



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE CUENCA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO**

**DISEÑO DE UN PARQUE DE MICROCENTRALES  
HIDROELÉCTRICAS PARA LA CUENCA BAJA DEL RIO  
SAN FRANCISCO DEL CANTÓN GUALACEO PROVINCIA  
DEL AZUAY**

**AUTORES:**

ROMEL ROBERTO MORENO TRAVEZ

JORGE PAUL NARANJO ARMIJOS

**DIRECTOR:**

ING. FRAN REINOSO AVECILLAS

**Cuenca, julio de 2012**

## **CERTIFICO**

Que la presente tesis ha sido desarrollada bajo todos los reglamentos estipulados por la Universidad politécnica Salesiana y ha cumplido con todos sus requisitos para su aprobación.

Atentamente



Ing. Fran Reinoso AVECILLAS

**DIRECTOR DE TESIS**

## DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Los conceptos desarrollados, análisis elaborados y las conclusiones del presente proyecto de investigación, son exclusiva responsabilidad de los autores y autorizamos a la Universidad Politécnica Salesiana el uso de la misma para fines académicos.

Cuenca, julio 19 del 2012



Roberto Moreno T



Jorge Naranjo A

## **AGRADECIMIENTO**

A todas las personas que han participado directa o indirectamente en la realización de la presente tesis, de manera muy especial al Ing. Nelson Jara y al Ing. Fran Reinoso Avecillas por su tiempo y apoyo dedicados a la ejecución de esta tesis.

## ***DEDICATORIA***

*Dedico y agradezco a mis padres Luis Moreno y Mercedes Travez por su abnegada y esforzada labor en mi formación como persona, a mis hermanos Rolando y Oscar por todo el apoyo incondicional brindado para llegar a esta etapa de la vida.*

*Roberto Moreno T.*

## ***DEDICATORIA***

*Quiero dedicar este trabajo a todas las personas que han formado parte de mi preparación Profesional, en especial a mis padres y hermanos quienes con su entrega y afecto han forjado mi vida y se han convertido en mi pilar de apoyo en los momentos difíciles, también está dedicado para mi prometida Kary quien ha sabido llenar de alegría y amor cada uno de mis días.*

*Muchas gracias a todos ustedes y que Dios los colme de bendiciones en su vida.*

*Paul Naranjo A.*

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

### **CAPITULO I: ESTUDIO TOPOGRÁFICO E HIDROLÓGICO DE LA CUENCA BAJA DEL RÍO SAN FRANCISCO DEL CANTÓN GUALACEO EN LA PROVINCIA DEL AZUAY**

Introducción.....	1
1.1 MEDICIÓN DEL SALTO.....	1
1.1.1 Altura neta.....	3
1.1.1.1 Principio de Energía.....	3
1.2 MÉTODOS DE MEDICIÓN DEL CAUDAL .....	5
1.2.1 Cuando existe información histórica .....	5
1.2.1.1 Curva de caudales .....	5
1.2.1.2 Caudal pico .....	5
1.2.1.3 Caudal mínimo.....	5
1.2.1.4 Caudal medio .....	6
1.2.1.5 Caudal ecológico.....	6
1.2.1.6 Curva de duración de caudales .....	6
1.2.1.7 Curva de frecuencia .....	6
1.2.1.8 Caudal de diseño.....	7
1.2.1.9 Volumen de sedimentos.....	7
1.2.2 Métodos de medición alternativos .....	8
1.2.2.1 Método del recipiente .....	8
1.2.2.2 Medición del caudal con flotador .....	8
1.2.2.3 Medición de caudal con correntómetro .....	10
1.2.2.4 Medición del caudal con escala .....	11
1.2.2.5 Medición de caudal con vertedero .....	11
1.2.2.6 Medición del caudal por el método de descarga.....	11
1.3 DETERMINACIÓN DEL SALTO Y DEL CAUDAL APROVECHABLE DEL RIO SAN FRANCISCO.....	11
1.3.1 Salto .....	11
1.3.2 Medición del Caudal.....	13

