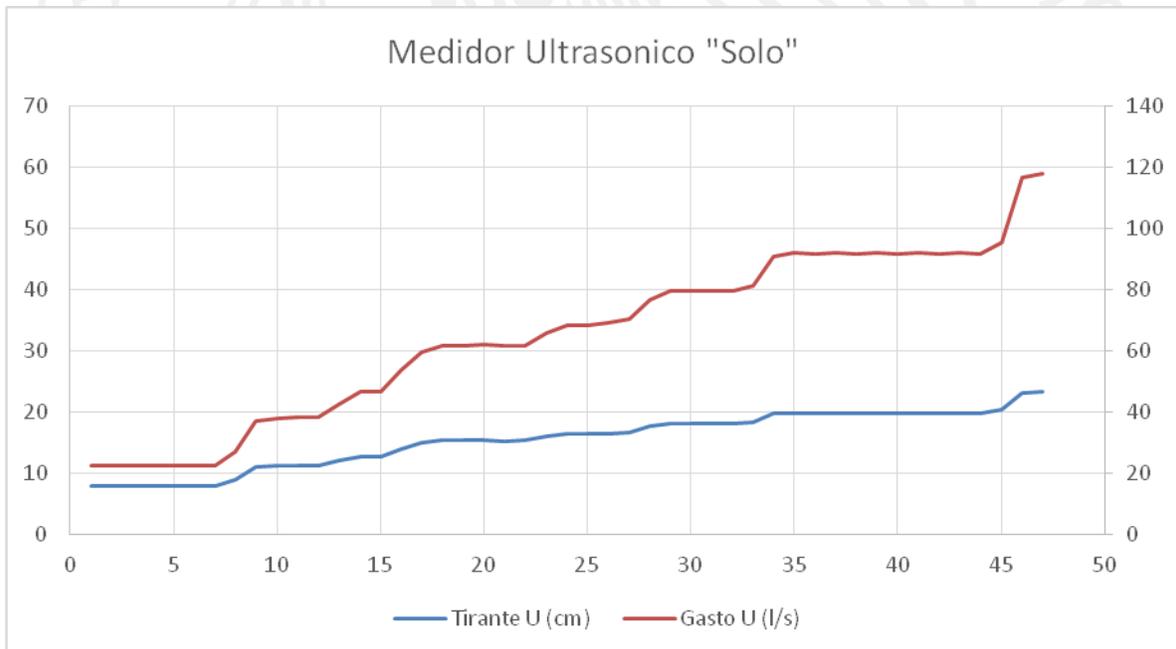
5.6.5. Series temporales de caudal

Con fines de observar las series temporales de las pruebas realizadas, se grafican los datos a los largo del tiempo (Contador de dato, Tirante y gasto)

El resto de datos se anexa como archivo al reporte en CD.



Grafica 5.13 Medidor infrarrojo tipo solo



Grafica 5.14 Medidor ultrasonico solo

5.7. Comparativo de medición de equipos con estructura

En el canal de pendiente variable del Laboratorio de Hidráulica del IMTA, IMTALAB, se colocaron tres medidores de gasto. El canal es de sección rectangular con un ancho y alto de 60 cm y 18 m de largo.

El medidor colocado a la mitad del canal es un equipo de tiempo de travesía de 4 pares de marca Rittmeyer. Los otros dos medidores, UTG-21 DS y SOLO-IMTA haciendo uso de una estructura aforadora de tipo garganta larga determinan el gasto a partir de la medición de nivel. La estructura aforadora se colocó aguas abajo del canal, 3 metros antes de su fin.

Canal de Pendiente Variable



Válvula de entrada al canal



Ilustración 5.1 Canal de pendiente variable del laboratorio de hidráulica del IMTA

El equipo Rittmeyer de 4 pares usa del principio de tiempo de travesía para determinar la velocidad del agua en el canal. El nivel se determina mediante un sensor ultrasónico. La medición de nivel es usada para calcular el área de la sección transversal del canal usado en el cálculo del gasto.

Sensores de velocidad y Nivel



Unidad Electrónica



Ilustración 5.2 Equipos de medición de gasto Rittmeyer

Los equipos UTG-21DS y SOLO-IMTA utilizan una unidad ultrasónica para determinar el nivel en la garganta del aforador. Usando la ecuación $Q = 1115 h^{1.543}$ se obtiene el gasto en l/s y la carga nivel en la garganta en metros.



Ilustración 5.3 sensores ultrasónicos del UTG- 21DS, SOLO-IMTA y cinta de referencia.

UTG-21DS

SOLO-IMTA



Ilustración 5.4 Unidad electrónica de los equipos UTG-21DS y SOLO-IMTA

Los equipos ultrasónicos determinan el nivel del agua a partir de la distancia entre el sensor y la superficie libre del agua ("d"). Conociendo la posición del sensor respecto a la garganta del aforador ("p") se determina el nivel del agua en la garganta ("n") como $n = p - d$.

La prueba desarrollada consistió en aumentar y reducir el gasto en el canal de 4 hasta 130 l/s. El gasto que ingresa al canal se ajustó girando media vuelta en cada cambio el volante de la válvula de admisión de agua al canal. En régimen permanente se registró el nivel en la garganta a través de la cinta colocada en la pared del canal, lo cual no es muy conveniente por el error de medición inducido por el ojo humano, y el valor medido por los equipos ultrasónico UTG-21DS y SOLO-IMTA (Imagen 3).

En la Gráfica. 1 se observa los gastos registrados por los equipos cada 20 segundos durante la prueba realiza. Se puede observar que la medición realizada por el equipo Rittmeyer y SOLO-IMTA presentan variaciones en estado estable, pasado el transitorio del cambio en gasto. No así el

equipo UTG-21DS cuyo valor permanece constante, esto es debido a que dicho equipo tiene filtros potentes de la señal, más aún se observa que en algunas ocasiones el proceso de filtrado retarda los cambios reales de tirante y caudal. Por tal razón, se harán solo indicaciones en términos de órdenes de magnitud.

En la Gráfica siguiente se presentan los datos de los tres equipos eliminados algunos datos medidos por el equipo SOLO-IMTA, con el fin de corregir el corrimiento.

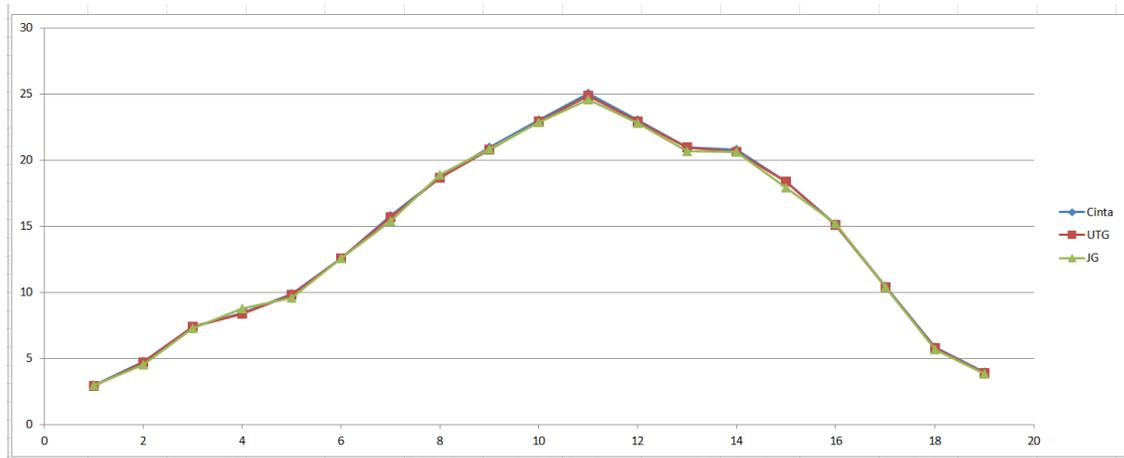


Grafica 5.15 Datos de corrimiento corregido

Los valores de gasto obtenidos por las unidades UTG-21DS y SOLO-IMTA son muy similares. Ya que el elemento usado en la medición es un aforador. Es de esperarse que este sea la medición más precisa, superior a un equipo electrónico de tiempo de travesía

En la Gráfica se aprecian algunos gastos donde el valor obtenido por el equipo UTG-21DS es diferente al medido por el SOLO-IMTA, solo con fines ilustrativos.

En general la medición de nivel de los equipos UTG-21DS y SOLO-IMTA. Son muy similares a los de la medición del flexómetro hecha visualmente. Lo anterior junto al hecho que un aforador es más preciso para medir gasto que una equipo electrónico de tiempo de travesía, por lo que se recomienda de ser posible medir con apoyo de una estructura.



Grafica 5.16 Resultados validos para canal abierto con aforo a descarga libre

Los resultados que son válidos para canal abierto con estructura de aforo a descarga libre con son válidos para vertedor rectangular. Ya que el análisis se hace sobre la medición del tirante.

A continuación se describe el trabajo realizado para una estructura tipo orificio.

5.8. Estructura tipo Orificio

Se indican las variables de acuerdo con las gráficas siguientes.

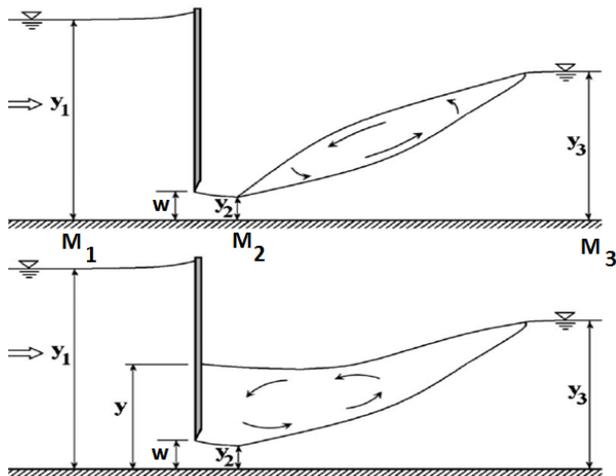


Ilustración 5.5 En cada sección (1, 2 y 3) hay tirante (y), velocidad (v), energía (E) y cantidad de movimiento (M), el caudal es el mismo en cada sección.

Enfoque a descarga libre con corrección de energía.

5.9.Descarga libre

La ecuación de gasto unitario es

$$q = C_{dl} W \sqrt{2gy_1} \quad 1)$$

Haciendo uno de la ecuación de energía y el factor de corrección k, se obtiene

$$q = C_c \sqrt{\frac{(y_1^2 - C_c W y_1)}{(1+k)y_1^2 + (C_c W)^2}} W \sqrt{2gy_1}$$

Aproximadamente se tiene:

$$C_{dl} = \frac{C_c(0.6945k + 0.5649)}{(1+k)^{3/2}}$$

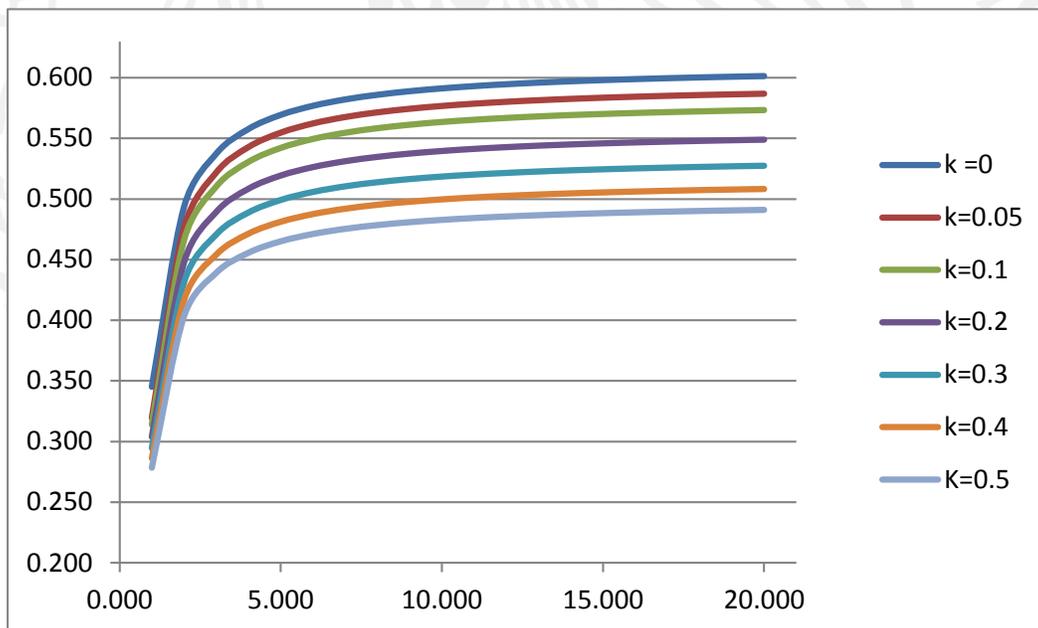
Si $k = 0$, se tiene $C_{dl} = 0.3452$

Así sucesivamente encontramos valores de k y coeficiente de descarga.

