

660
A39
2010

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA AMAZONÍA PERUANA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

TESIS

“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE UN SISTEMA
DE MEDICIÓN DE FLUJO EN CANAL ABIERTO CON PLACAS
INTERCAMBIABLES PARA EL LABORATORIO
DE PROCESOS Y OPERACIONES UNITARIOS
DE LA FIQ-UNAP”

PARA OPTAR EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO



AUTORES

BACH. JUNIOR ALEGRÍA OCAMPO.

BACH. MICHOLS LAYSÍN COK CÉSPEDES.

ASESOR

ING. OSCAR ALBERTO VÁSQUEZ GIL

IQUITOS – PERÚ
2010

3034

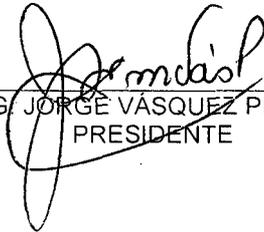
HOJA DE JURADO Y ASESOR:



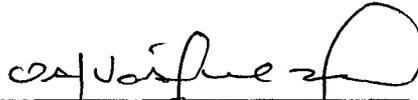
Ing. LUIS GÓMEZ TUESTA
MIEMBRO



ING. BENJAMÍN LOZANO MONTES
MIEMBRO



ING. JORGE VÁSQUEZ PINEDO
PRESIDENTE



ING. OSCAR VÁSQUEZ GIL
ASESOR

A mis amados Padres, Víctor y Paquita, las dos causas más nobles y justas de mi existencia.

M. Laysín Cok Céspedes.

*A mi Madre, Teresa de Jesús y mis hermanos.
Mis más grandes motivaciones y la fortaleza que necesito para seguir superando los
obstáculos que se me presentan en la vida.*

Junior Alegría Ocampo.

I. ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO	I
Índice de figuras	ix
Índice de cuadros	x
Índice de tablas	xii
RESUMEN	II
INTRODUCCIÓN	III
ANTECEDENTES	IV
OBJETIVOS	V
JUSTIFICACIÓN	VI
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO	1
1.1. CONCEPTOS BÁSICOS PARA EL ANÁLISIS INTEGRAL DE FLUIDOS EN MOVIMIENTO	1
1.1.1. PROPIEDADES	1
1.1.1.1. Propiedades externas o mecánicas	1
1.1.1.2. Propiedades internas o termodinámicas	1
1.1.1.3. Propiedades extensivas	1
1.1.1.4. Propiedades intensivas	1
1.1.1.5. Propiedades específicas	2
1.1.2. ESTADO	2
1.1.3. SISTEMA	2
1.1.4. VOLUMEN DE CONTROL	2
1.1.5. FLUJO	2
1.1.1.6. Campo de velocidades	3
1.1.1.7. Líneas de corriente	3
1.1.1.8. Flujo permanente	4

1.1.1.9.	Flujo uniforme	4
1.1.1.10.	Flujo unidimensional, bidimensional y tridimensional	4
1.1.1.11.	Flujo laminar	4
1.1.1.12.	Flujo turbulento	4
1.1.1.13.	Flujo ideal y flujo real	5
1.1.1.14.	Flujo isotérmico y flujo adiabático	5
1.1.1.15.	Flujo irrotacional y flujo rotacional	5
1.2.	ANÁLISIS INTEGRAL DE FLUIDOS EN MOVIMIENTO	5
1.2.1.	RELACIÓN ENTRE SISTEMA Y VOLUMEN DE CONTROL	5
1.3.	ECUACIÓN DE CONTINUIDAD	10
1.4.	ECUACIÓN GENERAL DE ENERGÍA	12
1.5.	ECUACIÓN GENERAL DE ENERGÍA EN CANALES CERRADOS	16
1.5.1.	PÉRDIDA DE ENERGÍA DEBIDO A LA FRICCIÓN Y ACCESORIOS	18
1.5.1.1.	Pérdidas de energía debido a la fricción	18
1.5.1.2.	Pérdidas menores	21
1.6.	LÍNEAS DE ENERGÍA	24
1.7.	FLUJO DE FLUIDOS EN CANALES ABIERTOS	26
1.7.1.	FLUJO NORMAL	27
1.7.2.	ENERGÍA ESPECÍFICA	27
1.7.2.1.	Tipos de flujos en canales abiertos.	34
1.7.3.	MEDIDAS DE FLUJO A SUPERFICIE LIBRE, EL VERTEDERO	36
1.7.3.1.	Vertedero triangular.	36
1.7.3.2.	Vertedero rectangular.	38
1.7.3.3.	Vertedero trapezoidal	39

1.8.	DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO DEL SISTEMA	40
1.8.1.	TANQUE RESERVORIO	40
1.8.2.	LÍNEA DE DISTRIBUCIÓN	41
1.8.2.1.	Tramo <i>AB</i> .	41
1.8.2.2.	Tramo <i>BC</i> .	41
1.8.2.3.	Tramo <i>BE</i> .	41
1.8.2.4.	Tramo <i>BD</i> .	41
1.8.3.	CANAL	42
1.8.4.	VERTEDEROS	42
1.8.5.	ESTRUCTURA METÁLICA	42
1.9.	APLICACIÓN DE LAS LÍNEAS DE ENERGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL PERFIL DE SUPERFICIE LIBRE DEL LÍQUIDO EN EL CANAL	43
1.9.1.	METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DEL PERFIL DE SUPERFICIE LIBRE DEL LÍQUIDO EN EL CANAL	46
1.9.2.	TRANSFORMACIÓN DE COORDENADAS DEL PERFIL DE SUPERFICIE LIBRE DEL LÍQUIDO EN EL CANAL	50
1.10.	METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL COEFICIENTE DE DESCARGA EN CADA VERTEDERO	52
1.11.	APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN GENERAL DE ENERGÍA EN CANALES CERRADOS A LA LÍNEA DE DISTRIBUCIÓN DEL SISTEMA	53
1.12.	EXPERIMENTOS QUE SE LLEVAN A CABO EN EL SISTEMA	54
1.12.1.	EVALUACIÓN DEL PERFIL DE SUPERFICIE LIBRE DEL LÍQUIDO EN EL CANAL	55
1.12.2.	DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE DESCARGA	56

1.13.	VARIABLES Y CRITERIOS MÁS IMPORTANTES DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA	56
1.13.1.	PROFUNDIDAD NORMAL MÁXIMA DEL LÍQUIDO EN EL CANAL	56
1.13.2.	DIMENSIONES DEL CANAL	57
1.13.3.	RANGO DE CAUDAL QUE PRODUCE LA ELECTROBOMBA	58
1.13.4.	DIMENSIONES DE LOS VERTEDEROS	58
1.13.5.	CARACTERÍSTICAS DE LA LÍNEA DE DISTRIBUCIÓN	58
1.13.6.	DIMENSIONES DE LA PLANCHA DE ACRÍLICO PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL TANQUE RESERVORIO	58
1.13.7.	DIMENSIONES DE LA PLANCHA DE ACRÍLICO PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL CANAL	59
	CAPÍTULO II: CÁLCULOS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN	60
2.1.	CONDICIONES INICIALES A CONSIDERARSE EN EL DISEÑO	60
2.2.	CÁLCULOS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN	61
2.2.1.	CÁLCULO DEL LARGO DEL CANAL DONDE SE REALIZA LAS MEDICIONES DE z_N Y x_N	61
2.2.2.	CÁLCULO DEL RANGO DE CAUDAL QUE PRODUCE LA ELECTROBOMBA	62
2.2.3.	CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DEL CANAL	63
2.2.4.	CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DE LOS VERTEDEROS	63
2.2.4.1.	Cálculo de las dimensiones del vertedero triangular	63
2.2.4.2.	Cálculo de las dimensiones del vertedero rectangular	63
2.2.4.3.	Cálculo de las dimensiones del vertedero trapezoidal	64
2.2.5.	CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DE LA PLANCHA DE ACRÍLICO PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL TANQUE RESERVORIO	64

2.2.6.	CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DE LA PLANCHA DE ACRÍLICO PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL CANAL	65
CAPÍTULO III: CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DEL SISTEMA		66
3.1.	MATERIALES EMPLEADOS	66
3.2.	VISTA ISOMÉTRICA DEL SISTEMA	67
3.2.1.	DETALLE DEL CANAL	68
3.2.2.	DETALLE DE LOS VERTEDEROS	69
3.3.	DESCRIPCIÓN Y ESPECIFICACIÓN DE LOS COMPONENTES PRINCIPALES DEL SISTEMA	70
3.3.1.	TANQUE RESERVORIO	
3.3.2.	LÍNEA DE DISTRIBUCIÓN	71
3.3.2.1.	Tramo <i>AB</i>	71
3.3.2.2.	Tramo <i>BC</i>	72
3.3.2.3.	Tramo <i>BD</i>	72
3.3.2.4.	Tramo <i>BE</i>	73
3.3.3.	CANAL	74
3.3.4.	VERTEDEROS	74
3.3.5.	INSTALACIÓN ELÉCTRICA	74
3.3.5.1.	Llave termomagnética	74
3.3.5.2.	Cablería	74
3.3.5.3.	Enchufe	74
3.4.	DISPOSICIÓN ADECUADA DEL SISTEMA EN EL LABORATORIO	74
CAPÍTULO IV: EVALUACIÓN DE LAS VARIABLES DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA		76
4.1.	DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA	76

4.2.	ENSAYOS Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA	77
4.2.1.	COLOCANDO EL VERTEDERO RECTANGULAR	77
4.2.2.	COLOCANDO EL VERTEDERO TRIANGULAR	77
4.2.3.	COLOCANDO EL VERTEDERO TRAPEZOIDAL	78
4.3.	CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	79
4.3.1.	CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EN LA ELABORACIÓN DEL PERFIL DE SUPERFICIE LIBRE DEL LÍQUIDO EN EL CANAL	79
4.3.2.	CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS PARA LA EVALUACIÓN DEL COEFICIENTE DE DESCARGA EN CADA VERTEDERO	93
4.3.3.	CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS PARA LA EVALUACIÓN DEL PERFIL TEÓRICO Y PRÁCTICO DE LA SUPERFICIE LIBRE DEL LÍQUIDO EN EL CANAL	97
4.3.4.	CÁLCULOS Y ANÁLISIS PARA LA EVALUACIÓN DEL CAUDAL PRÁCTICO QUE PRODUCE LA ELECTROBOMBA	98
4.3.5.	CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE LA ENERGÍA ESPECÍFICA Y EL NÚMERO DE FROUDE	104
4.4.	MANUAL DE INSTRUCCIONES PARA EL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA	107
4.5.	HIGIENE Y SEGURIDAD INDUSTRIAL	109
	CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE COSTO	110
5.1.	COSTO DE DISEÑO	110
5.2.	COSTO DE CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN	110
5.3.	COSTO DE MATERIALES	111
5.4.	OTROS COSTOS	112
5.5.	COSTO TOTAL	112

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	113
6.1. CONCLUSIONES	113
6.2. RECOMENDACIONES	114
BIBLIOGRAFÍA	115
ANEXOS	116
ANEXO 1: Curva de operación de la electrobomba	117
ANEXO 2: Perfil de superficie libre del líquido en el canal para la primera prueba colocando el vertedero rectangular	118
ANEXO 3: Perfil de superficie libre del líquido en el canal para la segunda prueba colocando el vertedero rectangular	119
ANEXO 4: Perfil de superficie libre del líquido en el canal para la tercera prueba colocando el vertedero rectangular	120
ANEXO 5: Perfil de superficie libre del líquido en el canal para la cuarta prueba colocando el vertedero rectangular	121
ANEXO 6: Perfil de superficie libre del líquido en el canal para la primera prueba colocando el vertedero triangular	122
ANEXO 7: Perfil de superficie libre del líquido en el canal para la segunda prueba colocando el vertedero triangular	123
ANEXO 8: Perfil de superficie libre del líquido en el canal para la tercera prueba colocando el vertedero triangular	124
ANEXO 9: Perfil de superficie libre del líquido en el canal para la cuarta prueba colocando el vertedero triangular	125
ANEXO10: Perfil de superficie libre del líquido en el canal para la primera prueba colocando el vertedero trapezoidal	126
ANEXO11: Perfil de superficie libre del líquido en el canal para la segunda prueba colocando el vertedero trapezoidal	127
ANEXO12: Perfil de superficie libre del líquido en el canal para la tercera prueba colocando el vertedero trapezoidal	128

ANEXO13: Perfil de superficie libre del líquido en el canal para la cuarta prueba colocando el vertedero trapezoidal	129
ANEXO 14: Representación de h_V versus Ca_T para el vertedero triangular	130
ANEXO 15: Representación de h_V versus Ca_T para el vertedero rectangular	131
ANEXO 16: Representación de h_V versus Ca_T para el vertedero trapezoidal	132
ANEXO 17: Hoja de cálculo que muestra el uso de la ecuación (1.90)	133
ANEXO 18: Hoja de cálculo que muestra el uso de la ecuación (1.93)	134
ANEXO 19: Hoja de cálculo que muestra el uso de la ecuación (1.83)	135
ANEXO 20: Hoja de cálculo que muestra el cálculo del coeficiente de descarga	136
ANEXO 21: Hoja de cálculo que muestra el cálculo del coeficiente de descarga promedio	137

Índice de figuras

Figura 1.1. Representación de la distribución de velocidades y las líneas de corriente en un sistema de coordenadas (x, y, z)	3
Figura 1.2. Sistema y volumen de control en los instantes t y $t + \Delta t$	6
Figura 1.3. Flujo a través de un elemento diferencial de la superficie de control	9
Figura 1.4. Volumen de control con entrada y salida de flujo unidimensional	11
Figura 1.5. Sistema de flujo de fluido que ilustra la ecuación general de energía	18
Figura 1.6. Diagrama de Moody	20
Figura 1.7. Líneas de energía	25
Figura 1.8. Flujo normal en un canal prismático	27
Figura 1.9. Flujo en un canal abierto con pendiente pequeña y \vec{v} paralela al lecho del canal.	31
Figura 1.10. Gráfica de z_N versus E_e a diferentes q	34
Figura 1.11. Vertedero triangular	38
Figura 1.12. Vertedero rectangular	39
Figura 1.13. Vertedero trapezoidal	40
Figura 1.14. Líneas de energía para la evaluación del perfil de superficie libre del líquido en el canal	44
Figura 1.15. Perfil de superficie libre del líquido en el canal, realizando p medidas de Δx_N	49
Figura 1.16. Detalle para la evaluación del perfil de superficie libre del líquido en el canal y realizar la transformación de coordenadas	51
Figura 1.17. Representación gráfica de $Ca_{(T)}$ versus $Ca_{(P)}$	52
Figura 3.1. Vista isométrica del sistema	67
Figura 3.2. Detalle del canal	68
Figura 3.3.a. Vertedero triangular	69
Figura 3.3.b. Vertedero rectangular	69
Figura 3.3.c. Vertedero trapezoidal	70

Índice de cuadros

Cuadro N°01: Resumen del cálculo del largo del canal donde se realiza las mediciones de z_N y x_N	61
Cuadro N°02: Resumen del cálculo de la transformación de coordenadas de (x_N, z_N) a (x, z) , para la primera prueba colocando el vertedero rectangular	80
Cuadro N°03: Resumen del cálculo de la transformación de coordenadas de (x_N, z_N) a (x, z) , para la segunda prueba colocando el vertedero rectangular	81
Cuadro N°04: Resumen del cálculo de la transformación de coordenadas de (x_N, z_N) a (x, z) , para la tercera prueba colocando el vertedero rectangular	82
Cuadro N°05: Resumen del cálculo de la transformación de coordenadas de (x_N, z_N) a (x, z) , para la cuarta prueba colocando el vertedero rectangular	83
Cuadro N°06: Resumen del cálculo de la transformación de coordenadas de (x_N, z_N) a (x, z) , para la primera prueba colocando el vertedero triangular	84
Cuadro N°07: Resumen del cálculo de la transformación de coordenadas de (x_N, z_N) a (x, z) , para la segunda prueba colocando el vertedero triangular	8
Cuadro N°08: Resumen del cálculo de la transformación de coordenadas de (x_N, z_N) a (x, z) , para la tercera prueba colocando el vertedero triangular	86
Cuadro N°09: Resumen del cálculo de la transformación de coordenadas de (x_N, z_N) a (x, z) , para la cuarta prueba colocando el vertedero triangular	87
Cuadro N°10: Resumen del cálculo de la transformación de coordenadas de (x_N, z_N) a (x, z) , para la primera prueba colocando el vertedero trapezoidal	88
Cuadro N°11: Resumen del cálculo de la transformación de coordenadas de (x_N, z_N) a (x, z) , para la segunda prueba colocando el vertedero trapezoidal	89
Cuadro N°12: Resumen del cálculo de la transformación de coordenadas de (x_N, z_N) a (x, z) , para la tercera prueba colocando el vertedero trapezoidal	90
Cuadro N°13: Resumen del cálculo de la transformación de coordenadas de (x_N, z_N) a (x, z) , para la cuarta prueba colocando el vertedero trapezoidal	91
Cuadro N°14: Resumen del cálculo del coeficiente de descarga en el vertedero triangular (primera y segunda prueba)	94

Cuadro N°15: Resumen del cálculo del coeficiente de descarga en el vertedero triangular (tercera y cuarta prueba)	94
Cuadro N°16: Resumen del cálculo del coeficiente de descarga en el vertedero rectangular (primera y segunda prueba)	95
Cuadro N°17: Resumen del cálculo del coeficiente de descarga en el vertedero rectangular (tercera y cuarta prueba)	95
Cuadro N°18: Resumen del cálculo del coeficiente de descarga en el vertedero trapezoidal (primera y segunda prueba)	96
Cuadro N°19: Resumen del cálculo del coeficiente de descarga en el vertedero trapezoidal (tercera y cuarta prueba)	96
Cuadro N°20: Resumen del cálculo para el perfil teórico de la superficie libre del líquido en el canal	97
Cuadro N°21: Comparación teórica y práctica de la superficie libre del líquido en el canal	98
Cuadro N°22: Resumen del cálculo de la energía específica y el número de Froude para la primera prueba del vertedero rectangular	105
Cuadro N°23: Resumen del cálculo de la energía específica y el número de Froude para la segunda prueba del vertedero rectangular	106
Cuadro N°24: Costo de diseño	110
Cuadro N°25: Costo de construcción e instalación	110
Cuadro N°26: Costo de materiales	111
Cuadro N°27: Otros costos	112

Índice de tablas

Tabla 1.1.	Resistencia en válvulas y juntas expresada como longitud equivalente	23
Tabla 1.2.	Valores promedio del n de Manning	30



II. RESUMEN

El diseño, construcción e instalación de un sistema de medición de flujo en canal abierto con placas intercambiables, para el Laboratorio de Procesos y Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (FIQ-UNAP), constituye el objetivo principal del presente trabajo de tesis.

Para el desarrollo del presente trabajo, primeramente se hizo una revisión bibliográfica muy detallada sobre la operación de transporte de fluidos en canales abiertos, posteriormente se empezó a realizar el diseño del sistema. En el diseño del mencionado sistema, se dedujo paso a paso lo siguiente: un modelo matemático para la evaluación del perfil de superficie libre del líquido en el canal y las ecuaciones que rigen el comportamiento de las variables de operación. Las variables de operación, son aquellas que se miden cuando se realizan los diferentes experimentos en el sistema.

Luego se determinaron las variables de construcción, esto con el fin de conocer la cantidad de material a utilizarse en la construcción del sistema. Seguidamente se procedió a construir el sistema y luego se hizo las pruebas de funcionamiento, verificando que el sistema funcione de acuerdo a como se había diseñado. Cuando se hizo las pruebas de funcionamiento, se obtuvieron datos experimentales los cuales fueron procesados haciendo uso del modelo matemático mencionado, las ecuaciones deducidas y las hojas de cálculo de Microsoft Excel.

Posteriormente, se procedió a la redacción de los últimos capítulos del informe final y se instaló el sistema en el Laboratorio de Procesos y Operaciones Unitarias de la (FIQ-UNAP).

III. INTRODUCCIÓN

La medición de flujo en canales abiertos, a pesar de lo sencillo que parece, es de gran complejidad. A diferencia de la medición de flujo en tuberías en que se conoce el área y se mide la velocidad del líquido, en canales abiertos el área y la velocidad del líquido varían. Para resolver esta problemática se cuenta con los vertederos, los cuales sirven para medir el flujo de fluidos en canales abiertos. (3)

En el presente trabajo, se plantea una versión mejorada de un sistema de medición de canales abiertos, el cual tiene como componentes principales a un canal de sección transversal rectangular y tres placas intercambiables que se colocan a la salida del canal para la medición de caudal (flujo) del fluido que fluye por el canal. Además este sistema cuenta con un dispositivo que permite darle un ángulo de inclinación al canal, lo cual sirve para evaluar el perfil de superficie libre del líquido en el canal.

La ventaja del sistema, es que puede ser usado para realizar muchos de los experimentos y demostraciones usualmente utilizados en la mayoría de laboratorios de flujo de fluidos, pero a un bajo costo y sin la necesidad de un soporte técnico costoso.

El sistema realiza su función en forma continua y permanente de la siguiente manera: el fluido que se encuentra en un tanque reservorio, es impulsado mediante una electrobomba a través de un conjunto de tuberías y accesorios hasta el canal, y desde donde el fluido fluye hacia el vertedero y regresa al tanque reservorio.

IV. ANTECEDENTES

El flujo de agua en un conducto puede ser flujo en canal abierto o flujo en canal cerrado (tubería). Estas dos clases de flujos son similares en muchos aspectos, pero éstos se diferencian en un aspecto importante.

El flujo en canal abierto debe tener una superficie libre, en tanto que el flujo en tubería no la tiene, debido a que en este caso el fluido debe llenar completamente el conducto.

El conocimiento empírico del funcionamiento de los canales se remonta a varios milenios. En la antigua **Mesopotamia** se usaban canales de **riego**, en la **Roma Imperial** se abastecían de agua a través de canales construidos sobre inmensos **acueductos**, y los habitantes del antiguo **Perú** construyeron en algunos lugares de los **Andes** canales que aún funcionan. El conocimiento y estudio sistemático de los canales se remonta al siglo XVIII, con **Chézy**, **Bazin** y otros. (8)

En la actualidad, el transporte de fluidos a través de canales abiertos se vienen dando de diversas formas: La canaleta es un canal de **madera** o de metal o de **concreto**, ubicado debajo o sobre la superficie del terreno para conducir el agua a través de una **depresión**. La alcantarilla que fluye parcialmente llena, es un canal cubierto con una longitud corta instalada, para drenar el agua a través de terraplenes de carreteras o de vías férreas. El túnel con flujo a superficie libre es un canal relativamente largo, utilizado para conducir el agua a través de una colina o a cualquier obstrucción del terreno.

En la (FIQ-UNAP), a lo largo de su historia académica, se han venido desarrollando proyectos de tesis relacionados con el diseño, construcción e instalación de equipos; pero específicamente los proyectos relacionados con el tema a desarrollarse en el presente trabajo son los siguientes:

En la (FIQ–UNAP), (4); ha realizado un trabajo de diseño construcción e instalación de un equipo de transporte de fluidos para el Laboratorio de Procesos y Operaciones Unitarias.

En la (FIQ–UNAP), (5); han diseñado y construido un sistema para medición de caudal utilizando el tubo de Pitot, el cual se basa en un modelo matemático para la integración gráfica de las velocidades puntuales de un fluido en una tubería.

En la (FIQ–UNAP), (2); han realizado un proyecto de tesis; teniendo como base al proyecto anteriormente mencionado en (4), pero acondicionándole un sistema de medición de caudal en canal abierto. Es a este equipo que el presente proyecto pretende reemplazar, mejorando su diseño y adicionando al equipo una serie de placas intercambiables con el fin de realizar mediciones en tres tipos de geometrías de vertederos (rectangular, triangular y trapezoidal).

V. OBJETIVOS.

- OBJETIVOS GENERALES

Diseñar, construir e instalar un sistema de medición de flujo en canal abierto con placas intercambiables, para el Laboratorio de Procesos y Operaciones Unitarias de la (FIQ-UNAP)

- OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar y construir, el canal y los vertederos de geometrías rectangular, triangular y trapezoidal.
- Diseñar y construir la línea de distribución, compuesta por tuberías, accesorios y una electrobomba.
- Determinar las variables más importantes del diseño y construcción del sistema efectuando los cálculos respectivos.
- Determinar las ecuaciones, para el cálculo de las variables involucradas en los experimentos a desarrollarse en el sistema.
- Desarrollar en forma muy didáctica, un modelo matemático para la evaluación del perfil de superficie libre del líquido en el canal, en el cual se aplican los principios básicos de: mecánica de fluidos en canales abiertos, cálculo diferencial e integral y hojas de cálculo de Microsoft Excel. La deducción de este modelo matemático se muestra en el desarrollo del informe final.
- Probar la validez del modelo matemático, procesando los datos experimentales
- Determinar la eficiencia del sistema, al hacer la comparación teórica y práctica del caudal que produce la electrobomba
- Instalar y poner en funcionamiento el sistema.

JUSTIFICACIÓN.

Actualmente, el estudio en el campo de la investigación tecnológica viene desarrollándose de manera vertiginosa. Se ve a diario y en todas partes, el avance que se viene logrando con cada uno de sus aportes, aportes que satisfactoriamente está facilitando la tarea de los profesionales en sus campos de operación. La variedad de las aplicaciones de la hidráulica y de la mecánica de fluidos es tan grande, que ahora los futuros ingenieros necesitan familiarizarse por lo menos con las leyes elementales del flujo de fluidos.

En la actualidad el Laboratorio de Procesos y Operaciones Unitarias de la (FIQ-UNAP), cuenta con un equipo en el cual sólo se mide el caudal en canal abierto utilizando un vertedero de placa rectangular y debido a la gran importancia que tiene la mecánica de fluidos en la formación de todo ingeniero químico, es que se ha visto la necesidad de implementar el mencionado laboratorio con un sistema de medición de flujo (caudal) en canal abierto, el cual permita realizar la medición de caudal utilizando tres tipos de vertederos (rectangular, triangular y trapezoidal). Además en el canal del sistema se realiza la evaluación del perfil de superficie libre del líquido. Todos estos estudios que se desarrollen en el sistema, contribuirá a que los alumnos de la (FIQ-UNAP), incrementen sus destrezas y conocimientos con respecto a cursos como cálculo matemático y mecánica de fluidos.

Por lo tanto, el propósito del presente trabajo de tesis, está orientado a implementar el mencionado laboratorio, contribuyendo con la formación de promociones venideras que puedan beneficiarse y ampliar sus conocimientos teóricos recibidos en las aulas y de esta manera estén mejor preparados para el campo de acción, lo cual traerá mucho prestigio a la (FIQ-UNAP).

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. CONCEPTOS BÁSICOS PARA EL ANÁLISIS INTEGRAL DE FLUIDOS EN MOVIMIENTO

1.1.1. PROPIEDADES

Son las características descriptivas del estado de un fluido que identifica a dicho estado, razón por la cual se menciona que una propiedad tiene cierto valor para cada estado.

1.1.1.1. Propiedades externas o mecánicas

Son aquellas que para su cuantificación requieren un marco de referencia. Por ejemplo: la velocidad, energía cinética, energía potencial, etc.

1.1.1.2. Propiedades internas o termodinámicas

Son aquellas que para su cuantificación no requieren un marco de referencia y dependen de la situación molecular en la que se encuentra el fluido. Las propiedades internas están relacionadas entre sí, es decir son interdependientes. Por ejemplo: la presión, temperatura, volumen, densidad, etc.

1.1.1.3. Propiedades extensivas (N)

Son aquellas cuyo valor para un estado varía al variar la magnitud de la masa considerada. Por ejemplo: volumen, energía cinética, energía potencial, etc.

1.1.1.4. Propiedades intensivas ($\eta = \frac{N}{\text{Masa}}$)

Son aquellas cuyo valor para un estado no cambia por mucho que cambie la magnitud de la masa considerada. Por ejemplo la densidad, la concentración, etc.

1.1.1.5. Propiedades específicas

Son las propiedades extensivas tomadas por unidad de masa o de peso, estas tienen propiedades similares a las propiedades intensivas, es decir, son independientes de la magnitud de la masa considerada. Por ejemplo: si la propiedad extensiva es la energía cinética $m \frac{v^2}{2}$, entonces las propiedades específicas son: $\frac{v^2}{2}$ (energía cinética específica = Energía cinética por unidad de masa) y $\frac{v^2}{2g}$ (energía cinética específica = Energía cinética por unidad de peso).

1.1.2. ESTADO

Se denomina de esta manera a cualquier situación particular en la que se encuentre un fluido y que se distingue o identifica por los valores que poseen sus propiedades.

1.1.3. SISTEMA

Según la mecánica de cuerpo rígido, se le define como una porción de materia que puede cambiar su forma, posición y propiedades. Pero la cantidad de materia permanece invariante en todo instante.

1.1.4. VOLUMEN DE CONTROL (VC)

Según la mecánica de fluidos, es el volumen definido en el espacio, cuyos límites están determinados por una superficie de control (SC). La superficie de control puede ser variable o invariante con el tiempo, y el volumen de control puede ser fijo o desplazable. Además, la cantidad de materia o masa puede variar con el tiempo dentro del volumen de control. (7)

1.1.5. FLUJO

Se denomina así, en forma genérica, al movimiento de un fluido.

En forma general el flujo se expresa como la relación de una variable extensiva N con el tiempo. Por ejemplo: el flujo másico es la relación de la masa con el tiempo, el flujo volumétrico (caudal) es la relación del volumen con el tiempo.

1.1.5.1. Campo de velocidades

El campo de velocidades $\vec{v} = \vec{v}(x(t), y(t), z(t))$ define la distribución de velocidades como una función de las coordenadas del espacio (x, y, z) para un instante t cualquiera. Véase la figura 1.1.

1.1.5.2. Líneas de corriente

Se denomina de esta forma a la envolvente de los vectores velocidad. Véase la figura 1.1.

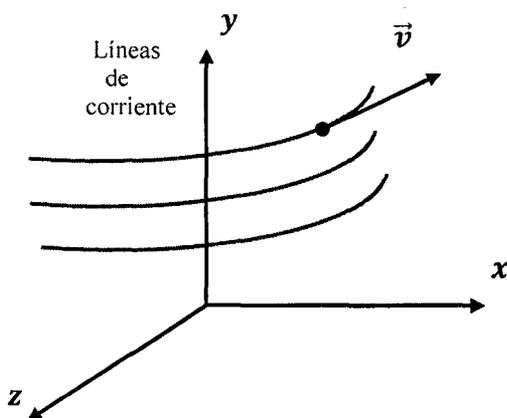


Figura 1.1. Representación de la distribución de velocidades y las líneas de corriente en un sistema de coordenadas (x, y, z)

Fuente: (7)

1.1.5.3. Flujo permanente

Es aquel flujo que se caracteriza porque las propiedades en cualquiera de sus puntos del fluido no cambian con el tiempo. Por ejemplo: $\frac{d\bar{v}}{dt} = 0$, $\frac{d\rho}{dt} = 0$, etc.

Al flujo permanente se le denomina también estacionario, y a los que no son permanentes se les denomina no permanente o no estacionario o transitorio.

1.1.5.4. Flujo uniforme

Es aquel flujo en donde el módulo, la dirección y el sentido del vector velocidad no varían de un punto a otro. Es decir: $\frac{d\bar{v}}{ds} = 0$ / S : Trayectoria

1.1.5.5. Flujo unidimensional, bidimensional y tridimensional

Es unidimensional cuando las características del desplazamiento de las partículas y por lo tanto la velocidad pueden expresarse en función de una sola coordenada.

Es bidimensional o tridimensional cuando las características del movimiento indican que se requiere utilizar dos o tres ejes coordenados para la descripción de las propiedades o la velocidad del fluido.

1.1.5.6. Flujo laminar

Es cuando las partículas fluidas se desplazan siguiendo trayectorias paralelas sin entrecruzarse unas con otras.

1.1.5.7. Flujo turbulento

Es cuando las trayectorias de las partículas fluidas se cruzan y entrecruzan continuamente sin guardar ningún orden.

1.1.5.8. Flujo ideal y flujo real

Es ideal cuando el fluido que se desplaza no produce esfuerzos cortantes en su trayectoria. El flujo es real cuando durante su trayectoria se manifiestan los efectos de la viscosidad.

1.1.5.9. Flujo isotérmico y flujo adiabático

Es isotérmico cuando la temperatura no cambia en ningún punto de la trayectoria del fluido. Es adiabático cuando no existe transferencia de calor desde o a hacia el fluido con respecto a sus alrededores.

1.1.5.10. Flujo irrotacional y flujo rotacional

Es irrotacional cuando las partículas durante su desplazamiento no admiten ningún movimiento de rotación alrededor de ningún eje, por lo tanto no se produce pares ni tensiones cortantes (es también flujo ideal). Es rotacional cuando las partículas rotan en torno a un eje que pasa por su centro de gravedad.

1.2. ANÁLISIS INTEGRAL DE FLUIDOS EN MOVIMIENTO

Es una forma de analizar los problemas de dinámica de fluidos y consiste en seleccionar un volumen de control que es una región constante en el espacio a través de la cual fluye el fluido. Esto se realiza para estudiar qué es lo que ocurre con las sucesivas partículas fluidas que atraviesan este volumen de control. (1).