1.3.2.1	Caudal promedio del rio San Francisco .....	13
1.3.3	Análisis de la información meteorológica del Rio San Francisco .....	16
1.3.3.1	Histograma de frecuencia de caudales del Rio San Francisco.....	19
1.3.3.2	Curva de duración de caudales del Rio San Francisco .....	20
1.4	DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA DISPONIBLE DEL RIO SAN FRANCISCO.....	23
1.5	CRITERIOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN PARQUE HIDROELÉCTRICO DE MICROCENTRALES .....	25
	Conclusiones .....	28

## **CAPITULO II: GENERACIÓN MINI-HIDRÁULICA**

	Introducción.....	30
2.1	ASPECTOS GENERALES SOBRE MICROCENTRALES HIDROELÉCTRICAS .....	30
2.2	DESCRIPCIÓN DE LAS OBRAS CIVILES DE UNA MICROCENTRAL HIDROELÉCTRICA .....	31
2.2.1	Esquema general de una MCH .....	33
2.2.1.1	Tubería corta.....	33
2.2.1.2	Tubería Larga.....	33
2.2.2	Bocatoma de Fondo .....	34
2.2.2.1	Azud.....	35
2.2.2.2	Soleras.....	35
2.2.2.3	Muros laterales.....	35
2.2.2.4	Canal colector .....	35
2.2.2.5	Rejilla de admisión .....	35
2.2.2.6	Cámara de recolección.....	36
2.2.2.7	Procedimiento de Diseño .....	36
a)	Azud o presa <sup>1</sup> .....	36
b)	Rejilla de admisión <sup>3</sup> .....	40
c)	Galería o Canal Colector .....	43
2.2.3	Conducción .....	45

2.2.3.1	Tubería de conducción.....	46
2.2.3.2	Selección de la tubería de conducción.....	46
2.2.4	Desarenado res y cámara de carga.....	48
2.2.4.1	Desarenador.....	48
a)	Ancho y longitud del desarenador.....	50
b)	Tanque colector del desarenador.....	52
2.2.4.2	Cámara de carga.....	53
a)	Distancia entre las rejillas.....	53
b)	Limpieza de las rejillas.....	53
2.2.4.3	Limpieza de desarenadores y corte del agua.....	54
2.2.4.4	Secciones de ingreso del desarenador.....	55
2.3	TUBERÍA DE PRESIÓN.....	55
2.3.1	Pautas para seleccionar una tubería de presión.....	56
2.3.2	Materiales para tuberías de presión.....	56
2.3.2.1	Acero comercial.....	57
2.3.2.2	Policloruro de vinilo (PVC).....	57
2.3.2.3	Hierro dúctil centrifugado.....	58
2.3.2.4	Asbesto-cemento.....	58
2.3.2.5	Resina de poliéster con fibra de vidrio reforzado.....	58
2.3.2.6	Polietileno de alta densidad.....	58
2.3.3	Tipos de uniones.....	60
2.3.4	Juntas de expansión.....	60
2.3.5	Válvulas para tuberías de presión.....	61
2.3.5.1	Válvula de compuerta.....	61
2.3.5.2	Válvula de mariposa.....	61
2.3.6	Selección del diámetro de la tubería de presión.....	62
2.3.6.1	Cálculo de las pérdidas por fricción y diámetro de tubería de presión.....	64
2.3.6.2	Cálculo del espesor de pared de tuberías de presión.....	65
2.3.6.3	Secuencia del cálculo.....	66
2.3.7	Apoyos y anclajes para tuberías de presión.....	68
2.3.7.1	Espaciamiento de soportes.....	69