K	Cdl Apr
0	0.3452
0.01	0.3442
0.02	0.3433
0.03	0.3424
0.04	0.3414
0.05	0.3405
0.06	0.3396
0.07	0.3387
0.08	0.3378
0.09	0.3369
0.1	0.3360
0.11	0.3351
0.12	0.3342
0.13	0.3333
0.14	0.3324
0.15	0.3315
0.16	0.3306
0.17	0.3297
0.18	0.3289
0.19	0.3280
0.2	0.3271
0.21	0.3263
0.22	0.3254
0.23	0.3246
0.24	0.3237

0.25	0.3229
0.26	0.3220
0.27	0.3212
0.28	0.3204
0.29	0.3196
0.3	0.3187
0.31	0.3179
0.32	0.3171
0.33	0.3163
0.34	0.3155
0.35	0.3147
0.36	0.3139
0.37	0.3132
0.38	0.3124
0.39	0.3116
0.4	0.3108

Tabla 5.4 Valores de k y coeficientes de descarga

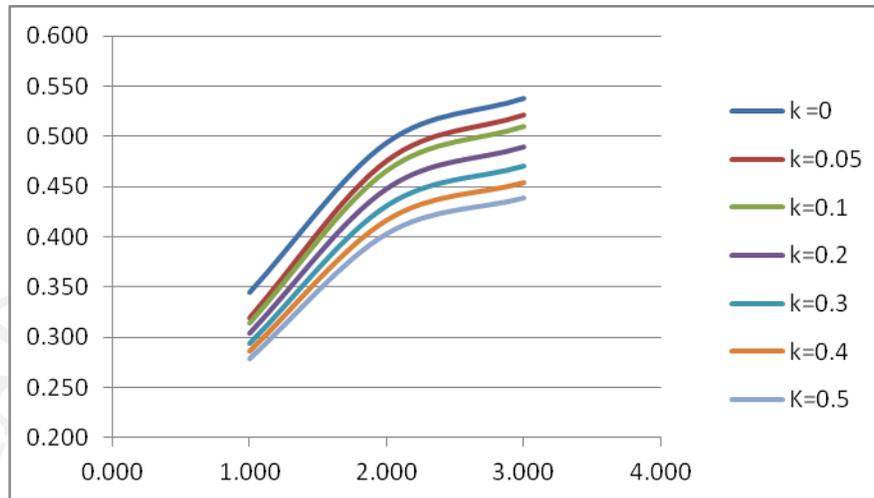


Grafica 5.17 Grafica de valores de k y coeficientes de descarga

En el eje w/y; $(0.05/(1...0.05))$ y Cd en el eje y.

Conforme aumenta el valor de k , asociada a un aumento de pérdida de energía, el coeficiente disminuye fuertemente y por ende también el caudal.

La curva respectiva de cada coeficiente puede quizás extrapolar el C_d cuando este se despega de la compuerta, como una recta como función que pasa por el origen, es decir a tirante nulo, gasto nulo y coeficiente cero.



Gráfica 5.18 Curva de cada coeficiente

Si $k = 0$ y $\frac{W}{y_1} \rightarrow 0$, se tiene que $C_{dl} = C_c$, que es un valor comúnmente utilizado en documentos de hidráulica como valor único de coeficiente para compuerta deslizante en canal rectangular.

De hecho se conoce de la ecuación de Energía descrita a través de los coeficientes de Boussinesq y de Coriolis, que formalmente son resultado de la distribución no uniforme de velocidades en una sección de canal, la altura de velocidad de un flujo en canales abiertos es por lo general mayor que el valor

calculado de acuerdo con la expresión $V^2/2g$ donde V es la velocidad media, las ecuaciones son: $\alpha = \frac{\int V_h^3 dA}{V^3 A}$ y

$$\beta = \frac{\int V_h^2 dA}{V^2 A}$$

A continuación se deduce el comportamiento a descarga ahogada.

5.10. Descarga ahogada

Se hace uso de la ecuación de gasto, de energía y de cantidad de movimiento para obtener la ecuación del coeficiente de descarga ahogada, siguiente:

$$C_d = \frac{C_c}{\sqrt{(1+k)}} \sqrt{\frac{(1 - \frac{y_3}{y_1})}{\left(1 + \frac{1}{(1+k)} \left(3 \frac{y_1^2}{y_3^2} - k_1\right) \left(\frac{C_c W}{y_1}\right)^2 - \frac{3}{(1+k)} \frac{C_c W}{y_3}\right)}}$$

Esta ecuación se denomina ecuación de Javier.

Cambio de régimen

Se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{(y_3)_{max}}{y_2} = \frac{(y_3)_{max}}{y_2} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_2^2} - 1 \right)$$

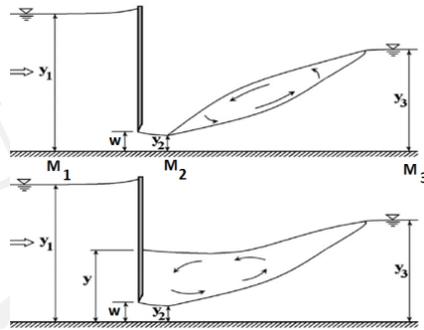


Ilustración 5.6

Para la condición de Momentum $M_3 \geq M_2$, se traduce a:

$$y_3 \geq \frac{C_c W}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{16 \left(\frac{y_1}{C_c W} - 1 \right)}{\left((1+k) + \left(\frac{C_c W}{y_1} \right)^2 \right)}} - 1 \right) = f(y_1, W, k)$$

Que como se observa se puede interactuar con valores del coeficiente de Coriolis de las secciones $i, i+1$ y la corrección de energía en $i+1$ a descarga libre.

5.11. Estudio de Laboratorio

La compuerta deslizante es de acrílico con soportes de acero al carbón.

El experimento se realiza con apoyo de bombas para suministrar la variación de caudal y para la medición del caudal se tiene como equipo patrón un Rittmeyer ultrasónico, en tiempo de tránsito, con 2 pares de emisores.

Los datos de los parámetros iniciales de $C_c = 0.611$; $(1 + k) = 1.0 + 0.062 = 1.062$ y $k_1 = 1.0$ para descarga libre y para descarga ahogada de $(1 + k) = 1 + 0.088 = 1.088$ y $k_1 = 1.0$, los resultados del experimento aparecen en las siguiente gráfica

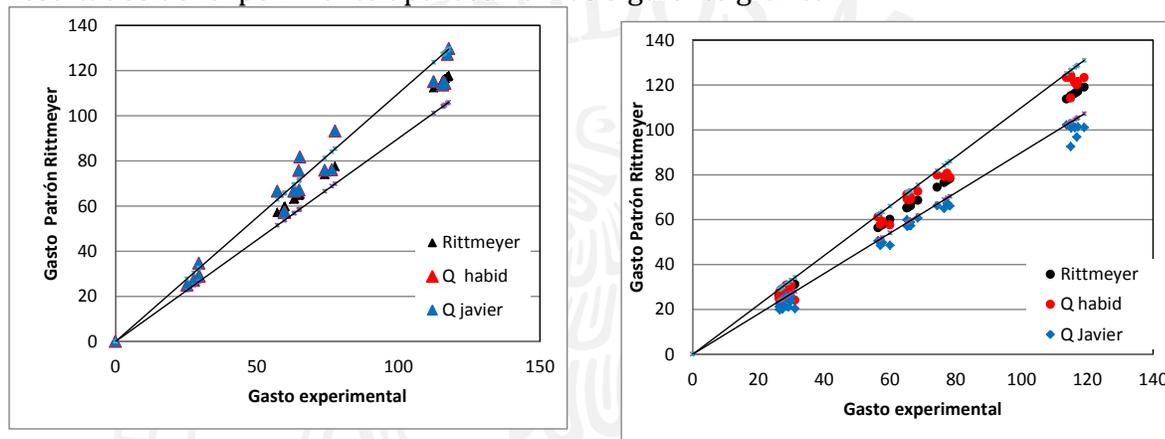
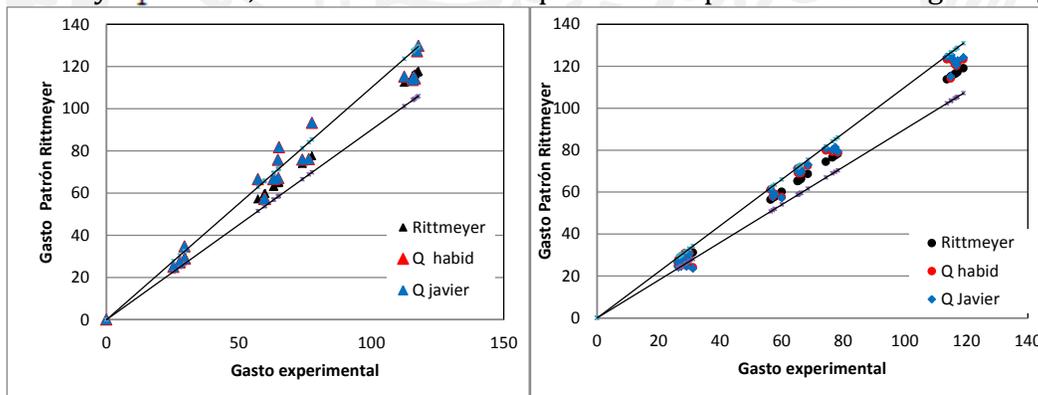


Ilustración 5.7 Gasto experimental a descarga libre y ahogada

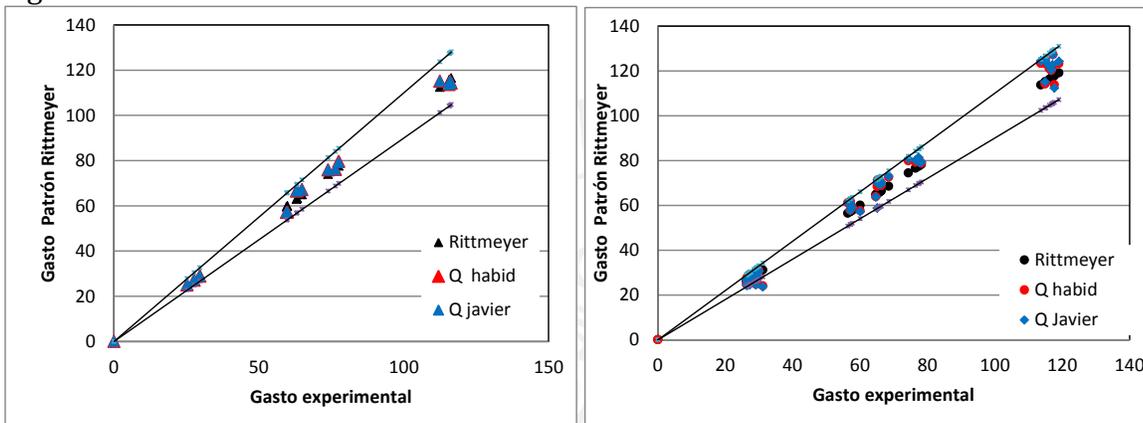
Se observa que el cambio de régimen de descarga libre a ahogada tiene valores muy grandes en gasto libre, mientras que a descarga ahogada, según la gráfica se subestima el gasto con la ecuación de Javier.

A continuación se realiza un ajuste de los datos iniciales y se analizan los resultados. Los datos de ajuste de los parámetros de $(1 + k) = 1.0 + 0.062 = 1.062$ y $k_1 = 1.0$ para descarga libre de $(1 + k) = 0.832$ y $k_1 = 0.40$, los resultados del experimento aparecen en las siguiente gráfica.



A descarga ahogada, los datos coinciden en dicho régimen en menos del 10% en términos absolutos.

Mientras que la estimación de caudal a descargar libre presenta el problema de estimación de cambio de régimen. Una vez realizado el cálculo del criterio de tirante aguas abajo se corrige de la siguiente manera.



A descarga libre (izquierda) y ahogada (derecha). El error relativo porcentual a descarga libre es del 6.5% mientras que al exceptuar dos datos a descarga ahogada a muy bajo caudal como se observa en la imagen derecha, se tiene un error porcentual relativo de 9.7%, inferior al 10%. A bajo caudal, debido a que solo se tiene una trayectoria sumergida superficialmente en el canal con agua, se considera adecuado dejar dicho porcentaje como parte del error del patrón de medida.

6. Guía rápida

Los equipos de desarrollo propio del IMTA tienen las siguientes características generales.

Son esencialmente un medidor ultrasónico compuesto por componentes electrónicos nacionales, maneja un micro controlador, el cual está conectado a un modem GSM/GPRS (Sistema Global de Comunicaciones Móviles), así mismo cuenta con una tarjeta de memoria SD que almacena la información del caudal, posteriormente es enviada a una base de datos mediante radiofrecuencia cada intervalo de tiempo programado.

El sistema de medición consiste en una aplicación de ultrasonido para medición de niveles y cálculo de flujos tanto para aforador como para estructura tipo orificio, la cual se basa en la emisión de un impulso ultrasónico a una superficie reflectante y la emisión del eco del mismo en un receptor para su medición.

La información se almacena en una base de datos de una computadora, de igual forma si se quiere hacer una consulta en tiempo real, se realiza una llamada a un chip telefónico en el medidor, en respuesta llega un mensaje de texto con el caudal que tiene el canal en ese momento. La información se sube a una dirección IP con protocolo FTP y de ahí se procesa para cada parcela en un sistema de estadística hidroagrícola.

La guía rápida estará en la filosofía anterior y lo escrito a continuación.

- A) EQUIPO DE MEDICIÓN (COSTO) CON O SIN
- B) ESTRUCTURA DE APOYO (COSTO)
- C) TELEMETRIA: Envío de información a oficina (RADIO, GPRS, GSM bidireccional)
- D) Sistema de PROCESO en OFICINA, además de Datos In-situ.
D1.- Datos en oficina y D2.- Sistema de proceso a parcela.
- E) Se E1) Fabrica en México o solo se tiene E2) oficina de representación en México.

En principio no se recomienda ningún equipo en especial, se considera que todos los equipos comerciales miden en función de su principio de funcionamiento y su costo se asocia a su resolución, precisión y exactitud.

La parte A, B, C y D se asocian exclusivamente al equipo, mientras que la parte E es relacionada a la capacidad de reparación a bajo costo así como mantenimiento económico de los equipos sin salir del país.

Con fines de ejemplo se muestra el caso de los desarrollos del IMTA.

SOLO-IMTA (USD \$800) con la estructura en fibra de vidrio del tipo AGL (USD \$1200) que tienen telemetría GSM/GPRS y que incorpora protocolo FTP para envía de información a dirección IP, además de guardar la información en archivos in-situ con apoyo de SDs. Los costos solo incorporan el costo de producción unitario (no escalado) e incluye la telemetría. Debido a que el

IMTA es propietario del ICAM-Riego se habilita la opción de incorporar la información al balance estadístico parcelario en términos de volumen aplicado y por ende a la entrega y cobro por volumen por parte de una asociación de usuarios. El TRIO-IMTA con compuerta deslizante tiene los mismos aditamentos y el costo es similar.