1.2.1. RELACIÓN ENTRE SISTEMA Y VOLUMEN DE CONTROL

En esta sección, se demostrará como cambia una propiedad extensiva N de un sistema en relación al volumen de control. Para eso se tiene en cuenta las siguientes consideraciones:

Considérese un campo de flujo arbitrario $\vec{v} = \vec{v}(x(t), y(t), z(t))$ visto desde una referencia xyz , en el cual se observa un sistema fluido de masa finita en los tiempos t y $t + \Delta t$, como se muestra en una forma ideal en la figura 1.2 mediante la línea continua y la línea punteada, respectivamente. Se considerará que el volumen del espacio ocupado por el sistema en el tiempo t es un volumen de control fijo en xyz . Luego, en el tiempo t el sistema es idéntico al fluido contenido en el volumen de control que se muestra con la línea continua.

Considérese alguna propiedad extensiva arbitraria N del fluido con el propósito de relacionar la tasa de cambio de esta propiedad para el sistema, con las variaciones de esa misma propiedad asociadas con el volumen de control.

La distribución de N por unidad de masa estará dada como η , de manera que $N = \iiint \eta \rho dV$, donde dV representa un elemento diferencial de volumen.

Para hacer esto, el sistema en el instante $t + \Delta t$ y el sistema en el instante t se han dividido en tres regiones, como se muestra en la figura 1.2. La región II es común para el sistema en los dos instantes t y $t + \Delta t$

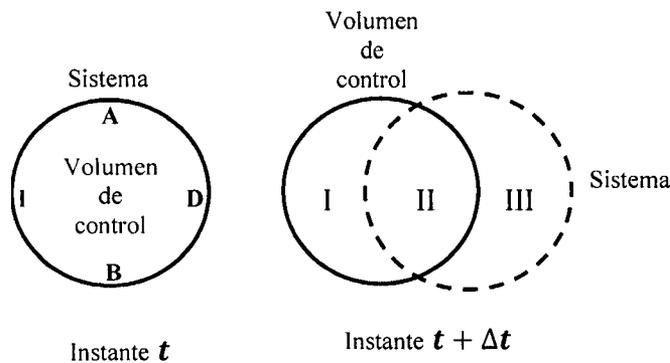


Figura 1.2. Sistema y volumen de control en los instantes t y $t + \Delta t$

Fuente: (7)

Ahora se calcula la tasa de cambio de N con respecto al tiempo para el sistema mediante el siguiente proceso de límites:

En el instante t , la cantidad de la propiedad extensiva N en el sistema es:

$$\left[\left(\iiint \eta n \rho dV \right)_I + \left(\iiint \eta \rho dV \right)_{II} \right]_t$$

En el instante $t + \Delta t$, la cantidad de la propiedad extensiva N en el sistema es:

$$\left[\left(\iiint \eta \rho dV \right)_{III} + \left(\iiint \eta \rho dV \right)_{II} \right]_{t+\Delta t}$$

Entonces, la tasa de cambio de la propiedad extensiva N en el sistema, en el intervalo de tiempo Δt es:

$$\begin{aligned} \left(\frac{dN}{dt} \right)_{\text{Sist}} &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{[(\iiint \eta \rho dV)_{III} + (\iiint \eta \rho dV)_{II}]_{t+\Delta t} - [(\iiint \eta \rho dV)_I + (\iiint \eta \rho dV)_{II}]_t}{\Delta t} \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{[(\iiint \eta \rho dV)_{II}]_{t+\Delta t} - [(\iiint \eta \rho dV)_{II}]_t}{\Delta t} + \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{[(\iiint \eta \rho dV)_{III}]_{t+\Delta t} - [(\iiint \eta \rho dV)_{II}]_t}{\Delta t} \end{aligned} \quad (1.1)$$

Ahora se considerará por separado cada uno de los límites anteriores. El primero de éstos, al notar que $(\iiint \eta \rho dV)_{II}$ es una función del tiempo, por definición corresponde a una derivada parcial. A medida que $\Delta t \rightarrow 0$, el volumen II se convierte en el volumen de control.

De acuerdo con esto, puede decirse que:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{[(\iiint \eta \rho dV)_{II}]_{t+\Delta t} - [(\iiint \eta \rho dV)_{II}]_t}{\Delta t} = \frac{\partial}{\partial t} [(\iiint \eta \rho dV)_{VC}] \quad (1.2)$$

En el segundo límite de la ecuación (1.1), puede considerarse que la integral, $[(\iiint \eta \rho dV)_{III}]_{t+\Delta t}$ aproxima la cantidad de propiedad N que atraviesa parte de la superficie de control, mostrada esquemáticamente como **ADB** en la figura 1.2 durante el tiempo Δt , de manera que la relación $\frac{[(\iiint \eta \rho dV)_{III}]_{t+\Delta t}}{\Delta t}$ aproxima el flujo promedio de salida de N que ha entrado al volumen de control a través de la superficie de control **ADB** durante el intervalo Δt . En el límite, cuando $\Delta t \rightarrow 0$, esta relación se convierte en el flujo de salida de N a través del la superficie de control. De modo similar, al considerar el último límite de la ecuación

(1.1), puede considerarse que para flujos con propiedades y características de flujo continuo, la integral $[(\iiint \eta \rho dV)_i]_t$, se aproxima a la cantidad de N que ha entrado al volumen de control durante el intervalo Δt a través de la porción restante de la superficie de control, mostrada en la figura 1.2 como **AIB**. En el límite, la relación $\frac{[(\iiint \eta \rho dV)_i]_t}{\Delta t}$ se convierte en el de flujo de entrada de N a través de la superficie de control en el tiempo t . Luego, las dos últimas integrales de la ecuación (1.1) dan el flujo neto de N en el volumen de control a través de la superficie de control en el tiempo t como:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{[(\iiint \eta \rho dV)_{in}]_{t+\Delta t} - [(\iiint \eta \rho dV)_i]_t}{\Delta t} = \text{Flujo neto de } N \text{ en el volumen de control a través de la superficie de control} \quad (1.3)$$

Ordenando la ecuación (1.1)

$$\left(\frac{dN}{dt}\right)_{\text{Sist}} = \frac{\partial}{\partial t} [(\iiint \eta \rho dV)_{VC}] + \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{[(\iiint \eta \rho dV)_{in}]_{t+\Delta t} - [(\iiint \eta \rho dV)_i]_t}{\Delta t} \quad (1.4)$$

La ecuación (1.3) puede expresarse en una forma más compacta y útil. Con este propósito, considérese la figura 1.3, donde se tiene un campo de velocidad de flujo permanente y una porción de una superficie de control, en esta figura se muestra un elemento diferencial de área denominado dA y que a su vez es la interfaz del fluido que apenas está en contacto con la superficie de control en el instante t

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{[(\iiint \eta \rho dV)_{in}]_{t+\Delta t} - [(\iiint \eta \rho dV)_i]_t}{\Delta t} = \left(\iint \eta \rho \vec{v} \cdot d\vec{A}\right)_{SC} \quad (1.5)$$

Donde:

\vec{v} : Velocidad relativa, medida con respecto al volumen de control

Teniéndose en cuenta la figura 1.3 y el producto escalar de dos vectores, se tiene: $\vec{v} \cdot d\vec{A} = v \cos \alpha dA$. Entonces la ecuación (1.4) queda:



$$\left(\frac{dN}{dt}\right)_{\text{Sist}} = \frac{\partial}{\partial t} [(\iiint \eta \rho dV)_{vc}] + (\oiint \eta \rho v \cos \alpha dA)_{sc} \quad (1.6)$$

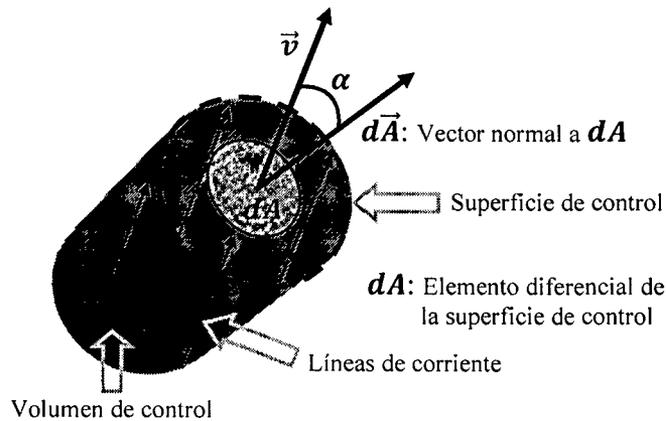


Figura 1.3. Flujo a través de un elemento diferencial de la superficie de control

Fuente: (6)

Mediante procesos de límites se ha visto que la tasa de cambio de N para un sistema en el tiempo t es igual a la suma de dos términos:

1. La tasa de cambio de N dentro del volumen de control que tiene la forma del sistema en el tiempo t , ecuación (1.2)
2. El flujo neto de N en el volumen de control, a través de la superficie de control en el tiempo t , ecuación (1.5)

1.3. ECUACIÓN DE CONTINUIDAD

Para deducir la ecuación de continuidad, se tiene en cuenta lo siguiente:

1. La propiedad extensiva N para este caso es la masa de un sistema fluido, la cual se simboliza por: m
2. La cantidad η es la unidad para este caso, ya que: $\eta = \frac{N}{\text{Masa}} = \frac{m}{\text{Masa}} = 1$
3. La masa de cualquier sistema es constante, es decir: $\frac{dm}{dt} = 0$

Entonces, la ecuación (1.6) queda:

$$\left(\oint \rho \mathbf{v} \cos \alpha dA \right)_{SC} = - \frac{\partial}{\partial t} \left[\left(\iiint \rho dV \right)_{VC} \right] \quad (1.7)$$

La ecuación (1.7) muestra que el flujo neto de masa a través de la superficie de control es igual a la disminución de la masa dentro del volumen de control. La ecuación (1.7) y sus formas simplificadas se conocen como **ecuaciones de continuidad**.

Si el flujo es permanente con respecto a una referencia fija al volumen de control, todas las propiedades del fluido, como la masa y la densidad en cualquier posición fija de la referencia, deben permanecer constantes en el tiempo, entonces: $\frac{\partial}{\partial t} \left[\left(\iiint \rho dV \right)_{VC} \right] = \frac{\partial m}{\partial t} = 0$, y la ecuación (1.7) queda:

$$\left(\oint \rho \mathbf{v} \cos \alpha dA \right)_{SC} = 0 \quad (1.8)$$

Luego, considérese el caso de flujo **incompresible** en el que interviene solamente una especie de fluido, tal como se muestra en la figura 1.4, la ecuación (1.8) puede escribirse como:

$$\left(\oint \mathbf{v} \cos \alpha dA \right)_{SC} = \left(\oint \mathbf{v} \cdot d\vec{A} \right)_{SC} = \iint_{A_1} (\mathbf{v} \cdot d\vec{A})_{A_1} + \iint_{A_2} (\mathbf{v} \cdot d\vec{A})_{A_2} = 0 \quad (1.9)$$

No debe existir temor por las operaciones de integración complicadas de las ecuaciones anteriores. Estas ecuaciones representan un lenguaje matemático preciso, utilizando estas formulaciones generales, se puede deducir ecuaciones particulares útiles.

Nótese que: $\iint (\vec{v} \cdot d\vec{A})_{A_1} = \iint (v \cdot \cos\alpha_1 dA)_{A_1}$ y $\iint (\vec{v} \cdot d\vec{A})_{A_2} = \iint (v \cdot \cos\alpha_2 dA)_{A_2}$.

Donde A_1 y A_2 son las áreas de entrada y de salida, respectivamente. Al observar que las velocidades son perpendiculares a las superficies de control en estas áreas y teniendo en cuenta el producto escalar de dos vectores, se tiene que: $\cos\alpha_1 = -1$ y $\cos\alpha_2 = 1$. Observe también, que las velocidades son unidimensionales y uniformes en las secciones de entrada y salida

$$\iint (v \cdot \cos\alpha_1 dA)_{A_1} = \iint (v_1 \cos\alpha_1 dA)_{A_1} = -v_1 \iint (dA)_{A_1} = -v_1 A_1 \quad (1.10)$$

$$\iint (v \cdot \cos\alpha_2 dA)_{A_2} = \iint (v_2 \cos\alpha_2 dA)_{A_2} = v_2 \iint (dA)_{A_2} = v_2 A_2 \quad (1.11)$$

Reemplazando las ecuaciones (1.10) y (1.11) en (1.9), se tiene:

$$-v_1 A_1 + v_2 A_2 = 0 \Rightarrow v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (1.12)$$

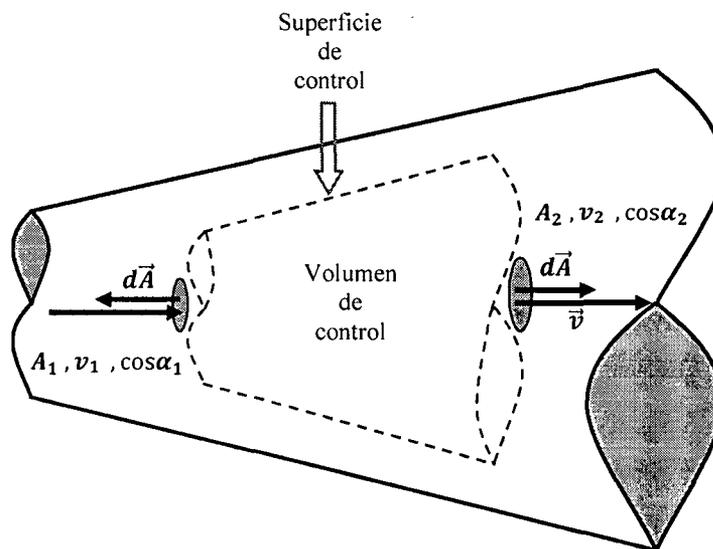


Figura 1.4. Volumen de control con entrada y salida de flujo unidimensional

Fuente: (1)

La ecuación (1.12) indica que, para un flujo permanente, unidimensional y uniforme, en la que interviene un sólo fluido incompresible, la conservación de la masa se reduce a la conservación del volumen. La ecuación (1.12), también es conocida como la ecuación de continuidad en su forma más simplificada.

1.4. ECUACIÓN GENERAL DE ENERGÍA

Esta ecuación se basa en la primera ley de la termodinámica, que establece lo siguiente:

$$\left(\frac{dE}{dt}\right)_{\text{Sist}} = \left(\frac{dQ}{dt}\right) - \left(\frac{dW}{dt}\right) \quad (1.13)$$

Donde:

$\left(\frac{dE}{dt}\right)_{\text{Sist}}$: Tasa de cambio de la energía total del sistema (en el SI debe estar en W)

$\left(\frac{dQ}{dt}\right)$: Flujo de calor neto añadido al sistema (en el SI debe estar en W)

$\left(\frac{dW}{dt}\right)$: Rapidez con la que se realiza el trabajo sobre o por el sistema (en el SI debe estar en W)

Haciendo uso de la ecuación (1.6) y teniéndose en cuenta que para este caso $N = E$ y $\eta = e = \frac{v^2}{2} + zg + U_e$.

Donde:

e : Energía específica total o energía total por unidad de masa (en el SI debe estar en m^2/s^2)

$\frac{v^2}{2}$: Energía cinética específica o energía cinética por unidad de masa (en el SI debe estar en m^2/s^2)

zg : Energía potencial específica o energía potencial por unidad de masa (en el SI debe estar en m^2/s^2)

U_e : Energía interna específica o energía interna por unidad de masa (en el SI debe estar en m^2/s^2)

Entonces la ecuación (1.6) queda:

$$\begin{aligned} \left(\frac{dQ}{dt}\right) - \left(\frac{dW}{dt}\right) &= \\ &= \frac{\partial}{\partial t} \left[\iiint \left(\frac{v^2}{2} + zg + U_e\right) \rho dV \right]_{VC} + \left[\oint \left(\frac{v^2}{2} + zg + U_e\right) \rho v \cos \alpha dA \right]_{SC} \end{aligned} \quad (1.14)$$

Analizando el término $\frac{dW}{dt}$

$$W = W_s + W_f \quad (1.15)$$

W_f : Trabajo de flujo, es el que realiza el medio ambiente sobre el sistema o volumen de control

W_s : Trabajo al eje, es el que da o recibe el sistema o volumen de control

W_s es positivo si el sistema da trabajo y negativo si el sistema recibe trabajo.

Por ejemplo, si se utiliza una electrobomba para transportar un fluido desde un punto a otro, en este caso el sistema (fluido) recibe trabajo y por lo tanto el valor de W_s se reemplaza como negativo en la ecuación (1.15).

Por ejemplo si el sistema (fluido) se utiliza para mover las aspas de una turbina, en este caso el sistema (fluido) da trabajo y por lo tanto el valor de W_s se reemplaza como positivo en la ecuación (1.15).

Se sabe que todo fluido está sometido a esfuerzos normales debido al medio ambiente y a esfuerzos cortantes debido a la fricción, es por eso que:

$$\frac{dW_f}{dt} = \left[\oint (\tau + \sigma) v \cos \alpha dA \right]_{SC} \quad (1.16)$$

En el caso de que el fluido sea no viscoso el esfuerzo cortante es igual a cero ($\tau = 0$) y considerando que el esfuerzo normal es igual a la presión ($\sigma = P$). Entonces la ecuación (1.16) queda:

$$\frac{dW_f}{dt} = \left[\oint P v \cos \alpha dA \right]_{SC} \quad (1.17)$$

Reemplazando desde la ecuación (1.15) hasta la ecuación (1.17), en la ecuación (1.14), se tiene:

$$\begin{aligned} \left(\frac{dQ}{dt} \right) - \left(\frac{dW_s}{dt} \right) - \left[\oint P v \cos \alpha dA \right]_{SC} &= \frac{\partial}{\partial t} \left[\iiint \left(\frac{v^2}{2} + z g + U_e \right) \rho dV \right]_{VC} \\ &+ \left[\oint \left(\frac{v^2}{2} + z g + U_e \right) \rho v \cos \alpha dA \right]_{SC} \\ \left(\frac{dQ}{dt} \right) - \left(\frac{dW_s}{dt} \right) &= \frac{\partial}{\partial t} \left[\iiint \left(\frac{v^2}{2} + z g + U_e \right) \rho dV \right]_{VC} \\ &+ \left[\oint \left(\frac{v^2}{2} + z g + U_e + \frac{P}{\rho} \right) \rho v \cos \alpha dA \right]_{SC} \end{aligned} \quad (1.18)$$

La ecuación (1.18) se conoce como la ecuación general de energía, esta ecuación se simplifica de acuerdo al tipo de flujo que se tenga en el sistema. Por ejemplo en la famosa ecuación de Bernoulli, se tiene en cuenta las siguientes consideraciones:

$$\text{Flujo adiabático: } \frac{dQ}{dt} = 0 \quad (1.19)$$

$$\text{Flujo permanente: } \frac{\partial}{\partial t} \left[\iiint \left(\frac{v^2}{2} + zg + U_e \right) \rho dV \right]_{vc} = 0 \quad (1.20)$$

$$\text{Flujo isotérmico: } U_{e1} = U_{e2} \quad (1.21)$$

$$\text{El sistema no da ni recibe trabajo: } \frac{dW_s}{dt} = 0 \quad (1.22)$$

$$\text{Fluido no viscoso: } \tau = 0$$

Fluido incompresible: $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ y **flujo unidimensional y uniforme en las secciones de entrada y salida.**

$$\left[\iint \left(\frac{v^2}{2} + zg + U_e + \frac{P}{\rho} \right) \rho v \cos \alpha dA \right]_{sc} = - \left(\frac{v_1^2}{2} + z_1 g + \frac{P_1}{\rho} \right) \rho v_1 A_1 + \left(\frac{v_2^2}{2} + z_2 g + \frac{P_2}{\rho} \right) \rho v_2 A_2 = 0 \quad (1.23)$$

Por la ecuación de continuidad se tiene:

$$\hat{m} = \rho v_1 A_1 = \rho v_2 A_2 \quad (1.24)$$

Reemplazando, desde la ecuación (1.19) hasta la ecuación (1.24), en la ecuación (1.18), se tiene:

$$0 = - \left(\frac{v_1^2}{2} + z_1 g + \frac{P_1}{\rho} \right) \hat{m} + \left(\frac{v_2^2}{2} + z_2 g + \frac{P_2}{\rho} \right) \hat{m}$$

Dividiendo todo entre $g\hat{m}$, γ es el peso específico y sus unidades en el SI son (N/m³)

$$\Rightarrow \left(\frac{v_1^2}{2g} + z_1 + \frac{P_1}{\gamma} \right) = \left(\frac{v_2^2}{2g} + z_2 + \frac{P_2}{\gamma} \right) \quad (1.25)$$

La ecuación (1.25) es conocida como la ecuación de Bernoulli

1.5. ECUACIÓN GENERAL DE ENERGÍA EN CANALES CERRADOS (TUBERÍAS)

La ecuación de energía, como se utiliza en el presente trabajo, es una expansión de la ecuación de Bernoulli, que hace posible resolver problemas en los que se presentan pérdidas adicionales de energía. La interpretación lógica de la ecuación de energía puede verse en la figura 1.5, que representa un sistema de flujo. Los términos E_{e1} y E_{e2} denotan la energía por unidad de peso que posee el fluido en las secciones 1 y 2, respectivamente.

También se muestran las adiciones (h_A), remociones (h_R) y pérdida de energía (h_L). Para tal sistema la expresión del principio de conservación de energía es:

$$E_{e1} + h_A - h_R - h_L = E_{e2} \quad (1.26)$$

La energía que posee el fluido por unidad de peso es:

$$E_e = \frac{P}{\gamma} + z + \frac{v^2}{2g} \quad (1.27)$$

La ecuación 1.26 queda entonces:

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h_A - h_R - h_L = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (1.28)$$

Esta es la forma de la ecuación de energía que se utiliza con mayor frecuencia en el presente trabajo. Al igual que con la ecuación de Bernoulli, cada término de la ecuación (1.28) representa una cantidad de energía por unidad de peso de fluido que fluye en el sistema. Las unidades SI típicas son N.m / N o metros; las unidades en el sistema Británico son lb.pie / lb o pie.

Es de suma importancia que la ecuación general de energía que se utiliza con mayor frecuencia esté escrita en la dirección de flujo, es decir, desde el punto de referencia en la parte izquierda de la ecuación, al punto correspondiente en el lado derecho.

Los signos algebraicos juegan un papel crítico, debido a que el lado izquierdo de la ecuación (1.28) establece que un elemento de fluido que tenga una cierta cantidad de energía por unidad de peso en la sección 1, pueda tener una adición de energía ($+h_A$), una remoción de energía ($-h_R$) o una pérdida de energía ($-h_L$), antes de que alcance la sección 2. En tal punto contiene una cantidad diferente de energía por unidad de peso según lo que indican los términos de la parte derecha de la ecuación.

Por ejemplo en la figura 1.5 los puntos de referencia son 1 y 2, y en cada uno de éstos se indican las cabezas de presión, de velocidad y elevación. Después de que el fluido abandona el punto 1, entra a la bomba, donde se le agrega energía. Un movilizador principal, que podría ser un motor eléctrico, hace funcionar la bomba y su movilizador transfiere energía al fluido ($+h_A$).

Entonces el sistema fluye por un sistema de conductos compuesto por una válvula, codos y tramos de conducto en los que la energía se disipa, es decir, el fluido pierde energía ($-h_L$). Antes de alcanzar el punto 2, el fluido fluye a través de un motor de fluido (turbina) que retira algo de la energía para hacer funcionar un dispositivo externo ($-h_R$). La ecuación general de energía toma en cuenta todas esas energías.

En un problema particular no todos los términos de la ecuación se requieren. Por ejemplo, si no hay un dispositivo mecánico entre las secciones de interés, los términos h_A y h_R serán cero, y pueden sacarse de la ecuación. Si las pérdidas de energía son tan pequeñas que pueden ser despreciadas, el término h_L puede eliminarse.

Si existen estas dos condiciones, se puede ver que la ecuación (1.28) se reduce a la ecuación de Bernoulli.

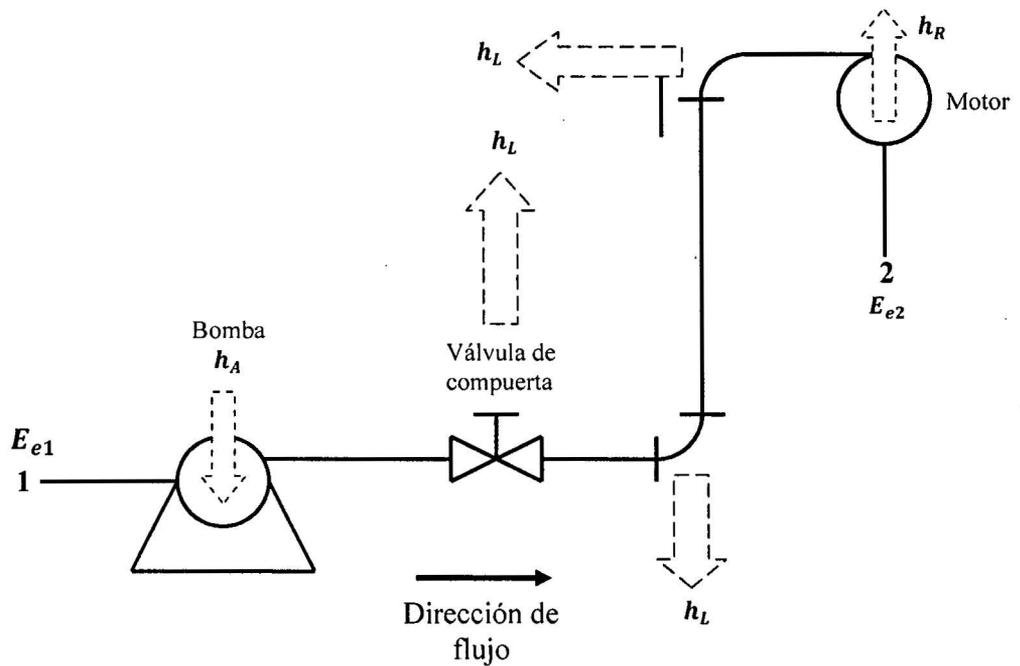


Figura 1.5. Sistema de flujo de fluido que ilustra la ecuación general de energía
Fuente: Elaboración propia.

1.5.1. PÉRDIDA DE ENERGÍA DEBIDO A LA FRICCIÓN Y ACCESORIOS

1.5.1.1. Pérdidas de energía debido a la fricción

A medida que un fluido fluye por un conducto, tubo o algún otro dispositivo, ocurren pérdidas debido a la fricción interna en el fluido. Como se indica en la ecuación general de energía, tales pérdidas traen como resultado una disminución de la presión entre dos puntos del sistema de flujo. Es muy importante ser capaces de calcular la magnitud de dichas pérdidas de energía. En la ecuación general de energía el término h_L se define como la energía perdida por el sistema. Una componente de pérdida de energía se debe a la fricción entre las paredes del conducto y el fluido en movimiento. La pérdida de energía por fricción es proporcional al factor de fricción, la cabeza de velocidad y al cociente de la longitud entre el diámetro de la corriente del fluido, para el caso de flujo en conductos y tubos. Lo anterior se expresa de manera matemática en la ecuación de Darcy:

$$h_L = f \frac{L_e v^2}{D 2g} \quad (1.29)$$

En la que:

h_L : Pérdida de energía por unidad de peso debido a la fricción (N.m / N)

L_e : Longitud de la corriente de fluido (m)

D : Diámetro del conducto (m)

v : Velocidad promedio del fluido (m /s)

f : Factor de fricción (sin dimensiones)

Para determinar el valor de f es necesario conocer lo siguiente:

1. Número de Reynolds. Se define como:

$$N_R = \frac{vD}{\nu} \quad (1.30)$$

Donde: ν es la viscosidad cinemática del fluido (m^2/s).

2. Rugosidad relativa. Se define como $\frac{D}{\epsilon}$, una alta rugosidad relativa indica un valor bajo de la rugosidad absoluta ϵ , es decir, un conducto liso. Algunos textos utilizan otras convenciones para representar la rugosidad relativa, como $\frac{\epsilon}{D}$ o $\frac{r}{\epsilon}$, en donde r es el radio del conducto.

3. Uso del diagrama de Moody. Se usa para determinar el valor del factor de fricción f , para flujo turbulento, para lo cual deben conocerse los valores del número de Reynolds y la rugosidad relativa. Por consiguiente, los datos básicos requeridos son el diámetro interior del conducto, el material con que el conducto está hecho, la velocidad del fluido, el tipo de fluido y su temperatura, con los cuales se puede encontrar la viscosidad.

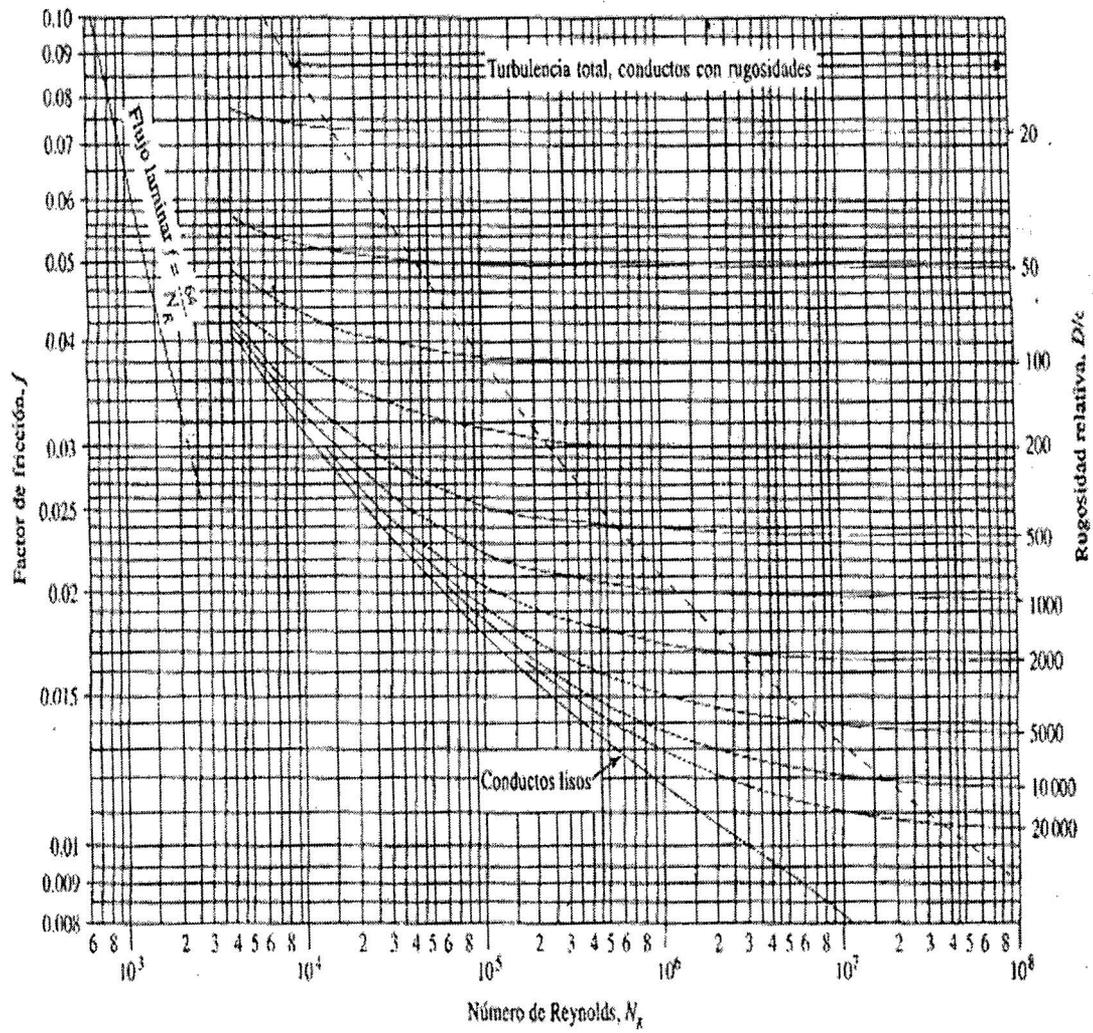


Figura 1.6. Diagrama de Moody.

Fuente: (3).



1.5.1.2. Pérdidas menores

En la mayor parte de los sistemas de flujo, la pérdida de energía primaria se debe a la fricción de conducto, los demás tipos de pérdidas generalmente son pequeñas en comparación, y por consiguiente se hace referencia a ellas como pérdidas menores. Las pérdidas menores ocurren cuando hay un cambio en la sección cruzada de la trayectoria del fluido o en la dirección de flujo, o cuando la trayectoria del fluido se encuentra obstruida, como sucede con una válvula. La energía se pierde bajo éstas condiciones debido a fenómenos físicos bastantes complejos. La predicción teórica de la magnitud de estas pérdidas también es compleja, y por tanto, normalmente se usan los datos experimentales.

Para determinar la pérdida de energía a través de una válvula o junta, es necesario conocer lo siguiente:

1. **Coefficiente de resistencia.** Las pérdidas de energía son proporcionales a la cabeza de velocidad del fluido al fluir éste alrededor de un codo, o a través de una válvula. Los valores experimentales de pérdidas de energía generalmente se reportan en términos de un coeficiente de resistencia K , de la siguiente forma:

$$h_L = K \frac{v^2}{2g} \quad (1.31)$$

Se dispone de muchos tipos diferentes de válvulas y juntas de varios fabricantes para especificación e instalación en sistemas de flujo de fluidos. Las válvulas se utilizan para controlar la cantidad de flujo y pueden ser válvulas de globo, de ángulo, de mariposa, válvulas de verificación y muchas más.