2.3.7.2	Cálculo de apoyos.....	69
2.3.8	Cálculo de anclajes .....	75
2.4	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO ELECTROMECAÁNICO DE UNA MICROCENTRAL HIDROELÉCTRICA.....	82
2.4.1	Tipo de turbinas .....	82
2.4.1.1	Turbinas Pelton .....	83
2.4.1.2	Turbinas Francis .....	84
2.4.1.3	Turbina Kaplan .....	85
2.4.1.4	Turbina Turgo.....	86
2.4.1.5	Turbina Michell Banki.....	86
a)	Principio de funcionamiento.....	86
b)	Descripción general y parámetros de diseño .....	87
c)	Diseño hidráulico.....	89
d)	Diseño mecánico.....	96
2.4.2	Estandarización y Selección .....	103
2.4.2.1	Estandarización.....	104
2.4.2.2	Selección.....	105
2.4.3	Sistema de control de la turbina hidráulica.....	109
2.4.3.1	Regulación de velocidad.....	109
a)	Regulación de velocidad por medio del caudal de agua en la turbina.....	109
c)	Regulación de la velocidad por regulación de carga .....	110
2.5	GENERADORES ELÉCTRICOS EN MCH .....	111
2.5.1	Generador síncrono.....	111
2.5.1.1	Velocidad síncrona .....	102
2.5.1.2	Generador síncrono-principio de operación .....	113
2.5.2	Regulación de tensión.....	114
2.5.2.1	Regulador automático de tensión (AVR) electrónico.....	114
2.5.2.2	Calibración.....	116
2.5.3	Criterios de selección.....	116
2.5.4	Operación en paralelo de generadores síncronos.....	117
2.5.4.1	Procedimiento general para conectar generador en paralelo .....	117

2.5.4.2	Conexión de las fases y excitatriz.....	118
2.5.4.3	Acoplamiento correcto.....	119
2.5.4.4	Modernas instalaciones.....	120
2.6	SISTEMAS DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA MECÁNICA.....	120
2.6.1	Elementos de un sistema de transmisión de potencia mecánica.....	120
2.6.2	Tipos de Transmisión.....	121
2.6.3	Comparación entre sistemas de transmisión.....	122
2.6.3.1	Transmisión por Bandas.....	122
2.6.3.2	Transmisión por cadena de rodillo.....	122
2.6.3.3	Transmisión por engranajes.....	123
2.6.4	Criterios para el dimensionamiento de sistemas de transmisión.....	124
2.6.4.1	Selección de Bandas en V.....	125
2.6.4.2	Selección del tipo de sección.....	125
2.6.4.3	Diámetro de poleas.....	125
2.6.4.4	Longitud de la banda.....	125
2.6.4.5	Número de Bandas.....	126
2.7	LÍNEAS DE TRANSMISIÓN Y REDES DE DISTRIBUCIÓN.....	127
2.7.1	Diseño de la línea de transmisión.....	127
2.7.2	Selección técnico-económica de los componentes de la LT.....	129
	Conclusiones.....	138

### **CAPITULO III: DISEÑO DEL PARQUE HIDROELÉCTRICO DE MICROCENTRALES PARA EL RIO SAN FRANCISCO DEL CANTÓN GUALACEO**

	Introducción.....	139
3.1	DISEÑO DE OBRAS CIVILES DE LA MICROCENTRAL.....	139
3.1.1	Bocatoma.....	139
3.1.1.1	Dimensionamiento del Azud.....	139
3.1.1.2	Análisis de estabilidad del Azud.....	145
3.1.1.3	Rejilla de admisión.....	151
3.1.1.4	Galería o Canal Colector.....	153

3.1.2	Tubería de Conducción.....	156
3.1.3	Desarenador y Cámara de Carga .....	159
3.2	DISEÑO HIDRÁULICO .....	160
3.2.1	Tubería de Presión .....	160
3.2.1.1	Apoyos .....	164
3.2.1.2	Anclajes .....	175
3.3	DISEÑO Y SELECCIÓN DE LA TURBINA .....	187
3.3.1	Diseño Hidráulico .....	188
3.3.2	Diseño Mecánico .....	192
3.4	SELECCIÓN DEL GENERADOR .....	202
3.5	TRANSMISIÓN DE POTENCIA MECÁNICA.....	203
3.6	SISTEMA ELÉCTRICO .....	207
3.7	GUIA PARA EL USO DEL SOFTWARE DE DIMENSIONAMIENTO DE MICROCENTRALES .....	212
	Conclusiones: .....	218