Paso 1. Distinguir el equipo de medición en base a su oferta comercial de precisión

Paso 2. Solicitar cotización de equipo (y estructura)

Paso 3. Verificar la telemetría y su costo y el guardado de información in-situ.

Paso 4. Verificar el funcionamiento del equipo en presencia de viento, sedimentos en suspensión, frío, alta temperatura y brisa (polvo). Antes de adquirirlo solicite garantía de funcionamiento a este respecto.

Paso 5. Solicite garantía a costo económico de reparación y mantenimiento de equipos directamente en campo.

Finalmente, no escrito no constituye una recomendación.

6.1. Conclusiones

Se construyeron tres equipos, dos del tipo SOLO en su modalidad de sensor ultrasónico e infrarrojo y un TRIO ultrasónico.

Se comparó el funcionamiento de tres equipos, infrarrojo, ultrasónico en su modalidad SOLO, un efecto Doppler de instalación de fondo y un equipos ultrasónico de tiempo de transito con dos trayectorias.

El equipos con mayor nivel de apego a los datos del Patrón "Multi-trayectoria" fue el SOLO ultrasónico, luego el Infrarrojo y lejos después el sensor de efecto Doppler.

Cabe señalar que se mide en la calidad de agua donde el Patrón presenta su mejor exactitud, por ende no se permite una conclusión desde el punto de vista de la presencia de partículas en suspensión, como es el caso de agua de riego a nivel parcelario, donde principalmente el Doppler de fondo puede presentar una situación crítica en su funcionamiento.

Los costos aproximados de los equipos comparados son equipo Rittmeyer \$USD 40,000.00, Unidata en Doppler \$ USD 5,000.0 , el SOLO Infrarrojo \$ USD 510.00 y el SOLO ultrasónico \$ USD 520.00, estos dos últimos en términos de Hardware.

Se recomienda que no olvide considerar la distancia muerta del sensor Infrarrojo en el diseño de caudalímetros.

Se demostró analíticamente y con prueba de laboratorio el funcionamiento de las estructuras tipo orificio en la medición de caudal (>90%).

Conclusiones (generales)

Se describen los componentes electrónicos que componen un medidor, como ejemplo, el caso particular de los desarrollos de los equipos IMTA. Se hace un resumen exhaustivo de principios de medición de los diferentes equipos de medición de flujo parcelarios.

Se probaron y evaluaron más de tres diferentes alternativas comerciales de equipos en tuberías así como en aplicación de canal a cielo abierto. Al mismo tiempo se evalúan los equipos de desarrollos propios del IMTA.

Se realiza una guía rápida para seleccionar equipos de medición parcelaria e interparcelaria. Se documentan ventajas y desventajas de sistemas desarrollados para aplicaciones particulares, así como productos comerciales disponibles en el mercado para la medición volumétrica.

Se presentó una revisión de los principios de funcionamiento de los equipos comerciales de medición de caudal.

Se tiene conocimiento de cómo construir, ensamblar y poner en funcionamiento equipos de medición de caudal de bajo costo y algunos comerciales.

Se seleccionaron componentes compatibles entre los medidores del tipo SOLO, por ende los costos son similares entre el caudalímetro infrarrojo y ultrasónico del tipo SOLO. La estructura de programación de los microcontroladores es igualmente idéntica. Similarmente, el ultrasónico es más preciso que el equipo infrarrojo. Los equipos comerciales de efecto Doppler dan una estimación adecuada del caudal en agua "clara".

Se entregan dos medidores del tipo SOLO (infrarrojo y ultrasónico) y uno del tipo TRIO, el cual se programó con ecuación de gasto del tipo orificio.

Se demostró analíticamente y con prueba de laboratorio el funcionamiento de las estructuras tipo orificio en la medición de caudal (>90%).

7. Tecnología de video detección de trazadores y cuerpos flotantes para la determinación de caudales y volúmenes en canales pequeños

Desarrollo, adaptación y validación de tecnología de video detección de trazadores y cuerpos flotantes para la determinación de caudales y volúmenes en canales pequeños del Laboratorio de Hidráulica del Posgrado en Ingeniería de la Facultad de Ingeniería de la UNAM ubicado dentro de las instalaciones del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

7.1. Requerimientos del proyecto

Adecuación del laboratorio de hidráulica del posgrado en ingeniería de la facultad de ingeniería de la UNAM.

1. Adecuaciones hidráulicas:

- a) Suministro y colocación de pintura azul en tuberías de alimentación de modelos, en particular la que abastece al canal de pendiente variable. 50 metros de tubería de 1 1/2" de diámetro.
- b) Suministro de 20 m de manguera ahulado de 3/4 de pulgadas para el drenado de modelos.

- c) Modificación y mantenimiento de tanque de descarga y regulación del canal de pendiente variable, sustitución de tubería de alimentación por tubería de PVC, diseño y ajuste en el canal de pendiente variable.

1.1 Elementos de soporte para el montaje de equipo, visualización de experimentos y el registro y transmisión de datos.

- a) Acondicionamiento de soporte para visualización de experimentos para el montaje de equipo , visualización y registro de transmisión de datos
- b) Suministro de 4 conectores y extensiones eléctricas de techo.

2. Realizar experimentos para probar y validar los equipos de visualización y registro de información. Se requiere personal de apoyo para la implementación, instrumentación y realización de pruebas experimentales.

- a) Proporcionar durante un mes dos técnicos para apoyar tanto al personal del IMTA como a estudiantes del Posgrado-UNAM-IMTA, en la realización de pruebas experimentales, ajuste y movimiento de equipos y en la captura y procesamiento de datos.

7.2.Desarrollo del proyecto

1. Adecuaciones hidráulicas:

- a) Suministro y colocación de pintura:

En las instalaciones del laboratorio de hidráulica del Posgrado en Ingeniería de la Facultad de Ingeniería de la UNAM ubicado dentro de las instalaciones del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, se proveo y aplicó pintura de color azul para identificar y proteger la tubería de agua.



Partida	Concepto	Unidad	Cantidad
1	Pintura (tubería de agua)	lt	1
2	Thinner estándar	lt	1
3	Estopa estándar	kg	1
4	Hoja de lija de agua media	pza	2
5	Porta lija de hule	pza	2
6	Brocha 3"	pza	2
7	Plástico protector	pza	2
8	Misceláneos	pza	varios

b) Suministro de manguera:

Se suministró veinte metros de manguera de ¾ de pulgada para uso en el drenado de diversos modelos instalados en el laboratorio.



Partida	Concepto	Unidad	Cantidad
1	Manguera ahulada de 3/4"	mt	20
2	Misceláneos	pza	varios

c) Modificación y mantenimiento de tanque de descarga:

Se realizó el diagnóstico de operación y se efectuaron diversas propuestas para el acondicionamiento del canal de pendiente variable del laboratorio de hidráulica del posgrado IMTA-UNAM.



7.3. Propuestas

Entre las que se hicieron se muestran las que siguen:

Cambiar el tanque de descarga existente por uno como el indicado en la figura, utilizando tubería y rejillas para disipar la energía.

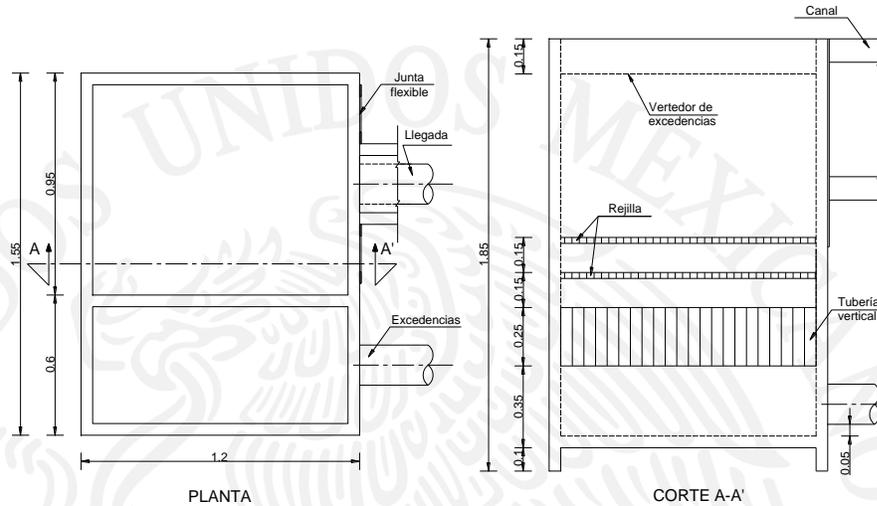


Figura: Tanque disipador de energía, que reemplazaría al existente.

Utilizar una forma hidrodinámica en la llegada del flujo de agua hacia la entrada del canal de pendiente variable, se muestran distintas formas propuestas.

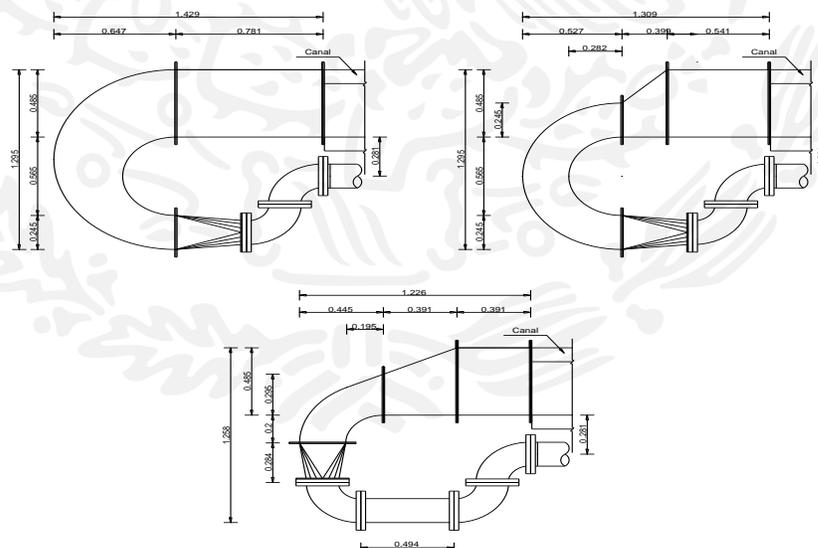


Figura: Tanque disipador de energía con flujo hidrodinámico en la llegada

Posterior a estas propuestas se optó por lo siguiente:

Cambiar la tubería de fofo existente por tubería de PVC hidráulico RD-26 en 150 y 100 mm, colocando una derivación hacia el tanque de descarga.

Se considera la solución más adecuada para estabilizar el flujo a lo largo del canal, en las siguientes figuras, se muestra un esquema del mismo.

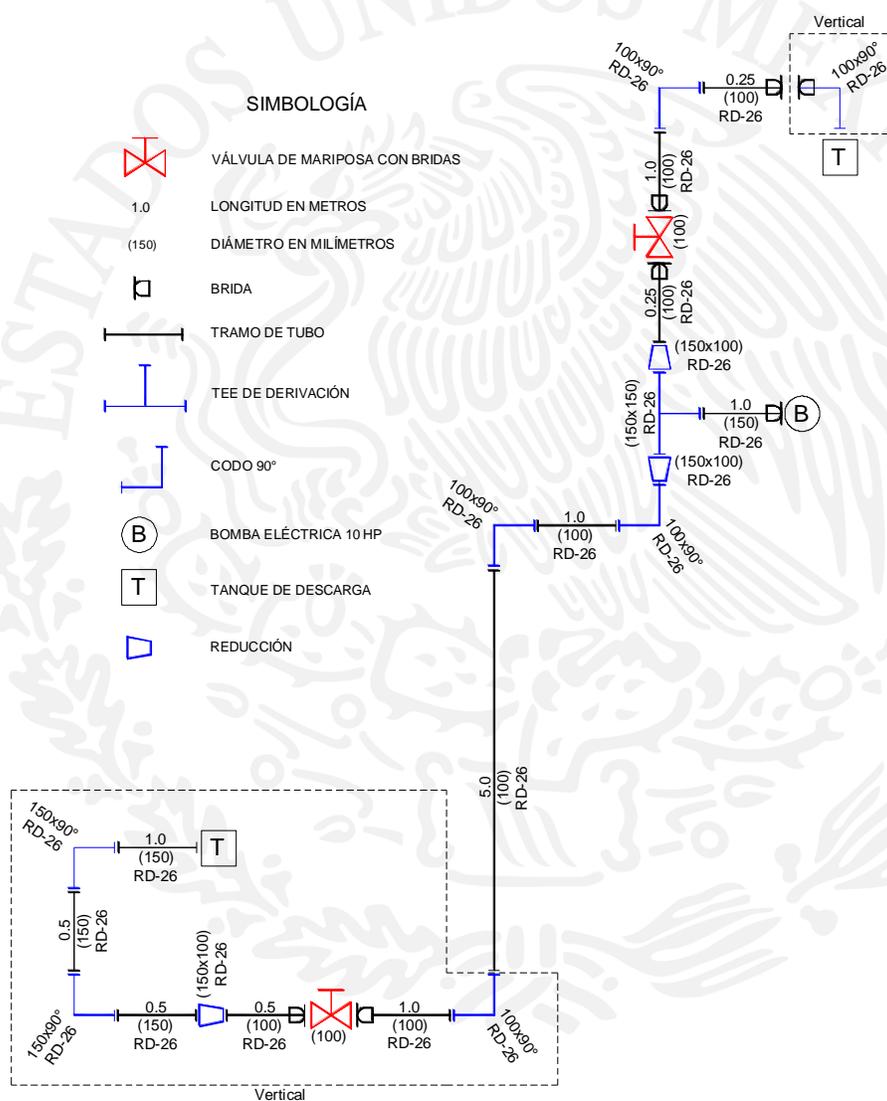


Figura: Esquema de instalación de la tubería de PVC y válvulas de regulación de caudal