El coeficiente de resistencia K se reporta en la forma siguiente:

$$K = \left(\frac{L_e}{D} \right) f \quad (1.32)$$

2. Proporción de longitud equivalente. El valor de $\left(\frac{L_e}{D}\right)$, llamado proporción de longitud equivalente, se reporta en la tabla 1.1 y se considera que es una constante para un tipo dado de válvula o junta.

El valor de L_e se denomina la longitud equivalente y es la longitud del conducto recto del mismo diámetro nominal como la válvula que tendría la misma resistencia que ésta.

Si se reemplaza la ecuación (1.32) en la ecuación (1.31), se tiene:

$$h_L = f \frac{L_e v^2}{D 2g} \quad (1.33)$$

La magnitud de la proporción de longitud equivalente $\left(\frac{L_e}{D}\right)$ y por lo tanto, la pérdida de energía, dependen de la complejidad de la trayectoria del fluido a través del dispositivo.

En algunos casos, particularmente con respecto de las válvulas de control en sistemas de potencia de fluidos, la pérdida de energía como tal no se reporta, en vez de esto, se reporta la magnitud de la caída de presión al fluir el fluido a través de la válvula a una cierta velocidad de flujo; lo cual puede convertirse a unidades de energía.

La tabla 1.1 muestra los valores de $\left(\frac{L_e}{D}\right)$ para las distintas válvulas y accesorios.

Nota

En el caso de una reducción o expansión, se aplica la ecuación (1.31) con un valor de $K = 1$ y v representa la velocidad del fluido en el conducto de mayor diámetro.

Tabla 1.1. Resistencia en válvulas y juntas expresada como longitud equivalente

Tipo	Longitud equivalente en diámetros de conducto
Válvula de globo – completamente abierta	340
Válvula de compuerta – completamente abierta	8
– ¾ abierta	35
– ½ abierta	160
– ¼ abierta	900
Válvula de verificación – tipo giratorio	100
Válvula de verificación – tipo bola	150
Válvula de mariposa – completamente abierta	45
Codo estándar de 90°	30
Codo de radio largo de 90°	20
Codo de calle de 90°	16
Codo estándar de 45°	26
Codo de devolución cerrada	50
Té estándar – con flujo a través de un tramo	20
Té estándar – con flujo a través de una rama	60

Fuente: (3).

1.6. LÍNEAS DE ENERGÍA

Son aquellas que tienen gran utilidad en el análisis de problemas de tuberías complejas y tienen su origen en la ecuación (1.28) (ecuación de Bernoulli generalizada), donde:

$\frac{P}{\gamma}$: Altura de presión

$\frac{v^2}{2g}$: Altura de velocidad o altura cinética

z : Altura geodésica o potencial

h_L : Altura de pérdidas de energía

Los ingenieros encuentran muy útil representar gráficamente diferentes partes de los términos de altura que contribuyen a la energía mecánica del flujo en una tubería.

La **línea central de la tubería** está conformada por el lugar geométrico de los puntos localizados en el centro de la tubería y que a su vez están a una distancia vertical z , medida a partir de algún nivel de referencia horizontal establecido hasta el centro de la tubería; esta línea también se conoce como **línea geodésica o potencial (LG)**. El lugar geométrico de los puntos localizados a una distancia vertical $\frac{P}{\gamma}$ por encima de la línea central de la tubería se conoce como **línea de altura piezométrica (LP)**, si se mide la altura z del centro de la tubería a partir del nivel de referencia horizontal establecido, entonces la ordenada $\left(\frac{P}{\gamma} + z\right)$ medida por encima de este nivel de referencia es la misma curva descrita antes, y por consiguiente, es la línea de altura piezométrica para el nivel de referencia mencionado antes. Ver figura 1.7.

Si la altura de velocidad $\frac{v^2}{2g}$ se agrega a la línea de altura piezométrica se obtiene la **línea de energía total** que aparece en la figura 1.7.

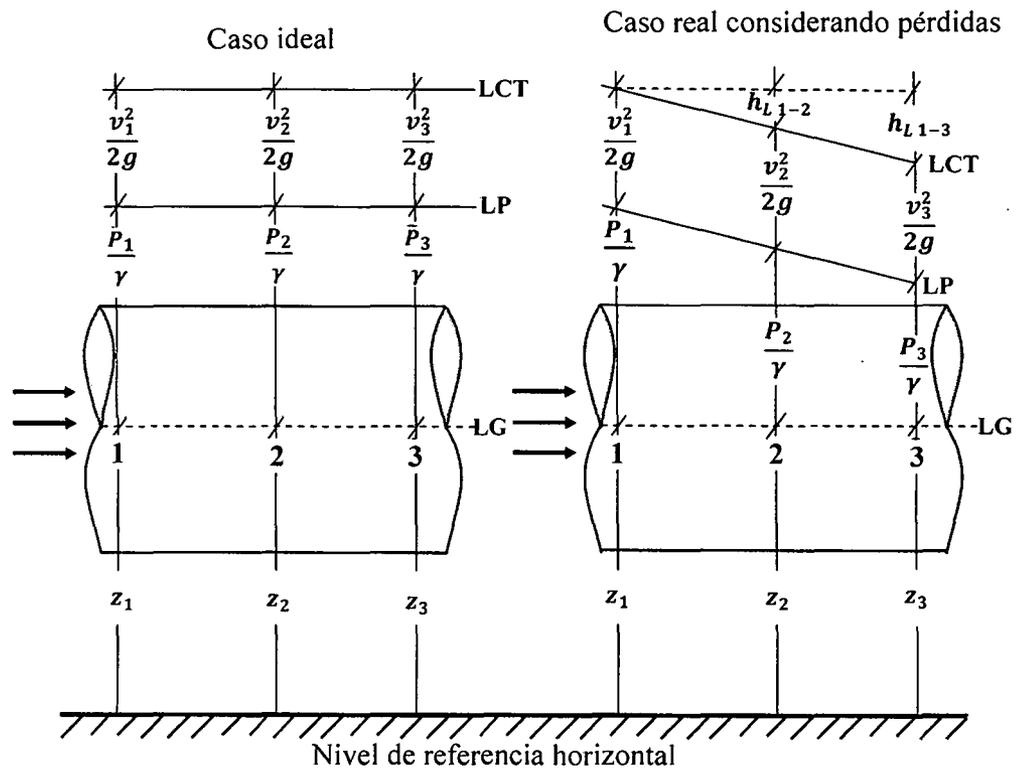


Figura 1.7. Líneas de energía

Fuente: (7)

Si aplica la ecuación (1.27) en la tubería de la figura 1.7 (**caso ideal**), se tiene:

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} = \frac{P_3}{\gamma} + z_3 + \frac{v_3^2}{2g} \quad (1.34)$$

Aplicando la misma ecuación para el **caso real** de la figura 1.7, se tiene:

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_{L(1-2)} = \frac{P_3}{\gamma} + z_3 + \frac{v_3^2}{2g} + h_{L(1-3)} \quad (1.35)$$

La ecuación (1.34) con respecto a la figura 1.7, indica que la energía total por unidad de peso $E_e = \frac{P}{\gamma} + z + \frac{v^2}{2g}$ en los puntos 1, 2 y 3 es la misma, esto siempre y cuando no existan pérdidas de energía (caso ideal).

La ecuación (1.35) con respecto a la figura 1.7 (caso real), indica que la energía total por unidad de peso en el punto 2 $\left(E_{e2} = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g}\right)$, es igual a la energía total por unidad de peso en el punto 1 $\left(E_{e1} = \frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g}\right)$ menos la pérdida de energía por unidad de peso entre los puntos 1 y 2 $(h_{L(1-2)})$, es decir: $E_{e2} = E_{e1} - h_{L(1-2)}$

$$\Rightarrow E_{e1} = E_{e2} + h_{L(1-2)} \Rightarrow \frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_{L(1-2)} \quad (1.36)$$

De igual manera entre los puntos 1 y 3, se tiene:

$$E_{e1} = E_{e3} + h_{L(1-3)} \Rightarrow \frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_3}{\gamma} + z_3 + \frac{v_3^2}{2g} + h_{L(1-3)} \quad (1.37)$$

1.7. FLUJO DE FLUIDOS EN CANALES ABIERTOS (SUPERFICIE LIBRE)

Usualmente el flujo a superficie libre se refiere a aquel flujo de líquidos en que una porción de la frontera del fluido, conocida como superficie libre, está sometida únicamente a ciertas condiciones de presión prescritas. El movimiento de los océanos y de los ríos así como el flujo de líquidos en tuberías parcialmente llenas son flujos a superficie libre donde actúa la presión atmosférica sobre parte de la superficie de frontera.

En el presente trabajo no se profundiza en los estudios empíricos de los perfiles de velocidad en canales abiertos, sino que se considera un modelo de flujo unidimensional en el que se tienen en cuenta la fricción y la turbulencia para canales largos, mediante un esfuerzo cortante particular en las paredes del canal.

1.7.1. FLUJO NORMAL

Ahora se consideran canales rectos y que mantienen constantes sus secciones transversales, a lo largo de toda su longitud. Éstos se conocen como canales prismáticos. Se considera el flujo de un líquido cuya superficie libre mantiene una profundidad constante z_N por encima del lecho del canal (véase la figura 1.8). La pendiente del lecho del canal debe tener cierto valor para mantener esta clase de flujo para un caudal dado Ca . Tal flujo se conoce como flujo normal o uniforme, y fácilmente puede demostrarse que existe un equilibrio entre las fuerzas gravitacionales que aceleran el flujo a lo largo y las fuerzas friccionales sobre el perímetro mojado que retardan el flujo. Para líquidos como el agua, la pendiente del canal debe ser pequeña.

En la figura 1.8, α es el ángulo de inclinación del canal, S_o es la tangente de dicho ángulo y z_N se denomina profundidad normal.

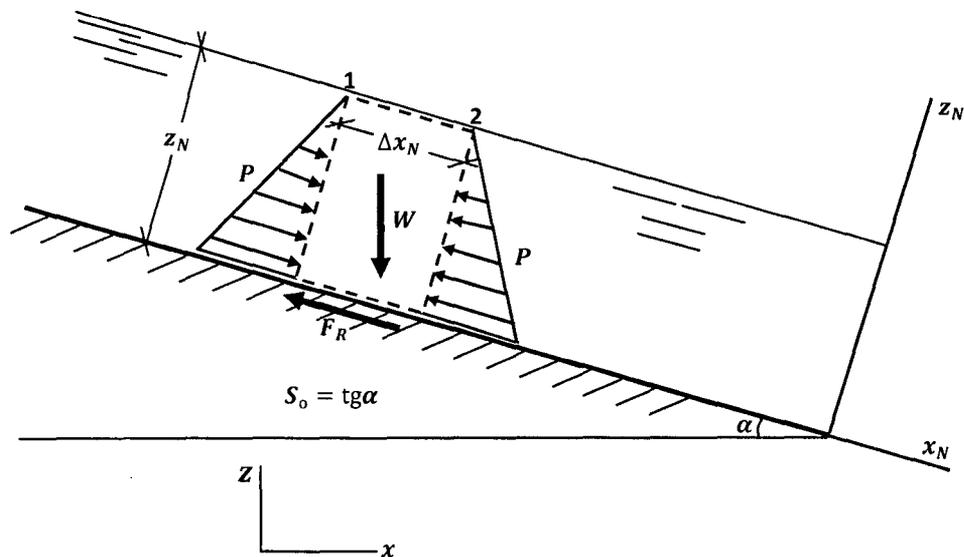


Figura 1.8. Flujo normal en un canal prismático

Fuente: (6)

Con el fin de analizar el flujo, se usa un modelo de flujo unidimensional sobre el cual actúan las fuerzas de fricción en la frontera mojada. Las líneas de corriente son paralelas y se considera que la presión es hidrostática en la dirección perpendicular al lecho. En la figura 1.8 se presenta un pequeño sistema de fluido con longitud Δx_N . Al aplicar la ley de Newton a este sistema en la dirección Δx_N , se obtiene:

$$F_R - W \text{sen} \alpha = 0 \quad (1.38)$$

Nótese que las fuerzas hidrostáticas se cancelan (la presión hidrostática por cualquier lado del prisma es la misma). Utilizando P_m como el perímetro mojado de una sección transversal del canal, la ecuación anterior se convierte en:

$$\rho g A \Delta x \text{sen} \alpha = \Delta x \int_0^{P_m} \tau_p dP_m \quad (1.39)$$

Donde A es el área de la sección transversal del prisma líquido, τ_p el esfuerzo cortante en la pared que varía a lo del perímetro mojado de una sección. Sin embargo usualmente esta variación puede ignorarse. Por consiguiente τ_p puede considerarse constante en una sección.

Ahora se define el radio hidráulico como:

$$R_H = \frac{A}{P_m} \quad (1.40)$$

Si el área de la sección transversal del prisma líquido es circular, entonces:

$$\Rightarrow R_H = \frac{A}{P_m} = \frac{\frac{\pi D^2}{4}}{\pi D} = \frac{D}{4}$$

$$\Rightarrow D = 4R_H \quad (1.41)$$

Reemplazando la ecuación (1.40) en la ecuación (1.39)

$$\rho g R_H \text{sen} \alpha = \tau_p \quad (1.42)$$

El esfuerzo cortante τ_p se expresa en función de un factor de fricción empírico, como se muestra en la ecuación siguiente:

$$\tau_p = \frac{f}{4} \rho \frac{v^2}{2} \quad (1.43)$$

Al igualar las ecuaciones (1.42) y (1.43)

$$\Rightarrow \frac{f}{4} \rho \frac{v^2}{2} = \rho g R_H \text{sen} \alpha \Rightarrow v = \left(\frac{8g}{f} \right)^{1/2} (R_H \text{sen} \alpha)^{1/2} \quad (1.44)$$

Para canales lisos (6), establece que:

$$C = \left(\frac{8g}{f} \right)^{1/2} \quad (1.45)$$

El término C se conoce como coeficiente de **Chézy**. Considerando que el ángulo de inclinación α del canal es muy pequeño, entonces:

$$\cos \alpha \approx 1 \Rightarrow S_o = \frac{\text{sen} \alpha}{\cos \alpha} \Rightarrow S_o = \text{sen} \alpha \quad (1.46)$$

Reemplazando las ecuaciones (1.45) y (1.46), en la ecuación (1.44), se tiene:

$$v = C (R_H S_o)^{1/2} \quad (1.47)$$

El coeficiente de **Chézy**, también puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$C = \frac{k}{n} (R_H)^{1/6} \quad (\text{En el sistema internacional}) \quad (1.48)$$

Donde n se conoce como el n de Manning y depende primordialmente de la rugosidad relativa y donde k equivale a 1.000. En la tabla 1.2, se muestran valores de n .

Tabla 1.2. Valores promedio del n de Manning

Material	n
Asfalto	0.016
Concreto pulido	0.012
Concreto sin pulir	0.015
Hierro fundido	0.015
Hierro forjado	0.015
Acero corrugado	0.022
Acrílico	0.012
Madera cepillada	0.012

Fuente: (6)

Reemplazando la ecuación (1.48) en la ecuación (1.47), se tiene:

$$v = \left(\frac{k}{n}\right) (R_H)^{2/3} \sqrt{S_0} \quad (1.49)$$

Como el caudal $Ca = vA$, entonces:

$$Ca = \left(\frac{k}{n}\right) (R_H)^{2/3} \sqrt{S_0} A \quad (1.50)$$

1.7.2. ENERGÍA ESPECÍFICA (FLUJOS EN CANALES ABIERTOS)

El análisis siguiente se restringe a flujo turbulento completamente desarrollado e incompresible a lo largo de un canal donde la pendiente del lecho es pequeña. Al igual que antes, se supone que en el flujo prevalece una distribución hidrostática de presiones. Además, éste se toma como unidimensional, donde \vec{v} es esencialmente paralela al lecho del canal y es constante a través de una sección perpendicular a ese lecho.

En la figura 1.9 se muestra una porción de un flujo como éste. Nótese que la elevación perpendicular al lecho del canal hasta un elemento del fluido está dada por z_{Ng} y hasta la superficie libre está dada por z_N . Las secciones perpendiculares al lecho se localizan mediante la posición x_N medida a lo largo de éste. La distancia vertical desde un elemento hasta el lecho está dada por h_g y desde la superficie libre hasta el lecho por h .

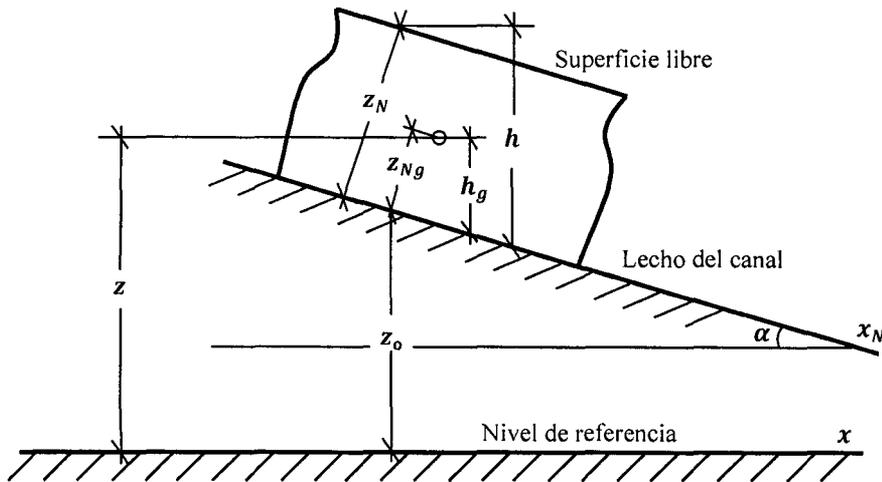


Figura 1.9. Flujo en un canal abierto con pendiente pequeña y \vec{v} paralela al lecho del canal.

Fuente: (6)

Utilizando z como elevación vertical desde un nivel de referencia horizontal convenientemente hasta un elemento fluido, se tiene que la altura de energía total H_D en esta posición es:

$$H_D = \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + z \quad (1.51)$$

Puesto que $\cos\alpha \approx 1$ puede reemplazarse z por $z_o + z_{Ng}\cos\alpha = z_o + z_{Ng}$. Asimismo la presión P puede evaluarse a partir de la variación hidrostática en la siguiente forma:

$$P = \gamma(z_N - z_{Ng}) \quad (1.52)$$

Reemplazando z y la ecuación (1.52) en la ecuación (1.51), se tiene:

$$H_D = z_N - z_{Ng} + \frac{v^2}{2g} + z_o + z_{Ng} = z_N + z_o + \frac{v^2}{2g} \quad (1.53)$$

Se debe notar que H_D es constante para todas las partículas en cada sección perpendicular al lecho.

Ahora se define la energía específica E_e de la forma siguiente:

$$E_e = H_D - z_o \quad (1.54)$$

La ecuación (1.54) muestra que la energía específica realmente es la altura de energía con respecto al lecho del canal como nivel de referencia. Al sustituir la ecuación (1.53) en la ecuación (1.54), se tiene:

$$E_e = z_N + z_o + \frac{v^2}{2g} - z_o = z_N + \frac{v^2}{2g} \quad (1.55)$$

Ahora se define a $q = \frac{Ca}{L_c} = \frac{vA}{L_c}$, que es el caudal por unidad de ancho del canal, L_c es el ancho del canal. En el presente trabajo se diseña y construye un canal rectangular, entonces el área de sección transversal a la dirección del flujo es $A = z_N L_c$.

Por consiguiente q es:

$$q = \frac{vA}{L_c} = \frac{v z_N L_c}{L_c} = v z_N \quad (1.56)$$

Reemplazando la ecuación (1.56) en la ecuación (1.55)



$$E_e = z_N + \frac{q^2}{2gz_N^2} \quad (1.57)$$

La representación de la ecuación (1.57) se muestra en la figura 1.10, esta ecuación permite calcular la energía específica E_e para una profundidad z_N a un q fijo.

Se puede observar de la figura 1.10, que para un q fijo, existe una profundidad que hace que la energía específica sea mínima $E_{e(\min)}$, dicha profundidad se denomina profundidad normal crítica z_{Nc} y se puede calcular igualando a cero la derivada de E_e con respecto a z_N

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_e}{\partial z_N} &= \frac{\partial}{\partial z_N} \left(z_N + \frac{q^2}{2gz_N^2} \right) = 0 \Rightarrow 1 - \frac{q^2}{gz_{Nc}^3} = 0 \\ \Rightarrow z_{Nc}^3 &= \frac{q^2}{g} \Rightarrow z_{Nc} = \left(\frac{q^2}{g} \right)^{1/3} \end{aligned} \quad (1.58)$$

Para hallar la energía específica mínima, se reemplaza z_{Nc} en la ecuación (1.57)

$$E_{e(\min)} = z_{Nc} + \frac{q^2}{2gz_{Nc}^2} = z_{Nc} + \frac{z_{Nc}^3}{2z_{Nc}^2} = z_{Nc} + \frac{z_{Nc}}{2}$$

$$E_{e(\min)} = \frac{3z_{Nc}}{2} \quad (1.59)$$

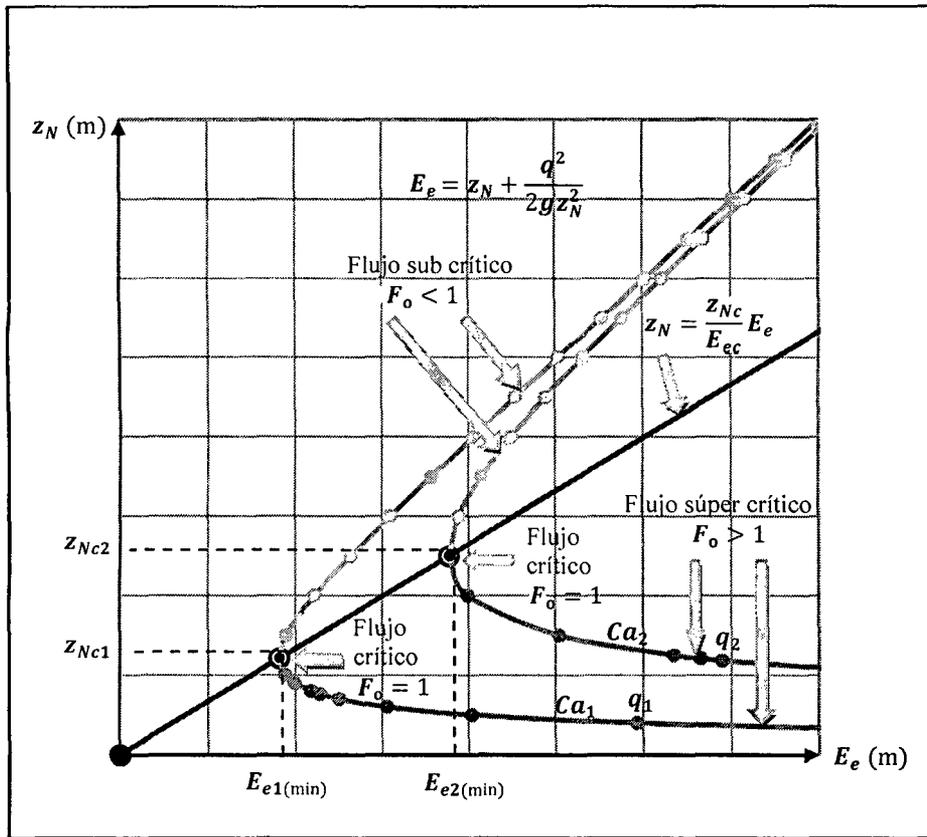


Figura 1.10. Gráfica de z_N versus E_e a diferentes q

Fuente: (6)

1.7.2.1. Tipos de flujos en canales abiertos.

En el caso de canales abiertos se hace uso de tres parámetros principales que son: la velocidad v , la gravedad g y la profundidad hidráulica z_N . Estos tres parámetros se relacionan para dar un parámetro adimensional que se conoce como el número de Froude F_o .

Con base en éste número es posible distinguir o encasillar el flujo en tres tipos o estados: el sub crítico, el flujo crítico y el súper crítico. El número de Froude relaciona básicamente, dos tipos de fuerzas, las de gravedad y las inerciales, que dependen de la masa.

El número de Froude se usa cuando el estado de flujo se desea clasificar en función de la acción que sobre él ejerce la gravedad. Los tres tipos de flujo son:

- 1. Flujo sub crítico.** Para este régimen de flujo las fuerzas inerciales son sobrepasadas en importancia por las gravitacionales; en el flujo se tienen velocidades y pendientes bajas, pero las profundidades de la lámina del agua, por el contrario, son mayores que las que se presentan en el flujo súper crítico. Para este tipo de flujo un aumento en la energía se traduce en un aumento en la profundidad de la lámina de agua. En este caso $F_o < 1$.
- 2. Flujo crítico.** Este tipo de flujo presenta una combinación de fuerzas inerciales y gravitacionales que lo hacen inestable, convirtiéndolo en cierta manera en un estado intermedio y cambiante entre los otros dos tipos de flujo. Debido a esto es bastante inaceptable y poco recomendable, usarlo en el diseño de estructuras hidráulicas. Para éste tipo de flujo $F_o = 1$ y en esta condición no se generan resaltos hidráulicos (disipadores de energía).
- 3. Flujo súper crítico.** En este tipo de flujo las fuerzas inerciales presentan una influencia mucho mayor que las fuerzas gravitacionales. Además de esto, el flujo se presenta a velocidades y pendientes altas, y a profundidades más pequeñas. Cuando existe un flujo de este tipo en un canal un aumento en la cantidad de energía provoca una disminución de la profundidad de la lámina de agua. El número de Froude, en este caso, $F_o > 1$. Este estado de flujo propicia la formación de resaltos hidráulicos (situaciones en las que se pasa de flujo súper crítico a sub crítico en forma brusca); estos aumentan su capacidad de disipación de energía en ciertos intervalos, alcanzando la mayor capacidad para flujos con Froude mayores a 9.

Para calcular el número de Froude y determinar el estado en que se encuentra el flujo se usa la siguiente relación:

$$F_o = \frac{v}{\sqrt{gz_N}} \quad (1.60)$$

1.7.3. MEDIDAS DE FLUJO A SUPERFICIE LIBRE, EL VERTEDERO

Un vertedero puede concebirse como una presa sobre la cual debe pasar el líquido. Tomando ciertas medidas del flujo cerca del vertedero, puede determinarse el caudal Ca con la ayuda de la ecuación de Bernoulli y de algunos datos empíricos.

Ésta es la idea de las medidas de caudal mediante vertederos en los canales. Como ya se ha visto anteriormente, existen diferentes tipos de vertederos, caracterizados por el grosor de sus paredes (en este caso veremos únicamente vertederos de labio fino) y por la forma y dimensiones del obstáculo que modifica el flujo. Para calcular el caudal teórico que circula por un canal mediante un vertedero, se aplica la ecuación de Bernoulli, pero ahora en vez de entre dos puntos dentro de una línea de corriente, entre dos secciones del canal: una aguas arriba del vertedero y otra en el vertedero mismo. A la hora de aplicar esta ecuación hay que tener en cuenta que el flujo es no viscoso, adiabático, incompresible, permanente y unidimensional. En el presente trabajo se considera tres tipos de vertederos que son: triangular, rectangular y trapezoidal.

1.7.3.1. Vertedero triangular

Aplicando la ecuación de Bernoulli entre los puntos 1 y 2 de la figura 1.11, se tiene:

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (1.61)$$

Las presiones en los puntos 1 y 2 son atmosféricas, es decir:

$$P_1 = P_2 = P_{atm} \quad (1.62)$$

La velocidad en el punto 1 es bastante pequeña en comparación con la velocidad en el punto 2, es por eso que:

$$v_1 \approx 0 \quad (1.63)$$

Reemplazando (1.62) y (1.63) en (1.61), se tiene:

$$z_1 = z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \Rightarrow v_2 = \sqrt{2g z_1^{1/2}} \quad (1.64)$$

Se sabe además que:

$$dCa_T = v_2 dA = v_2 x dz \quad (1.65)$$

$$x = 2(h_V - z) \operatorname{tg} \left(\frac{\beta}{2} \right) \quad (1.66)$$

Reemplazando las ecuaciones (1.65) y (1.66) en la ecuación (1.64) se tiene:

$$dCa_T = v_2 dA = v_2 x dz = 2\sqrt{2g} z^{1/2} (h_V - z) \operatorname{tg} \left(\frac{\beta}{2} \right) dz$$

$$\Rightarrow \int dCa_T = 2\sqrt{2g} \operatorname{tg} \left(\frac{\beta}{2} \right) \int_0^{h_V} (z^{1/2} h_V - z^{3/2}) dz$$

$$= 2\sqrt{2g} \operatorname{tg} \left(\frac{\beta}{2} \right) \left[\frac{2}{3} h_V z^{3/2} - \frac{2}{5} z^{5/2} \right]_0^{h_V} = 2\sqrt{2g} \operatorname{tg} \left(\frac{\beta}{2} \right) \left[\frac{2}{3} h_V^{5/2} - \frac{2}{5} h_V^{5/2} \right]$$

$$= 2\sqrt{2g} \operatorname{tg} \left(\frac{\beta}{2} \right) \left[\frac{2}{3} h_V^{5/2} - \frac{2}{5} h_V^{5/2} \right] = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \operatorname{tg} \left(\frac{\beta}{2} \right) h_V^{5/2}$$

$$Ca_T = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \operatorname{tg} \left(\frac{\beta}{2} \right) h_V^{5/2} \quad (1.67)$$

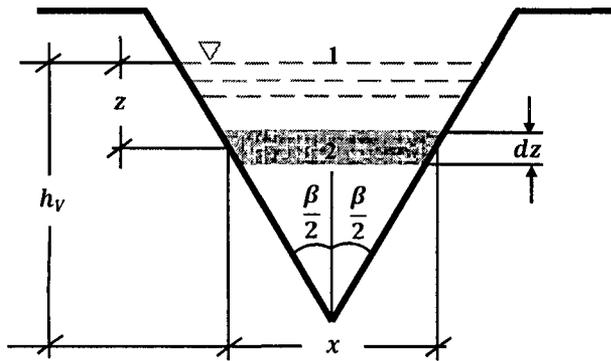


Figura 1.11. Vertedero triangular

Fuente: (Elaboración propia)

Donde:

h_v : Altura del fluido en el vertedero

β : Ángulo del vertedero

1.7.3.2. Vertedero rectangular

Procediendo de la misma forma que en el vertedero triangular, se tiene:

$$\Rightarrow v_2 = \sqrt{2g} z^{1/2} \quad (1.68)$$

$$\Rightarrow dCa_T = v_2 dA = v_2 L_W dz = \sqrt{2g} L_W z^{1/2} dz$$

$$\Rightarrow \int dCa_T = \sqrt{2g} L_W \int_0^{h_v} z^{1/2} dz = \frac{2}{3} \sqrt{2g} L_W [z^{3/2}]_0^{h_v} = \frac{2}{3} \sqrt{2g} L_W h_v^{3/2}$$

$$Ca_T = \frac{2}{3} \sqrt{2g} L_W h_v^{3/2} \quad (1.69)$$

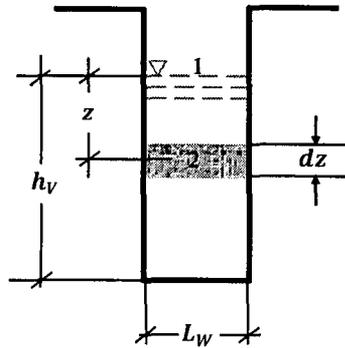


Figura 1.12. Vertedero rectangular

Fuente: (Elaboración propia)

Donde:

h_V : Altura del fluido en el vertedero

L_W : Ancho del vertedero

1.7.3.2. Vertedero trapezoidal

Procediendo de la misma forma que en los vertederos anteriores se obtiene:

$$Ca_T = \frac{2}{3} \sqrt{2g} L_W h_V^{3/2} + \frac{8}{15} \sqrt{2g} \operatorname{tg} \left(\frac{\beta}{2} \right) h_V^{5/2} \quad (1.70)$$

Donde:

h_V : Altura del fluido en el vertedero

L_W : Base menor del vertedero

β : Ángulo del vertedero (parte triangular)

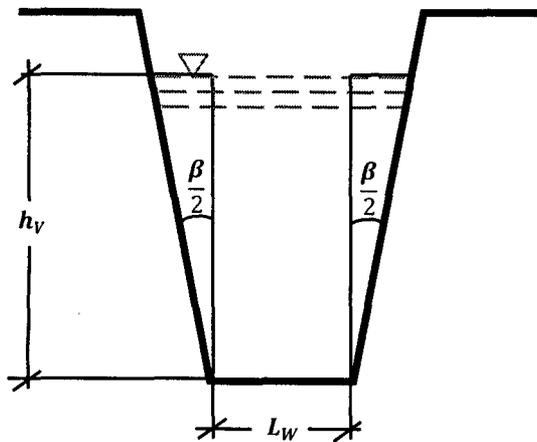


Figura 1.13. Vertedero trapezoidal
Fuente: (Elaboración propia)

1.8. DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO DEL SISTEMA

En la figura 3.1, se puede ver en detalle el diseño del sistema.