#### **CAPITULO IV: ANÁLISIS ECONÓMICO FINANCIERO**

	Introducción.....	220
4.1.	PRESUPUESTO DEL PARQUE DE MCH.....	220
4.1.1	Costo de Obras Civiles .....	220
4.1.2	Tubería de Presión .....	222
4.1.3	Costos equipos Electromecánicos.....	223
4.1.4	Costo Sistema Eléctrico .....	224
4.2	EVALUACIÓN ECONÓMICA TOTAL DEL PROYECTO .....	224
4.2.1	Cuadro de Flujo de Caja Interno.....	225
4.2.2	Cálculo de los indicadores del análisis Beneficio-Costo .....	229
4.2.3	Cálculo del costo del kWh .....	230
4.2.4	Análisis de sensibilidad .....	233
4.2.4.1	Análisis aumentando el 10% de costos de la Obra Civil .....	233
4.2.4.2	Análisis con un disminución del 10% de los ingresos anuales.....	239
4.2.5	Conclusiones del Análisis Económico.....	244

4.3	EVALUACIÓN FINANCIERA.....	244
4.3.1	Flujo Neto Financiero del Proyecto.....	244
4.3.2	Parámetros de Evaluación.....	246
4.3.2.1	Valor Actual Neto (VAN).....	246
4.3.2.2	Tasa Interna de Retorno (TIR).....	247
4.3.3	Cálculo del Costo del kWh.....	247
4.3.4	Conclusiones de la Evaluación Financiera.....	249
	Conclusiones.....	249

## ÍNDICE DE TABLAS

### CAPITULO I

Tabla 1.1.	Comparación de métodos para medir el salto.....	2
Tabla 1.2.	Coeficientes de flotación experimentales para diferentes lechos.....	10
Tabla 1.3.	Medición del salto o caída del Rio San Francisco.....	11
Tabla 1.4.	Valores de tiempos de desplazamiento del flotador.....	15
Tabla 1.5.	Cuadro de caudales anuales para la cuenca del Rio San Francisco en Gualaceo (m <sup>3</sup> /s).....	18
Tabla 1.6.	Cuadro de Distribución de Frecuencias.....	20
Tabla 1.7.	Demanda para distintas poblaciones.....	26

### CAPITULO II

Tabla 2.1.	Coeficiente de captación de acuerdo al ángulo de inclinación de la rejilla....	42
Tabla 2.2.	Comparación de los diferentes materiales para tuberías de presión.....	59
Tabla 2.3.	Propiedades de los materiales para tuberías.....	59
Tabla 2.4.	Coeficiente de pérdidas en curvas.....	63
Tabla 2.5.	Coeficientes de pérdidas en contracciones.....	63
Tabla 2.6.	Espaciamiento entre apoyos (m) para tuberías de acero comercial.....	69
Tabla 2.7.	Valores de velocidad específica para diferentes tipos de turbinas Francis.....	84
Tabla 2.8.	Rango de aplicación de las turbinas Hidráulicas.....	88
Tabla 2.9.	Diámetro del eje álabe directriz.....	97
Tabla 2.10.	Eficiencia del grupo de generación ( $\eta_{GR}$ ).....	106