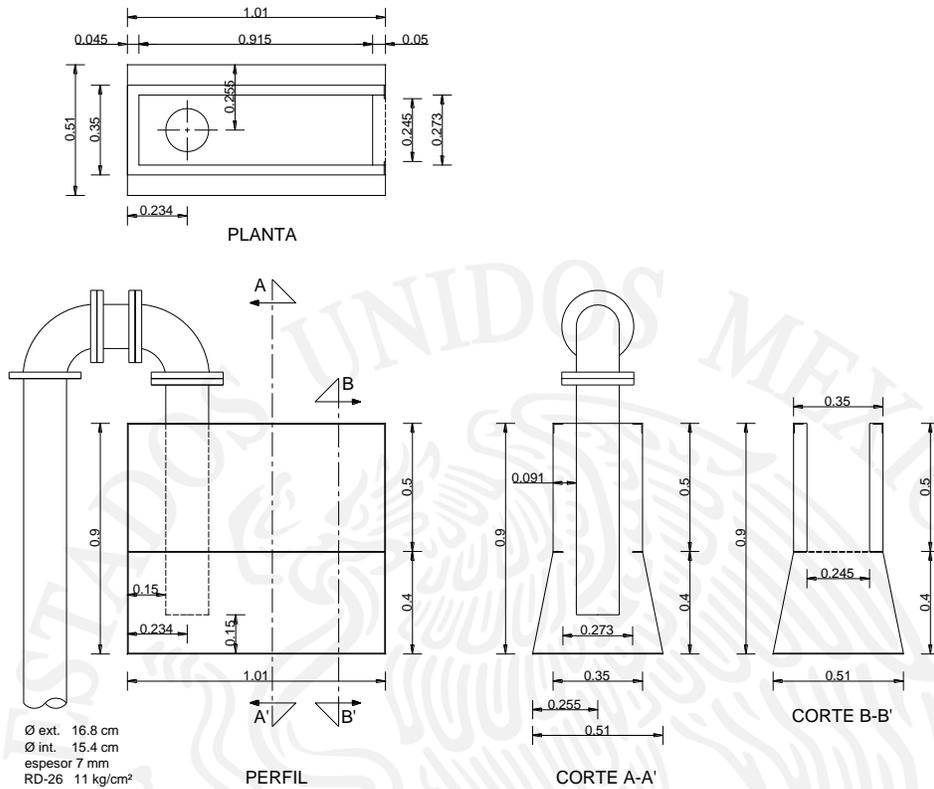


Figura: Esquema de la disposición de la llegada de la tubería al tanque disipador de energía del canal de pendiente variable

Se obtiene la curva carga-descarga (H-Q) del equipo de bombeo existente considerando una eficiencia constante en el conjunto motor-bomba igual a 0.8.

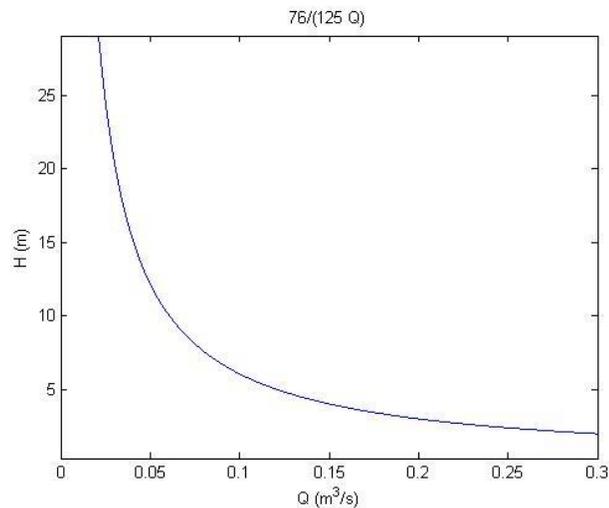


Figura: Curva carga-descarga del equipo de bombeo de 10 HP, con una eficiencia de 0.8.

El gasto en función de la carga dinámica total y la potencia del equipo de bombeo se calcula como sigue:

$$Q = \frac{76 P \eta}{\gamma H}$$

donde:

Q, Gasto, en l/s

P, Potencia, en Hp

η , Eficiencia del equipo motor bomba

H, Carga dinámica total

γ , Peso específico del fluido, kgf/m³, para el agua es 1,000 kgf/m³

Los cálculos de las pérdidas de carga se hicieron utilizando la ecuación de Darcy-Weisbach para el cálculo pérdidas de carga por fricción en tuberías:

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

donde:

h_f , Pérdidas de carga por fricción, en m

f, Factor de fricción

g, Aceleración de la gravedad en m/s²

D, Diámetro de la tubería en m

L, Longitud del tubo, en m

V, Velocidad media, en m/s

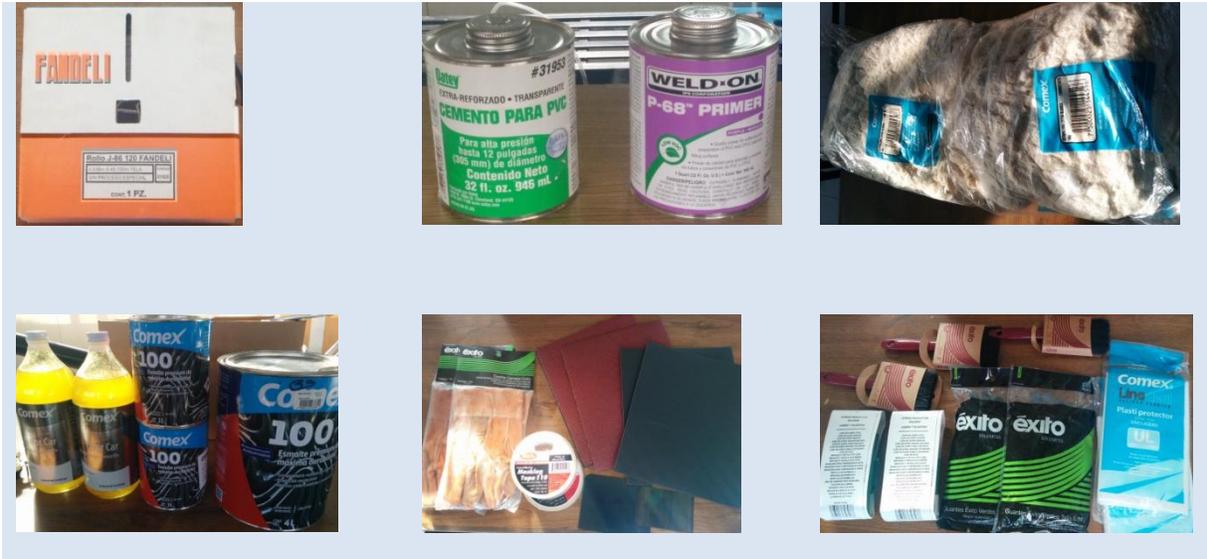
Para el cálculo de las pérdidas de carga locales es como sigue:

$$h_l = K \frac{V^2}{2g}$$

K, Coeficiente de pérdidas locales

Para estas adecuaciones se muestra parte del material que se utilizó:





Catálogo de conceptos para el acondicionamiento del canal de pendiente variable del Laboratorio de Hidráulica de Posgrado IMTA-UNAM.

Partida	Concepto	Unidad	Cantidad
1	Tornillos 3/4" x 4" para bridas	pza	16
2	Tornillos 3/4" x 5" para bridas	pza	8
3	Tornillos 3/4" x 7" para bridas	pza	8
4	Tornillos 5/8" x 4" para bridas	pza	16
5	Tornillos 5/8" x 6" para bridas	pza	8
6	Arandelas planas 3/4"	pza	64
7	Arandelas planas 5/8"	pza	48
8	Arandelas de presión 3/4"	pza	32
9	Arandelas de presión 5/8"	pza	24
10	Atraques en cambios de dirección	pza	5
11	Estructura tubular para tubería vertical	pza	1
12	Pegamento PVC Ced. 40	lt	1
13	Primer PVC	lt	1
14	Pintura anticorrosiva para tanque descarga	lt	2
15	Rollo de lija 38mm x 45 mts	pza	5
16	Tubería PVC hidráulico serie inglesa C-40 extremos lisos en los siguientes diámetros 4" (100 mm)	m	12
17	6" (150 mm)	m	6
18	Codo PVC hidráulico serie inglesa C-40 cementar 90° x 4" (100 mm)	pza	4
19	90° x 6" (150 mm)	pza	4
20	Tee derivación PVC hidráulico serie inglesa C-40 cementar 6" (150 mm) x 6" (150mm)	pza	1
21	Reducción bushing PVC hidráulico serie inglesa C-40 cementar 6" (150 mm) x 4" (100 mm)	pza	2

Partida	Concepto	Unidad	Cantidad
22	Brida PVC hidráulico serie C-40 cementar 4" (100 mm)	pza	6
23	6" (150 mm)	pza	6
24	Brida universal hierro rango 1 6" (150 mm)	pza	1
25	Válvula de mariposa cuerpo de hierro, disco y vástago de acero inoxidable con operador de engranes con volante 4" (100 mm)	pza	1
26	6" (150 mm)	pza	1
27	Empaque para brida 4" (100 mm)	pza	3
28	6" (150 mm)	pza	4
29	Tapa ciega hierro 4" (100 mm)	pza	1
30	Pliego de placa metálica	pza	1
31	Pintura anticorrosiva (tanque descarga)	lt	3
32	Primer PVC	lt	1
33	Removedor de pintura	lt	1
34	Thinner estándar	lt	3
35	Estopa estándar	kg	1
36	Cuña para remover pintura	pza	2
37	Hoja de lija esmeril	pza	3
38	Porta lija de hule	pza	2
39	Brocha 6"	pza	2
40	Brocha 3"	pza	2
41	Plástico protector	pza	2
42	Misceláneos	pza	varios

Esquema de instalación de tubería para el acondicionamiento del canal de pendiente variable del laboratorio de hidráulica del posgrado IMTA-UNAM.

SIMBOLOGÍA



VÁLVULA DE MARIPOSA CON BRIDAS

1.0

LONGITUD EN METROS

(150)

DIÁMETRO EN MILÍMETROS



BRIDA



BRIDA UNIVERSAL



TRAMO DE TUBO



TEE DE DERIVACIÓN



CODO 90°



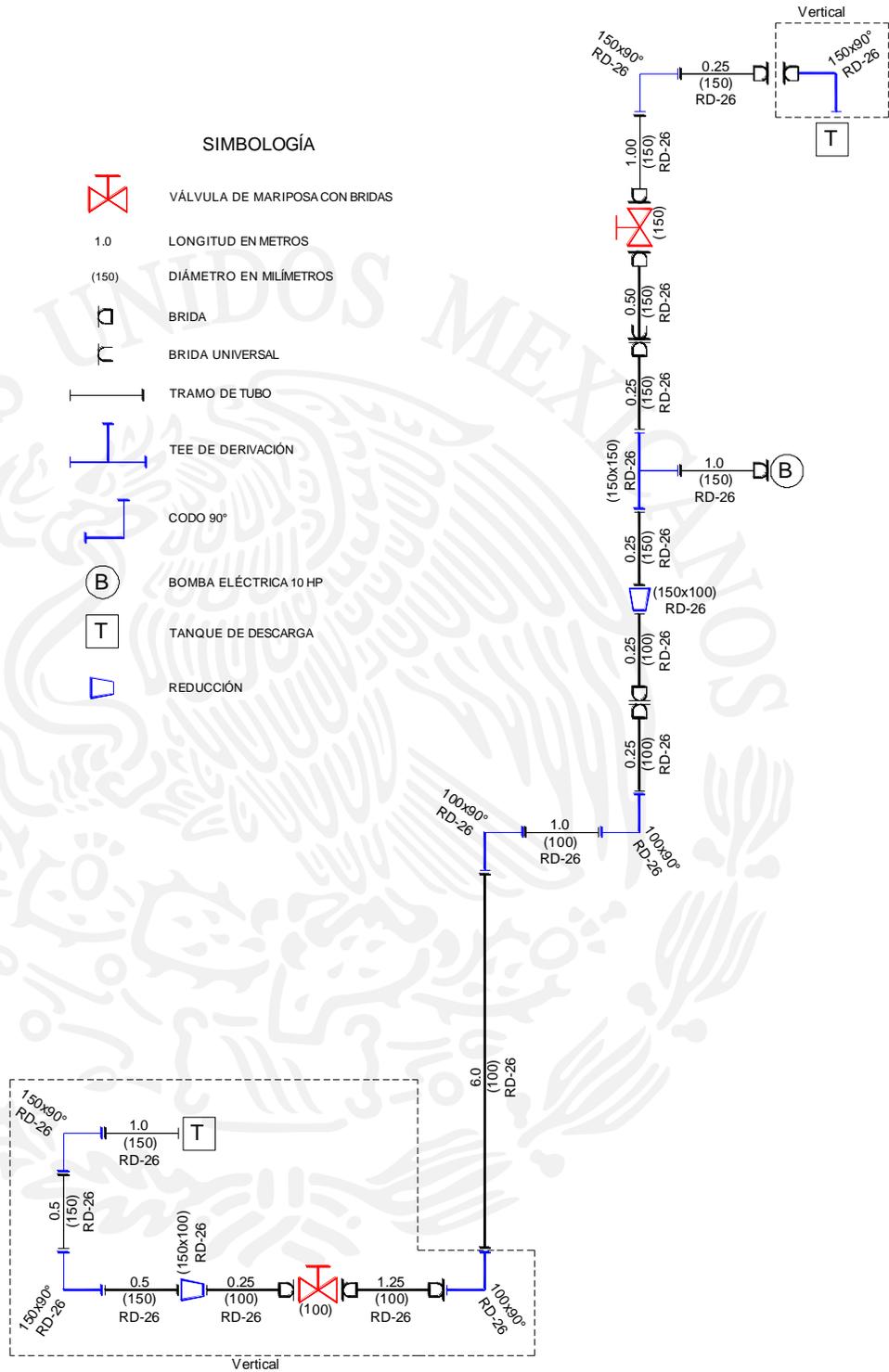
BOMBA ELÉCTRICA 10 HP



TANQUE DE DESCARGA

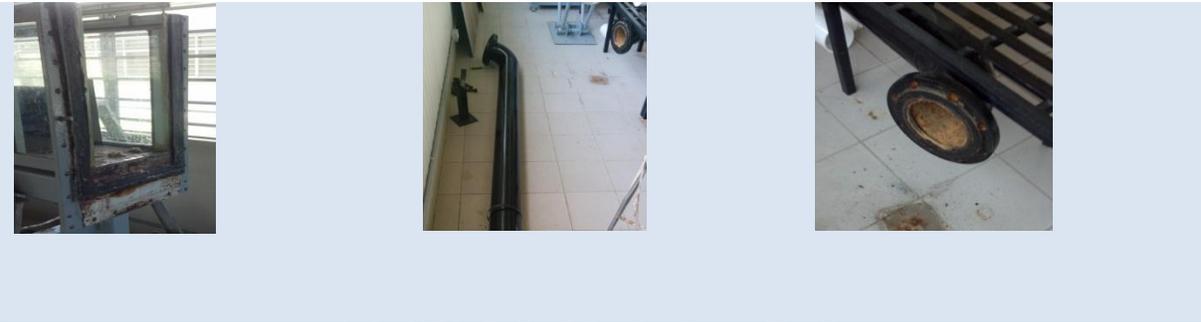


REDUCCIÓN



En las siguientes imágenes se muestran fragmentos del proceso:









1.1 Elementos de soporte para el montaje de equipo, visualización de experimentos y el registro y transmisión de datos

- a) Acondicionamiento de soporte para visualización de experimentos para el montaje de equipo, visualización y registro de transmisión de datos

En este punto, se realizó un análisis de movilidad y espacio dentro de las instalaciones del laboratorio de Hidráulica del espacio disponible para instalación de soporte del dispositivo y visualización y adquisición de imágenes.

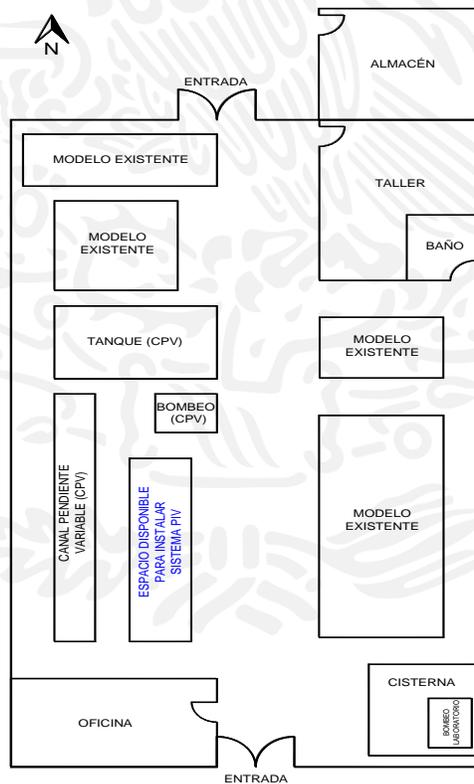


Figura: Croquis del estado actual del laboratorio de hidráulica del Posgrado IMTA

Se realizaron cambios y modificaciones en el soporte

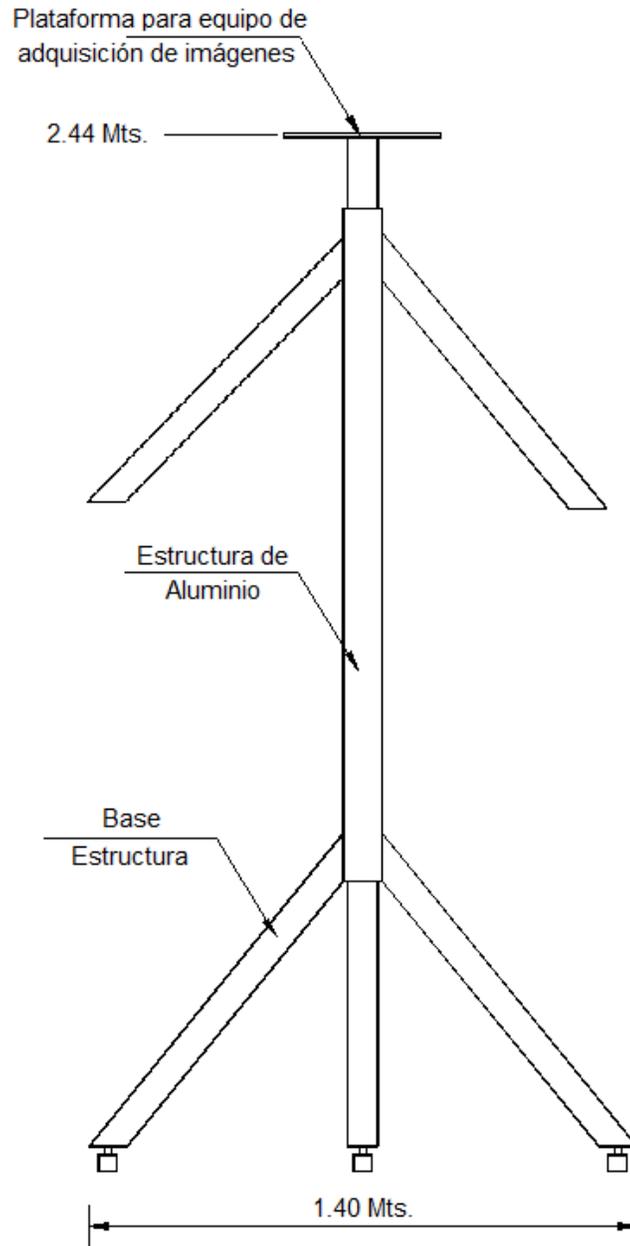


Figura: Esquema.

b) Se suministro, ensamble y coloco de 4 conectores y extensiones eléctricas



Partida	Concepto	Unidad	Cantidad
1	Cable uso rudo 2x3m2 60° c, 300 vlt.	pza	4
2	Caja uso rudo metálica para 2 conectores	pza	4
3	Conectores dobles + / - tierra	pza	4
4	Clavija uso rudo	pza	4

2. Realizar experimentos

Para la realización de experimentos para probar y validar los equipos de visualización y registro de información, se proporcionó personal de apoyo para la implementación, instrumentación y realización de pruebas experimentales para apoyar al personal del IMTA y a estudiantes del Posgrado UNAM-IMTA, en la realización de pruebas experimentales, ajuste y movimiento de equipos y en la captura y procesamiento de datos.

Estas pruebas requieren de apoyos de equipo tecnológico que permita facilitar la obtención de datos, es por ello que en la ejecución del proceso experimental se proporcionó durante el servicio dos equipos de adquisición de imágenes con una frecuencia menor a 1/10 segundos y con una resolución de 5.1 mega pixeles.

La medición de flujo en canales, en los últimos años, se ha confiado a equipo de muy alto costo o técnicas sofisticadas. Sin embargo, se pueden obtener mediciones con cierto grado de exactitud, con equipo más económico y de uso práctico. En este documento, se presenta un estudio de investigación enfocado a la determinación de la velocidad media del flujo en canales a través del uso, validación y adaptación de una herramienta de detección visual del movimiento de flotadores mediante un teléfono celular con cámara de filmación.

En los últimos 20 años, se han comenzado a usar técnicas de medición mediante la grabación de secuencias de imágenes de objetos o partículas flotantes, la mayor parte de ellas desarrolladas en laboratorios experimentales: medición de velocidad por imágenes de partículas (PIV, por sus siglas en inglés) y medición de velocidad por seguimiento de partícula (PTV, siglas en inglés).(Rowiński, 2011)

En este trabajo se examinó una aplicación del tipo PTV para medir la velocidad, utilizando la cámara de un teléfono celular. Para la depuración y calibración del procedimiento de medición se probaron distintos flotadores que hicieran las funciones de un trazador, de esta manera entre las diferentes opciones se eligió un aro flotante cuya relación del diámetro con respecto al ancho del canal es de 0.5, por ser el que arrojó los mejores resultados. Cabe resaltar que dicho flotador es de fácil fabricación y es el que proporciona la mejor relación entre velocidad de traslado de trazador contra velocidad media del flujo.

7.4. Antecedentes

Las técnicas PIV (Quénot, 1998) y PTV (Savid, 2008) permiten la medición experimental en mecánica de fluidos. Estas técnicas tienen la capacidad de generar el campo vectorial de velocidades de un flujo. Tomando como base esto, se han desarrollado técnicas de larga escala (LS, por sus siglas en inglés, lasgescale) PIV de larga escala (LSPIV) (Creutin, 2003) y PTV de larga escala (LSPTV) (Admiraal, 2004). A diferencia de los primeros, que emplean de cámaras fotográficas especializadas y un haz de luz láser para iluminar la zona de medición (Rowiński, 2011); las técnicas de larga escala utilizan videocámaras e iluminación natural.

Las técnicas PIV (convencional y de larga escala) requieren que el flujo sea sembrado con una gran cantidad de partículas que funcionen como trazadores, se hace el seguimiento de un conjunto de partículas y se cuantifica la velocidad promedio de estas. Los PTV hacen del seguimiento de una sola partícula a la vez.

Existen diferentes algoritmos para la detección del movimiento de las partículas trazadoras y así como para automatizar estas técnicas (Huang, 1993):

- Correlación cruzada (cross-correlationmethod).
- Método de la franja de Young (Young'sfringemethod)

Las técnicas de larga escala, en muchas ocasiones, requieren hacer un tratamiento de ortorectificación a los fotogramas, para corregir cualquier deformación por la perspectiva de las imágenes y para convertir coordenadas en píxeles a coordenadas físicas, como explica Creutin, (2003).

7.5. Software empleado como herramienta de evaluación

Se buscaron aplicaciones para equipo celular, que midieran la velocidad de objetos haciendo uso de su cámara. La que cumplió con los requerimientos para la medición de la velocidad de objetos flotantes en canales y que proporciona información sobre la calidad de la misma fue la app denominada SpeedClock® disponible para equipos Iphone®, a un costo bajo y al alcance de todos los bolsillos.

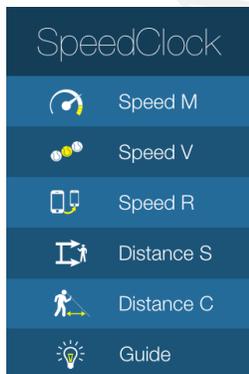


Ilustración 1. Ventana principal del software SpeedClock®

SpeedClock® calcula la magnitud de la velocidad de un objeto en movimiento utilizando el principio "distancia/tiempo", y cuenta con tres modalidades para tal fin:

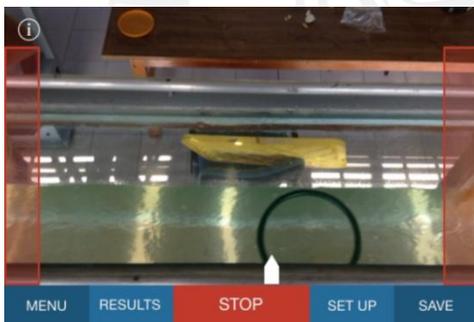
- Speed M®
- Speed V®
- Speed R®.

Una de las ventajas de esta aplicación es que arroja una serie de resultados que permiten determinar si una medición puede considerarse aceptable o no, lo cual incrementa el grado de confiabilidad en uso para los fines que se persiguen. Mostrando los resultados obtenidos entre cada uno de los fotogramas en los que se sigue el objeto en estudio.



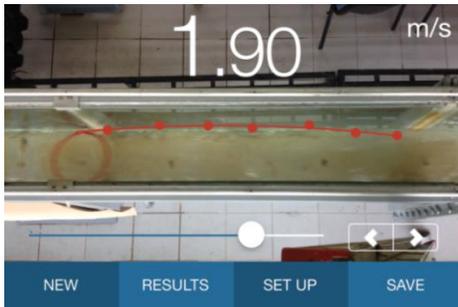
Ilustración 2. Resultados opción Speed V®

Speed M® (Kaiser, 2014), permite medir la velocidad de objetos en movimiento, de forma simple y en tiempo real. Al instante que la aplicación detecta un cambio en la banda de la pantalla, el cronómetro del celular se activa, cuando atraviesa la última, el cronómetro se detiene. Se calcula la distancia recorrida y con esto calcula una velocidad.



Fotografía 1. Ejemplo de Speed M®

Speed V® basa la medición en la filmación. En el video realizado por el equipo, se detecta el movimiento del objeto seleccionado y cuantifica la velocidad de desplazamiento entre los fotogramas. Esta opción requiere que el usuario seleccione el objeto a medir, al momento de entrar a la línea de visión y a la salida del lente de la cámara. La aplicación traza la trayectoria del móvil.



Fotografía 2. Ejemplo de Speed V[®]

La información básica que requiere SpeedClock[®] en cualquiera de sus opciones, es la distancia perpendicular entre la cámara y el ente en movimiento.

El software configura la cámara de tal modo que la distancia entre el lente y el plano enfocado, es aproximadamente igual a la longitud que tiene el campo visual de la cámara del celular.