El sistema que se diseña y construye en el presente trabajo, se define como un conjunto de componentes, los cuales tienen una función específica. Los principales componentes del sistema se mencionan a continuación:

1.8.1. TANQUE RESERVORIO

Este componente tiene la función de almacenar agua y a la vez recepcionar el agua que sale del canal a través del vertedero que esté instalado. Además la electrobomba succiona el agua de este tanque y la envía a través de las tuberías al canal.

Se puede notar en la figura 3.1, que la forma de este tanque es la de un paralelepípedo.

1.8.2. LÍNEA DE DISTRIBUCIÓN

Este componente es el más complejo del sistema, pues consta de otros sub componentes que se mencionan a continuación:

1.8.2.1. Tramo *AB*

Está conformado por tuberías rectas, accesorios y una electrobomba. Por medio de este tramo se succiona el agua del tanque reservorio y se distribuye a través de los otros tramos de tuberías.

La función principal de la electrobomba es mantener el flujo permanente

1.8.2.2. Tramo *BC*

Este tramo es conocido como la línea de retorno y está compuesto por tuberías rectas y accesorios. Esta línea tiene por función, hacer que el caudal que produce la electrobomba se distribuya, retornando una parte del agua al tanque reservorio. De esta forma el caudal que entra al canal será menor que el caudal que produce la electrobomba. Esta línea se pone en funcionamiento abriendo la válvula esférica *V1* . Véase la figura 3.1.

1.8.2.3. Tramo *BE*

Este tramo está compuesto por tuberías rectas, accesorios y una manguera de alta presión de 5/8 pulgada de diámetro. Para hacer funcionar este tramo, se abre la válvula esférica *V2* y se cierra la válvula esférica *V3*, haciendo que el agua fluya sólo por este tramo hasta el punto *E* y descargue en el canal. Ver figura 3.1.

1.8.2.4. Tramo *BD*

Este tramo está compuesto por tuberías rectas, accesorios y una manguera de alta presión de 5/4 pulgada de diámetro.

Para hacer funcionar este tramo, se abre la válvula esférica **V3** y se cierra las válvulas esféricas **V1** y **V2**, haciendo que el agua fluya sólo por este tramo hasta el punto **D** y descargue en el canal. Ver figura 3.1.

1.8.3. CANAL

Este es el principal componente del sistema y es aquí donde se realiza el estudio del flujo de fluidos en canales abiertos. Como se puede ver en la figuras 3.1 y 3.2, el canal tiene forma de un paralelepípedo, en donde las áreas de sección transversal al flujo son rectangulares. Algunos textos llaman a estos tipos de canales como prismáticos o simplemente rectangulares por el área de sección transversal al flujo.

Además en las figuras 3.1 y 3.2, se puede ver que el canal, tiene al lado izquierdo una cinta métrica y dos reglas corredizas. La cinta métrica sirve para medir la distancia paralela al lecho del canal y las dos reglas corredizas sirven para medir la profundidad normal al canal. Mediante estas dos mediciones se construye el perfil de superficie libre del líquido en el canal. También, el canal tiene un armazón de angular de aluminio, esto le da mayor resistencia a la estructura del canal, además el canal cuenta con un pequeño espacio de 15cm de longitud (zona de turbulencia), donde se recepciona al fluido que llega desde el tanque reservorio, la medida de la distancia paralela al lecho del canal se hace al terminar estos 15cm.

1.8.4. VERTEDEROS

Los vertederos que se usan en el sistema son de tres tipos: triangular, rectangular y trapezoidal. Estos vertederos sirven para medir el caudal que circula por el canal y serán colocados a la salida del mismo. Ver figuras 3.3

1.8.5. ESTRUCTURA METÁLICA

Este componente tiene la función de soportar a los demás componentes del sistema (tanque reservorio, línea de distribución y canal).

1.9. APLICACIÓN DE LAS LINEAS DE ENERGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL PERFIL DE SUPERFICIE LIBRE DEL LÍQUIDO EN EL CANAL

El perfil de superficie libre del líquido en el canal, es la línea que se forma al graficar la longitud paralela al lecho del canal x_N versus la profundidad normal z_N . Para hacer la evaluación del perfil de superficie libre del líquido en el canal, se considera lo siguiente:

1. Flujo gradualmente variado sobre canales largos y lisos (el área de la sección transversal al flujo cambia muy lentamente)
2. Flujo normal y permanente (la velocidad es paralela al lecho del canal y uniforme en una sección normal al lecho)
3. El fluido es incompresible
4. El ángulo de inclinación del canal es muy pequeño.

Aplicando las líneas de energía entre los puntos P y Q , de la figura 1.14

$$z_o + h + \frac{v^2}{2g} = z_o + dz_o + h + dh + \frac{v^2}{2g} + d\left(\frac{v^2}{2g}\right) + dh_L$$

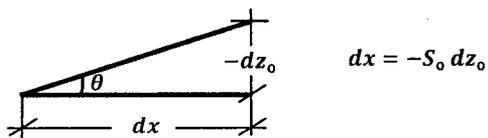
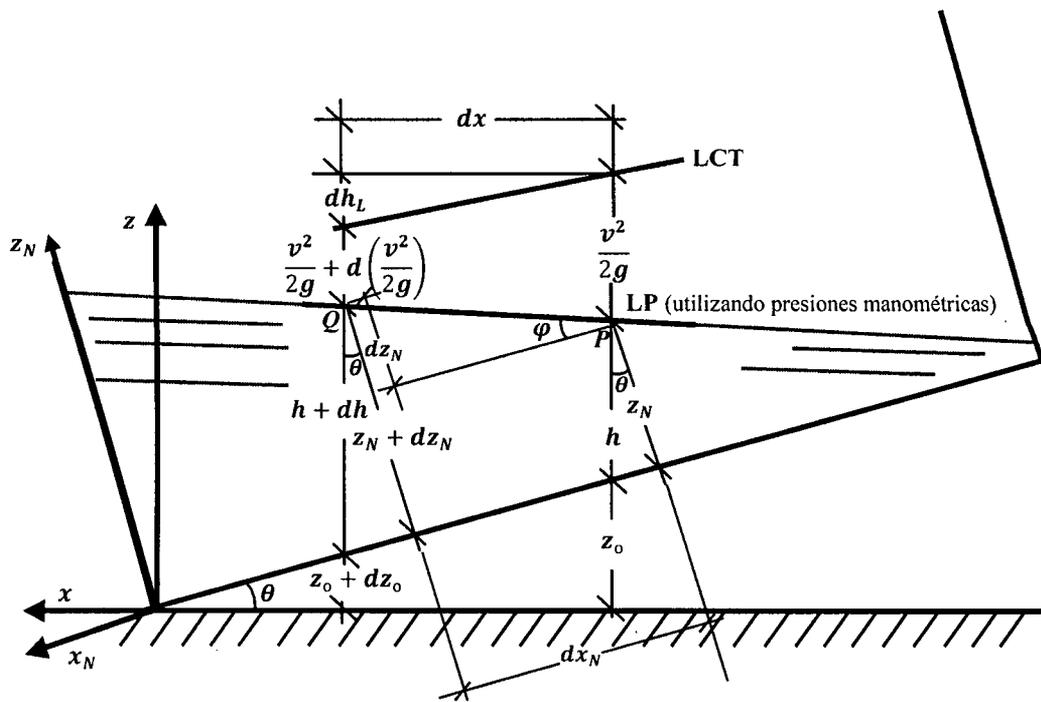
$$\Rightarrow dz_o + dh + d\left(\frac{v^2}{2g}\right) + dh_L = 0 \quad (1.71)$$

De las figuras 1.14 y 1.16, se tiene:

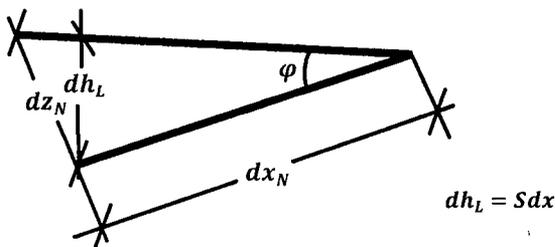
$$dz_o = -S_o dx \quad (1.72)$$

$$h = z_N \cos\theta \Rightarrow dh = \cos\theta dz_N \quad (1.73)$$

$$x = (x_N + z_N \operatorname{tg}\theta) \cos\theta \Rightarrow dx = \cos\theta dx_N + \operatorname{sen}\theta dz_N \quad (1.74)$$



Se considera que θ es agudo, entonces $S_0 = \text{tg}\theta > 0$



$$S = \text{tg}\varphi = \frac{\text{sen}\varphi}{\text{cos}\varphi}$$



Figura 1.14. Líneas de energía para la evaluación del perfil de superficie libre del líquido en el canal

Fuente: (Elaboración propia)

Reemplazando (1.74) en (1.72), se tiene:

$$\begin{aligned} dz_o &= -S_o(\cos\theta dx_N + \text{sen}\theta dz_N) = -\text{sen}\theta dx_N - S_o \text{sen}\theta dz_N \\ &= -\text{sen}\theta dx_N - (S_o)^2 \cos\theta dz_N \end{aligned}$$

$$dz_o = -\text{sen}\theta dx_N - (S_o)^2 \cos\theta dz_N \quad (1.75)$$

Por otro lado se tiene que:

$$Ca = vA \Rightarrow \frac{dCa}{dx_N} = 0 = A \frac{dv}{dx_N} + v \frac{dA}{dx_N}, \quad dA = L_C dz_N$$

L_C : Ancho del canal (m)

$$\Rightarrow A \frac{dv}{dx_N} + v \frac{L_C dz_N}{dx_N} = 0 \Rightarrow \frac{dv}{dx_N} = -\frac{v L_C dz_N}{A dx_N} \quad (1.76)$$

Además:

$$\Rightarrow \frac{d}{dx_N} \left(\frac{v^2}{2g} \right) = \frac{v}{g} \frac{dv}{dx_N} \quad (1.77)$$

Reemplazando (1.76) en (1.77), se tiene:

$$\Rightarrow \frac{d}{dx_N} \left(\frac{v^2}{2g} \right) = -\frac{v^2 L_C dz_N}{gA dx_N} \Rightarrow d \left(\frac{v^2}{2g} \right) = -\frac{v^2}{gA} L_C dz_N \quad (1.78)$$

$$dh_L = S dx \quad (1.79)$$

El valor del término S , se puede estimar utilizando la ecuación (1.49)

$$dh_L = \left(\frac{n}{k} \right)^2 \frac{v^2}{(R_H)^{4/3}} dx = \left(\frac{n}{k} \right)^2 \frac{v^2}{(R_H)^{4/3}} (\cos\theta dx_N + \text{sen}\theta dz_N) \quad (1.80)$$

Reemplazando las ecuaciones (1.73), (1.75), (1.77) y (1.80) en la ecuación (1.71), se tiene:

$$-\text{sen}\theta dx_N - S_o \text{sen}\theta dz_N + \cos\theta dz_N - \frac{v^2}{gA} L_C dz_N + \left(\frac{n}{k}\right)^2 \frac{v^2}{(R_H)^{4/3}} (\cos\theta dx_N + \text{sen}\theta dz_N) = 0$$

$$\left[\cos\theta - S_o \text{sen}\theta - \frac{v^2}{gA} L_C + \left(\frac{n}{k}\right)^2 \frac{v^2}{(R_H)^{4/3}} \text{sen}\theta \right] dz_N = \left[\text{sen}\theta - \left(\frac{n}{k}\right)^2 \frac{v^2}{(R_H)^{4/3}} \cos\theta \right] dx_N$$

$$dx_N = \frac{\left[\cos\theta - S_o \text{sen}\theta - \frac{v^2}{gA} L_C + \left(\frac{n}{k}\right)^2 \frac{v^2}{(R_H)^{4/3}} \text{sen}\theta \right] dz_N}{\left[\text{sen}\theta - \left(\frac{n}{k}\right)^2 \frac{v^2}{(R_H)^{4/3}} \cos\theta \right]} \quad (1.81)$$

Como $v = \frac{Ca}{A}$, la ecuación (1.81), queda:

$$dx_N = \frac{\left[\cos\theta - S_o \text{sen}\theta - \frac{(Ca)^2}{gA^3} L_C + \left(\frac{n}{k}\right)^2 \frac{(Ca)^2}{(R_H)^{4/3} A^2} \text{sen}\theta \right] dz_N}{\left[\text{sen}\theta - \left(\frac{n}{k}\right)^2 \frac{(Ca)^2}{(R_H)^{4/3} A^2} \cos\theta \right]} \quad (1.82)$$

1.9.1. METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DEL PERFIL DE SUPERFICIE LIBRE DEL LÍQUIDO EN EL CANAL

Para elaborar el perfil de superficie libre del líquido en el canal, básicamente se tiene en cuenta la ecuación (1.83) y la figura (1.14)

$$\Delta x_{Ni} = \frac{\left[\cos\theta - S_o \text{sen}\theta - \frac{(Ca)^2}{g(A_{mi})^3} L_C + \left(\frac{n}{k}\right)^2 \frac{(Ca)^2}{R_{Hmi}^{4/3} (A_{mi})^2} \text{sen}\theta \right] (\Delta z_{Ni} - (0.02(b-0.05) + 0.003))}{\left[\text{sen}\theta - \left(\frac{n}{k}\right)^2 \frac{(Ca)^2}{R_{Hmi}^{4/3} (A_{mi})^2} \cos\theta \right]} \quad (1.83)$$

La ecuación (1.83) es una ampliación de la ecuación (1.81), en la cual se considera que la variación de A y R_H entre dos puntos cercanos del canal es pequeña. Además se considera el término $0.02(b - 0.05) + 0.003$ que es la desviación promedio del valor de b . La desviación promedio de b , se obtiene considerando que por cada 1cm la altura de inclinación b se desvía 0.2mm, lo cual afecta al realizar la medida de z_N

En la ecuación (1.83) Δz_{Ni} es el cambio en la altura de la superficie libre correspondiente a un cambio en la posición Δx_{Ni} a lo largo del lecho del canal.

El término $b(m)$ representa la altura de inclinación del canal. Ver figura 1.16

Se supone que se tiene dos secciones en el canal, los valores de z_N , A y R_H son conocidos en las secciones 1 y 2. El cambio en la altura de la superficie libre entre los puntos 1 y 2 es $\Delta z_{N1} = z_{N2} - z_{N1}$, de igual forma la distancia a lo largo del lecho del canal correspondiente a Δz_{N1} es $\Delta x_{N1} = x_{N2} - x_{N1}$. Para hallar Δx_{N1} se puede aplicar la ecuación (1.83), teniéndose en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se determina el promedio lineal de los valores de A y R_H en las secciones 1 y 2. Los promedios lineales para A y R_H se representan como A_{mi} y R_{Hmi} , respectivamente. Entonces, en las secciones 1 y 2, se tiene: $A_{m1} = \frac{A_2 + A_1}{2}$, $R_{Hm1} = \frac{R_{H2} + R_{H1}}{2}$. Los valores de A_{m1} y R_{Hm1} se reemplazan en la ecuación (1.83) y se obtiene el valor de Δx_{N1} .

Teniéndose en cuenta la figura 1.15, el perfil de superficie libre del líquido, se obtiene graficando los valores de x_N versus los valores de z_N .

En forma general si se realiza p cálculos de Δx_N se tiene:

$$R_{Hmi} = \frac{R_{H(i+1)} + R_{Hi}}{2} \quad (1.84)$$

$$A_{mi} = \frac{A_{(i+1)} + A_i}{2} \quad (1.85)$$

$$\Delta z_{Ni} = z_{N(i+1)} - z_{Ni} \quad (1.86)$$

$$\Delta x_{Ni} = x_{N(i+1)} - x_{Ni} \quad (1.87)$$

$$i = 0, 1, 2, 3, 4, \dots, p \quad (1.88)$$

Por ejemplo, si se quisiera conocer cuál es la distancia paralela al lecho, correspondiente a z_{N4} . En este caso se aplicaría la ecuación (1.83) para evaluar Δx_{N3} y como $\Delta x_{N3} = x_{N4} - x_{N3}$ el valor de x_{N4} sería $x_{N4} = \Delta x_{N3} + x_{N3}$. Si se tiene en cuenta la figura 1.15 el valor de x_{N3} sería $x_{N3} = \Delta x_{N2} + x_{N2} = \Delta x_{N2} + \Delta x_{N1} + x_{N1} = \Delta x_{N2} + \Delta x_{N1} + \Delta x_{N0} + x_{N0}$. Entonces $x_{N4} = \Delta x_{N3} + \Delta x_{N2} + \Delta x_{N1} + \Delta x_{N0} + x_{N0}$.

Así como para Δx_{N3} , la ecuación (1.83) se aplicaría del mismo modo para encontrar los valores de Δx_{N2} , Δx_{N1} y Δx_{N0} .

Considerando que x_{Np} es la longitud paralela al lecho que cubre todo el líquido en el canal al realizar p medidas de Δx_N , se tiene que:

$$x_{Np} = x_{N0} + \sum_{i=0}^{p-1} \Delta x_{Ni} \quad (1.89)$$

Nota.

El perfil de superficie libre de líquido en el canal, se considera que es completamente desarrollado y se limita a la zona del canal donde el flujo es **sub crítico**. Es casi imposible realizar medidas en el canal en la zona **súper crítica** debido a que en esta zona existe demasiada turbulencia.

Los espacios de las zonas **súper crítica** y **sub crítica** son: (x_{N0}) y $(L - x_{N0})$, respectivamente.

En la figura 1.15, los términos z_{Nmax} y z_{Nmin} representan la altura normal máxima y la altura normal mínima en el canal, respectivamente.

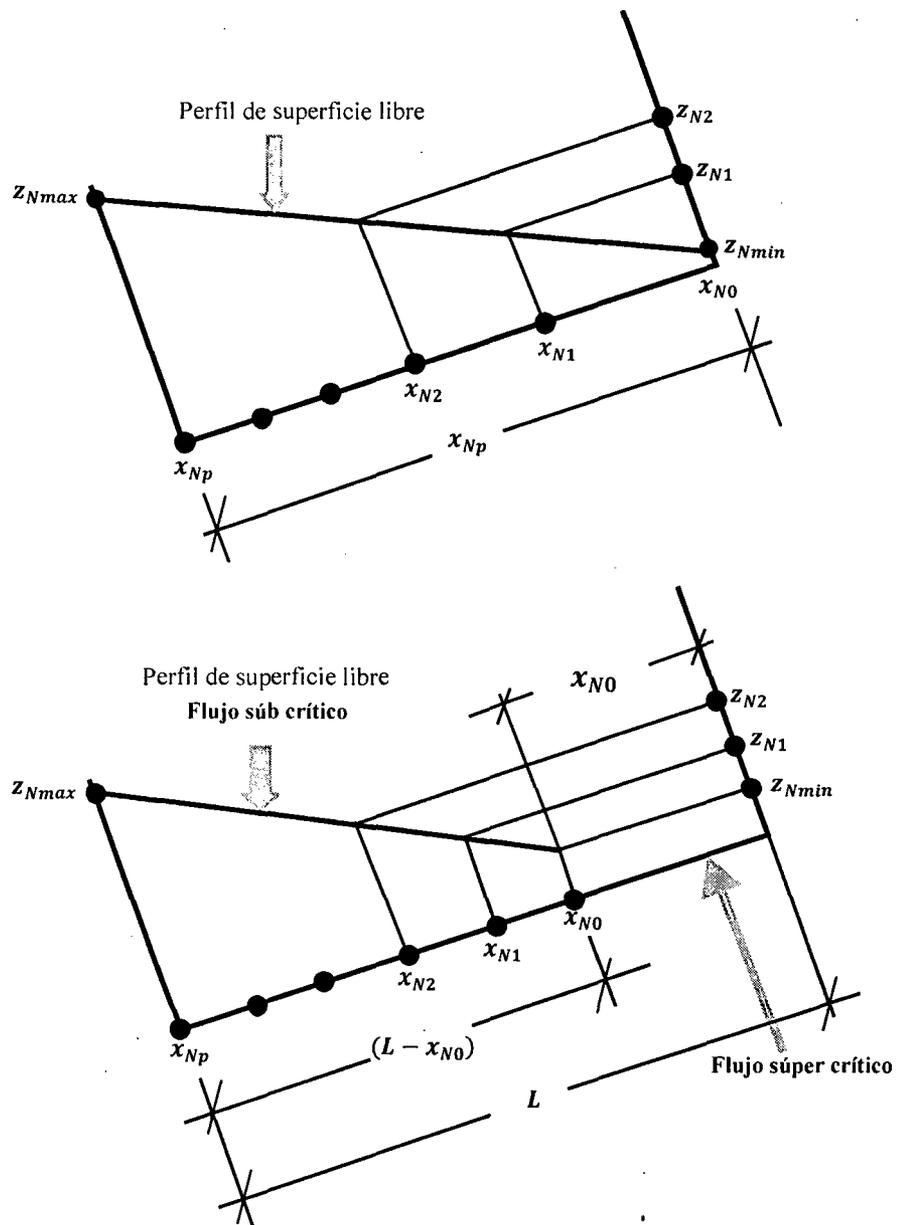


Figura 1.15. Perfil de superficie libre del líquido en el canal, realizando p medidas de Δx_N

Fuente: (Elaboración propia)

1.9.2. TRANSFORMACIÓN DE COORDENADAS DEL PERFIL DE SUPERFICIE LIBRE DEL LÍQUIDO EN EL CANAL

La transformación de coordenadas del perfil de superficie libre, consiste en pasar las coordenadas (x_N, z_N) de los puntos que forman el perfil a las coordenadas (x, y) , para esto se hace uso de la figura 1.16.

De la figura 1.16 se tiene:

$$\cos\theta = \frac{\sqrt{L^2 - b^2}}{L}, \quad \operatorname{tg}\theta = \frac{b}{\sqrt{L^2 - b^2}}, \quad \operatorname{sen}\theta = \frac{b}{L}$$

$$\Rightarrow x = (x_N + z_N \operatorname{tg}\theta) \cos\theta = \left(x_N + z_N \frac{b}{\sqrt{L^2 - b^2}}\right) \frac{\sqrt{L^2 - b^2}}{L} = x_N \frac{\sqrt{L^2 - b^2}}{L} + z_N \frac{b}{L}$$

$$x = x_N \sqrt{1 - \left(\frac{b}{L}\right)^2} + z_N \frac{b}{L} \quad (1.90)$$

$$z = \frac{z_N}{\cos\theta} + c = \frac{z_N L}{\sqrt{L^2 - b^2}} + c \quad (1.91)$$

$$\frac{b - c}{(x_N + y_N \operatorname{tg}\theta)} = \frac{b}{L} \Rightarrow c = b - \frac{b}{L} \left(x_N + z_N \frac{b}{\sqrt{L^2 - b^2}}\right) \quad (1.92)$$

Reemplazando (1.92) en (1.91), se tiene:

$$\begin{aligned} z &= \frac{z_N L}{\sqrt{L^2 - b^2}} + b - \frac{b}{L} \left(x_N + z_N \frac{b}{\sqrt{L^2 - b^2}}\right) = z_N \frac{L}{\sqrt{L^2 - b^2}} + b - \frac{b}{L} x_N - z_N \frac{b^2}{L \sqrt{L^2 - b^2}} \\ &= z_N \left(\frac{L}{\sqrt{L^2 - b^2}} - \frac{b^2}{L \sqrt{L^2 - b^2}} \right) + b - \frac{b}{L} x_N = z_N \left(\frac{\sqrt{L^2 - b^2}}{L} \right) + b - \frac{b}{L} x_N \end{aligned}$$

$$z = z_N \left(\frac{\sqrt{L^2 - b^2}}{L} \right) + b - \frac{b}{L} x_N \quad (1.93)$$

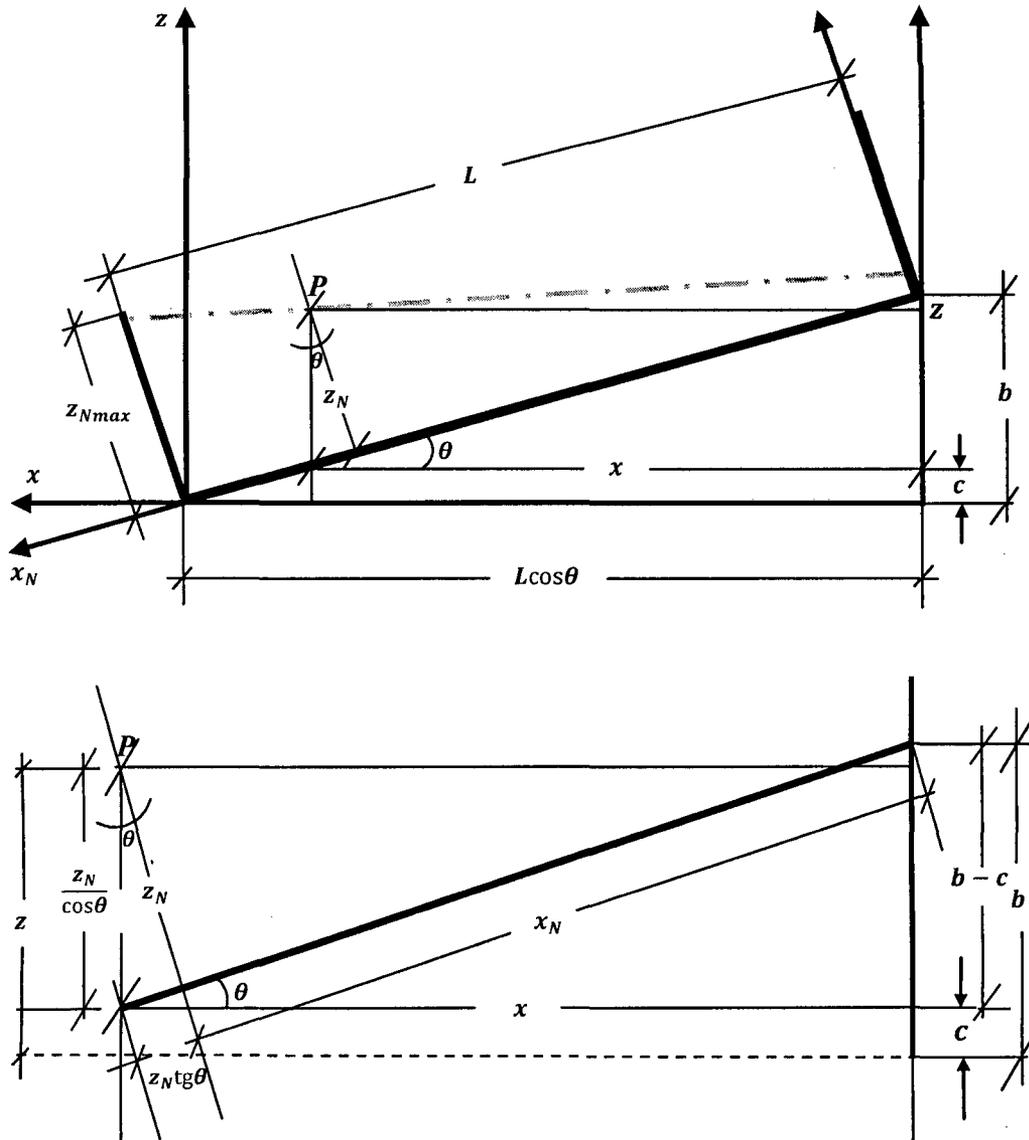


Figura 1.16. Detalle para la evaluación del perfil de superficie libre del líquido en el canal y realizar la transformación de coordenadas

Fuente: (Elaboración propia)

Donde:

Largo del canal donde se realizan las mediciones de x_N y z_N : L (m)

Altura de inclinación del canal: b (m)

Ángulo de inclinación del canal: θ

1.10. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL COEFICIENTE DE DESCARGA EN CADA VERTEDERO

El coeficiente de descarga es un factor de corrección del caudal teórico en cada vertedero y se simboliza como Cd . El caudal práctico $Ca_{(P)}$ en cada vertedero se obtiene multiplicando el caudal teórico $Ca_{(T)}$ con el coeficiente de descarga Cd , tal como indica la ecuación siguiente:

$$Ca_{(P)} = CdCa_{(T)} \quad (1.94)$$

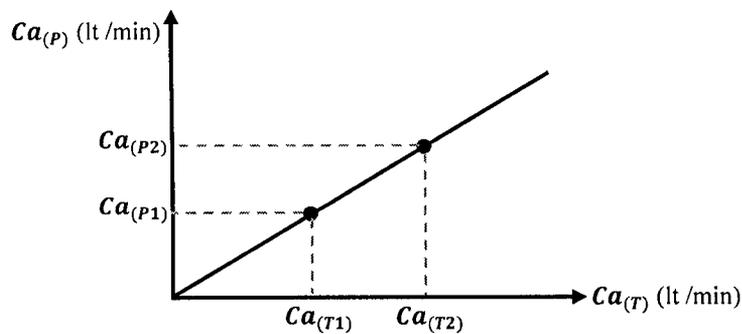


Figura 1.17. Representación gráfica de $Ca_{(T)}$ versus $Ca_{(P)}$

Fuente: (Elaboración propia)

La metodología para medir el coeficiente de descarga, consiste en calcular dos caudales teóricos ($Ca_{(T1)}$ y $Ca_{(T2)}$), después para cada uno de estos caudales teóricos se determinan los respectivos caudales prácticos ($Ca_{(P1)}$ y $Ca_{(P2)}$) mediante el método de

descarga directa (se mide el tiempo que demora en llenarse un recipiente cilíndrico con el fluido que sale del canal a través del vertedero que esté instalado). Si se ubican los puntos $(C_{a(T1)}, C_{a(P1)})$ y $(C_{a(T2)}, C_{a(P2)})$ en un sistema de coordenadas cartesianas, tal como se muestra en la figura 1.17, el coeficiente de descarga es la pendiente de la recta formada por estos dos puntos, es decir:

$$Cd = \frac{C_{a(P2)} - C_{a(P1)}}{C_{a(T2)} - C_{a(T1)}} \quad (1.95)$$

De la misma forma se procede en cada vertedero

1.11. APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN GENERAL DE ENERGÍA EN CANALES CERRADOS A LA LÍNEA DE DISTRIBUCIÓN DEL SISTEMA

Esta ecuación se aplica a la línea de distribución del sistema, con el fin de evaluar el caudal real que desarrolla la electrobomba. Específicamente se aplica a los tramos *AD*, *AB*, *BC* y *BE*. Véase también la figura 3.1

Tramo *AD*

$$\frac{P_A}{\gamma} + z_A + \frac{v_A^2}{2g} + h_A - h_{L(AD)} = \frac{P_D}{\gamma} + z_D + \frac{v_D^2}{2g} \quad (1.96)$$

Se puede ver en la figura 3.1 que $v_A \approx 0$ y $P_D = P_{atm}$, entonces:

$$z_A + h_A - h_{L(AD)} = \frac{P_D}{\gamma} + z_D + \frac{v_D^2}{2g} \quad (1.97)$$

Tramo *AB*

$$\frac{P_A}{\gamma} + z_A + \frac{v_A^2}{2g} + h_A - h_{L(AB)} = \frac{P_B}{\gamma} + z_B + \frac{v_B^2}{2g}$$

$$\frac{P_A}{\gamma} + z_A + h_A - h_{L(AB)} = \frac{P_B}{\gamma} + z_B + \frac{v_B^2}{2g} \quad (1.98)$$

Tramo BC

$$\frac{v_B^2}{2g} + \frac{P_B}{\gamma} + z_B - h_{L(BC)} = \frac{P_C}{\gamma} + z_C + \frac{v_C^2}{2g}$$

$$P_C = P_{atm}$$

$$\frac{v_B^2}{2g} + \frac{P_B}{\gamma} + z_B - h_{L(BC)} = z_C + \frac{v_C^2}{2g} \quad (1.99)$$

Tramo BE

$$\frac{v_B^2}{2g} + \frac{P_B}{\gamma} + z_B - h_{L(BE)} = \frac{P_E}{\gamma} + z_E + \frac{v_E^2}{2g}$$

$$P_E = P_{atm}$$

$$\frac{v_B^2}{2g} + \frac{P_B}{\gamma} + z_B - h_{L(BE)} = z_E + \frac{v_E^2}{2g} \quad (1.100)$$

1.12. EXPERIMENTOS QUE SE LLEVAN A CABO EN EL SISTEMA

El sistema que se diseña y construye en el presente trabajo, permite básicamente el estudio del flujo de fluidos en canales abiertos, este sistema se ha diseñado para que cuando se realicen los experimentos se trabaje de la siguiente forma: Se fija una inclinación en el canal y se realizan las medias de x_N y z_N para cada dos caudales. Por ejemplo, si se realizan cuatro pruebas para cada vertedero, estas pueden ser: primera prueba S_{01} con $Ca_{(P1)}$; segunda prueba S_{01} con $Ca_{(P2)}$; tercera prueba S_{02} con $Ca_{(P3)}$; cuarta prueba S_{02} con $Ca_{(P4)}$.

Los experimentos que se llevan a cabo en el sistema, se centran en los siguientes aspectos:

1.12.1. EVALUACIÓN DEL PERFIL DE SUPERFICIE LIBRE DEL LÍQUIDO EN EL CANAL

Medir el perfil de superficie libre en el canal implica medir la longitud paralela al lecho del líquido en el canal x_N versus la profundidad normal z_N en el canal, estableciendo una inclinación para el canal.

Esto también permite saber en qué partes del canal el flujo es súper crítico, crítico o sub crítico.