Tabla 2.11. Características principales de turbinas hidráulicas .....	107
Tabla 2.12. Clasificación de MCH según la potencia.....	107
Tabla 2.13. Velocidades síncronas.....	112
Tabla 2.14. Ejemplos de grado de irregularidad de las maquinas accionales .....	124
Tabla 2.15. Valores de aproximados de factor de servicio .....	124
Tabla 2.16. Tensiones de Líneas de Transmisión y Redes de Distribución Primaria recomendadas .....	128
Tabla 2.17. Máxima caída de tensión permisible en Líneas de Transmisión y Distribución Primaria .....	129
Tabla 2.18. Conductores generalmente usados en electrificación rural.....	130
Tabla 2.19. Factores de caída de tensión (FCT).....	132
Tabla 2.20. Coeficiente de temperatura ( $\alpha$ ) .....	133
Tabla 2.21. Aisladores recomendados para ambientes con atmosfera limpia (Clases IEE- NEMA).....	135
Tabla 2.22. Potencias Nominales de Transformadores .....	136
Tabla 2.23. Potencias nominales de transformadores de distribución (estándares de fabricantes).....	137

### **CAPITULO III**

Tabla 3.1. Cálculo de momentos de cada uno de los elementos .....	147
Tabla 3.2. Perdidas en accesorios en la tubería de conducción .....	156
Tabla 3.3. Valores de iteración de la tubería de conducción .....	158
Tabla 3.4. Elección de diámetro comercial de la tubería de conducción .....	158
Tabla 3.5. Perdidas por turbulencia en accesorios en la tubería de presión.....	162
Tabla 3.6. Dimensiones de la tubería de presión .....	164

### **CAPITULO IV**

Tabla 4.1. Costo de la Casa de Maquinas .....	220
Tabla 4.2. Costo de la Bocatoma .....	221
Tabla 4.3. Costo de la Tubería de Conducción .....	221
Tabla 4.4. Costo del Desarenador y Tanque de Presión .....	222

Tabla 4.5. Costo de los Apoyos y Anclajes .....	222
Tabla 4.6. Costo de la Tubería de Presión .....	223
Tabla 4.7. Costo del Equipo Electromecánico .....	223
Tabla 4.8. Costo del Sistema Eléctrico .....	224
Tabla 4.9. Inversiones en el Parque de MCH de 160 kW .....	225
Tabla 4.10. Venta Anual de Energía Proyectada .....	225
Tabla 4.11. Ingreso por venta de Energía a 4¢ el kWh.....	226
Tabla 4.12. Flujo de caja interno proyectada para cada año de funcionamiento del Parque de MCH.....	228
Tabla 4.13. Procedimiento de cálculo del VAN a diversas Tasas de Interés.....	229
Tabla 4.14. Cálculo del costo del kWh (Miles de US\$ corrientes).....	232
Tabla 4.15. Inversiones en el Parque de MCH de 160 kW con un aumento del 10% del costo de la Obras Civil.....	233
Tabla 4.16. Flujo de caja interno para un aumento del 10% del costo de la Obra Civil.....	235
Tabla 4.17. Procedimiento de cálculo del VAN a diversas Tasas de Interés para un aumento del 10% del costo de las Obras Civiles .....	236
Tabla 4.18. Cálculo del costo del kWh (Miles de US\$ corrientes) para un aumento del 10% del costo de la Obra Civiles .....	238
Tabla 4.19. Venta Anual de Energía con una disminución del 10%.....	239
Tabla 4.20. Ingreso por venta de Energía a 4¢ el kWh con una disminución de 10% ..	239
Tabla 4.21. Flujo de caja interno para una disminución del 10% de los ingresos anuales.....	240
Tabla 4.22. Procedimiento de cálculo del VAN a diversas Tasas de Interés para una disminución del 10% de los ingresos anuales.....	241
Tabla 4.23. Cálculo del costo del kWh (Miles de US\$ corrientes) para una disminución del 10% de los ingresos anuales.....	243
Tabla 4.24. Flujo de Caja Financiero del Proyecto.....	245
Tabla 4.25. Procedimiento de cálculo del VAN a diversas Tasas de Interés.....	246
Tabla 4.26. Cálculo del costo del kWh (Miles de US\$ corrientes).....	248