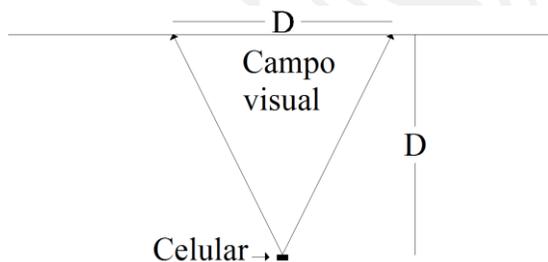


Ilustración 3. Esquema de la relación entre la distancia de la cámara del celular y la longitud del campo visual de esta

Verificación del SpeedClock[®]

Se optó por hacer pruebas con diferentes objetos flotantes en un canal de laboratorio, con un ancho (B) de 0.245 m; aforado con un vertedor triangular, con el afán de comprobar que las velocidades calculadas con la aplicación sean correctas.

7.6. Conclusiones preliminares:

- A distancias pequeñas (alrededor de 1m), entre el flotador y el celular. Tanto Speed M® como Speed V® calculan una velocidad con buen grado de exactitud.
- Si la distancia entre el objeto y el celular aumenta (2.00 m o más) el tamaño del flotador influye en la medición. Si este es pequeño solo es detectado por Speed V® con buenos resultados (detalle que el autor de la aplicación comenta en la guía de usuario) Kaiser, (2014).
- La densidad del trazador es un factor importante en la medición de su velocidad. Trazadores de muy poca densidad, pueden ser afectados por corrientes dominantes, y de densidades similares a las del agua, pueden sumergirse en algunas ocasiones. En este caso finalmente se usaron trazadores con una gravedad específica de 0.75.
- Algunas formas del trazador provocan que este no se mueva en línea recta, (Geometrías esféricas giran constantemente sobre si y llegan a mostrar trayectorias aleatorias).
- Si el trazador toca las paredes del canal, los efectos de fricción provocan que su velocidad sea menor a la velocidad esperada.
- El tamaño del trazador es directamente proporcional a la velocidad que llega a desarrollar.

En esta verificación se usaron los siguientes objetos flotantes:

- Esferas de unicel
- pelotas de goma de diferentes tamaños
- Frutas
- cilindros de cera
- globos de aire y agua
- estructuras construidas de PVC
- aros elaborados con manguera de diferentes diámetros y tamaños.

En la fotografía 3 se muestran algunos de los objetos utilizados.



Fotografía 3.- Ejemplo de algunos flotantes (trazadores)

Las gráficas que SpeedClock® presenta al activar el botón de results, brinda información sobre los cálculos realizados por el app. Aquellas graficas cuyos puntos (resultados) son muy cercanos entre sí y su línea de tendencia asemejó a la horizontal, representan resultados de mayor precisión que los que no se comportaron de esta manera



Ilustración 4. Diferencias entre mala correlación de datos y buena en Speed V®

7.7. Trazador seleccionado

De todas las propuestas de trazador, se optó por un aro de manguera sin relleno alguno, considerando los siguientes puntos:

- La elaboración de este no requiere más de unos cuantos minutos.
- Es sencillo obtener un aro con la forma de un círculo prácticamente perfecto.
- El precio por metro de material no supera el monto de \$10.00 (dependiendo el diámetro y calidad del plástico de fabricación), por lo que los costos de inversión son sumamente bajos.
- Los resultados obtenidos de la medición de la velocidad con SpeedClock® tienen gran consistencia.
- Se considera que la forma de anillo circular del trazador, ayuda a tomar una resultante de velocidad representativa a la velocidad media del flujo en la superficie y gracias a ello medir un factor de proporcionalidad, se determina la velocidad media del flujo del canal.

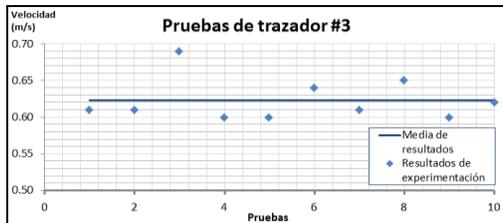


Ilustración 5. Resultados de pruebas realizadas al trazador seleccionado

En la Ilustración 5 se presentan los resultados obtenidos de 10 repeticiones realizadas con el tipo de trazador tipo anillo. La desviación estándar en porcentaje con respecto a la media superficial de las velocidades registradas fue de: 4.8%

7.7.1. Pruebas con el trazador seleccionado

La segunda etapa experimental, consistió en probar diferentes diámetros del trazador. Para poder elaborar trazadores pequeños, sin alterar su geometría circular; se optó por usar manguera de nivel de 0.00794m (5/16”).



Fotografía 4. Diámetros usados en segunda etapa.

7.8. Las consideraciones para este experimento fueron:

- Una distancia de 2.0 entre la superficie libre del agua y el celular, esto con el objeto de captar una trayectoria representativa.
- Se usó la modalidad Speed V®.
- Mediciones con flotadores de 5 diámetros diferentes.
- Repeticiones para régimen de flujo subcrítico y supercrítico, modificando la pendiente del canal.
- Dos tipos de rugosidad, pared lisa y rugosa.
- Dos tirantes diferentes para cada régimen de flujo y alta rugosidad.

La geometría de los diferentes aros se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Diámetros de aros

Identificador	Diámetro (D) [m]	D/B
A1	0.08	0.33
A2	0.12	0.49
A3	0.18	0.73
A4	0.22	0.90
A5 (control)	0.098	0.40

Tabla 2. Combinaciones de las pruebas ejecutadas

Combinaciones		Tirante [m]
C1	Liso + subcrítico	0.168
C2	Rugoso + subcrítico	0.177

C3	Rugoso + supercrítico	0.113
C4	Rugoso + subcrítico	0.096
C5	Rugoso + supercrítico	0.047

En la tabla 2 se presentan las Combinaciones bajo las que se realizaron los experimentos.

Las paredes del canal son de vidrio, por lo que se consideró prácticamente liso. Para incrementar su rugosidad se recubrieron las mismas con lija de agua, grado 80.



Fotografía 5. Canal recubierto de lija

El flujo del canal se aforó por medio de un vertedor triangular de pared delgada, con el fin de calcular la velocidad media de éste y compararla con el promedio de cada diámetro de los trazadores.



Fotografía 6. Trazador sobre la superficie del canal

Resultados de segunda etapa de experimentos y análisis adimensional.

Se realizaron de 10 a 16 repeticiones por cada combinación, midiendo la velocidad a la que cada aro pasaba por la superficie libre de agua y el gasto del canal para calcular la velocidad media del flujo y de esta forma relacionar los resultados obtenidos.

Se omitieron los resultados en los que el trazador no se desplazaba en línea recta, aproximadamente por el centro del canal.



Fotografía 7. Proceso de medición.

Para representar de mejor manera los resultados de los experimentos, se realizó el análisis dimensional de las variables que intervienen en el fenómeno que se pretende caracterizar, la dimensión del aro con respecto al ancho del canal. A continuación se presenta un resumen de este ejercicio.

Tabla 3. Variables involucradas

Variable	Símbolo	Dimensiones
Velocidad del trazador	V_s	LT^{-1}
Diámetro del trazador	D	L
Ancho del canal	B	L
Velocidad media del flujo	V_m	LT^{-1}

Ecuación funcional:

$$F(V_s, D, B, V_m) \quad (1)$$

$$n \text{ (número de variables)} = 4$$

$$m \text{ (número de dimensiones)} = 2$$

$$n - m \text{ (números adimensionales)} = 2$$

Tabla 4. Variables repetitivas

Ancho del canal	B	L
Velocidad media del flujo	V_m	LT^{-1}

Número adimensionales:

$$\pi_1 = V_m B V_s = [LT^{-1}]^{x_1} [L]^{y_1} [LT^{-1}] \quad (2)$$

$$\pi_2 = V_m B D = [LT^{-1}]^{x_2} [L]^{y_2} [L] \quad (3)$$

Analizando π_1

$$L: x_1 + y_1 + 1 = 0$$

$$T: -x_1 - 1 = 0 \quad x_1 = -1 \quad y_1 = 0$$

Analizando π_2

$$L: x_1 + y_1 + 1 = 0$$

$$T: -x_1 = 0 \quad x_1 = 0 \quad y_1 = -1$$

$$\pi_1 = \frac{V_m}{V_s}$$

$$\pi_2 = \frac{D}{B}$$

A partir del análisis anterior se generaron gráficas con las relaciones obtenidas, para identificar patrones comunes entre cada uno de los experimentos realizados, y determinar coeficientes que relacionen la velocidad del trazador con la velocidad media del flujo del canal.

Los resultados obtenidos de cada combinación de pruebas se muestran en la tabla 5.

Se presenta el diámetro de aro usado; la velocidad media del flujo; la relación entre el diámetro del trazador y el ancho del canal; el número de pruebas efectuadas de cada combinación, el promedio de las velocidades medidas del trazador, para cada una de los ensayos correspondientes; la desviación estándar de las muestras y la proporción de las velocidades según muestra el análisis dimensional.

Tabla 5. Resumen de resultado

Diámetro [m]	Velocidad media del flujo (V_m) [m/s]	D/B	Número de pruebas	Media, velocidad de trazador (V_T) [m/s]	Desviación estándar [m/s]	$\frac{V_m}{V_T}$ [m/s]
Combinación C1						
0.08	0.96	0.33	15	1.02	0.049	0.94
0.12		0.49	15	1.01	0.024	0.95
0.18		0.73	15	1.03	0.028	0.93
0.22		0.90	15	1.03	0.018	0.94
0.098		0.40	15	1.00	0.041	0.96
Combinación C2						
0.08	0.92	0.33	11	1.00	0.037	0.92
0.12		0.49	11	0.97	0.022	0.95
0.18		0.73	11	0.96	0.031	0.96
0.22		0.90	11	0.97	0.020	0.95
0.098		0.40	11	0.98	0.030	0.94
Combinación C3						
0.08	1.43	0.33	11	1.52	0.053	0.94
0.12		0.49	11	1.52	0.034	0.94
0.18		0.73	11	1.49	0.031	0.96
0.22		0.90	11	1.47	0.029	0.97
0.098		0.4	11	1.51	0.018	0.94
Combinación C4						
0.08	0.62	0.33	10	0.66	0.019	0.94
0.12		0.49	10	0.67	0.015	0.93
0.18		0.73	10	0.66	0.016	0.94
0.22		0.90	10	0.65	0.022	0.95
0.098		0.4	10	0.67	0.012	0.93
Combinación C5						

0.08	1.19	0.33	10	1.29	0.015	0.92
0.12		0.49	10	1.29	0.014	0.92
0.18		0.73	10	1.29	0.015	0.93
0.22		0.90	10	1.26	0.018	0.95
0.098		0.4	10	1.28	0.016	0.93

En la mayoría de los resultados, puede apreciarse que la velocidad media comprende valores entre 0.91 y 0.95 de la velocidad medida con un trazador con una relación π_1 de 0.5. Al coeficiente π_1 , en lo subsecuente se le denominara Coeficiente de translación y se le asignaran las siglas C_t .

$$C_t = V_m/V_s \quad (4)$$

Donde V_m es la velocidad media del flujo m/s, V_s es la velocidad media de los trazadores, C_t es el coeficiente de translación.

Ilustraciones 6 – 8 muestra de resultados de cada medición:

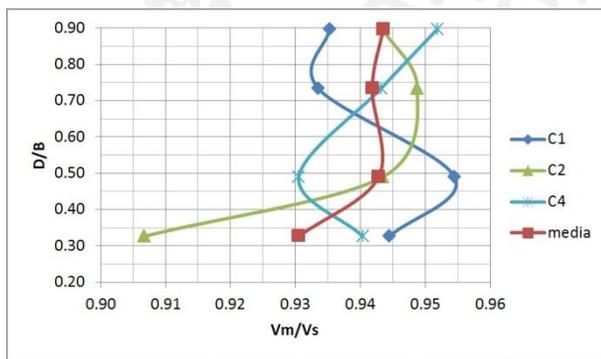


Ilustración 6. Pruebas en subcrítico

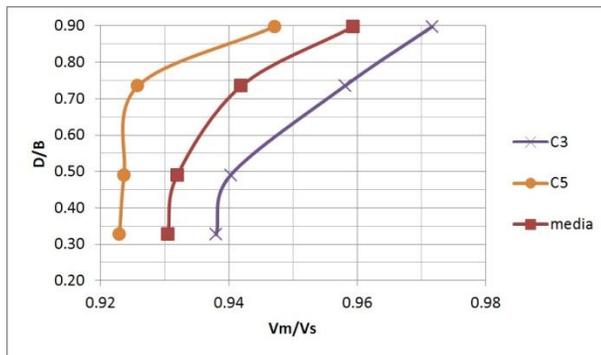


Ilustración 7. Pruebas en supercrítico

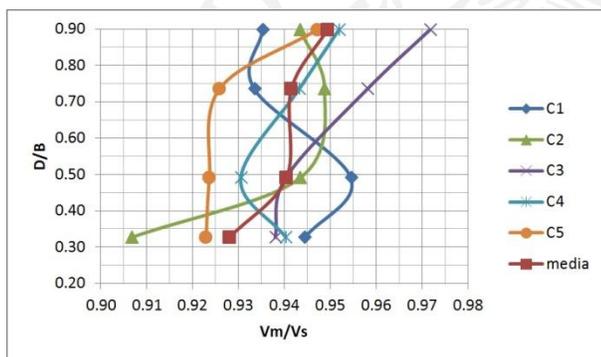


Ilustración 8. Superposición de todos los resultados excepto C2

Se observó en las pruebas realizadas en flujo subcrítico, que los resultados presentaron un comportamiento similar entre ellas. La media de los datos obtenidos muestra un comportamiento constante en la relación $C_t = 0.942$ para un rango de π_2 de 0.4 a 0.7.

En régimen supercrítico se encontró que el comportamiento de los resultados fue similar pero los resultados entre las combinaciones de las pruebas se alejaron entre sí. Dando un promedio $C_t = 0.93$, para un $\pi_2 = 0.50$.