Esta evaluación se realiza de las siguientes formas:

- Fijando la inclinación S_{01} en el canal para dos caudales ($Ca_{(p1)}$ y $Ca_{(p2)}$)

Si se desea que el caudal en el canal sea menor que el caudal que produce la electrobomba, se cierra la válvula V_3 y se abren las válvulas V_1 y V_2 . De esta forma el caudal que produce la electrobomba se distribuye, una parte por el tramo BE (entra al canal) y otra parte por el tramo BC (retorna al tanque reservorio). En este caso al caudal que entra al canal se le denomina $Ca_{(p1)}$. Ver figura 3.1.

Si se desea que el caudal que produce la electrobomba sea igual al caudal en el canal, se cierran las válvulas V_1 y V_2 y se abre la válvula V_3 . De esta forma el fluido fluye sólo a través del tramo AD . En este caso al caudal que entra al canal se le denomina $Ca_{(p2)}$. Ver figura 3.1

Posteriormente, se elabora el perfil de superficie libre del líquido para cada caudal ($Ca_{(p1)}$ y $Ca_{(p2)}$) con la misma inclinación en el canal S_{01} .

- **Fijando la inclinación S_{o2} en el canal para dos caudales ($Ca_{(P3)}$ y $Ca_{(P4)}$)**

Si se desea que el caudal en el canal sea menor que el caudal que produce la electrobomba, se cierra la válvula V_3 y se abren las válvulas V_1 y V_2 . De esta forma el caudal que produce la electrobomba se distribuye, una parte por el tramo BE (entra al canal) y otra parte por el tramo BC (retorna al tanque reservorio). En este caso al caudal que entra al canal se le denomina $Ca_{(P3)}$

Si se desea que el caudal que produce la electrobomba sea igual al caudal en el canal, se cierran las válvulas V_1 y V_2 y se abre la válvula V_3 . De esta forma el fluido fluye sólo a través del tramo AD . En este caso al caudal que entra al canal se le denomina $Ca_{(P4)}$.

Posteriormente, se elabora el perfil de superficie libre del líquido para cada caudal ($Ca_{(P3)}$ y $Ca_{(P4)}$) con la misma inclinación en el canal S_{o2} .

1.12.2. DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE DESCARGA EN CADA VERTEDERO

En la práctica, este procedimiento consiste en medir h_v para los caudales teóricos ($Ca_{(T1)}$, $Ca_{(T2)}$) y a su vez medir los respectivos caudales prácticos ($Ca_{(P1)}$ y $Ca_{(P2)}$). Con todos estos valores, se aplica la ecuación (1.94) y se calcula el coeficiente de descarga Cd , procediendo de la misma forma para cada vertedero.

1.13. VARIABLES Y CRITERIOS MÁS IMPORTANTES DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA

1.13.1. PROFUNDIDAD NORMAL MÁXIMA DEL LÍQUIDO EN EL CANAL

A esta variable se le denota como z_{Nmax} . Ver figura 1.15. Como el diseño del sistema se hace con fines académicos, se considera que $0.07m \leq z_{Nmax} \leq 0.11m$.



El criterio para optar este valor es que pueda notarse y medirse con facilidad cuando se realizan los experimentos en el sistema.

1.13.2. DIMENSIONES DEL CANAL

Las dimensiones del canal que se considera son las siguientes:

Largo del canal donde se realiza las mediciones de z_N y x_N : L (m)

Ancho del canal: L_C (m)

Altura del canal: Y_C (m)

Largo total del canal: L_T (m)

El criterio para la elección del valor de estas variables, es que se debe obtener en el canal un perfil de superficie libre del líquido muy notorio, en el cual se pueda medir con bastante facilidad los valores de z_N y x_N .

Considerando que $0.07\text{m} \leq z_{Nmax} \leq 0.11\text{m}$, se realiza una serie de iteraciones en la cual se aplica la ecuación (1.83) para calcular los valores de Δx_{Ni} y así poder determinar el valor de L correspondiente a z_{Nmax}

Se debe notar en la figura 3.1, que el canal tiene un espacio donde se receptiona el fluido que viene del tanque reservorio a través de la línea de distribución. La longitud de este espacio se denota como L_R (m). Además, se considera que la longitud de este espacio es:

$$L_R = 0.1L \quad (1.101)$$

Entonces, la longitud total del canal es:

$$L_T = L_R + L = 1.1L \quad (1.102)$$

1.13.3. RANGO DE CAUDAL QUE PRODUCE LA ELECTROBOMBA

Conocer el rango de caudal en el que trabaja la electrobomba es de suma importancia, porque este debe adecuarse al caudal que se requiere para obtener el valor z_{Nmax} en el rango que se especificó.

1.13.4. DIMENSIONES DE LOS VERTEDEROS

El criterio para determinar las dimensiones de los vertederos, es que estos deben tener un área adecuada para mantener el flujo permanente. Si el vertedero tiene un área demasiado grande, es posible de que el fluido se escurra a través del mismo. Si el área del vertedero es demasiado pequeña, es posible de que el canal se inunde. Si sucedería cualquiera de los dos casos el flujo en el canal no sería permanente y no se podría realizar las medidas de x_N y z_N

Conociendo el caudal en el canal, se puede estimar las dimensiones de cada vertedero, haciendo uso de las ecuaciones (1.67), (1.69) y (1.70)

1.13.5. CARACTERÍSTICAS DE LA LÍNEA DE DISTRIBUCIÓN

La línea de distribución es como se muestra en la figura 3.1. El criterio para su diseño se basa en que para cada experimento a desarrollarse en el sistema, se requiere hacer las mediciones de x_N y z_N por lo menos para dos caudales. De esta forma se determina la cantidad de accesorios y longitud de tubería recta en cada tramo.

1.13.6. DIMENSIONES DE LA PLANCHA DE ACRÍLICO PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL TANQUE RESERVORIO

Las dimensiones del tanque reservorio, se denotan de la forma siguiente:

Ancho del tanque reservorio: L_{TR} (m)

Altura del tanque reservorio: Y_{TR} (m)

Largo del tanque reservorio: X_{TR} (m)

Este tanque tiene la forma de un paralelepípedo abierta en la parte de arriba. Entonces el área de la plancha de acrílico para la construcción de este tanque se denota como A_{PTR} y su valor se debe calcular como se muestra en la siguiente ecuación:

$$A_{PTR} = 1.05(2Y_{TR}L_{TR} + 2X_{TR}Y_{TR} + L_{TR}X_{TR}) \quad (1.103)$$

Se considera un 5% más del área necesaria.

Esta área debe representarse en función de su ancho y largo, los cuales se denotan como L_{PTR} y X_{PTR} , entonces A_{PTR} es:

$$A_{PTR} = L_{PTR} X_{PTR} \quad (1.104)$$

1.13.7. DIMENSIONES DE LA PLANCHA DE ACRÍLICO PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL CANAL

De la misma forma que el tanque reservorio se calcula las dimensiones de la plancha de acrílico para la construcción del canal.

El área de la plancha de acrílico para la construcción del canal se denota como A_{PC} y su valor se debe calcular como se muestra en la siguiente ecuación:

$$A_{PC} = 1.05(2Y_C L_C + 2Y_C L_T + L_T L_C) \quad (1.105)$$

Se considera un 5% más del área necesaria.

Representando esta área en función de su ancho y largo, los cuales se denotan como L_{PC} y X_{PC} , entonces A_{PC} es:

$$A_{PC} = L_{PC} X_{PC} \quad (1.106)$$

CAPÍTULO II: CÁLCULOS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

2.1. CONDICIONES INICIALES A CONSIDERARSE EN EL DISEÑO

Perfil de superficie libre del líquido en el canal completamente desarrollado, es decir no existe espacio para el flujo súper crítico a lo largo del canal donde se realiza las mediciones de z_N y x_N .

Profundidad normal mínima del líquido en el canal: $z_{Nmin} = 0.035\text{m}$

Profundidad normal máxima del líquido en el canal: $z_{Nmax} = 0.11\text{m}$

Caudal que produce la electrobomba: $Ca = 35 \text{ lt /min} = 0.000583 \text{ m}^3/\text{s}$

Altura de elevación: $b = 0.05\text{m} \Rightarrow 0.02(b - 0.05) + 0.003 = 0.003$

Ancho del canal: $L_C = 0.12\text{m}$

Tangente del ángulo de inclinación del canal: S_o

$$S_o = \frac{b}{\sqrt{L^2 - b^2}} = \frac{0.05}{\sqrt{1.5^2 - 0.05^2}} = 0.03335187$$

Ángulo de inclinación del canal: $\theta = 1.91^\circ$

$$\cos\theta = \frac{\sqrt{L^2 - b^2}}{L} = \frac{\sqrt{1.5^2 - 0.05^2}}{1.5} = 0.999444$$

$$\text{sen}\theta = \frac{b}{L} = \frac{0.05}{1.5} = 0.033333$$

$n = 0.012$, $k = 1$

2.2. CÁLCULOS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

2.2.1. CÁLCULO DEL LARGO DEL CANAL DONDE SE REALIZA LAS MEDICIONES DE z_N Y x_N

Se reemplaza los datos de la sección 2.1 (condiciones iniciales a considerarse en el diseño) y se hace uso de las hojas de cálculo de Microsoft Excel aplicándose desde la ecuación (1.83) hasta la ecuación (1.88), para calcular cada valor de Δx_{Ni} . El resumen de este cálculo se muestra en el cuadro 1.

Cuadro N° 01: Resumen del cálculo del largo del canal donde se realiza las mediciones de z_N y x_N

	z_{Ni} (m)	A_i (m ²)	R_{Hi} (m)	Δz_{Ni} (m)	A_{mi} (m ²)	R_{Hmi} (m)	Δx_{Ni} (m)	x_{Ni} (m)
0	0.035	0.004	0.022					0
				0.005	0.005	0.023	0.058	
1	0.04	0.005	0.024					0.058
				0.01	0.005	0.026	0.205	
2	0.05	0.006	0.027					0.263
				0.01	0.007	0.029	0.207	
3	0.06	0.007	0.030					0.471
				0.01	0.008	0.031	0.208	
4	0.07	0.008	0.032					0.679
				0.01	0.009	0.033	0.209	
5	0.08	0.01	0.034					0.888
				0.01	0.010	0.035	0.209	
6	0.09	0.011	0.036					1.097
				0.01	0.011	0.037	0.209	
7	0.1	0.012	0.038					1.306
				0.0095	0.006	0.019	0.194	
8	0.10955							1.500

Fuente: Elaboración propia

Se puede notar en el cuadro N° 01 que si $x_N = 1.5$ m, el correspondiente valor de la profundidad normal del líquido en el canal es $z_N = 0.109555$ m.

También, esto explica que el largo del canal donde se realiza las mediciones de z_N y x_N es $L = x_{Np} = x_{N8} = 1.5$ m y la correspondiente profundidad normal máxima del líquido en el canal es $z_{Nmax} = 0.109555$ m ≈ 0.11 m.

2.2.2. CÁLCULO DEL RANGO DE CAUDAL QUE PRODUCE LA ELECTROBOMBA

Como se puede ver en la sección 2.1, la electrobomba a utilizarse, debe producir como máximo un caudal de 35 lt /min. Cuando se realice los experimentos en el sistema este caudal podrá distribuirse, haciendo que sólo una parte de este entre al canal.

Al consultar información sobre cuáles serían las características de la electrobomba a emplearse, se determina que la electrobomba debe tener una potencia nominal de 1/2 Hp (monofásico) y su curva de operación debe ser como el que se muestra en la figura A1 (anexo1).

$$Ca = 35 \text{ lt /min} , h_A = 2 \text{ m}$$

$$Ca = 30 \text{ lt /min} , h_A = 5 \text{ m}$$

$$Ca = 5 \text{ lt /min} , h_A = 20 \text{ m}$$

De esta información se puede concluir que el rango de operación de la electrobomba es:

$$5 \text{ lt /min} \leq Ca \leq 35 \text{ lt /min} , 2 \text{ m} \leq h_A \leq 20 \text{ m}$$

2.2.3. CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DEL CANAL

Aplicando las ecuaciones (1.101) y (1.102), se tiene:

$$L_R = 0.1L = 0.1 \times 1.5 = 0.15\text{m}$$

$$L_T = L_R + L = 1.1L = 1.1 \times 1.5 = 1.65\text{m} \text{ . (Largo total del canal)}$$

Se asume que el ancho y la altura del canal deben ser: $L_C = 0.12\text{m}$ y $Y_C = 0.2\text{m}$, respectivamente.

2.2.4. CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DE LOS VERTEDEROS

2.2.4.1. Cálculo de las dimensiones del vertedero triangular

Para realizar este cálculo, se asume que el caudal teórico en este vertedero es: $Ca_T = 68 \text{ lt/min} = 0.00133\text{m}^3/\text{s}$. Asumiendo que $\text{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right) = 0.25$, se aplica la ecuación (1.67) para determinar la altura del vertedero h_V

$$h_V = \sqrt[5]{\left(\frac{15Ca_T}{8\sqrt{2g}\text{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)}\right)^2} = \sqrt[5]{\left(\frac{15 \times 0.001333}{8\sqrt{2 \times 9.81} \times 0.25}\right)^2} = 0.082 \text{ m}$$

Esto indica que la altura máxima que el fluido podrá cubrir en este vertedero es 0.082 m. Véase también la figura 3.3a.

2.2.4.2. Cálculo de las dimensiones del vertedero rectangular

Del mismo modo que en el vertedero triangular, en este vertedero se asume que: $Ca_T = 68 \text{ lt/min} = 0.00133\text{m}^3/\text{s}$ y $L_W = 0.015\text{m}$. Se aplica la ecuación (1.69) para determinar h_V .

$$\Rightarrow h_v = \sqrt[3]{\left(\frac{3C_{aT}}{2\sqrt{2g}L_W}\right)^2} = \sqrt[3]{\left(\frac{3 \times 0.00133}{2 \times \sqrt{2 \times 9.81} \times 0.015}\right)^2} = 0.0967\text{m}$$

$$h_v = 0.0967\text{m} \approx 0.1\text{m}$$

Esto indica que la altura máxima que el fluido podrá cubrir en este vertedero es 0.1 m. Véase también la figura 3.3b.

2.2.4.3. Cálculo de las dimensiones del vertedero trapezoidal

Como el vertedero trapezoidal tiene más área que los anteriores vertederos, se asume que: $L_W = 0.02\text{m}$, $h_v = 0.068\text{m}$ y $\text{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right) = \frac{0.011}{0.068} \approx 0.1618$.

Reemplazando estos datos en la ecuación (1.70), se tiene:

$$C_{aT} = \frac{2}{3}\sqrt{2 \times 9.81} \times 0.02 \times (0.068)^{3/2} + \frac{8}{15}\sqrt{2 \times 9.81} \times \left(\frac{0.011}{0.068}\right) \times (0.068)^{5/2}$$

$$C_{aT} = 0.0015\text{m}^3/\text{s} = 90\text{lt}/\text{min}$$

Esto indica, que el caudal teórico máximo en este vertedero es: $C_{aT} = 90\text{lt}/\text{min}$.

Si en caso el caudal en este vertedero, fuera menor al calculado, lo único que variaría sería h_v , obviamente el valor de h_v sería menor que 0.068m.

2.2.5. CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DE LA PLANCHA DE ACRÍLICO PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL TANQUE RESERVORIO

Considerando que: $Y_{TR} = 0.6\text{m}$, $X_{TR} = 0.6\text{m}$ y $L_{TR} = 0.3\text{m}$

Aplicando las ecuaciones (1.103) y (1.104), se tiene:

$$A_{PTR} = 1.05(2 \times 0.6 \times 0.6 + 2 \times 0.3 \times 0.6 + 0.3 \times 0.6) = 1.323 \text{m}^2$$

Considerando que $X_{PTR} = 1.2 \text{m}$

$$1.323 = 1.2L_{PTR} \Rightarrow L_{PTR} = 1.1025 \text{m}$$

2.2.6. CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DE LA PLANCHA DE ACRÍLICO PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL CANAL

Haciendo uso de las ecuaciones (1.105) y (1.106), se tiene:

$$L_C = 0.12 \text{m}, Y_C = 0.2 \text{m} \text{ y } L_T = 1.5 \text{m}$$

$$A_{PC} = 1.05(2 \times 0.2 \times 0.12 + 2 \times 1.65 \times 0.2 + 1.65 \times 0.12) = 0.9513 \text{m}^2$$

Considerando que $X_{PC} = 1.55 \text{m}$

$$0.9513 = 1.55L_{PC} \Rightarrow L_{PC} = 0.6137 \text{m}$$

CAPÍTULO III: CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DEL SISTEMA

3.1. MATERIALES EMPLEADOS

Una plancha de acrílico de 4mm de espesor (1.2m×2m)
Una electrobomba de ½ Hp
Una tubería de 1 pulgada de diámetro (PVC SAP)
Una tubería de 1/2 pulgada de diámetro (PVC SAP)
Una válvula check para tubería de 1/2 de diámetro (vertical con canastilla)
Una válvula de compuerta para tubería de 1 pulgada
Tres válvulas esféricas de PVC para tubería de 1/2 pulgada
Una válvula esférica de PVC para tubería de 1 pulgada
Tres uniones universales PVC para tubería de 1 pulgada
Dos uniones universales PVC para tubería de 1/2 pulgada
Seis adaptadores PVC para tubería de 1 pulgada
Seis adaptadores PVC para tubería de 1/2 pulgada
Tres térs PVC para tubería de 1 pulgada
Tres codos de 90° PVC para tubería de 1 pulgada
Cinco codos de 90° PVC para tubería de 1/2 pulgada
Cuatro reducciones PVC de 1 a 1/2 pulgada
Seis carretes de cinta teflón
Un pegamento para tubo (envase mediano)
Dos siliconas para pegar acrílico
Cinco abrazaderas
Una manguera de alta presión 5/8 de diámetro
Una manguera de alta presión 5/4 de diámetro
Una llave termomagnética de 2x15 amperios
Una caja para sobre poner la llave termomagnética
Un metro de cable vulcanizado 2x14 AWG
Dos metros de alambre mellizo 2x16 AWG

- Un enchufe
- Tres angulares de aluminio de 3/4
- Un riel doble de aluminio
- Una cinta métrica
- Cinco reglas de 20 centímetros
- Un cuarto de galón de pintura esmalte (color verde)
- Un cuarto de galón de pintura esmalte (color negro)
- Estructura metálica

3.2. VISTA ISOMÉTRICA DEL SISTEMA

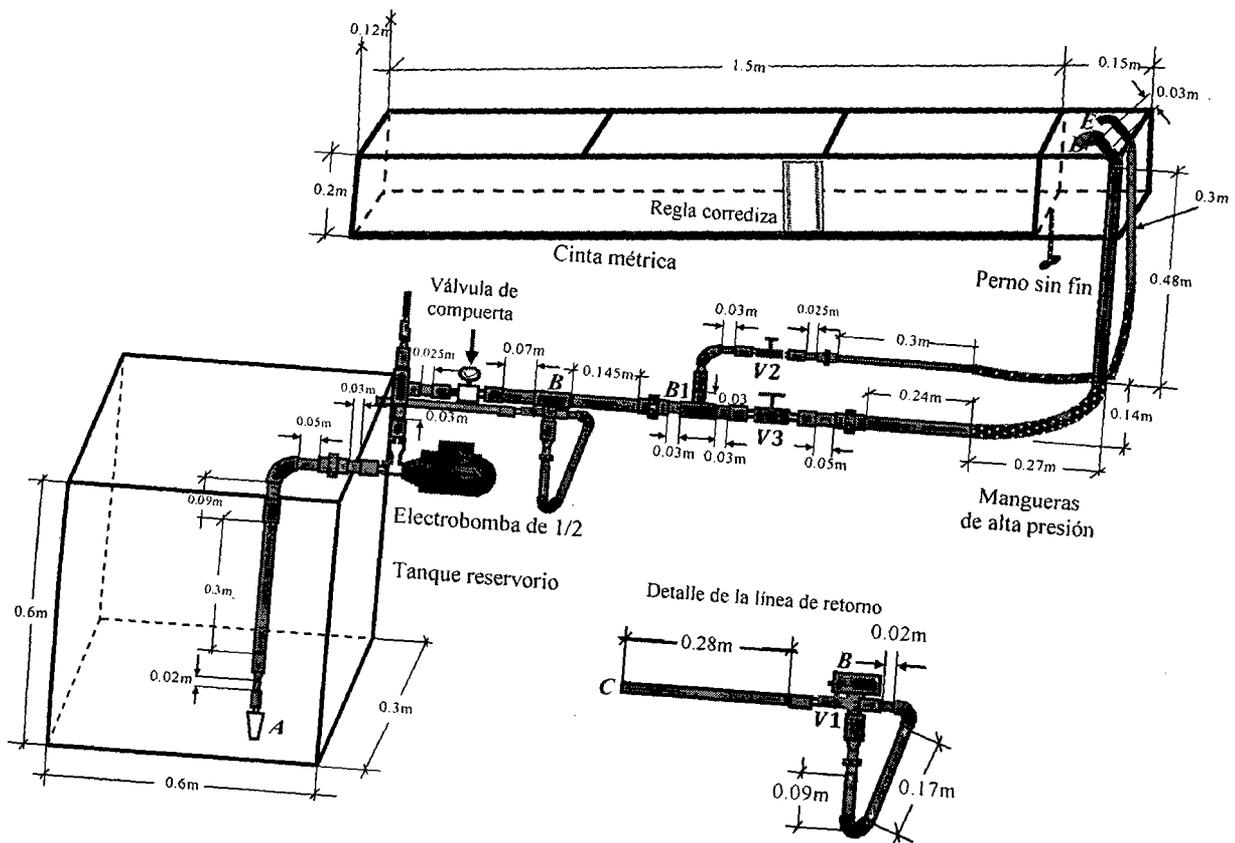


Figura 3.1. Vista isométrica del sistema
Fuente: (Elaboración propia)

Nomenclatura utilizada en la vista isométrica

-  Codo de 90° de 1/2 pulg
-  Válvula esférica de 1/2 pulg
-  Adaptador de 1/2 pulg
-  Adaptador de 1 pulg
-  Válvula esférica de 1/2 pulg
-  Unión universal de 1 pulg
-  Unión universal de 1/2 pulg
-  Reducción de 1 a 1/2 pulg
-  Te de 1 pulg
-  Válvula esférica de 1 pulg
-  Codo de 90° de 1 pulg
-  Válvula check de 1/2 pulg
-  Electrobomba de 1/2 Hp = 0.37 Kw



3.2.1. DETALLE DEL CANAL

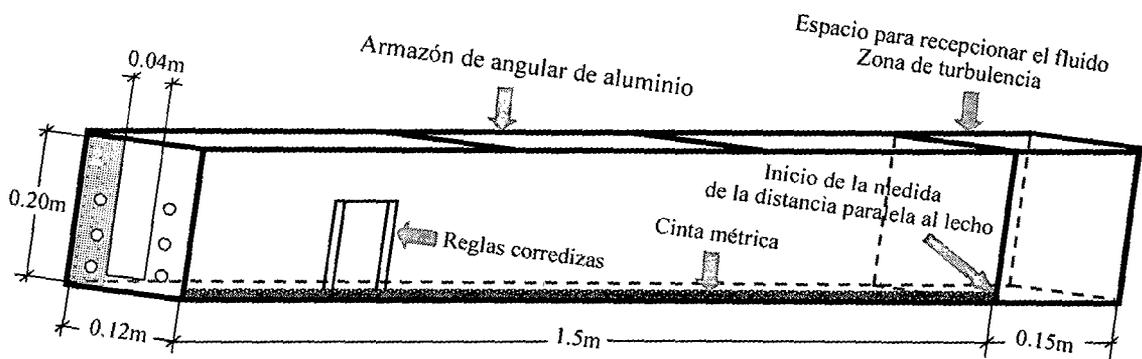


Figura 3.2. Detalle del canal
Fuente: (Elaboración propia)

3.2.2. DETALLE DE LOS VERTEDEROS

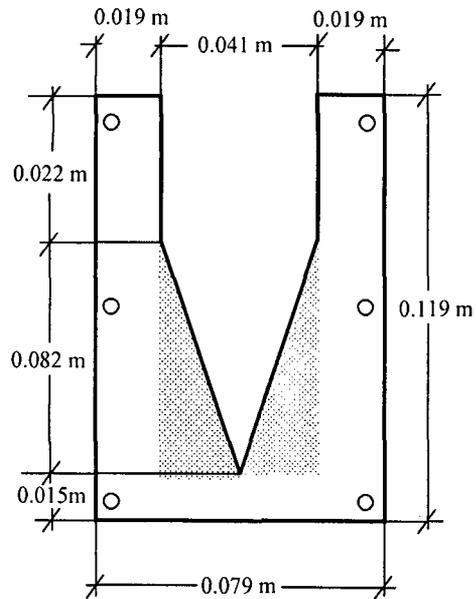


Figura 3.3a. Vertedero triangular

Fuente: (Elaboración propia)

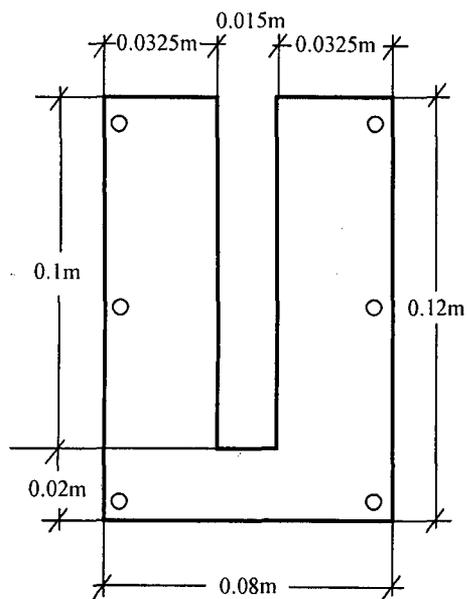


Figura 3.3b. Vertedero rectangular

Fuente: (Elaboración propia)

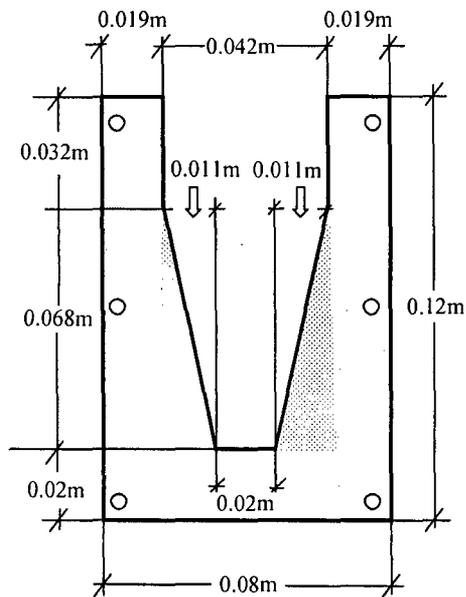


Figura 3.3c. Vertedero trapezoidal

Fuente: (Elaboración propia)

3.3. DESCRIPCIÓN Y ESPECIFICACIÓN DE LOS COMPONENTES PRINCIPALES DEL SISTEMA

3.3.1. TANQUE RESERVORIO

Material: Acrílico

Ancho interior = 0.3m

Largo = 0.6m

Alto = 0.6m

Espesor = 0.004m

3.3.2. LÍNEA DE DISTRIBUCIÓN

3.3.2.1. Tramo AB

Una válvula check para tubería de 1/2 pulgada
Un adaptador PVC para tubería de 1/2 pulgada
Una reducción PVC de 1 a 1/2 pulgada
Un codo de 90° PVC para tubería de 1 pulgada
Una unión universal PVC para tubería de 1 pulgada
Cuatro adaptadores PVC para tubería de 1 pulgada
Dos térs PVC para tubería de 1 pulgada
Una válvula de compuerta de bronce para tubería de 1 pulgada

Tubería recta de 1/2 pulgada

Material: PVC SAP cédula 10

Longitud = 0.02m

Diámetro interno = 0.017m

Diámetro externo = 0.021m

Espesor = 0.002m

Tubería recta de 1 pulgada

Material: PVC SAP cédula 10

Longitud = 0.565m

Diámetro interno = 0.03m

Diámetro externo = 0.034m

Espesor = 0.002m

Electrobomba

Marca: Fuksi

Cantidad: 1

Voltaje: 220–230 voltios

Potencia nominal: 1/2 Hp

Caudal máximo: 35lt/min

Frecuencia: 60Hz

3.3.2.2. Tramo *BC* (línea de retorno)

Una té PVC para tubería de 1 pulgada

Una reducción PVC de 1 a 1/2 pulgada

Una unión universal PVC para tubería de 1/2 pulgada

Dos codos de 90° PVC para tubería de 1/2 pulgada

Dos adaptadores PVC para tubería de 1/2 pulgada

Una válvula esférica de PVC para tubería de 1/2 pulgada

Tubería recta de 1/2 pulgada

Material: PVC SAP cédula 10

Longitud = 0.56m

Diámetro interno = 0.017m

Diámetro externo = 0.021m

Espesor = 0.002m

Notas.

La té que se muestra en el punto *B* de la figura 3.1, es común para los tramos *AB*, *BC*, *BD* y *BD*.

3.3.2.3. Tramo *BD*

Dos té PVC para tubería de 1 pulgada

Dos uniones universales PVC para tubería de 1 pulgada

Una válvula esférica de PVC para tubería de 1 pulgada (**V3**)

Dos adaptadores PVC para tubería de 1 pulgada

Dos codos de 90° PVC para tubería de 1 pulgada

Una manguera de alta presión de 5/8 de pulgada (equivalente a 0,41m de tubería recta de 5/8 de pulgada de diámetro nominal)

Tubería recta de 1 pulgada

Material: PVC SAP cédula 10

Longitud = 0.975m

Diámetro interno = 0.03m

Diámetro externo = 0.034m

Espesor = 0.002m

3.3.2.4. Tramo *BE*

Dos té s PVC para tubería de 1 pulgada

Una unión universal PVC para tubería de 1 pulgada

Una reducción PVC de 1 a 1/2 pulgada

Tres codos de 90° PVC para tubería de 1/2 pulgada

Dos adaptadores PVC para tubería de 1/2 pulgada

Una válvula esférica de PVC para tubería de 1/2 pulgada (**V2**)

Una unión universal PVC para tubería de 1/2 pulgada

Una manguera de alta presión de 5/4 de pulgada (equivalente a 0,49m de tubería recta de 5/4 de pulgada de diámetro nominal)

Tubería recta de 1 pulgada

Material: PVC SAP cédula 10

Longitud = 0.175m

Diámetro interno = 0.03m

Diámetro externo = 0.034m

Espesor = 0.002m

Tubería recta de 1/2 pulgada

Material: PVC SAP cédula 10

Longitud = 0.355m

Diámetro interno = 0.017m

Diámetro externo = 0.021m

Espesor = 0.002m

3.3.3. CANAL

Material: Acrílico

Largo total = 1.65m

Espacio para recepción del fluido = 0.15m

Espacio para medir la distancia paralela al lecho = 1.5m

Ancho interior = 0.12m

Alto = 0.2m

3.3.4. VERTEDEROS

Material: Acrílico

Espesor = 0.004m (para los tres vertederos)

Los demás datos, se muestran en las figuras 3.3.

3.3.5. INSTALACIÓN ELÉCTRICA

3.3.5.1. Llave termomagnética

Corriente = 2x15 Amperios

3.3.5.2. Cablería

Cable vulcanizado 2x14 = 1m

Alambre mellizo 2x16 = 2m

3.3.5.3. Enchufe

Bipolar monofásico 220V

3.4. DISPOSICIÓN ADECUADA DEL SISTEMA EN EL LABORATORIO

Para trabajar cómodamente el sistema se debe ubicar en un lugar que tenga las siguientes dimensiones:

Largo = 4 m

Ancho = 4 m

Alto = 3m

Además, este lugar debe contar por lo menos con lo siguiente:

- Un grifo para el suministro de agua al tanque reservorio del sistema
- Un tomacorriente bipolar (220V) para conectar el enchufe de la electrobomba

CAPÍTULO IV: EVALUACIÓN DE LAS VARIABLES DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

4.1. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

El sistema inicia su funcionamiento con el encendido de la electrobomba. Como se mencionó en la sección 1.8, esta componente de la línea distribución tiene por función mantener el flujo de fluido continuo y permanente en el sistema.

Cuando la electrobomba bombea el fluido desde el punto *A* hasta los puntos *C* y *E*, la válvula *V*₃ se mantiene cerrada y el fluido sólo fluye por los tramos *AE* y *BC*. El fluido ingresa al canal por el punto *E* y retorna al tanque reservorio por el punto *C*

El fluido se receptiona en el canal en un espacio de 0.15m de largo y seguidamente entra a la zona donde se realiza las mediciones de *z*_{*N*} y *x*_{*N*}. La medición de *z*_{*N*} se realiza mediante las reglas corredizas y *x*_{*N*} mediante la cinta métrica. Además, el sistema posee un mecanismo que hace que se le dé un ángulo de inclinación al canal y se mantenga en esta inclinación mientras se realiza las mediciones de *z*_{*N*} y *x*_{*N*}. Ver figura 3.2.

El fluido termina su recorrido en el canal cuando atraviesa el vertedero y sale a través de este último, retornando al tanque reservorio, de esta forma el flujo de fluido en el sistema es continuo.