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPITULO I

Figura 1.1. Concepto de salto.....	2
Figura 1.2. Balance energético entre distintas secciones .....	4
Figura 1.3. Gráfica de velocidades en la sección transversal del rio .....	9
Figura 1.4. Curvas de Nivel del Rio San Francisco .....	12
Figura 1.5. Perfil del tramo en estudio del Rio San Francisco.....	13
Figura 1.6. Aproximación de sección del rio .....	13
Figura 1.7. Seccionamiento del tramo 1 del rio .....	14
Figura 1.8. Cálculo de sección del Rio San Francisco.....	16
Figura 1.9. Hidrógrama Rio San Francisco, año 1991 .....	17
Figura 1.10. Hidrógrama Rio San Francisco, año 1990.....	17
Figura 1.11. Curva de Duración de Caudales del Rio San Francisco .....	21
Figura 1.12. Histograma de Frecuencias Relativas del rio San Francisco .....	22
Figura 1.13. Eficiencias del sistema para una MCH operando a plena carga.....	24
Figura 1.14. Ubicación de las subestaciones en el Rio San Francisco.....	27

### CAPITULO II

Figura 2.1. Diversos esquemas de Microcentrales Hidroeléctricas. ....	31
Figura 2.2. Componentes de una Microcentral Hidráulica .....	32
Figura 2.3. Esquema con tubería de presión corta .....	33
Figura 2.4. Esquema de tubería de presión larga .....	34
Figura 2.5. Elementos de la Bocatoma .....	36
Figura 2.6. Coordenadas del sistema cartesiano .....	38
Figura 2.7. Dimensiones del azud .....	40
Figura 2.8. Dimensiones de la rejilla .....	43
Figura 2.9. Dimensiones del Canal Colector .....	43
Figura 2.10. Esquema de una cámara de carga .....	49
Figura 2.11. Trayectoria de las partículas de un desarenador .....	51
Figura 2.12. Rejilla en la cámara de carga .....	53
Figura 2.13. Desagüe de limpieza y aliviadero .....	54

Figura 2.14. Componentes de una tubería de presión .....	55
Figura 2.15. Juntas de dilatación.....	61
Figura 2.16. Válvulas de mariposa con diferentes mecanismos de apertura .....	62
Figura 2.17. Pérdidas debido a turbulencias .....	63
Figura 2.18. Apoyos y anclajes para tuberías de presión .....	68
Figura 2.19a. Fuerzas que intervienen los apoyos .....	70
Figura 2.19b. Fuerzas que intervienen los apoyos .....	71
Figura 2.19c. Fuerzas que intervienen los apoyos .....	71
Figura 2.19d. Fuerzas que intervienen los apoyos .....	72
Figura 2.20. Fuerzas cuando la tubería se dilata .....	74
Figura 2.21. Tubería de presión .....	75
Figura 2.22. Cálculo de la fuerza $F_1$ .....	76
Figura 2.23. Cálculo de la fuerza $F_2$ .....	77
Figura 2.24. Cálculo de la fuerza $F_3$ .....	77
Figura 2.25. Cálculo de la fuerza $F_4$ .....	78
Figura 2.26. Cálculo de la fuerza $F_5$ .....	79
Figura 2.27. Cálculo de la fuerza $F_6$ .....	80
Figura 2.28. Cálculo de la fuerza $F_7$ .....	80
Figura 2.29. Cálculo de la fuerza $F_8$ .....	81
Figura 2.30. Cálculo de la fuerza $F_9$ .....	82
Figura 2.31. Componentes de una turbina Pelton de eje horizontal.....	83
Figura 2.32. Partes principales Turbina Michell Banki .....	86
Figura 2.33. Diagrama de velocidades en el rodete Michell Banki .....	91
Figura 2.34. Fuerzas actuantes sobre el alabe del rodete .....	98
Figura 2.35. Ángulos en el Alabe.....	99
Figura 2.36. Diagrama de fuerzas y Momentos en el Eje de la Turbina.....	102
Figura 2.37. Diagrama para seleccionar Turbinas Michell Banki Estandarizadas .....	105
Figura 2.38. Diagrama de selección de Turbinas Hidráulicas .....	106
Figura 2.39. Esquema en partes del Generador Síncrono .....	112
Figura 2.40. Esquema de Generador Trifásico.....	114