La gráfica de superposición de todos los datos, se realizó con el fin de obtener una media representativa de todo el conjunto de muestras. La media obtenida dio como resultado: $C_t = 0.941$, para un $\pi_2 = 0.50$.

7.9.Comentarios finales

Las mediciones realizadas se hicieron prácticamente perpendiculares a la superficie libre del agua.

Es importante recordar que las pruebas se realizaron en un canal rectangular de sección constante. Alteraciones en el flujo, como: cambios en el tamaño del conducto, objetos que obstruyen el cauce, cambios de dirección cercanos al punto de medición, entre otros; pueden afectar las mediciones, tal y como se registran en las recomendaciones usadas en técnicas de aforo convencionales (Boiten, 2008)

El trazador debe tener un color altamente contrastante con el medio, para que su detección sea más confiable.

Se recomienda que el celular no este inclinado con respecto al eje del flujo.

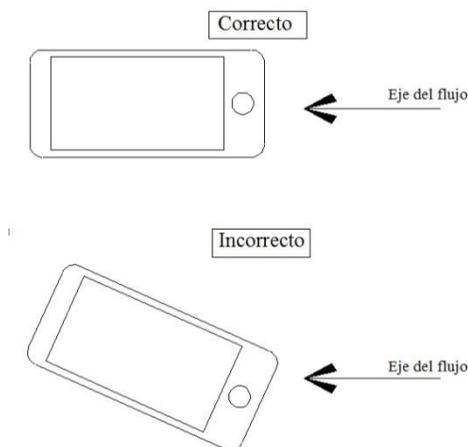


Ilustración 9. Orientación del teléfono respecto al flujo.

7.10. Conclusiones

Como se puede apreciar, es viable obtener la velocidad superficial de un flujo con técnicas de medición mediante filmación, como lo es la aplicación SpeedClock®.

Se encontró de forma experimental la existencia de un coeficiente (Coeficiente de traslado, C_T) que relaciona la velocidad que desarrolla un trazador en forma de aro con un factor $\pi_2=0.5$, magnitud que establece la recomendación para el dimensionamiento de los flotadores.

Las mediciones realizadas con la aplicación usada y con apoyo de un trazador con la forma recomendada permiten obtener con buena aproximación la velocidad media del canal.

7.11. Referencias

ADMIRAAL, D., STANSBURY, J. y HABERMAN, C. Case study: particle velocimetry in a model of Lake Ogallala. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. CXXX, núm. 7, 2004, pp. 599-607.

BOITEN, W., *Hidrometry*. Tercera edición. Países Bajos: WageningenUniversity, 2008, 247pp.

CREUTIN, D., MUSTE, M., BRADLEY, A., KIM, C. y KRUGER, A. (2003). Rivergauging using PIV techniques: a proof of concept experiment on the Iowa River. *Journal of Hydrology*, Vol. CCLXXVII, núm. 3, pp. 182-194.

HUANG, T., FIEDLER, E. y WANG, J. Limitation and improvement of PIV. *Experiments in Fluids*, Vol. XV, núm. 4-5, 1993, pp. 263-273.

KAISER, S., *Speedclock Guides* [en línea]. 2014. Disponible para World Wide Web:

<http://appmaker.se/speedClock/speedInfo.html>

QUÉNOT, G., JAROSLAW, P., y TOMASZ, K.
Particle image velocimetry using optical flow for image analysis. *8th Int. Symposium on Flow Visualization*. Septiembre de 1998, pp 47-1.

ROWIĄNSKI, P., *Experimental methods in hydraulic research*. Polonia, Springer, 2011, 321 pp.

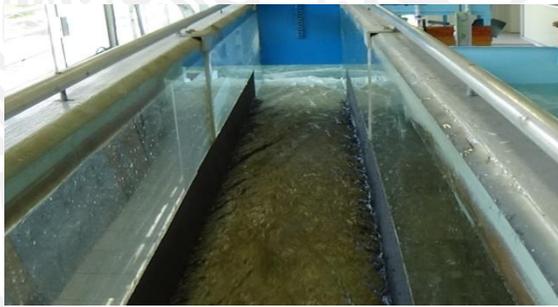
SAVID, C., WIERZBICKI, P., GARCÍA, M., TARRAB, L., PLENCOVICH, G., DÍAZ, A., y RODRÍGUEZ, A. Caracterización de velocidades del flujo en la zona de aproximación al vertedero del aprovechamiento Los Monos. *V Congreso Argentino de Presas y Aprovechamientos Hidroeléctricos; Tucumán, Argentina, 2008*.

STREETER V, WYLIE B. *Mecánica de Fluidos*. McGraw Hill, 2000, 741 pp.

Registro fotográfico.







8. ANEXOS

8.1.Anexo 1 Diagramas eléctricos TRIO

Fuente de Alimentación

Volts que son con los cuales trabaja toda la electronica de este medidor de gasto