Cuando la electrobomba bombea el fluido desde el punto *A* hasta el punto *D*, se abre la válvula *V*₃ y las válvulas *V*₁ y *V*₂ se mantienen cerradas, entonces el fluido sólo fluye por el tramo *AD*. El fluido ingresa al canal por el punto *D*. De la misma forma que en el caso anterior el fluido entra al canal y llega al tanque reservorio, manteniéndose el flujo de fluido continuo.

En ambos casos, se le puede dar un ángulo de inclinación al canal y colocar cualquiera de los tres vertederos.



4.2. ENSAYOS Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

Se realizaron 4 pruebas para cada vertedero.

4.2.1. COLOCANDO EL VERTEDERO RECTANGULAR

Primera prueba

Se fijo $b = 0.05\text{m}$. (Altura de inclinación del canal)

Se hizo que el fluido fluya, sólo por los tramos AE y BC

Segunda prueba

Se fijo $b = 0.05\text{m}$. (Altura de inclinación del canal)

Se hizo que el fluido fluya, sólo por el tramo AD

Tercera prueba

Se fijo $b = 0.075\text{m}$. (Altura de inclinación del canal)

Se hizo que el fluido fluya, sólo por los tramos AE y BC

Cuarta prueba

Se fijo $b = 0.075\text{m}$. (Altura de inclinación del canal)

Se hizo que el fluido fluya, sólo por el tramo AD

4.2.2. COLOCANDO EL VERTEDERO TRIANGULAR

Primera prueba

Se fijo $b = 0.05\text{m}$. (Altura de inclinación del canal)

Se hizo que el fluido fluya, sólo por los tramos AE y BC

Segunda prueba

Se fijo $b = 0.05\text{m}$. (Altura de inclinación del canal)

Se hizo que el fluido fluya, sólo por el tramo AD

Tercera prueba

Se fijo $b = 0.075\text{m}$. (Altura de inclinación del canal)

Se hizo que el fluido fluya, sólo por los tramos AE y BC

Cuarta prueba

Se fijo $b = 0.075\text{m}$. (Altura de inclinación del canal)

Se hizo que el fluido fluya, sólo por el tramo AD

4.2.3. COLOCANDO EL VERTEDERO TRAPEZOIDAL

Primera prueba

Se fijo $b = 0.05\text{m}$. (Altura de inclinación del canal)

Se hizo que el fluido fluya, sólo por los tramos AE y BC

Segunda prueba

Se fijo $b = 0.05\text{m}$. (Altura de inclinación del canal)

Se hizo que el fluido fluya, sólo por el tramo AD

Tercera prueba

Se fijo $b = 0.075\text{m}$. (Altura de inclinación del canal)

Se hizo que el fluido fluya, sólo por los tramos AE y BC

Cuarta prueba

Se fijo $b = 0.075\text{m}$. (Altura de inclinación del canal)

Se hizo que el fluido fluya, sólo por el tramo AD

4.3. CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

4.3.1. CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EN LA ELABORACIÓN DEL PERFIL DE SUPERFICIE LIBRE DEL LÍQUIDO EN EL CANAL

Básicamente lo que se hizo en esta sección, fue tomar las medidas de z_N y x_N y se realizaron los cálculos haciendo uso de las ecuaciones (1.90) y (1.93) mediante hojas de cálculo de Microsoft Excel. Estos cálculos se realizaron para hacer la transformación de coordenadas de (x_N, z_N) a (x, z)

VERTEDERO RECTANGULAR

Primera prueba

Caudal en el canal: $Ca_{p1} = 21.09 \text{ lt/min} = 0.0003515 \text{ m}^3/\text{s}$

Altura de elevación: $b_1 = 0.05\text{m} \Rightarrow 0.02(b_1 - 0.05) + 0.003 = 0.003$

Tangente del ángulo de inclinación del canal: S_{o1}

$$S_{o1} = \frac{b_1}{\sqrt{L^2 - b_1^2}} = \frac{0.05}{\sqrt{1.5^2 - 0.05^2}} = 0.03335187$$

Ángulo de inclinación del canal: $\theta_1 = 1.91^\circ$

$$\cos\theta_1 = \frac{\sqrt{L^2 - b_1^2}}{L} = \frac{\sqrt{1.5^2 - 0.05^2}}{1.5} = 0.999444$$

$$\text{sen}\theta_1 = \frac{b_1}{L} = \frac{0.05}{1.5} = 0.033333$$

Cuadro N° 02: Resumen del cálculo de la transformación de coordenadas de (x_N, z_N) a (x, z) , para la primera prueba colocando el vertedero rectangular

	z_{Ni} (m)	x_{Ni} (m)	x_i (m)	z_i (m)
0	0.02	0.328	0.32848439	0.05905555
1	0.03	0.503	0.50372048	0.06321666
2	0.04	0.699	0.69994489	0.06667777
3	0.05	0.893	0.89417042	0.07020555
4	0.06	1.072	1.07340428	0.07423332
5	0.07	1.248	1.24963981	0.0783611
6	0.08	1.481	1.48284366	0.08058888
7	0.082	1.498	1.49990088	0.0820211

Fuente: Elaboración propia

La gráfica de x versus z , se muestra en la figura A2

Segunda prueba

Caudal en el canal: $Ca_{p2} = 34.8 \text{ lt/min} = 0.00058 \text{ m}^3/\text{s}$

Altura de elevación: $b_1 = 0.05\text{m} \Rightarrow 0.02(b_1 - 0.05) + 0.003 = 0.003$

Tangente del ángulo de inclinación del canal: S_{o1}

$$S_{o1} = \frac{b_1}{\sqrt{L^2 - b_1^2}} = \frac{0.05}{\sqrt{1.5^2 - 0.05^2}} = 0.03335187$$

Ángulo de inclinación del canal: $\theta_1 = 1.91^\circ$

$$\cos\theta_1 = \frac{\sqrt{L^2 - b_1^2}}{L} = \frac{\sqrt{1.5^2 - 0.05^2}}{1.5} = 0.999444$$

$$\text{sen}\theta_1 = \frac{b_1}{L} = \frac{0.05}{1.5} = 0.033333$$

Cuadro N° 03: Resumen del cálculo de la transformación de coordenadas de (x_N, z_N) a (x, z) , para la segunda prueba colocando el vertedero rectangular

	z_{Ni} (m)	x_{Ni} (m)	x_i (m)	z_i (m)
0	0.03	0.185	0.18589719	0.07381666
1	0.04	0.405	0.40610827	0.07647777
3	0.05	0.59	0.5913388	0.08030555
4	0.06	0.773	0.77457044	0.08419999
5	0.07	0.972	0.97379318	0.0875611
6	0.08	1.154	1.15602538	0.09148888
7	0.09	1.387	1.38922923	0.09371665
8	0.095	1.5	1.5023331	0.09494721

Fuente: Elaboración propia

La gráfica de x versus z , se muestra en la figura A3

Tercera prueba

Caudal en el canal: $Ca_{p3} = 21.06 \text{ lt/min} = 0.000351 \text{ m}^3/\text{s}$

Altura de elevación: $b_2 = 0.075\text{m} \Rightarrow 0.02(b_2 - 0.05) + 0.003 = 0.0035$

Tangente del ángulo de inclinación del canal: S_{o2}

$$S_{o2} = \frac{b_2}{\sqrt{L^2 - b_2^2}} = \frac{0.075}{\sqrt{1.5^2 - 0.075^2}} = 0.050062617$$

Ángulo de inclinación del canal: $\theta_2 = 2.866^\circ$

$$\cos\theta_2 = \frac{\sqrt{L^2 - b_2^2}}{L} = \frac{\sqrt{1.5^2 - 0.075^2}}{1.5} = 0.99874922$$

$$\text{sen}\theta_2 = \frac{b_2}{L} = \frac{0.075}{1.5} = 0.05$$

Cuadro N° 04: Resumen del cálculo de la transformación de coordenadas de (x_N, z_N) a (x, z) , para la tercera prueba colocando el vertedero rectangular

	z_{Ni} (m)	x_{Ni} (m)	x_i (m)	z_i (m)
0	0.02	0.665	0.66516823	0.06172498
1	0.03	0.768	0.7685394	0.06656248
2	0.04	0.894	0.8948818	0.07024997
3	0.05	1.039	1.04020044	0.07298746
4	0.06	1.182	1.18352158	0.07582495
5	0.07	1.326	1.32784146	0.07861245
6	0.08	1.5	1.50212383	0.07989994

Fuente: Elaboración propia

La gráfica de x versus z , se muestra en la figura A4

Cuarta prueba

Caudal en el canal: $Ca_{p4} = 35.8 \text{ lt/min} = 0.00059667 \text{ m}^3/\text{s}$

Altura de elevación: $b_2 = 0.075\text{m} \Rightarrow 0.02(b_2 - 0.05) + 0.003 = 0.0035$

Tangente del ángulo de inclinación del canal: S_{o2}

$$S_{o2} = \frac{b_2}{\sqrt{L^2 - b_2^2}} = \frac{0.075}{\sqrt{1.5^2 - 0.075^2}} = 0.050062617$$

Ángulo de inclinación del canal: $\theta_2 = 2.866^\circ$

$$\cos\theta_2 = \frac{\sqrt{L^2 - b_2^2}}{L} = \frac{\sqrt{1.5^2 - 0.075^2}}{1.5} = 0.99874922$$

$$\text{sen}\theta_2 = \frac{b_2}{L} = \frac{0.075}{1.5} = 0.05$$

Cuadro N° 05: Resumen del cálculo de la transformación de coordenadas de (x_N, z_N) a (x, z) , para la cuarta prueba colocando el vertedero rectangular

	z_{Ni} (m)	x_{Ni} (m)	x_i (m)	z_i (m)
0	0.02	0.51	0.5103621	0.06947498
1	0.03	0.58	0.58077455	0.07596248
2	0.04	0.691	0.69213571	0.08039997
3	0.05	0.83	0.83146185	0.08343746
4	0.06	0.955	0.9568055	0.08717495
5	0.07	1.105	1.10711789	0.08966245
6	0.08	1.254	1.25643152	0.09219994
7	0.09	1.425	1.42771764	0.09363743
8	0.095	1.5	1.50287383	0.09488118

Fuente: Elaboración propia

La gráfica de x versus z , se muestra en la figura A5

VERTEDERO TRIANGULAR

Primera prueba

Caudal en el canal: $Ca_{p1} = 21.47 \text{ lt/min} = 0.00035783 \text{ m}^3/\text{s}$

Altura de elevación: $b_1 = 0.05\text{m} \Rightarrow 0.02(b_1 - 0.05) + 0.003 = 0.003$

Tangente del ángulo de inclinación del canal: S_{o1}

$$S_{o1} = \frac{b_1}{\sqrt{L^2 - b_1^2}} = \frac{0.05}{\sqrt{1.5^2 - 0.05^2}} = 0.03335187$$

Ángulo de inclinación del canal: $\theta_1 = 1.91^\circ$

$$\cos\theta_1 = \frac{\sqrt{L^2 - b_1^2}}{L} = \frac{\sqrt{1.5^2 - 0.05^2}}{1.5} = 0.999444$$

$$\text{sen}\theta_1 = \frac{b_1}{L} = \frac{0.05}{1.5} = 0.033333$$

Cuadro N° 06: Resumen del cálculo de la transformación de coordenadas de (x_N, z_N) a (x, z) , para la primera prueba colocando el vertedero triangular

	z_{Ni} (m)	x_{Ni} (m)	x_i (m)	z_i (m)
0	0.02	0	0.00066667	0.06998889
1	0.03	0.19	0.19089442	0.07365
2	0.04	0.374	0.3751255	0.0775111
3	0.05	0.565	0.56635269	0.08113888
4	0.06	0.748	0.74958433	0.08503332
5	0.07	0.918	0.91982319	0.0893611
6	0.08	1.132	1.1340376	0.09222221
7	0.09	1.325	1.32726368	0.09578332
8	0.096	1.5	1.50236644	0.09594665

Fuente: Elaboración propia

La gráfica de x versus z , se muestra en la figura A6

Segunda prueba

Caudal en el canal: $Ca_{p2} = 34.47 \text{ lt/min} = 0.0005745 \text{ m}^3/\text{s}$

Altura de elevación: $b_1 = 0.05\text{m} \Rightarrow 0.02(b_1 - 0.05) + 0.003 = 0.003$

Tangente del ángulo de inclinación del canal: S_{o1}

$$S_{o1} = \frac{b_1}{\sqrt{L^2 - b_1^2}} = \frac{0.05}{\sqrt{1.5^2 - 0.05^2}} = 0.03335187$$

Ángulo de inclinación del canal: $\theta_1 = 1.91^\circ$

$$\cos\theta_1 = \frac{\sqrt{L^2 - b_1^2}}{L} = \frac{\sqrt{1.5^2 - 0.05^2}}{1.5} = 0.999444$$

$$\text{sen}\theta_1 = \frac{b_1}{L} = \frac{0.05}{1.5} = 0.033333$$



Cuadro N° 07: Resumen del cálculo de la transformación de coordenadas de (x_N, z_N) a (x, z) , para la segunda prueba colocando el vertedero triangular

	$z_{Ni}(m)$	$x_{Ni}(m)$	$x_i(m)$	$z_i(m)$
0	0.03	0.024	0.02498666	0.07918333
1	0.04	0.147	0.14825164	0.08507777
2	0.05	0.342	0.34347661	0.08857221
3	0.06	0.538	0.53970103	0.09203332
4	0.07	0.715	0.716936	0.09612777
5	0.08	0.895	0.89716931	0.10012221
6	0.09	1.099	1.10138927	0.10331665
7	0.1	1.307	1.30960702	0.10637776
8	0.108	1.5	1.50276644	0.10793998

Fuente: Elaboración propia

La gráfica de x versus z , se muestra en la figura A7

Tercera prueba

Caudal en el canal: $Ca_{p3} = 18.66 \text{ lt/min} = 0.000311 \text{ m}^3/\text{s}$

Altura de elevación: $b_2 = 0.075\text{m} \Rightarrow 0.02(b_2 - 0.05) + 0.003 = 0.0035$

Tangente del ángulo de inclinación del canal: S_{o2}

$$S_{o2} = \frac{b_2}{\sqrt{L^2 - b_2^2}} = \frac{0.075}{\sqrt{1.5^2 - 0.075^2}} = 0.050062617$$

Ángulo de inclinación del canal: $\theta_2 = 2.866^\circ$

$$\cos\theta_2 = \frac{\sqrt{L^2 - b_2^2}}{L} = \frac{\sqrt{1.5^2 - 0.075^2}}{1.5} = 0.99874922$$

$$\text{sen}\theta_2 = \frac{b_2}{L} = \frac{0.075}{1.5} = 0.05$$

Cuadro N° 08: Resumen del cálculo de la transformación de coordenadas de (x_N, z_N) a (x, z) , para la tercera prueba colocando el vertedero triangular

	$z_{Ni}(\text{m})$	$x_{Ni}(\text{m})$	$x_i(\text{m})$	$z_i(\text{m})$
0	0.02	0.502	0.50237211	0.06987498
1	0.03	0.571	0.5717858	0.07641248
2	0.04	0.715	0.71610569	0.07919997
3	0.05	0.856	0.85742933	0.08213746
4	0.06	0.994	0.99575672	0.08522495
5	0.07	1.143	1.14507036	0.08776245
6	0.08	1.289	1.29138774	0.09044994
7	0.09	1.448	1.45068887	0.09248743
8	0.093	1.5	1.50277383	0.09288368

Fuente: Elaboración propia

La gráfica de x versus z , se muestra en la figura A8

Cuarta prueba

Caudal en el canal: $Ca_{p4} = 34.56 \text{ lt/min} = 0.000576 \text{ m}^3/\text{s}$

Altura de elevación: $b_2 = 0.075\text{m} \Rightarrow 0.02(b_2 - 0.05) + 0.003 = 0.0035$

Tangente del ángulo de inclinación del canal: S_{o2}

$$S_{o2} = \frac{b_2}{\sqrt{L^2 - b_2^2}} = \frac{0.075}{\sqrt{1.5^2 - 0.075^2}} = 0.050062617$$

Ángulo de inclinación del canal: $\theta_2 = 2.866^\circ$

$$\cos\theta_2 = \frac{\sqrt{L^2 - b_2^2}}{L} = \frac{\sqrt{1.5^2 - 0.075^2}}{1.5} = 0.99874922$$

$$\text{sen}\theta_2 = \frac{b_2}{L} = \frac{0.075}{1.5} = 0.05$$

Cuadro N° 09: Resumen del cálculo de la transformación de coordenadas de (x_N, z_N) a (x, z) , para la cuarta prueba colocando el vertedero triangular

	z_{Ni} (m)	x_{Ni} (m)	x_i (m)	z_i (m)
0	0.02	0.303	0.30362101	0.07982498
1	0.03	0.356	0.35705472	0.08716248
2	0.04	0.485	0.48639337	0.09069997
3	0.05	0.612	0.61373452	0.09433746
4	0.06	0.757	0.75905316	0.09707495
5	0.07	0.9	0.9023743	0.09991245
6	0.08	1.037	1.03970294	0.10304994
7	0.09	1.181	1.18402283	0.10583743
8	0.1	1.358	1.36130144	0.10697492
9	0.108	1.5	1.50352383	0.10786492

Fuente: Elaboración propia

La gráfica de x versus z , se muestra en la figura A9

VERTEDERO TRAPEZOIDAL

Primera prueba

Caudal en el canal: $Ca_{p1} = 18.28 \text{ lt/min} = 0.000304667 \text{ m}^3/\text{s}$

Altura de elevación: $b_1 = 0.05\text{m} \Rightarrow 0.02(b_1 - 0.05) + 0.003 = 0.003$

Tangente del ángulo de inclinación del canal: S_{o1}

$$S_{o1} = \frac{b_1}{\sqrt{L^2 - b_1^2}} = \frac{0.05}{\sqrt{1.5^2 - 0.05^2}} = 0.03335187$$

Ángulo de inclinación del canal: $\theta_1 = 1.91^\circ$

$$\cos\theta_1 = \frac{\sqrt{L^2 - b_1^2}}{L} = \frac{\sqrt{1.5^2 - 0.05^2}}{1.5} = 0.999444$$

$$\text{sen}\theta_1 = \frac{b_1}{L} = \frac{0.05}{1.5} = 0.033333$$

Cuadro N° 10: Resumen del cálculo de la transformación de coordenadas de (x_N, z_N) a (x, z) , para la primera prueba colocando el vertedero trapezoidal

	$z_{Ni}(\text{m})$	$x_{Ni}(\text{m})$	$x_i(\text{m})$	$z_i(\text{m})$
0	0.02	0.461	0.46141048	0.05462222
1	0.03	0.655	0.65563601	0.05815
2	0.04	0.837	0.8378682	0.06207777
3	0.05	1.013	1.01410373	0.06620555
4	0.06	1.212	1.21332648	0.06956666
5	0.07	1.456	1.45752422	0.07142777
6	0.073	1.5	1.50159977	0.07295943

Fuente: Elaboración propia

La gráfica de x versus z , se muestra en la figura A10

Segunda prueba

Caudal en el canal: $Ca_{p2} = 32.4 \text{ lt/min} = 0.00054 \text{ m}^3/\text{s}$

Altura de elevación: $b_1 = 0.05\text{m} \Rightarrow 0.02(b_1 - 0.05) + 0.003 = 0.003$

Tangente del ángulo de inclinación del canal: S_{o1}

$$S_{o1} = \frac{b_1}{\sqrt{L^2 - b_1^2}} = \frac{0.05}{\sqrt{1.5^2 - 0.05^2}} = 0.03335187$$

Ángulo de inclinación del canal: $\theta_1 = 1.91^\circ$

$$\cos\theta_1 = \frac{\sqrt{L^2 - b_1^2}}{L} = \frac{\sqrt{1.5^2 - 0.05^2}}{1.5} = 0.999444$$

$$\text{sen}\theta_1 = \frac{b_1}{L} = \frac{0.05}{1.5} = 0.033333$$

Cuadro N° 11: Resumen del cálculo de la transformación de coordenadas de (x_N, z_N) a (x, z) , para la segunda prueba colocando el vertedero trapezoidal

	$z_{Ni}(\text{m})$	$x_{Ni}(\text{m})$	$x_i(\text{m})$	$z_i(\text{m})$
0	0.02	0.38	0.3804555	0.05732222
1	0.03	0.472	0.4727377	0.06425
2	0.04	0.623	0.62398713	0.0692111
3	0.05	0.807	0.80821821	0.07307221
4	0.06	1.012	1.01343762	0.07623332
5	0.07	1.2	1.20166648	0.0799611
6	0.08	1.426	1.42787422	0.08242221
7	0.083	1.5	1.5019331	0.08295388

Fuente: Elaboración propia

La gráfica de x versus z , se muestra en la figura A11

Tercera prueba

Caudal en el canal: $Ca_{p3} = 22.2 \text{ lt/min} = 0.00037 \text{ m}^3/\text{s}$

Altura de elevación: $b_2 = 0.075\text{m} \Rightarrow 0.02(b_2 - 0.05) + 0.003 = 0.0035$

Tangente del ángulo de inclinación del canal: S_{o2}

$$S_{o2} = \frac{b_2}{\sqrt{L^2 - b_2^2}} = \frac{0.075}{\sqrt{1.5^2 - 0.075^2}} = 0.050062617$$

Ángulo de inclinación del canal: $\theta_2 = 2.866^\circ$

$$\cos\theta_2 = \frac{\sqrt{L^2 - b_2^2}}{L} = \frac{\sqrt{1.5^2 - 0.075^2}}{1.5} = 0.99874922$$

$$\text{sen}\theta_2 = \frac{b_2}{L} = \frac{0.075}{1.5} = 0.05$$

Cuadro N° 12: Resumen del cálculo de la transformación de coordenadas de (x_N, z_N) a (x, z) , para la tercera prueba colocando el vertedero trapezoidal

	$z_{Ni}(\text{m})$	$x_{Ni}(\text{m})$	$x_i(\text{m})$	$z_i(\text{m})$
0	0.02	0.715	0.71510569	0.05922498
1	0.03	0.818	0.81847686	0.06406248
2	0.04	0.956	0.95680425	0.06714997
3	0.05	1.092	1.09313415	0.07033746
4	0.06	1.257	1.25842777	0.07207495
5	0.07	1.407	1.40874015	0.07456245
6	0.075	1.5	1.50187383	0.07490619

Fuente: Elaboración propia

La gráfica de x versus z , se muestra en la figura A12

Cuarta prueba

Caudal en el canal: $Ca_{p4} = 34.26 \text{ lt/min} = 0.000571 \text{ m}^3/\text{s}$

Altura de elevación: $b_2 = 0.075\text{m} \Rightarrow 0.02(b_2 - 0.05) + 0.003 = 0.0035$

Tangente del ángulo de inclinación del canal: S_{o2}

$$S_{o2} = \frac{b_2}{\sqrt{L^2 - b_2^2}} = \frac{0.075}{\sqrt{1.5^2 - 0.075^2}} = 0.050062617$$

Ángulo de inclinación del canal: $\theta_2 = 2.866^\circ$

$$\cos\theta_2 = \frac{\sqrt{L^2 - b_2^2}}{L} = \frac{\sqrt{1.5^2 - 0.075^2}}{1.5} = 0.99874922$$

$$\text{sen}\theta_2 = \frac{b_2}{L} = \frac{0.075}{1.5} = 0.05$$

Cuadro N° 13: Resumen del cálculo de la transformación de coordenadas de (x_N, z_N) a (x, z) , para la cuarta prueba colocando el vertedero trapezoidal

	$z_{Ni}(\text{m})$	$x_{Ni}(\text{m})$	$x_i(\text{m})$	$z_i(\text{m})$
0	0.03	0.724	0.72459443	0.06876248
1	0.04	0.836	0.83695435	0.07314997
2	0.05	0.975	0.97628049	0.07618746
3	0.06	1.121	1.12259787	0.07887495
4	0.07	1.275	1.27690525	0.08116245
5	0.08	1.447	1.44919012	0.08254994
6	0.083	1.5	1.50227383	0.08289619

Fuente: Elaboración propia

La gráfica de x versus z , se muestra en la figura A13.

Se puede notar de los resultados obtenidos, que si se fija una inclinación para el canal y se trabaja con dos caudales, a mayor caudal la altura normal máxima aumenta, esto se puede ver si se relacionan las pruebas (primera y segunda) y (tercera y cuarta) para cada vertedero.

Por ejemplo, en el vertedero trapezoidal:

En la primera prueba se fija $b_1 = 0.05\text{m}$, obteniéndose el caudal práctico y la altura normal máxima en el canal: $Ca_{p1} = 18.28 \text{ lt/min}$ y $z_{Nmax} = 0.073 \text{ m}$, respectivamente.

En la segunda prueba se fija $b_2 = 0.05\text{m}$, obteniéndose el caudal práctico y la altura normal máxima en el canal: $Ca_{p2} = 32.4 \text{ lt/min}$ y $z_{Nmax} = 0.083 \text{ m}$, respectivamente.

Otra observación que se puede realizar, es que si se aumenta el caudal en el canal, manteniendo la misma inclinación, el espacio para la zona sub crítica es mayor cuando se trabaja con el caudal mayor, esto también se puede ver si se relacionan las pruebas (primera y segunda) y (tercera y cuarta) para cada vertedero.

Por ejemplo, en el vertedero rectangular:

En la tercera prueba se fija $b_2 = 0.075\text{m}$, obteniéndose el caudal práctico y el espacio de la zona sub crítica en el canal: $Ca_{p3} = 21.06 \text{ lt/min}$ y $L - x_{N0} = (1.5 - 0.665)\text{m} = 0.835 \text{ m}$, respectivamente.

En la cuarta prueba se fija $b_2 = 0.075\text{m}$, obteniéndose el caudal práctico y el espacio de la zona sub crítica en el canal: $Ca_{p4} = 35.8 \text{ lt/min}$ y $L - x_{N0} = (1.5 - 0.51)\text{m} = 0.99 \text{ m}$, respectivamente.

Si se fija dos inclinaciones para el canal y se trabaja aproximadamente con el mismo caudal, la altura normal máxima en el canal se mantiene casi constante, pero el espacio para la zona sub crítica es menor cuando se fija la mayor inclinación para el canal, esto se puede ver si se relacionan las pruebas (primera y tercera) y (segunda y cuarta) para cada vertedero.

Por ejemplo, en el vertedero triangular:

En la segunda prueba se fija $b_1 = 0.05\text{m}$, obteniéndose el caudal práctico, la altura normal máxima en el canal y el espacio de la zona sub crítica en el canal: $Ca_{p2} = 34.47\text{ lt/min}$, $z_{Nmax} = 0.108\text{ m}$ y $L - x_{N0} = (1.5 - 0.024)\text{m} = 1.476\text{ m}$, respectivamente.

En la cuarta se fija $b_2 = 0.075\text{m}$, obteniéndose el caudal práctico, la altura normal máxima en el canal y el espacio de la zona sub crítica en el canal: $Ca_{p4} = 34.56\text{ lt/min}$, $z_{Nmax} = 0.108\text{ m}$ y $L - x_{N0} = (1.5 - 0.303)\text{m} = 1.197\text{ m}$, respectivamente.

4.3.2. CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS PARA LA EVALUACIÓN DEL COEFICIENTE DE DESCARGA EN CADA VERTEDERO

Para evaluar el coeficiente de descarga en cada vertedero, primeramente se mide la altura del líquido h_v en cada vertedero para las cuatro pruebas, seguidamente se calcula los respectivos caudales teóricos haciendo uso de las ecuaciones (1.67), (1.69) y (1.70), mediante hojas de cálculo de Microsoft Excel.

Después se puede tomar dos caudales y como se mencionó en la sección (1.10) se hace uso de la ecuación (1.95)

VERTEDERO TRIANGULAR

Primera y segunda prueba

Cuadro N° 14: Resumen del cálculo del coeficiente de descarga en el vertedero triangular

	h_V (m)	Ca_T (lt/min)	Ca_P (lt/min)	Cd
1	0.061	32.56597432	21.47	0.704425605
2	0.073	51.02072655	34.47	

Fuente: Elaboración propia

Tercera y cuarta prueba

Cuadro N° 15: Resumen del cálculo del coeficiente de descarga en el vertedero triangular

	h_V (m)	Ca_T (lt/min)	Ca_P (lt/min)	Cd
3	0.058	28.70843197	18.66	0.712611603
4	0.073	51.02072655	34.56	

Fuente: Elaboración propia

Se hizo uso de la ecuación (1.67)

El valor promedio del coeficiente de descarga para las pruebas (1-2) y (3-4) es:

$$Cd_{prom} = \frac{0.704425605 + 0.712611603}{2} = 0.7085$$

VERTEDERO RECTANGULAR

Primera y segunda prueba

Cuadro N° 16: Resumen del cálculo del coeficiente de descarga en el vertedero rectangular

	h_v (m)	Ca_T (lt/min)	Ca_P (lt/min)	Cd
1	0.042	22.87571554	21.09	1.20214671
2	0.055	34.28031359	34.8	

Fuente: Elaboración propia

Tercera y cuarta prueba

Cuadro N° 17: Resumen del cálculo del coeficiente de descarga en el vertedero rectangular

	h_v (m)	Ca_T (lt/min)	Ca_P (lt/min)	Cd
3	0.04	21.26134521	21.06	1.13219416
4	0.055	34.28031359	35.8	

Fuente: Elaboración propia

Se hizo uso de la ecuación (1.69)

El valor promedio del coeficiente de descarga para las pruebas (1-2) y (3-4) es:

$$Cd_{prom} = \frac{1.20214671 + 1.13219416}{2} = 1.167170435$$



VERTEDERO TRAPEZOIDAL

Primera y segunda prueba

Cuadro N° 18: Resumen del cálculo del coeficiente de descarga en el vertedero trapezoidal

	h_V (m)	Ca_T (lt/min)	Ca_P (lt/min)	Cd
1	0.033	25.77868175	18.28	0.96650256
2	0.043	40.38805852	32.4	

Fuente: Elaboración propia

Tercera y Cuarta prueba

Cuadro N° 19: Resumen del cálculo del coeficiente de descarga en el vertedero trapezoidal

	h_V (m)	Ca_T (lt/min)	Ca_P (lt/min)	Cd
3	0.035	28.45762767	22.2	1.01086039
4	0.043	40.38805852	34.26	

Fuente: Elaboración propia

Se hizo uso de la ecuación (1.70)

$$Cd_{prom} = \frac{0.96650256 + 1.01086039}{2} = 0.988681474$$

Los coeficientes de descarga para cada vertedero, que se obtengan posteriormente en otros experimentos que se realicen en el sistema, no deben desviarse más de un 5% de los valores promedios que se obtuvo en las pruebas. Por ejemplo, si al realizar dos pruebas en el vertedero trapezoidal se obtiene el valor para el coeficiente de descarga $Cd = 0.97$.

El porcentaje de error que se comete al realizar esta evaluación, se puede calcular de la siguiente forma: $\frac{|0.988681474-0.97|\times 100}{0.988681474} = 1.89\%$. Este valor es muy aceptable porque es menor que el 5%

4.3.3. CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS PARA LA EVALUACIÓN DEL PERFIL TEÓRICO Y PRÁCTICO DE LA SUPERFICIE LIBRE DEL LÍQUIDO EN EL CANAL

Estos cálculos, se pueden realizar a cualquiera de las cuatro pruebas de cada vertedero. En este caso se eligió la cuarta prueba para el vertedero rectangular. De la misma forma que en la sección 2.2.1, se hace uso de las hojas de cálculo de Microsoft Excel aplicándose desde la ecuación (1.83) hasta la ecuación (1.88), para calcular cada valor de Δx_{Ni} . El resumen de este cálculo se muestra en el cuadro 20.

Cuadro N° 20: Resumen del cálculo para el perfil teórico de la superficie libre del líquido en el canal

	$z_{Ni}(m)$	$A_i(m^2)$	$R_{Hi}(m)$	$\Delta z_{Ni}(m)$	$A_{mi}(m^2)$	$R_{Hmi}(m)$	$\Delta x_{Ni}(m)$	$x_{Ni}(m)$
0	0.0200	0.0024	0.0150					0.5100
				0.0100	0.0030	0.0175	0.1113	
1	0.0300	0.0036	0.0200					0.6213
				0.0100	0.0042	0.0220	0.1230	
2	0.0400	0.0048	0.0240					0.7444
				0.0100	0.0054	0.0256	0.1265	
3	0.0500	0.0060	0.0273					0.8709
				0.0100	0.0066	0.0286	0.1279	
4	0.0600	0.0072	0.0300					0.9988
				0.0100	0.0078	0.0312	0.1285	
5	0.0700	0.0084	0.0323					1.1273
				0.0100	0.0090	0.0333	0.1289	
6	0.0800	0.0096	0.0343					1.2562
				0.0100	0.0102	0.0351	0.1291	
7	0.0900	0.0108	0.0360					1.3853
				0.0095	0.0114	0.0367	0.1193	
8	0.0995	0.0119	0.0374					1.5046

Fuente: Elaboración propia

En el cuadro 21 se compara los valores teóricos con los valores prácticos

Cuadro N° 21: Comparación teórica y práctica de la superficie libre del líquido en el canal

Perfil teórico				Perfil práctico				%Error	%Error promedio
z_{Ni} (m)	x_{Ni} (m)	x (m)	z (m)	z_{Ni} (m)	x_{Ni} (m)	x (m)	z (m)	%Error	3.13
0.0200	0.5100	0.5104	0.0695	0.0200	0.5100	0.5104	0.0695	0	
0.0300	0.6213	0.6221	0.0739	0.0300	0.5800	0.5808	0.0760	6.65	
0.0400	0.7444	0.7454	0.0777	0.0400	0.6910	0.6921	0.0804	7.17	
0.0500	0.8709	0.8723	0.0814	0.0500	0.8300	0.8315	0.0834	4.69	
0.0600	0.9988	1.0005	0.0850	0.0600	0.9550	0.9568	0.0872	4.38	
0.0700	1.1273	1.1294	0.0885	0.0700	1.1050	1.1071	0.0897	1.98	
0.0800	1.2562	1.2586	0.0921	0.0800	1.2540	1.2564	0.0922	0.17	
0.0900	1.3853	1.3881	0.0956	0.0900	1.4250	1.4277	0.0936	0	
0.0955	1.5046	1.5075	0.0952	0.0950	1.5000	1.5029	0.0949	0.52	

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en el cuadro 21, que el porcentaje de error promedio entre el perfil teórico y el perfil practico es 3.13%, lo cual es muy aceptable. Esto demuestra, la eficiencia del modelo matemático que se plantea en la sección 1.9.1.