Figura 2.41. Esquema de Frecuencia de Fases.....	114
Figura 2.42. Devanados del Generador.....	118
Figura 2.43. Método de las tres lámparas .....	119
Figura 2.44. Sincronización para el acoplamiento de un alternador a la red .....	120
Figura 2.45. Esquema eléctrico de LT y RDS .....	127
Figura 2.46. Disposición de conductores .....	129

### **CAPITULO III**

Figura 3.1. Sistema de Generación Hidroeléctrica.....	140
Figura 3.2. Coordenadas del Perfil Creager .....	142
Figura 3.3. Dimensionamiento de Perfil Creager.....	145
Figura 3.4. Sección equivalente del Azud.....	145
Figura 3.5. Diagrama de fuerzas actuantes sobre el Azud. ....	146
Figura 3.6. Punto de aplicación del peso del Azud .....	147
Figura 3.7. Dimensiones de la rejilla .....	153
Figura 3.8. Bocatoma .....	155
Figura 3.9. Tubería de conducción.....	156
Figura 3.10. Dimensiones del desarenador y Cámara de Carga .....	160
Figura 3.11. Diagrama fuerzas F1 y F2 .....	166
Figura 3.12. Inercia de la sección.....	167
Figura 3.13. Dimensiones del apoyo.....	168
Figura 3.14. Diagrama de fuerzas en el Apoyo.....	170
Figura 3.15. Centro de gravedad del Apoyo .....	171
Figura 3.16. Fuerzas que intervienen en el Apoyo .....	171
Figura 3.17. Fuerza debido al peso de la tubería con agua .....	175
Figura 3.18. Fuerza debido a cambio de presión hidrostática.....	176
Figura 3.19. Fuerza del peso de la tubería paralela a ella .....	176
Figura 3.20. Fuerza debido a cambio de temperatura .....	177
Figura 3.21. Fuerza debido al cambio de dirección .....	178
Figura 3.22. Resumen de fuerzas actuantes del Apoyo .....	178
Figura 3.23. Dimensiones del Anclaje .....	179

Figura 3.24. Centro de gravedad del Anclaje.....	180
Figura 3.25. Diagrama de fuerzas actuantes en el Anclaje .....	171
Figura 3.26. Fuerzas actuantes en el Anclaje .....	183
Figura 3.27. Diagrama de fuerzas cuando la tubería se contrae.....	184
Figura 3.28. Diagrama de fuerzas en el eje de la turbina .....	201
Figura 3.29. Sistema Eléctrico .....	208
Figura 3.30. Sistema de Distribución.....	211
Figura 3.31. Pantalla de arranque del Software .....	213
Figura 3.32. Ventana para el ingreso de datos aprovechables .....	214
Figura 3.33. Cuadro para el ingreso de los datos de diseño .....	214
Figura 3.34. Cuadro para el cumplimiento de criterios de diseño .....	215
Figura 3.35. Ventana de Simbología.....	215
Figura 3.36. Ventana de graficas.....	216
Figura 3.37. Ingreso de valores por defecto.....	216
Figura 3.38. Ingreso de datos en tablas de cálculo.....	217
Figura 3.39. Ventana de Tablas para selección rápida de las variables de cálculo.....	217

#### **CAPITULO IV**

Figura 4. 1. Tasa Interna de Retorno para análisis normal.....	230
Figura 4. 2. TIR para un aumento del 10% del costo de las Obras Civiles.....	237
Figura 4. 3. TIR para una disminución del 10% de los ingresos anuales .....	242
Figura 4. 4. Tasa interna de retorno financiero .....	247