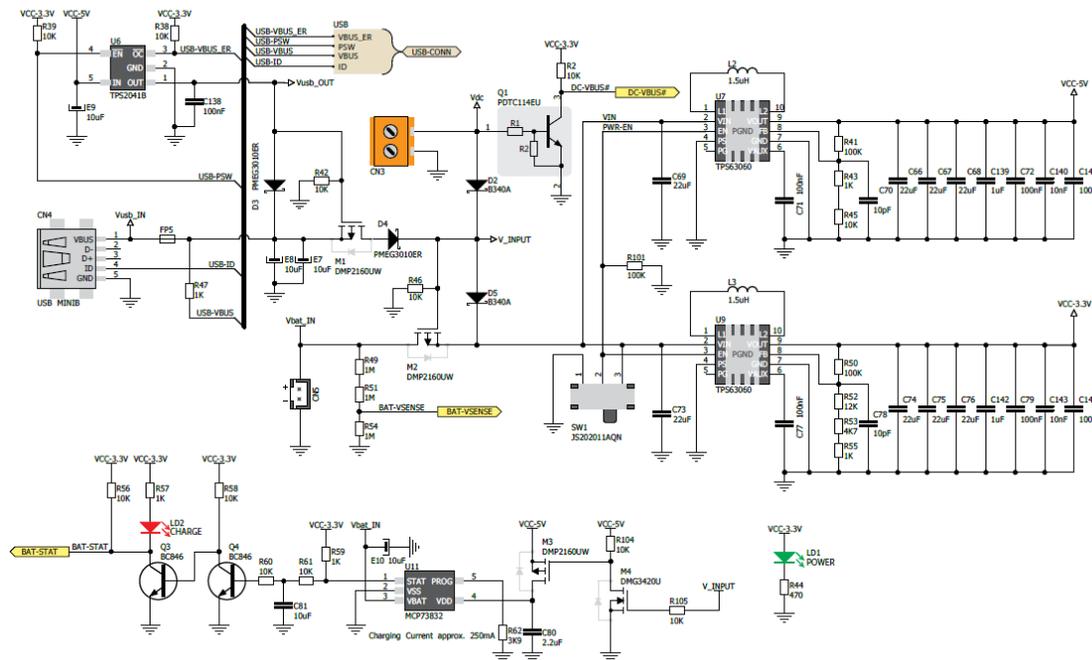


Ilustración 8.1 Fuente de alimentación

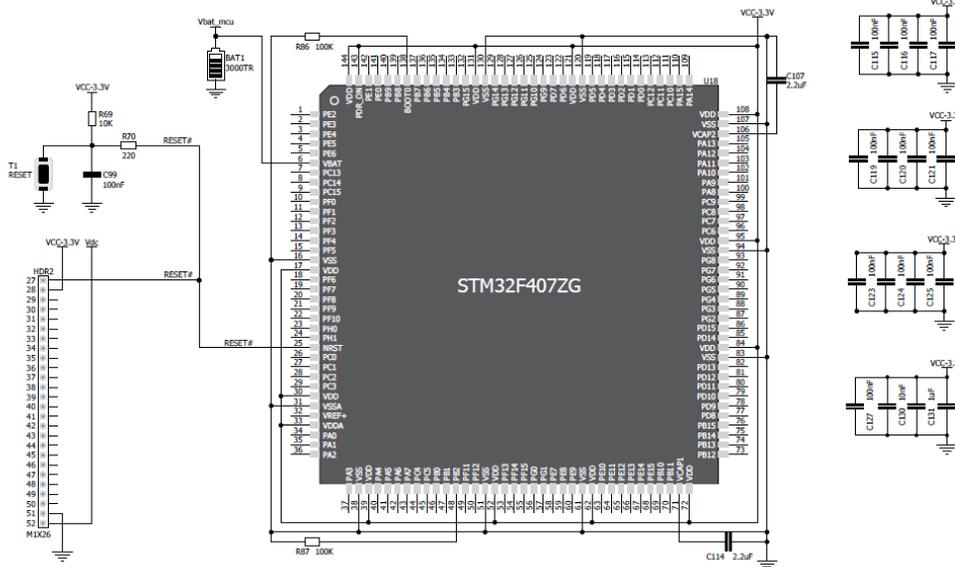


Ilustración 8.2 Boton Resét

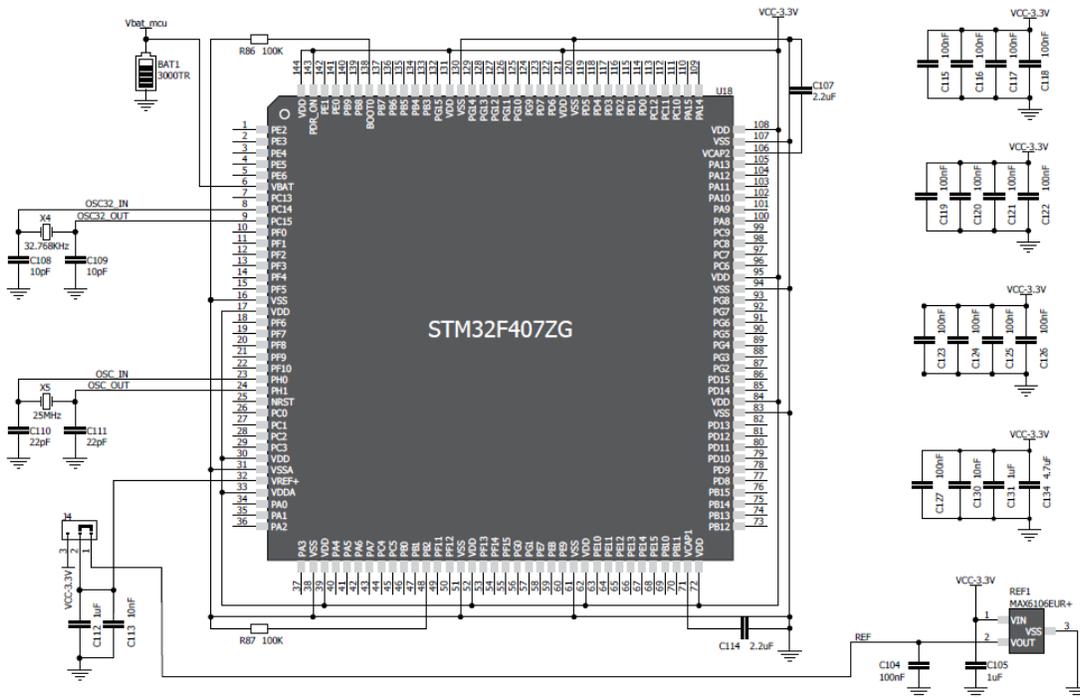


Ilustración 8.3 Voltaje de Referencia para ADC

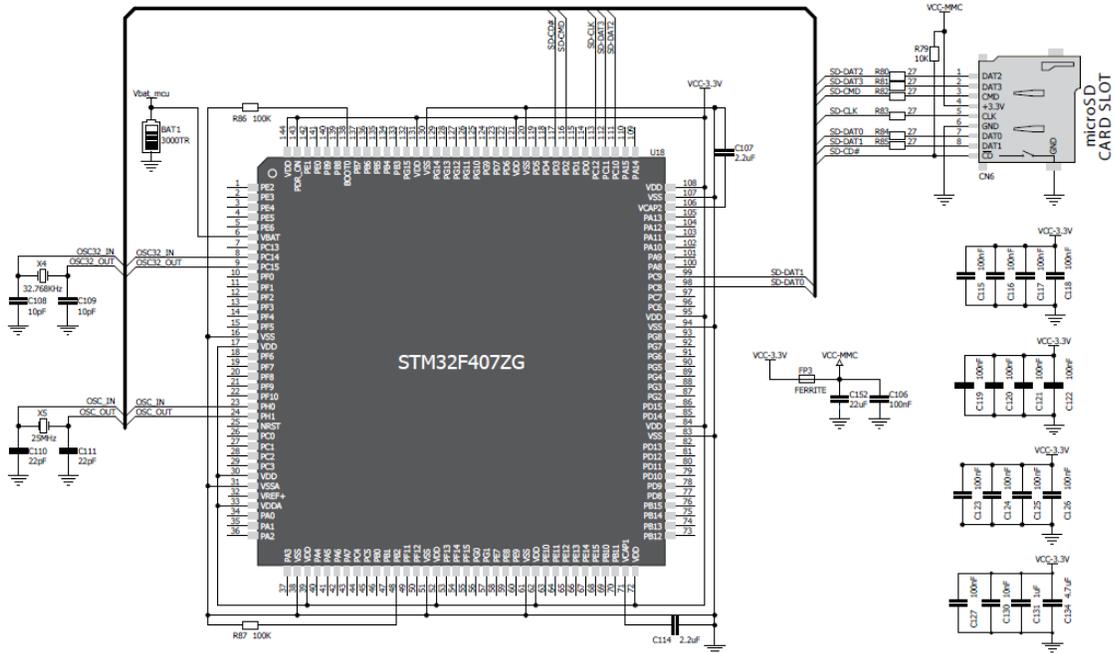


Ilustración 8.4 Módulo para tarjeta de memoria SD

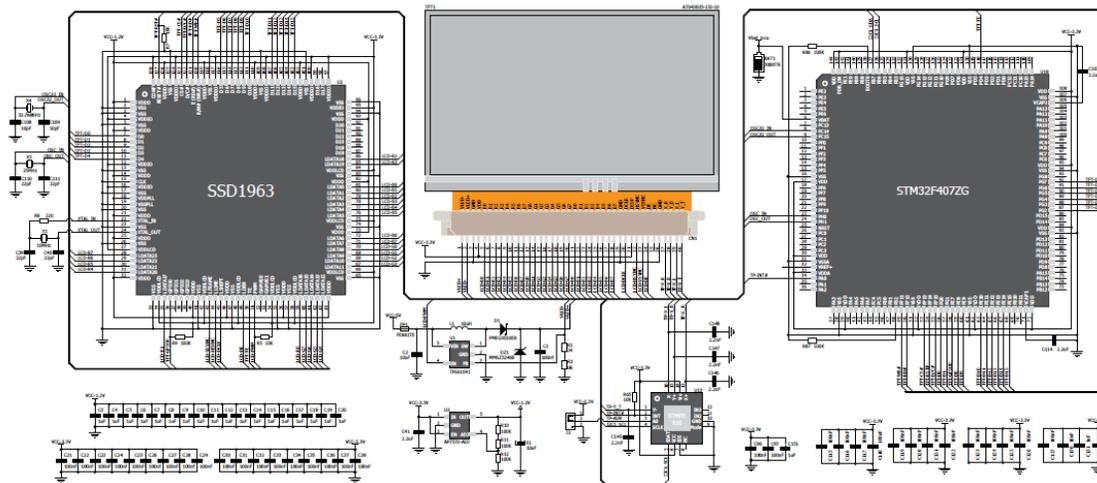


Ilustración 8.5 Conexiones LCD Táctil

8.2.Anexo 2 Diagramas eléctricos SOLO

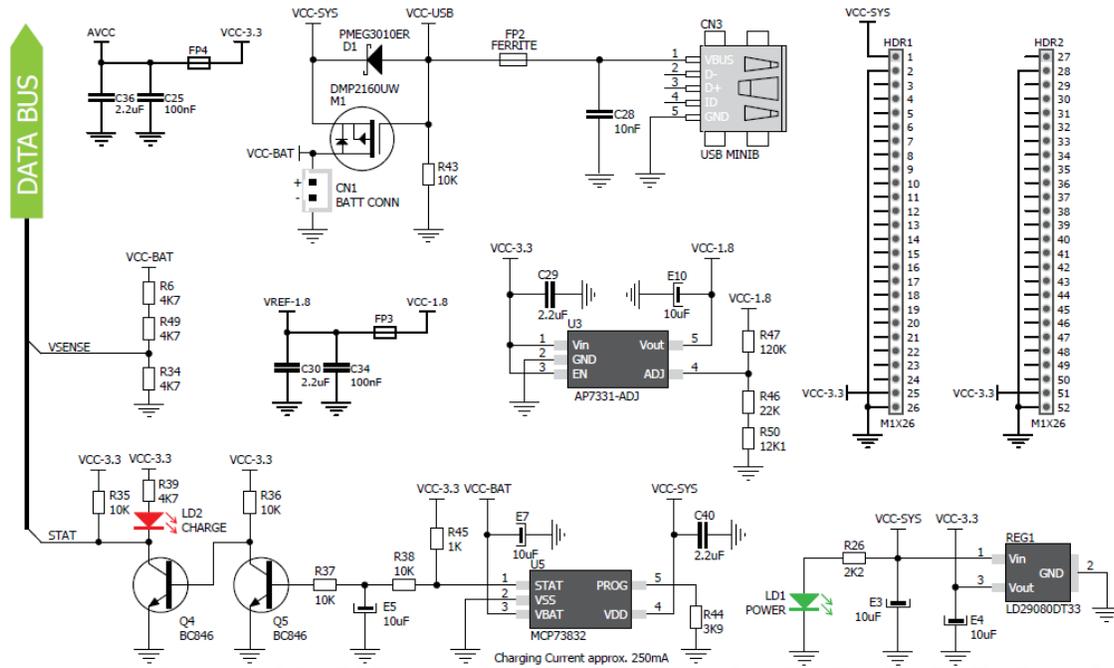


Ilustración 8.7 Fuente de alimentación

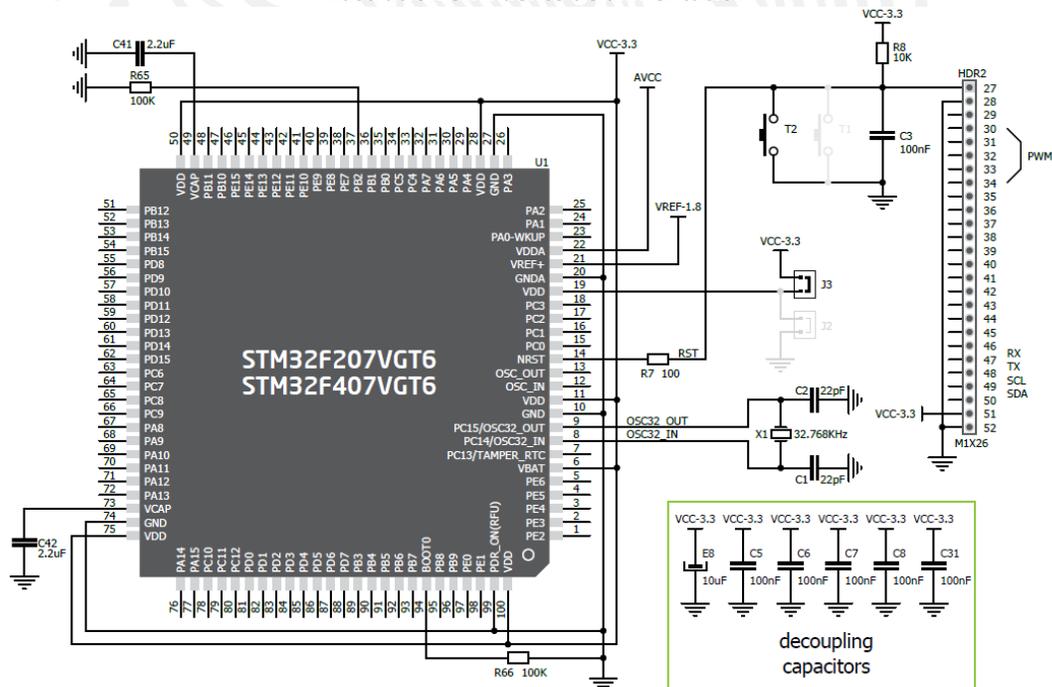


Ilustración 8.8 Botón Reset

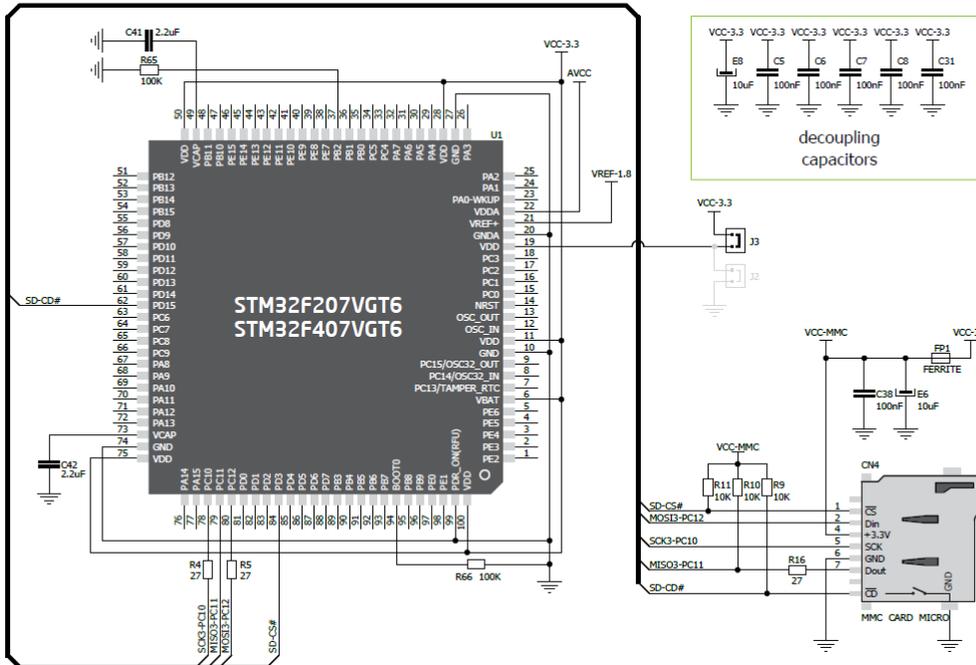


Ilustración 8.9 Tarjeta de Almacenamiento SD

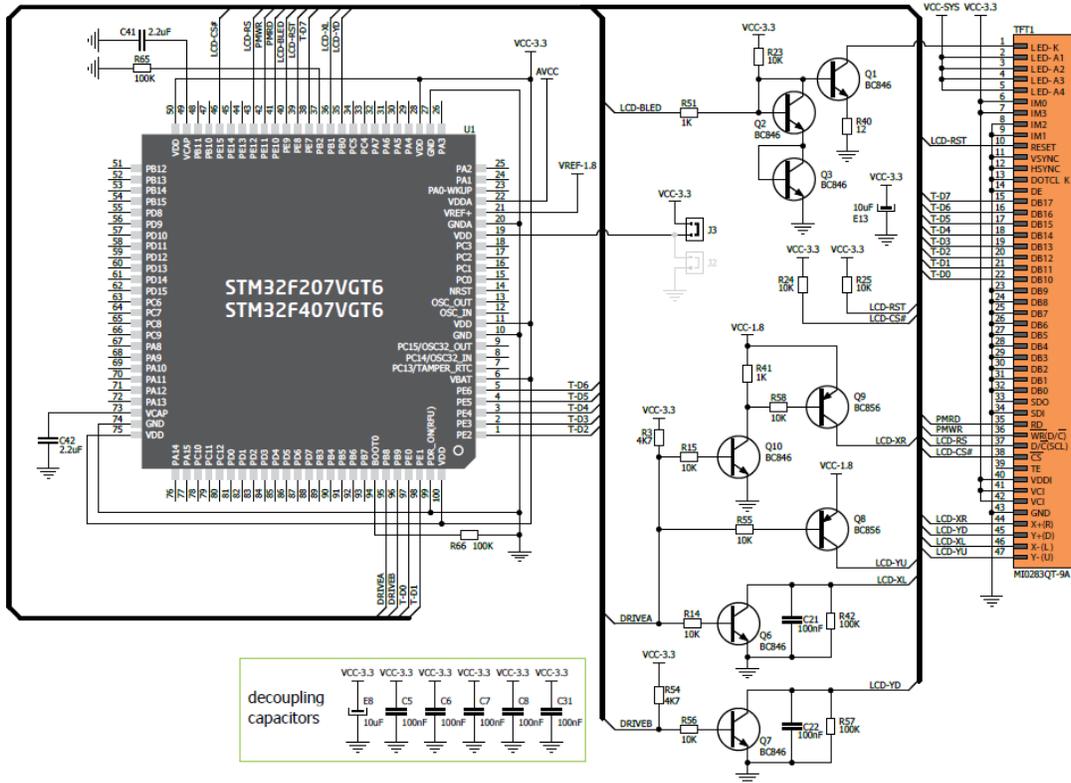


Ilustración 8.10 Pantalla Táctil

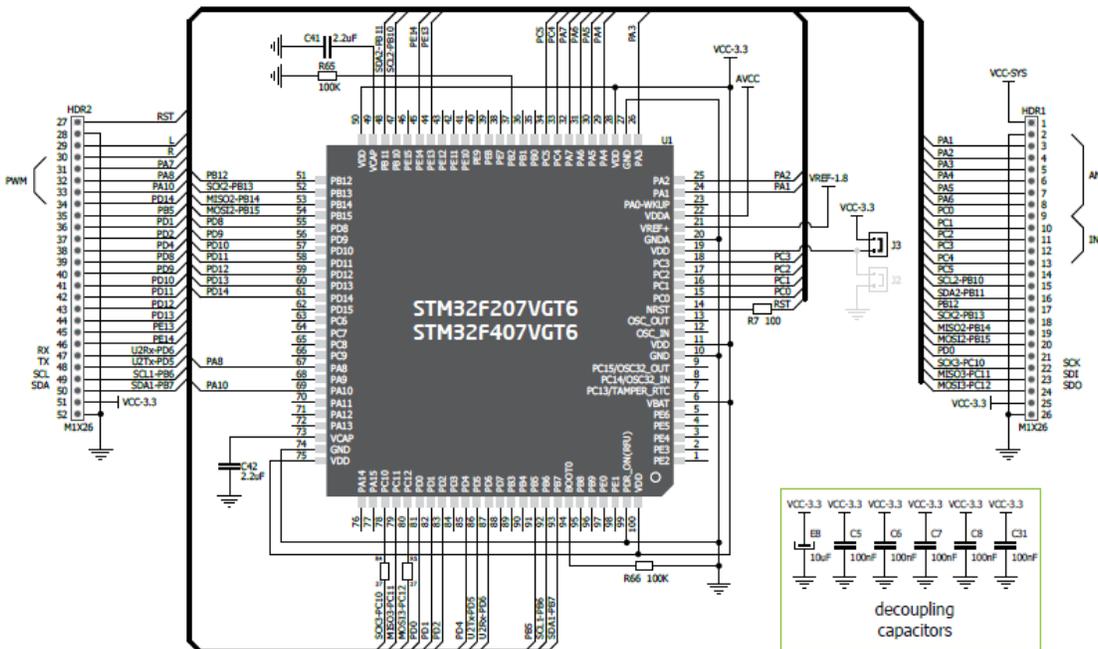


Ilustración 8.11 Puerto's de Multiple propósito