4.3.4. CÁLCULOS Y ANÁLISIS PARA LA EVALUACIÓN DEL CAUDAL PRÁCTICO QUE PRODUCE LA ELECTROBOMBA

En la ecuación (1.96), el término h_A se denomina altura dinámica de la electrobomba. La altura dinámica, es la energía por unidad de peso que requiere la electrobomba para transportar el fluido de un punto a otro.

Básicamente lo que se hace en esta sección, es calcular la altura dinámica a las condiciones que se realizan los experimentos y después con este valor se obtiene el caudal teórico que produce la electrobomba, mediante la siguiente ecuación:

$$h_A - 20 = -\frac{3}{5}(Ca_T - 5) \quad (4.1)$$

Esta ecuación se obtiene de la figura A1 (curva de operación de la electrobomba)

Aplicando la ecuación (1.100)

TRAMO BE

$$\frac{v_B^2}{2g} + \frac{P_B}{\gamma} + z_B - h_{L(BE)} = z_E + \frac{v_E^2}{2g} \quad (4.2)$$

$Ca_{BE} = 21.09 \text{ lt / min} = 0.0003515 \text{ m}^3/\text{s}$. (Caudal que entra al canal en la primera prueba del vertedero rectangular)

$$D_{(1/2'')} = 0.017\text{m}$$

$$v_E = \frac{4Ca_{BE}}{\pi(D_{(1/2'')})^2} = \frac{4 \times 0.0003515}{\pi \times (0.017)^2} = 1.549 \text{ m/s}$$

$$z_E - z_B = 0.62\text{m}$$

$$h_{L(BE)} = h_{L(BB1)} + h_{L(B1E)} \quad (4.3)$$

Tramo BB1

$$D_{(1')} = 0.03\text{m}$$

Por continuidad se tiene:

$$v_{(BB1)}(D_{(1')})^2 = v_E(D_{(1/2'')})^2 \Rightarrow v_{(BB1)}(0.03)^2 = 1.549 \times (0.017)^2$$

$$\Rightarrow v_{(BB1)} = 0.4973 \text{ m/s}$$

Aplicando la ecuación (1.30), se tiene:

$$N_{R(BB1)} = \frac{v_{(BB1)} D_{(1'')}}{\nu} = \frac{0.4973 \times 0.03}{10^{-6}} = 1.4922 \times 10^4$$

$$\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^2, \quad \frac{\epsilon}{D} \approx 0. \text{ (Tubo liso)}$$

Del diagrama de Moody se obtiene:

$$f_{(BB1)} = 0.028$$

$$\text{Te a través de una rama: } h_L = f_{(BB1)} \left(\frac{L_e}{D} \right) \frac{(v_{(BB1)})^2}{2g}$$

$$h_L = 0.028 \times 60 \times \frac{(0.4973)^2}{2 \times 9.81} = 0.0214 \text{ m}$$

$$\text{Te a través de un tramo: } h_L = f_{(BB1)} \left(\frac{L_e}{D} \right) \frac{(v_{(BB1)})^2}{2g}$$

$$h_L = 0.028 \times 20 \times \frac{(0.4973)^2}{2 \times 9.81} = 0.007059 \text{ m}$$

$$\text{Tubería recta más unión universal: } h_L = f_{(BB1)} \left(\frac{L_e}{D} \right) \frac{(v_{(BB1)})^2}{2g}$$

$$h_L = 0.028 \times \frac{0.2}{0.03} \times \frac{(0.4973)^2}{2 \times 9.81} = 0.002354 \text{ m}$$

$$\Rightarrow h_{L(BB1)} = 0.0214 + 0.002354 + 0.007059 = 0.030813 \text{ m}$$

Tramo B1E

$$N_{R(B1E)} = \frac{v_E D_{(1/2")}}{\nu} = \frac{1.549 \times 0.017}{10^{-6}} = 2.633 \times 10^4$$

$$\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^2, \quad \frac{\epsilon}{D} \approx 0. \quad (\text{Tubo liso})$$

Del diagrama de Moody se obtiene:

$$f_{(B1E)} = 0.024$$

$$\text{Reducción de 1 a } 1/2": \quad h_L = K \frac{(v_{(BB1)})^2}{2g}$$

$$h_L = 1 \times \frac{(0.4973)^2}{2 \times 9.81} = 0.0126 \text{ m}$$

$$\text{Tres codos de } 1/2": \quad h_L = 3f_{(B1E)} \left(\frac{L_e}{D}\right) \frac{(v_E)^2}{2g}$$

$$h_L = 3 \times 0.022 \times 30 \times \frac{(1.549)^2}{2 \times 9.81} = 0.2421 \text{ m}$$

$$\text{Tubería recta más unión universal: } h_L = f_{(B1E)} \left(\frac{L_e}{D}\right) \frac{(v_E)^2}{2g}$$

$$h_L = 0.022 \times \frac{0.79}{0.017} \frac{(1.549)^2}{2 \times 9.81} = 0.125 \text{ m}$$

$$\text{Válvula esférica: } h_L = f_{(B1E)} \left(\frac{L_e}{D}\right) \frac{(v_E)^2}{2g}$$

$$h_L = 0.022 \times 150 \times \frac{(1.549)^2}{2 \times 9.81} = 0.4036 \text{ m}$$

$$\Rightarrow h_{L(B1E)} = 0.0126 + 0.2421 + 0.125 + 0.4036 = 0.7833 \text{ m}$$

Entonces en la ecuación (4.3), se tiene:

$$h_{L(BE)} = h_{L(BB1)} + h_{L(B1E)} = 0.030813 + 0.7833 = 0.8141113 \text{ m}$$

Reemplazando $h_{L(BE)}$ en (4.2), se tiene:

$$\frac{v_B^2}{2g} + \frac{P_B}{\gamma} = 0.8141113 + 0.62 + \frac{(1.549)^2}{2 \times 9.81} = 1.5564 \text{ m} \quad (4.4)$$

TRAMO AB

Aplicando la ecuación (1.98)

$$\frac{P_A}{\gamma} + z_A + h_A - h_{L(AB)} = \frac{P_B}{\gamma} + z_B + \frac{v_B^2}{2g} \quad (4.5)$$

En la segunda prueba para el vertedero rectangular el caudal práctico es:

$Ca_{p2} = 34.8 \text{ lt / min} = 0.00058 \text{ m}^3/\text{s}$. Este caudal es el correspondiente al que produce la electrobomba cuando se trabaja sólo en el tramo AD y por tanto, se puede considerar que también es igual en el tramo AB , es decir: $Ca_{AB} = 34.8 \text{ lt / min} = 0.00058 \text{ m}^3/\text{s}$

$$z_B - z_A = 0.56 \text{ m}$$

$$\frac{P_A}{\gamma} = 0.3 \text{ m}$$

$$v_B = \frac{4Ca_{AB}}{\pi(D_{(1'')})^2} = \frac{4 \times 0.00058}{\pi \times (0.03)^2} = 0.8205 \text{ m/s}$$

$$N_{R(AB)} = \frac{v_B D_{(1'')}}{\nu} = \frac{0.8205 \times 0.03}{10^{-6}} = 2.4615 \times 10^4$$

$$\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^2, \quad \frac{\epsilon}{D} \approx 0. \quad (\text{Tubo liso})$$

Del diagrama de Moody se obtiene:

$$f_{(AB)} = 0.0245$$

$$\text{Reducción de 1 a 1/2": } h_L = K \frac{(v_B)^2}{2g}$$

$$h_L = 1 \times \frac{(0.8205)^2}{2 \times 9.81} = 0.0343 \text{ m}$$

$$\text{Un codo de 1": } h_L = f_{(AB)} \left(\frac{L_e}{D} \right) \frac{(v_B)^2}{2g}$$

$$h_L = 0.0245 \times 30 \times \frac{(0.8205)^2}{2 \times 9.81} = 0.0247 \text{ m}$$

$$\text{Te a travées de un tramo: } h_L = f_{(AB)} \left(\frac{L_e}{D} \right) \frac{(v_B)^2}{2g}$$

$$h_L = 0.0245 \times 20 \times \frac{(0.8205)^2}{2 \times 9.81} = 0.0168 \text{ m}$$

$$\text{Válvula de compuerta: } h_L = f_{(AB)} \left(\frac{L_e}{D} \right) \frac{(v_B)^2}{2g}$$

$$h_L = 0.0245 \times 8 \times \frac{(0.8205)^2}{2 \times 9.81} = 0.00659 \text{ m}$$

$$\text{Tubería recta: } h_L = f_{(AB)} \left(\frac{L_e}{D} \right) \frac{(v_B)^2}{2g}$$

$$h_L = 0.0245 \times \frac{0.59}{0.03} \times \frac{(0.8205)^2}{2 \times 9.81} = 0.01653 \text{ m}$$

$$h_{L(AB)} = 0.0343 + 0.0247 + 0.0168 + 0.00659 + 0.01653 = 0.09892 \text{ m}$$

Reemplazando la ecuación (4.3) y $h_{L(AB)}$ en la ecuación (4.4), se tiene:

$$0.3 + h_A - 0.09892 = 0.56 + 1.5564 \Rightarrow h_A = 1.91532 \text{ m}$$

Si se reemplaza $h_A = 1.91532 \text{ m}$ en la ecuación (4.1) el valor correspondiente para el caudal teórico es: $Ca_T \approx 35 \text{ lt / min} = 0.00058333 \text{ m}^3/\text{s}$. Esto prueba que el cálculo de h_A es correcto, pues el porcentaje de error del caudal práctico con respecto al teórico es: $\frac{(35-34.8)}{35} \times 100 = 0.571\%$

Esto también prueba la eficiencia del sistema, pues sus componentes trabajan en óptimas condiciones.

4.3.5. CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE LA ENERGÍA ESPECÍFICA Y EL NÚMERO DE FROUDE

La velocidad, la energía específica y el número de Froude, se pueden calcular aplicando las ecuaciones (1.56), (1.57) y (1.60), respectivamente.

Estos cálculos se pueden realizar en cualquiera de las pruebas de los vertederos. En este caso se eligió la primera y segunda prueba para el vertedero rectangular.

También, se puede calcular para cada prueba, la altura normal crítica y la correspondiente energía específica mínima, aplicándose las ecuaciones (1.58) y (1.59), respectivamente.

Estos cálculos se muestran en los cuadros 22 y 23

Cuadro N° 22: Resumen del cálculo de la energía específica y el número de Froude para la primera prueba del vertedero rectangular

$Ca(m^3/s)$				
0.0003515				
$q(m^2/s)$	$z_N(m)$	$E_e(m)$	$v(m/s)$	F_0
0.0029	0.0030	0.0516	0.9764	5.6915
0.0029	0.0060	0.0181	0.4882	2.0123
0.0029	0.0090	0.0144	0.3255	1.0953
0.0029	0.010	0.014	0.306	1.000
0.0029	0.0120	0.0150	0.2441	0.7114
0.0029	0.0150	0.0169	0.1953	0.5091
0.0029	0.0170	0.0185	0.1723	0.4219
0.0029	0.0200	0.0211	0.1465	0.3306
0.0029	0.0200	0.0211	0.1465	0.3306
0.0029	0.0200	0.0211	0.1465	0.3306
0.0029	0.0200	0.0211	0.1465	0.3306
0.0029	0.0200	0.0211	0.1465	0.3306
0.0029	0.0300	0.0305	0.0976	0.1800
0.0029	0.0400	0.0403	0.0732	0.1169
0.0029	0.0500	0.0502	0.0586	0.0836
0.0029	0.0600	0.0601	0.0488	0.0636
0.0029	0.0700	0.0701	0.0418	0.0505
0.0029	0.0800	0.0801	0.0366	0.0413
0.0029	0.0820	0.0821	0.0357	0.0398



Fuente: Elaboración propia

$$q = \frac{Ca}{L_c} = \frac{0.0003515}{0.12} = 0.0029 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\Rightarrow z_{Nc} = \left(\frac{q^2}{g}\right)^{1/3} = \left(\frac{(0.0029)^2}{9.81}\right)^{1/3} = 0.0094 \text{ m} \approx 0.01 \text{ m}$$

$$E_{e(\min)} = \frac{3z_{Nc}}{2} = \frac{3 \times 0.0094}{2} = 0.0141 \text{ m}$$

De la misma forma se procede con la segunda prueba

Cuadro N° 23: Resumen del cálculo de la energía específica y el número de Froude para la segunda prueba del vertedero rectangular

$Ca(m^3/s)$				
0.00058				
$q(m^2/s)$	$z_N(m)$	$E_e(m)$	$v(m/s)$	F_o
0.0048	0.01	0.0219	0.4833	1.5432
0.0048	0.03	0.0313	0.1611	0.2970
0.0048	0.05	0.0505	0.0967	0.1380
0.0048	0.07	0.0702	0.0690	0.0833
0.0048	0.09	0.0901	0.0537	0.0572
0.0048	0.11	0.1101	0.0439	0.0423
0.0048	0.13	0.1301	0.0372	0.0329
0.0048	0.0133539	0.0200	0.3619	1.0000
0.0048	0.015	0.0203	0.3222	0.8400
0.0048	0.02	0.0230	0.2417	0.5456
0.0048	0.025	0.0269	0.1933	0.3904
0.0048	0.0300	0.0313	0.1611	0.2970
0.0048	0.0400	0.0407	0.1208	0.1929
0.0048	0.0500	0.0505	0.0967	0.1380
0.0048	0.0600	0.0603	0.0806	0.1050
0.0048	0.0700	0.0702	0.0690	0.0833
0.0048	0.0800	0.0802	0.0604	0.0682
0.0048	0.0900	0.0901	0.0537	0.0572
0.0048	0.0950	0.0951	0.0509	0.0527

Fuente: Elaboración propia

$$q = \frac{Ca}{L_c} = \frac{0.00058}{0.12} = 0.0048 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\Rightarrow z_{Nc} = \left(\frac{q^2}{g}\right)^{1/3} = \left(\frac{(0.0048)^2}{9.81}\right)^{1/3} = 0.001335 \text{ m}$$

$$E_{e(\min)} = \frac{3z_{Nc}}{2} = \frac{3 \times 0.001335}{2} = 0.02 \text{ m}$$

En el cuadro 22, se puede ver que si el caudal en el canal es $Ca = 0.0003515\text{m}^3/\text{s}$ los valores teóricos de la altura normal crítica y la energía mínima son: $z_{Nc} = 0.01\text{ m}$ y $E_{e(\text{min})} = 0.014\text{m}$.

En la práctica estos valores no se pueden medir, debido a que se encuentran en el espacio donde existe mucha turbulencia en el canal. En la realidad, las mediciones de z_N sólo se pudieron realizar a partir de 0.0300m en adelante. Por otro lado, $F_0 < 1$ a lo largo del canal donde se pudieron realizar las mediciones de z_N , esto demuestra que estas mediciones fueron correctas pues corresponden a la zona del canal donde el flujo es sub crítico

De la misma forma en el cuadro 23, si $Ca = 0.00058\text{m}^3/\text{s}$ los valores teóricos de la altura normal crítica y la energía mínima son: $z_{Nc} = 0.01335\text{ m}$ y $E_{e(\text{min})} = 0.02\text{m}$.

De estas dos pruebas, también se puede concluir que si mayor es el caudal en el canal, mayor será la altura normal crítica

4.4. MANUAL DE INSTRUCCIONES PARA EL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

- Antes de empezar a realizar los experimentos en el sistema, es necesario que se ponga agua en el tanque reservorio, aproximadamente hasta la altura de 35 cm. También se debe verificar si la electrobomba está cebada
- El prendido y apagado de la electrobomba se hace por medio de la llave termomagnética.
- La fijación de la altura de inclinación del canal, se debe realizar por medio del perno sin fin

- Si se desea que el caudal que entra al canal, sea el mismo que produce la electrobomba, se debe trabajar sólo con el tramo *AD*, para lo cual se abre la válvula V_3 y se cierran las válvulas V_1 y V_2
- Si se desea que el caudal que produce la electrobomba se distribuya, una parte por el tramo *BC* (regresa al tanque reservorio) y otra parte por el tramo *BE*(entra al canal), se debe cerrar la válvula V_3 , y abrirse las válvulas V_1 y V_2
- Las mediciones de z_N y x_N , se realizan por medio de las reglas corredizas y la cinta métrica, respectivamente.
- Para la evaluación del perfil teórico de la superficie libre del líquido, se deben aplicar las ecuaciones, desde (1.83) hasta (1.88). de la misma forma que en la sección 2.2.1. Véase el anexo 19.
- Los cálculos para la transformación de coordenadas de (x_N, z_N) a (x, z) , se realizan por medio de las ecuaciones (1.90) y (1.93). Véase los anexos 17 y 18.
- Los cálculos para los caudales teóricos de los vertederos, triangular, rectangular y trapezoidal, se deben realizar utilizando las ecuaciones (1.67), (1.69) y (1.70), respectivamente.
- El cálculo del coeficiente de descarga para cada vertedero, se debe realizar haciendo uso de la ecuación (1.95). Véase los anexos 20 y 21.
- Los cálculos de la velocidad, la energía específica y el número de Froude, se pueden realizar aplicando las ecuaciones (1.56), (1.57) y (1.60), respectivamente.

4.5. HIGIENE Y SEGURIDAD INDUSTRIAL

- Al realizar los experimentos en el sistema, procurar estar con la vestimenta adecuada, es decir usar mandil
- Al realizar el prendido de la electrobomba, realizarlo con las manos secas y así evitar que se tenga una descarga eléctrica
- Al terminar de realizar los experimentos, se deben dejar el tanque reservorio y el canal sin nada de agua, esto con el fin de que no sean criaderos de larvas y zancudos

CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE COSTO

5.1. COSTO DE DISEÑO

Cuadro N° 24: Costo de diseño

SERVICIO	CANTIDAD	P. UNITA (S/.)	P. TOTAL (S/.)
Dibujo del sistema	1	100	100
Consultoría y asesoramiento matemático	-	2500	2500
TOTAL			2600

Fuente: Elaboración propia

5.2. COSTO DE CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN

Cuadro N° 25: Costo de construcción e instalación

SERVICIO	P. UNITA (S/.)	P. TOTAL (S/.)
Estructura metálica	650	650
Canal, los vertederos y el tanque reservorio	350	350
TOTAL		1000

Fuente: Elaboración propia

5.3. COSTO DE MATERIALES

Cuadro N° 26: Costo de materiales

ARTÍCULO	CANTIDAD	P. UNITA (S/.)	P. TOTAL (S/.)
Plancha de acrílico	1	400	400
Electrobomba	1	150	150
Tubería de 1 "	1	21	21
Tubería de 1/2 "	1	13	13
Válvula check 1/2"	1	32	32
Válvula esférica 1/2"	3	8	24
Válvula esférica 1 "	1	15	15
Unión universal 1/2"	2	3	6
Unión universal 1"	3	6	18
Adaptadores 1"	6	1.5	9
Adaptadores 1/2"	6	1	6
Te de 1"	3	2	6
Reducción de 1 a 1/2"	4	1.5	6
Codo de 90° de 1"	3	1.5	4.5
Codo de 90° de 1/2"	5	1	5
Cinta teflón	6	1	6
Pegamento para tubo	1	6	6
Silicona	2	10	20
Abrazaderas	5	2	10
Manguera de 5/8"	1	25	25
Manguera de 5/4"	1	34	34
Llave termomagnética	1	15	15
Angular de aluminio y pintura	-	50	50
Enchufe y cablería	-	15	15
Cinta métrica y reglas	-	3	3
TOTAL			899.5

Fuente: Elaboración propia

5.4. OTROS COSTOS

Cuadro N° 27: Otros costos

ARTÍCULO	CANTIDAD	P. UNITA (S/.)	P. TOTAL (S/.)
Copias	5	20	100
Encuadernados	8	20	160
Pasajes y otros gastos	-	300	300
TOTAL			560

Fuente: Elaboración propia

5.5. COSTO TOTAL

$$C \text{ TOTAL (S.)} = 2600 + 1000 + 899.5 + 560 = 5059.5$$

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

1. Se diseñó, construyó e instaló un sistema de medición de flujo en canal abierto con placas intercambiables, para el Laboratorio de Procesos y Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana.
2. Se diseñó y construyó el canal y los vertederos, de geometrías rectangular, triangular y trapezoidal.
3. Se diseñó y construyó la línea de distribución, compuesta por tuberías, accesorios y una electrobomba
4. Se determinó las variables más importantes del diseño y construcción del sistema, esto se puede ver en la sección 1.13, para los cuales se realizaron los cálculos respectivos tal como se muestra en la sección 2.2.
5. En la sección 1.12, se determinó las ecuaciones para el cálculo de las variables involucradas en los experimentos a desarrollarse en el sistema. El cálculo detallado de estas variables se realizó en la sección 4.3.
6. Se probó la validez del modelo matemático que se planteó en la sección 1.9. Esto se puede verificar en la sección 4.3.3, cuando se hace la comparación teórica y práctica del perfil de superficie libre del líquido en el canal.
7. En la sección 4.3.4, se determinó la eficiencia del sistema al hacer la comparación teórica y práctica del caudal que produce la electrobomba.



6.2. RECOMENDACIONES

- 1.** Se recomienda realizar siempre una inspección para ver si todos los componentes del sistema estén funcionando correctamente, como por ejemplo al prender la electrobomba, verificar que esta, no esté haciendo tierra con la estructura metálica, esto ayudará a evitar accidentes.
- 2.** Se recomienda tener muy en cuenta los aspectos de higiene y seguridad industrial
- 3.** Se recomienda realizar otros estudios en el canal, como medir el perfil de velocidad del fluido o trabajar con otras geometrías de vertederos
- 4.** Se recomienda que cuando se instale el sistema en el laboratorio, este debe tener su propia línea de alimentación de energía para la electrobomba, la cual debe estar muy cerca. Esto con el fin de no estar usando extensiones con alambre mellizo
- 5.** Se recomienda abordar otros desafíos con respecto al diseño y construcción de estos tipos de sistemas, como por ejemplo un sistema de medición de caudal en canal abierto, donde se pueda variar la geometría del canal y en el que se pueda realizar diferentes tipos de investigación tecnológica, aplicándose con mucha frecuencia la modelación matemática

BIBLIOGRAFÍA

1. **GEANKOPLIS. C J.** (1998). Procesos de transporte y operaciones unitarias. Compañía editorial continental, S.A de C.V. México. Tercera edición
2. **GRANDEZ. A, GARCÍA R.** (2002). Diseño y construcción de un sistema de medición de caudal en canal abierto. Tesis para optar el título de ingeniero químico. FIQ-UNAP
3. **MOTT. R.** (2002). Mecánica de fluidos aplicada. Editorial Mc Graw Hill. Tercera edición
4. **RAMÍREZ N.** (1984). Diseño, construcción e instalación de un equipo de transporte de fluidos para el Laboratorio de Procesos y Operaciones Unitarias de la FIQ-UNAP
5. **SALAS. F J, LOVERA. M CH.** (2002). Diseño y construcción de un sistema para medición de caudal utilizando el tubo de Pitot. Tesis para optar el título de ingeniero químico. FIQ-UNAP
6. **SHAMES. I.** (1995). Mecánica de fluidos. Editorial Mc Graw Hill. Tercera edición
7. **UGARTE. F.** (1990). Mecánica de fluidos. Segunda edición. Lima-Perú
8. **[http://es.wikipedia.org/wiki/Canal_\(ingenier%C3%ADa\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Canal_(ingenier%C3%ADa))**

ANEXOS

ANEXO 1: Curva de operación de la electrobomba

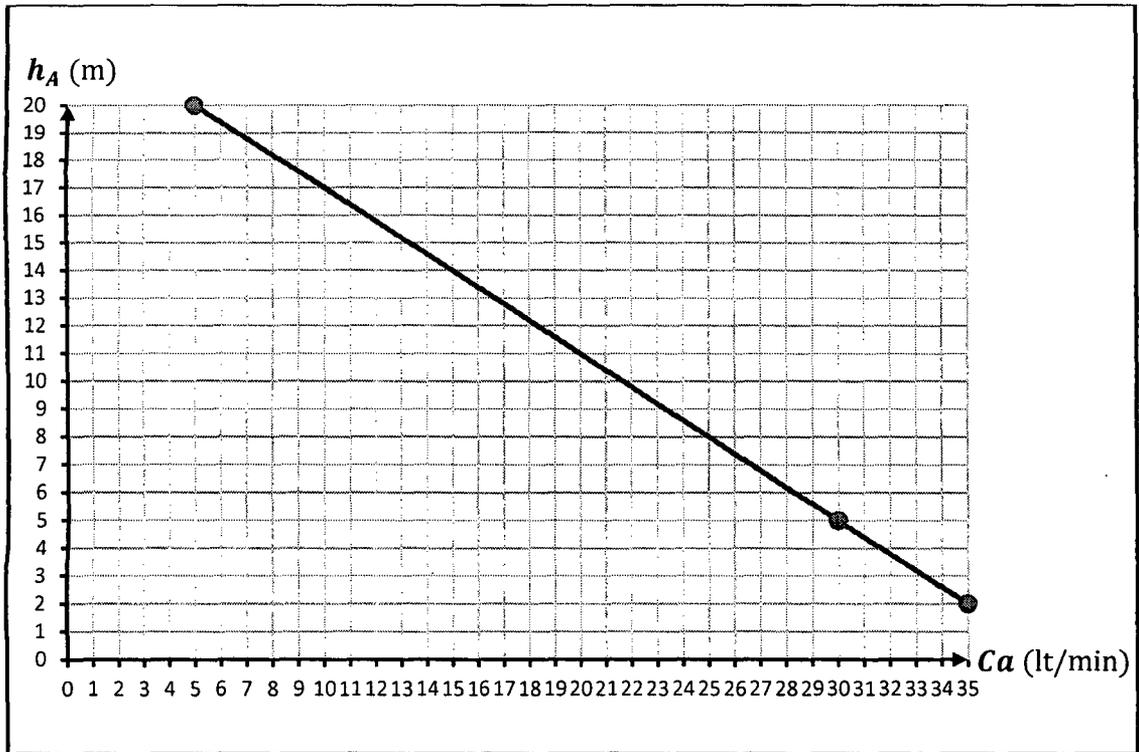


Figura A1. Curva de operación de la electrobomba

Fuente: Placa de la electrobomba

ANEXO 3: Perfil de superficie libre del líquido en el canal para la segunda prueba, colocando el vertedero rectangular

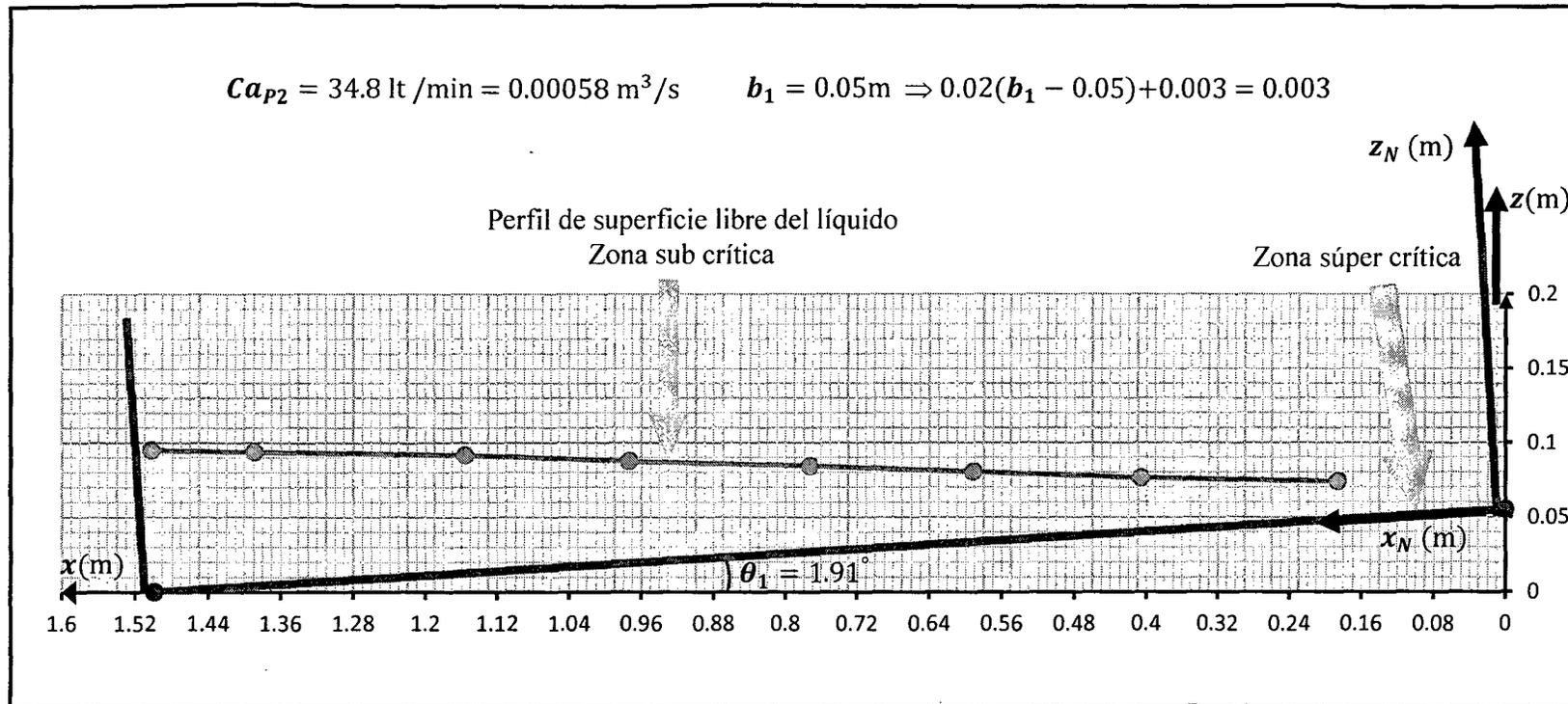


Figura A3. Perfil de superficie libre del líquido en el canal para la segunda prueba, colocando el vertedero rectangular

Fuente: (Elaboración propia)

ANEXO 4: Perfil de superficie libre del líquido en el canal para la tercera prueba, colocando el vertedero rectangular

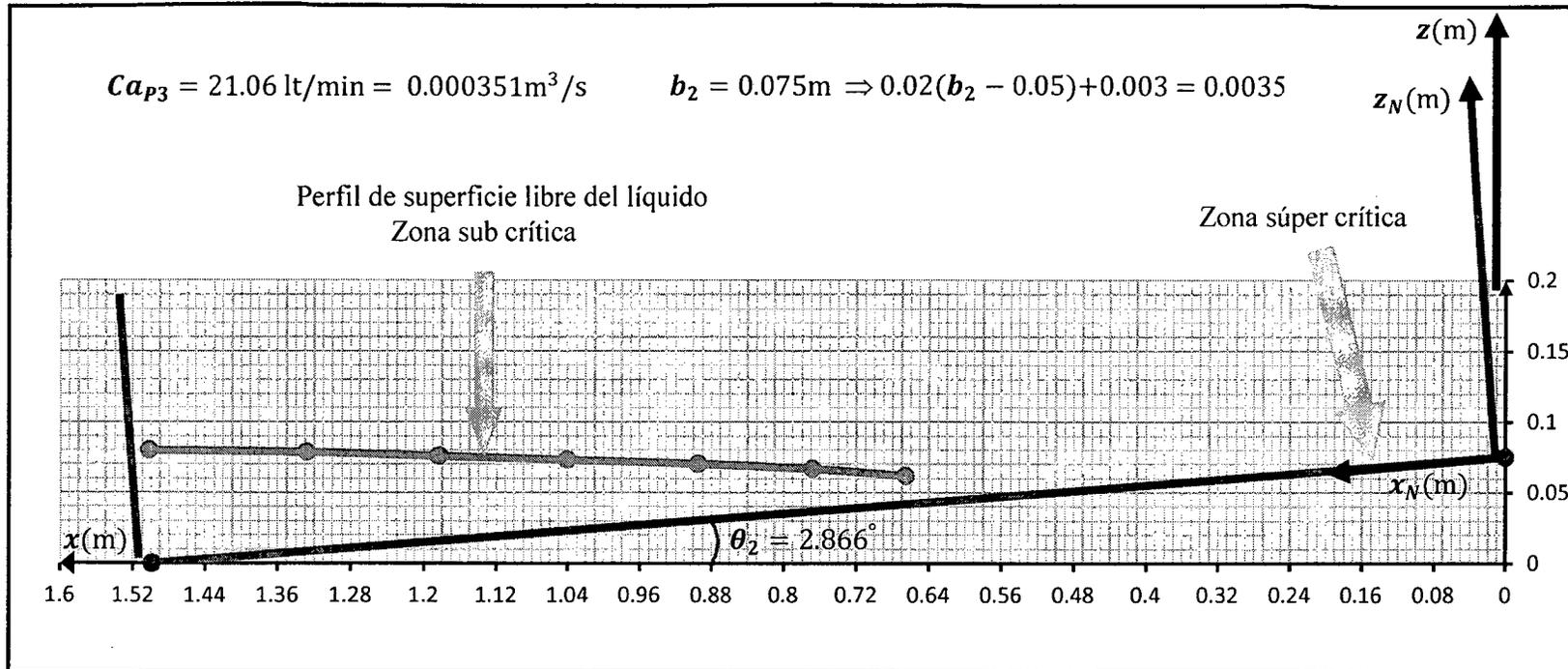
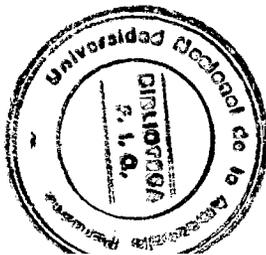


Figura A4. Perfil de superficie libre del líquido en el canal para la tercera prueba, colocando el vertedero rectangular

Fuente: (Elaboración propia)



ANEXO 5: Perfil de superficie libre del líquido en el canal para la cuarta prueba, colocando el vertedero rectangular

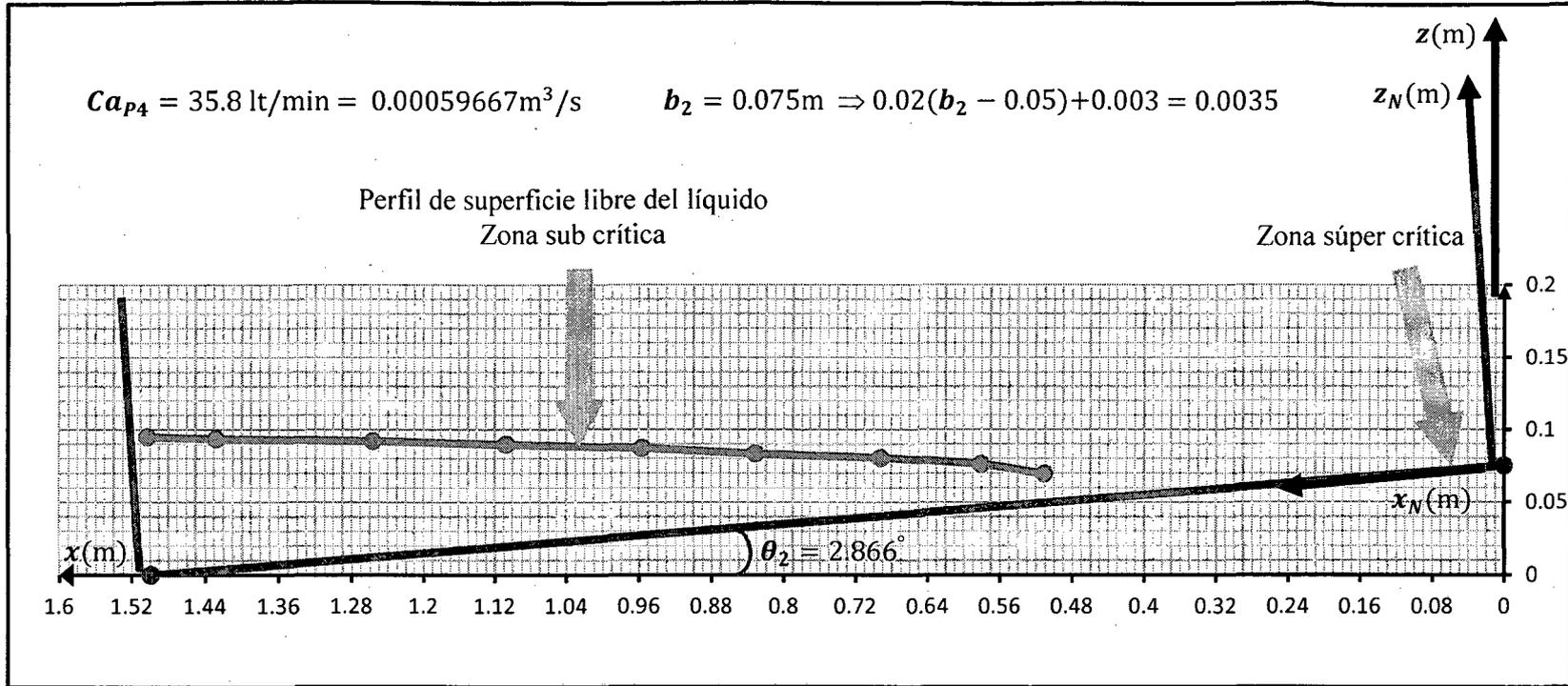


Figura A5. Perfil de superficie libre del líquido en el canal para la cuarta prueba, colocando el vertedero rectangular

Fuente: (Elaboración propia)

ANEXO 6: Perfil de superficie libre del líquido en el canal para la primera prueba, colocando el vertedero triangular

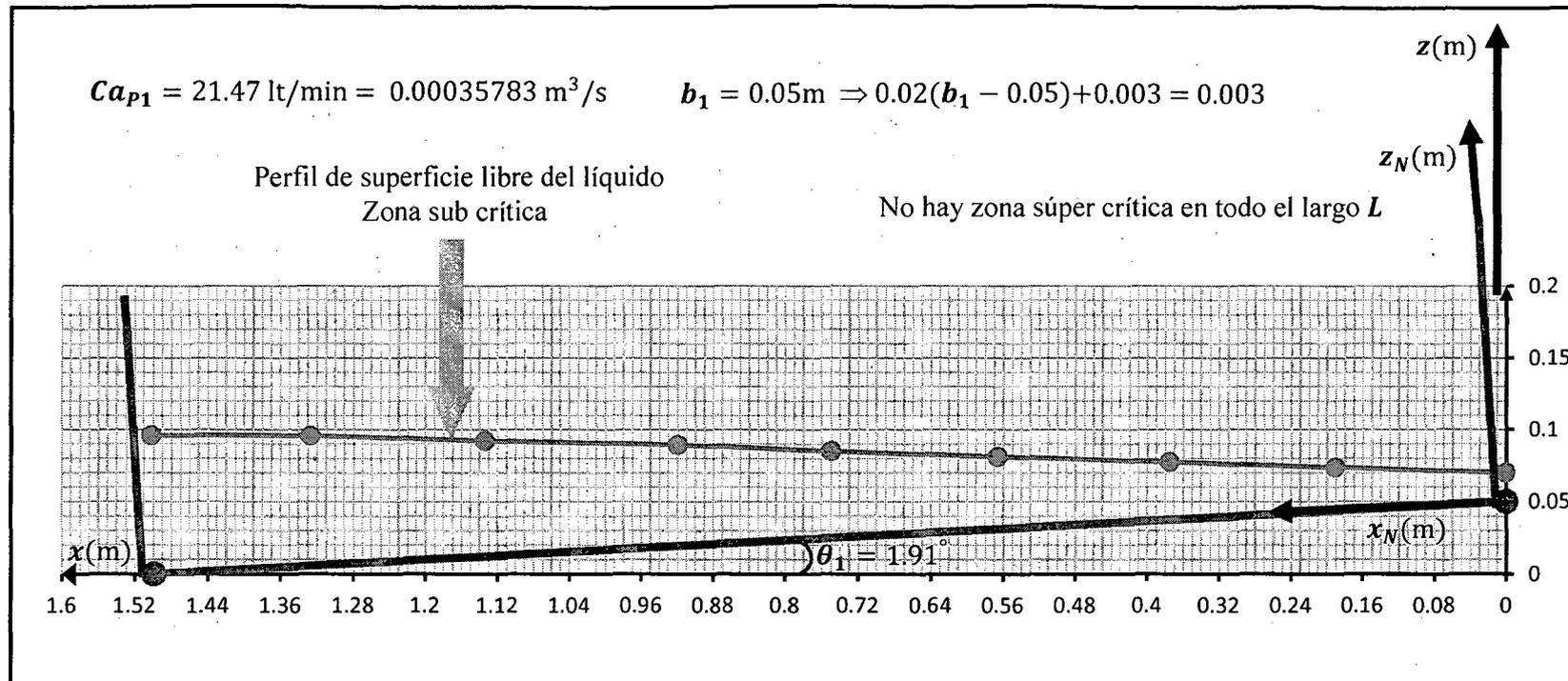


Figura A6. Perfil de superficie libre del líquido en el canal para la primera prueba, colocando el vertedero triangular

Fuente: (Elaboración propia)

ANEXO 7: Perfil de superficie libre del líquido en el canal para la segunda prueba, colocando el vertedero triangular

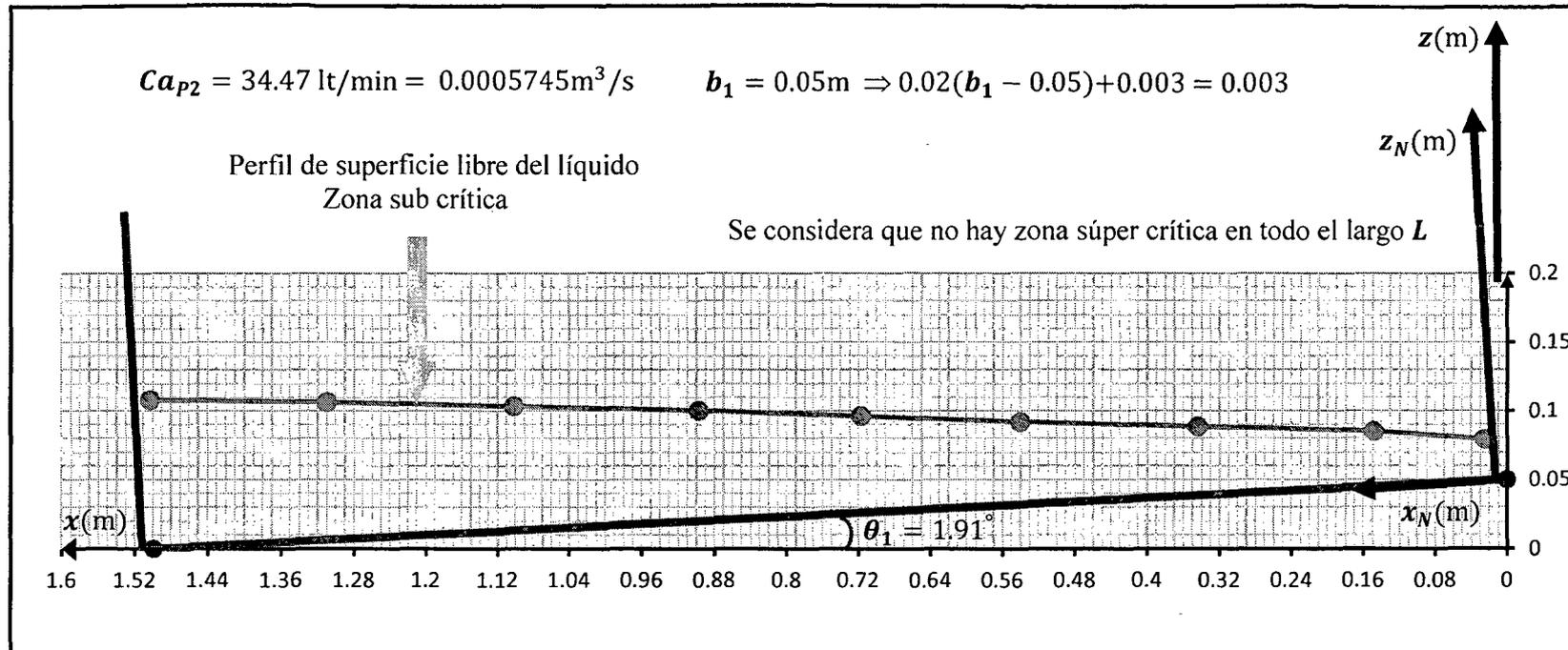


Figura A7. Perfil de superficie libre del líquido en el canal para la segunda prueba, colocando el vertedero triangular

Fuente: (Elaboración propia)

ANEXO 13: Perfil de superficie libre del líquido en el canal para la cuarta prueba, colocando el vertedero trapezoidal

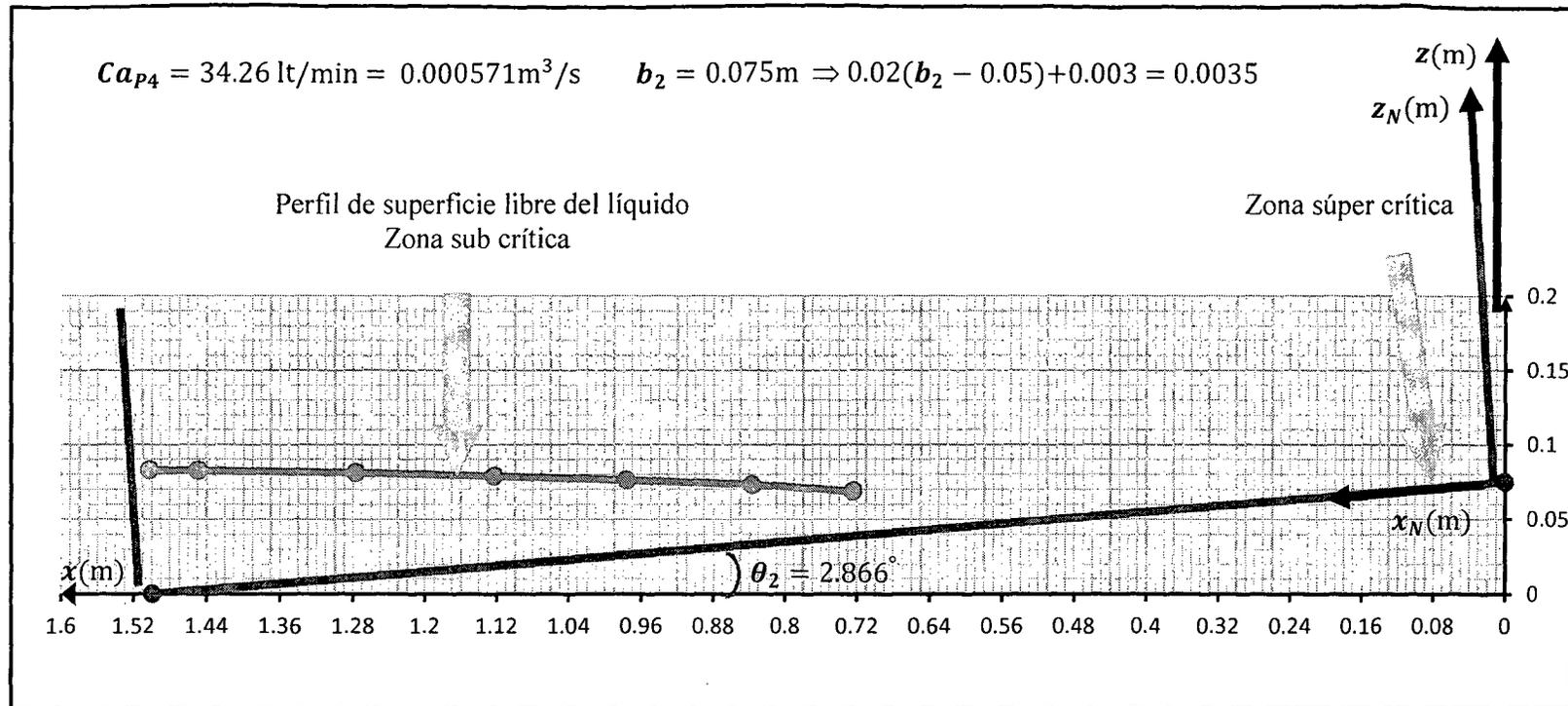


Figura A13. Perfil de superficie libre del líquido en el canal para la cuarta prueba, colocando el vertedero trapezoidal

Fuente: (Elaboración propia)

ANEXO 14: Representación de h_V versus Ca_T para el vertedero triangular

h_V (m)	Ca_T (l/min)
0.058	28.71
0.060	31.25
0.062	33.92
0.064	36.72
0.066	39.66
0.068	42.73
0.070	45.94
0.072	49.29
0.074	52.79



ANEXO 15: Representación de h_V versus Ca_T para el vertedero rectangular

h_V (m)	Ca_T (l/min)
0.042	22.88
0.044	24.53
0.046	26.22
0.048	27.95
0.050	29.71
0.052	31.51
0.054	33.35
0.055	34.28

ANEXO 16: Representación de h_V versus Ca_T para el vertedero trapezoidal

h_V (m)	Ca_T (l/min)
0.033	25.78
0.035	28.46
0.037	31.26
0.039	34.18
0.041	37.22
0.043	40.39

ANEXO 17: Hoja de cálculo que muestra el uso de la ecuación (1.90)

energía específica [Modo de compatibilidad] - Micro

Inicio Insertar Diseño de página Fórmulas Datos Revisar Vista

COEF. DE CORREL = $=C94*((1-((0.05/1.5)^2))^{0.5})+B94*(0.05/1.5)$

VERTEDERO RECTANGULAR

Primera prueba				
	Ca_{p1} (m ² /s)	b_1 (m)		
	0.0003515	0.05		
	z_{Ni} (m)	x_{Ni} (m)	x (m)	z (m)
0	0.02	0.0328	0.0334484	0.0688956
1	0.03	0.503	0.5037205	0.0632167
2	0.04	0.699	0.6999449	0.0666778
3	0.05	0.893	0.8941704	0.0702055
4	0.06	1.072	1.0734043	0.0742333
5	0.07	1.248	1.2496398	0.0783611
6	$=C94*((1-((0.05/1.5)^2))^{0.5})+B94*(0.05/1.5)$			
7	0.082	1.498	1.4999009	0.0820211

Figura A14. Hoja de cálculo que muestra el uso de la ecuación (1.90). El mismo procedimiento se puede realizar para cualquier prueba utilizando cualquier vertedero

Fuente: (Elaboración propia)

ANEXO 18: Hoja de cálculo que muestra el uso de la ecuación (1.93)

VERTEDERO RECTANGULAR

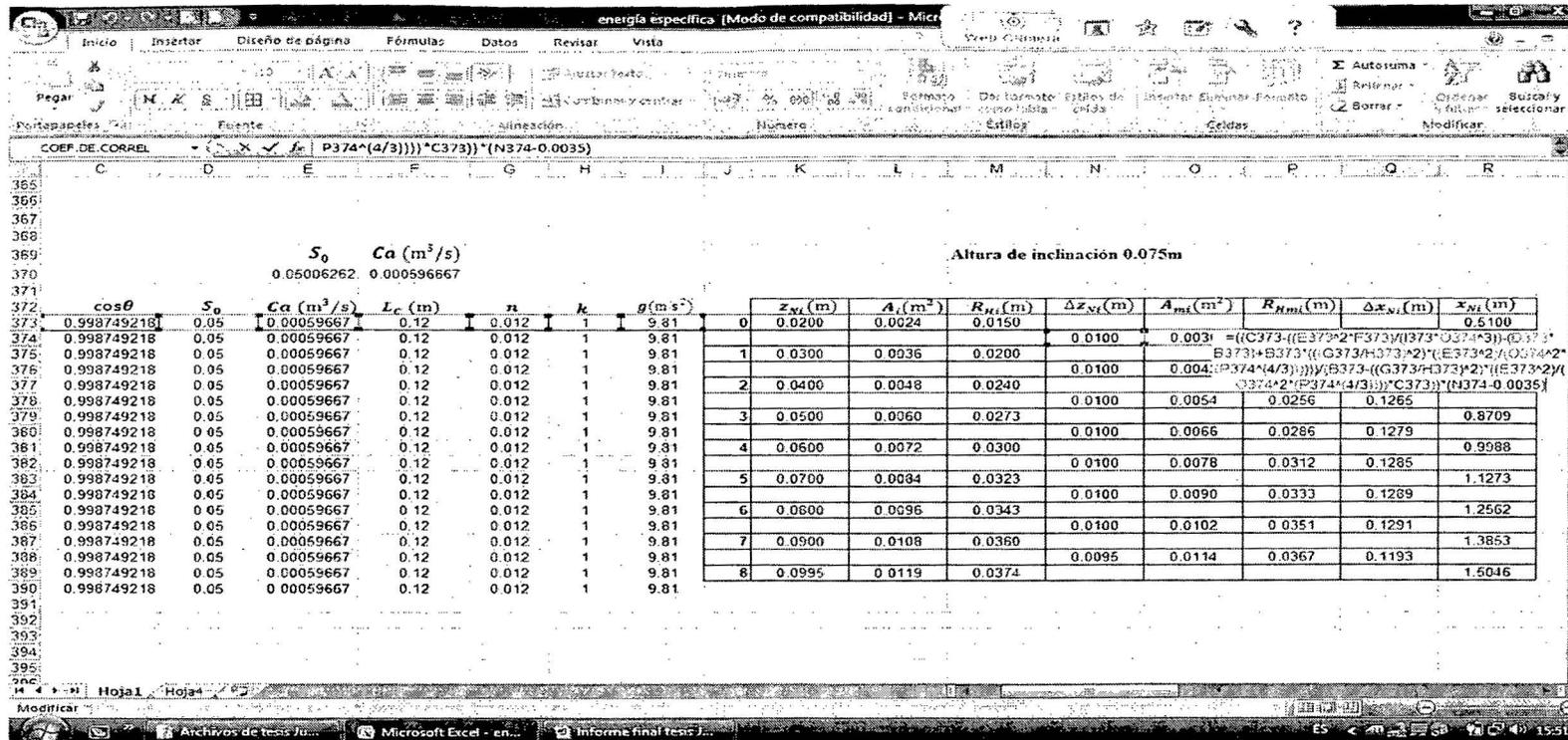
Primera prueba	
$Ca_{p1} (m^3/s)$	$b_1 (m)$
0.0003515	0.05

	$z_{Ni} (m)$	$x_{Ni} (m)$	$x (m)$	$z (m)$
0	0.02	0.0328	0.0334484	0.0688956
1	0.03	0.503	0.5037205	0.0632167
2	0.04	0.699	0.6999449	0.0666778
3	0.05	0.893	0.8941704	0.0702055
4	0.06	1.072	1.0734043	0.0742333
5	0.07	1.248	1.2496398	0.0783611
6	0.08	=B94*((1.5^2-0.05^2)^0.5)/(1.5)+0.05-C94*(0.05/1.5)}		
7	0.082	1.498	1.4999009	0.0820211

Figura A15. Hoja de cálculo que muestra el uso de la ecuación (1.93). El mismo procedimiento se puede realizar para cualquier prueba utilizando cualquier vertedero

Fuente: (Elaboración propia)

ANEXO 19: Hoja de cálculo que muestra el uso de la ecuación (1.83)



energía específica [Modo de compatibilidad] - Micro...

COEF.DE.CORREL = $\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{P374 \cdot (4/3)^{1/3}}{C373}} \cdot (N374 - 0.0035)}$

Altura de inclinación 0.075m

	$\cos\theta$	S_0	$Ca \text{ (m}^3/\text{s)}$	$L_c \text{ (m)}$	n	k	$g \text{ (m/s}^2)$	$z_{Ni} \text{ (m)}$	$A_i \text{ (m}^2)$	$R_{Ni} \text{ (m)}$	$\Delta z_{Ni} \text{ (m)}$	$A_{mi} \text{ (m}^2)$	$R_{ami} \text{ (m)}$	$\Delta x_{Ni} \text{ (m)}$	$x_{Ni} \text{ (m)}$
372		0.05006262	0.00059667					0	0.0200	0.0024	0.0150				0.5100
373	0.998749218	0.05	0.00059667	0.12	0.012	1	9.81								
374	0.998749218	0.05	0.00059667	0.12	0.012	1	9.81	0.0300	0.0036	0.0200	0.0100	0.0031	0.0256	0.1265	0.8709
375	0.998749218	0.05	0.00059667	0.12	0.012	1	9.81								
376	0.998749218	0.05	0.00059667	0.12	0.012	1	9.81								
377	0.998749218	0.05	0.00059667	0.12	0.012	1	9.81	0.0400	0.0048	0.0240	0.0100	0.0054	0.0286	0.1279	0.9988
378	0.998749218	0.05	0.00059667	0.12	0.012	1	9.81								
379	0.998749218	0.05	0.00059667	0.12	0.012	1	9.81								
380	0.998749218	0.05	0.00059667	0.12	0.012	1	9.81								
381	0.998749218	0.05	0.00059667	0.12	0.012	1	9.81	0.0500	0.0072	0.0300	0.0100	0.0078	0.0312	0.1285	1.1273
382	0.998749218	0.05	0.00059667	0.12	0.012	1	9.81								
383	0.998749218	0.05	0.00059667	0.12	0.012	1	9.81								
384	0.998749218	0.05	0.00059667	0.12	0.012	1	9.81								
385	0.998749218	0.05	0.00059667	0.12	0.012	1	9.81	0.0600	0.0096	0.0343	0.0100	0.0090	0.0333	0.1289	1.2562
386	0.998749218	0.05	0.00059667	0.12	0.012	1	9.81								
387	0.998749218	0.05	0.00059667	0.12	0.012	1	9.81								
388	0.998749218	0.05	0.00059667	0.12	0.012	1	9.81	0.0700	0.0084	0.0323	0.0100	0.0078	0.0312	0.1285	1.1273
389	0.998749218	0.05	0.00059667	0.12	0.012	1	9.81								
390	0.998749218	0.05	0.00059667	0.12	0.012	1	9.81	0.0800	0.0108	0.0360	0.0100	0.0102	0.0351	0.1291	1.3853
391															
392															
393															
394															
395															
396															
397															
398															
399															
400															
401															
402															
403															
404															
405															
406															
407															
408															
409															
410															
411															
412															
413															
414															
415															
416															
417															
418															
419															
420															
421															
422															
423															
424															
425															
426															
427															
428															
429															
430															
431															
432															
433															
434															
435															
436															
437															
438															
439															
440															
441															
442															
443															
444															
445															
446															
447															
448															
449															
450															
451															
452															
453															
454															
455															

Figura A16. Hoja de cálculo que muestra el uso de la ecuación (1.83). El mismo procedimiento se puede realizar para utilizando cualquier vertedero, fijando una altura de inclinación y un caudal
 Fuente: (Elaboración propia)

ANEXO 20: Hoja de cálculo que muestra el cálculo del coeficiente de descarga

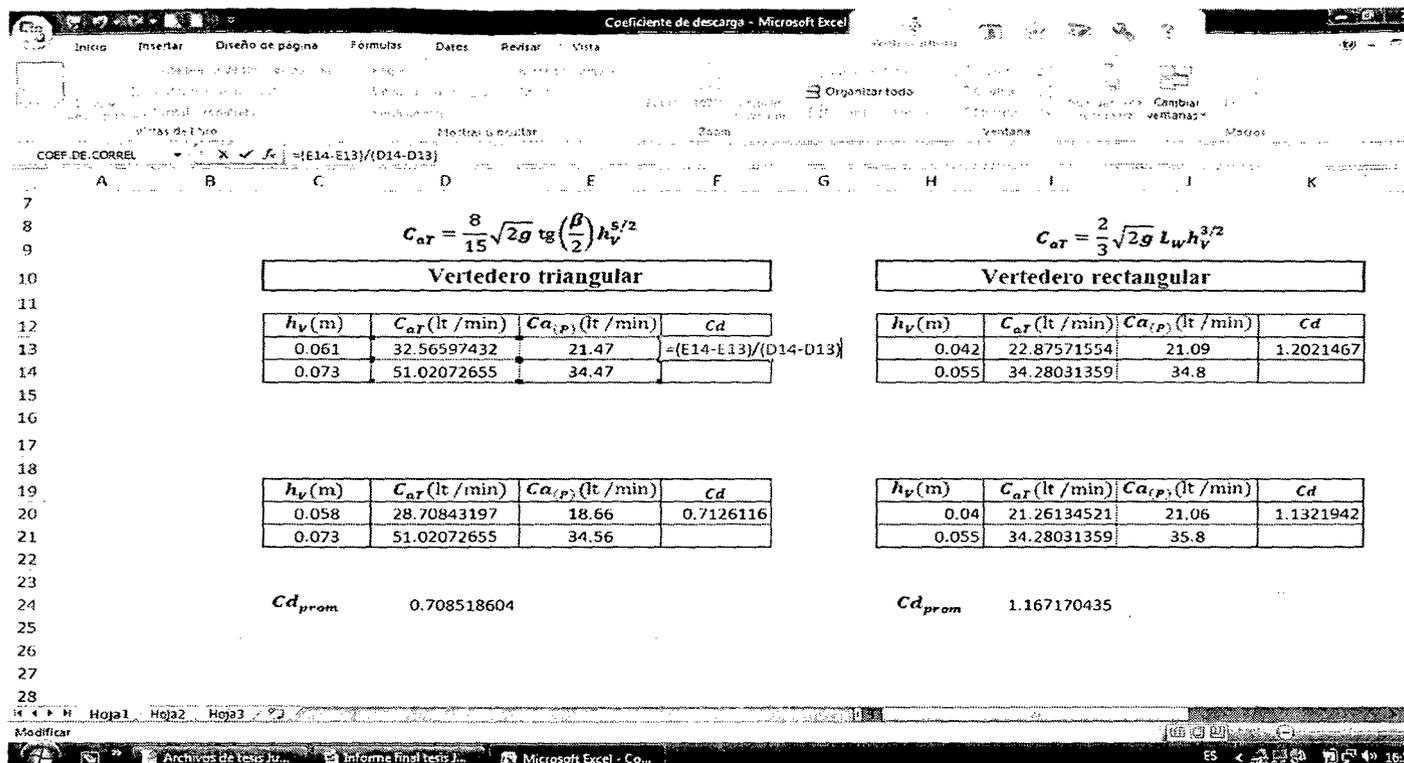


Figura A17. Hoja de cálculo que muestra el cálculo del coeficiente de descarga. El mismo procedimiento se puede realizar para cualquier vertedero

Fuente: (Elaboración propia)

ANEXO 21: Hoja de cálculo que muestra el cálculo del coeficiente de descarga promedio

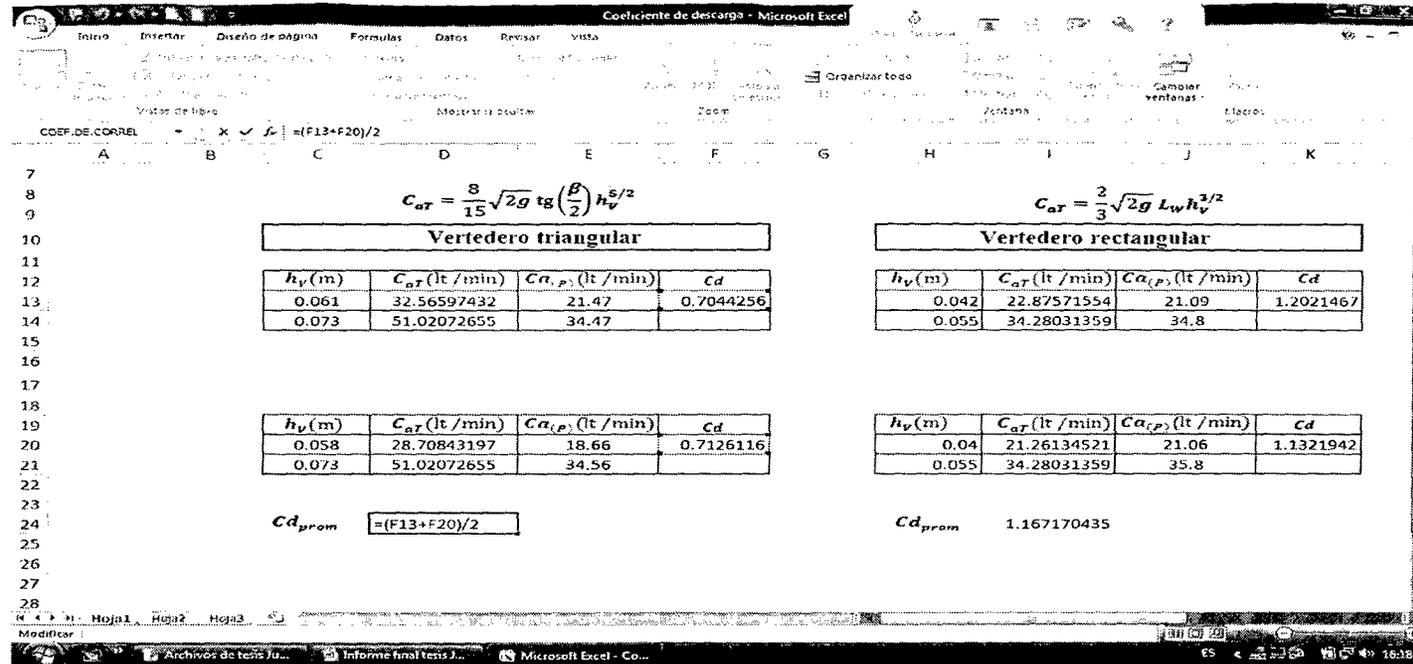


Figura A18. Hoja de cálculo que muestra el cálculo del coeficiente de descarga promedio. El mismo procedimiento se puede realizar para cualquier vertedero

Fuente: (Elaboración propia)