## LISTA DE ABREVIACIONES

MCH:	Microcentral Hidroeléctrica
PROMAS:	Programa para el Manejo del Agua y del Suelo
ONUDI:	Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial
OLADE:	Organización Latinoamericana de Energía
ITDG:	Intermediate Technology Development Group
$P$ :	Presión en $N/m^2$
$\gamma$ :	Peso Específico en $N/m^3$
$V$ :	Velocidad del Fluido en $m/s$
$Q$ :	Es el caudal en $m^3/s$
$\rho_o$ :	Turbidez
$A$ :	Es el área de la sección transversal en $m^2$
$\eta_o$ :	Eficiencia típica del sistema para una Microcentral a plena carga
$H_{disp}$ :	Altura disponible en $m$
$X, Y$ :	Son las coordenadas del sistema cartesiano
$g$ :	Aceleración de la gravedad
$k$ :	Pérdidas de presión en $m$
$\lambda$ :	Factor de fricción
Re:	Número de Reynolds
$\nu$ :	Es la viscosidad cinemática del fluido en $m^2/s$
$K$ :	Es el valor de la rugosidad absoluta
$k_j$ :	Factor de corrección para junta soldada de tuberías
$K_C$ :	Factor de corrección por corrosión de tuberías
$\gamma$ :	Peso específico del material, $(N/m^3)$ ó $(kg/m^3)$
$I_{gx}$ :	Momento de inercia
$n_{crit}$ :	Velocidad crítica de la turbina en rpm
$f$ :	Frecuencia en Hz

## **INTRODUCCIÓN**

El presente proyecto proporciona los criterios e información sobre la evaluación del recurso Hidroenergético en la cuenca baja del Río San Francisco del Cantón Gualaceo en la provincia del Azuay así como también el procedimiento de cálculo basado en los criterios de la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) para el diseño de cada uno de los componentes que conforman una Microcentral Hidroeléctrica.

Es así como en el capítulo uno se realiza la evaluación del caudal y altura disponibles en la cuenca en estudio, para la determinación del caudal aprovechable se utilizaron datos históricos de aforos proporcionados por el Programa para el Manejo del Agua y del Suelo (PROMAS) de la Universidad de Cuenca, mientras que para la determinación de la altura bruta en los diferentes tramos de la cuenca en estudio se utilizó el método del GPS debido a que se puede obtener datos precisos de desnivel en cualquier zona con costos reducidos, mismos que servirán para la estimación de la potencia a obtener la cual en función de la demanda energética de la zona determinaran el número de subestaciones de las cuales estará conformado el Parque Hidroeléctrico.

Una vez que se han determinado los datos de caudal y altura aprovechables se procede a establecer los criterios y procedimientos de diseño para el dimensionamiento de cada uno de los componentes que conforman una Microcentral Hidroeléctrica, para la captación del caudal aprovechable se plantea la metodología de cálculo para un bocatoma de fondo (Tipo Tirolesa) debido a las ventajas que presenta por su sencillez constructiva y además porque garantiza una captación constante de caudal. El agua captada debe ser transportada hacia el desarenador y cámara de carga por medio de canales o por tubería, siendo la tubería de PVC la más idónea para la implementación en este tipo de proyectos debido a su costo y facilidad de instalación.

Para la selección de la tubería de presión hay que tener en cuenta el tipo de material y dimensiones de las que se puede disponer en el mercado siendo las de acero comercial y PVC las más utilizadas, la elección de cualquiera de estas dos alternativas estará en función de las características del sector en el que se pretenda implementar el proyecto

teniendo un mayor rango de utilización la de PVC por las ventajas que presenta en su fácil instalación, resistencia a las altas presiones, factor de fricción bajo siendo además resistente a la corrosión.

La selección de la turbina se la realiza en base a los datos de caudal y altura obtenidos en el capítulo uno, siendo la Michell Banki la más óptima para este proyecto, por lo cual el procedimiento de cálculo desarrollado se enfoca principalmente en el dimensionamiento de los componentes hidráulicos y mecánicos de este tipo de turbina.

La energía eléctrica se la obtiene por la acción del generador que para nuestro caso será el de tipo síncrono debido a que por tratarse de un parque hidroeléctrico, en donde existirá más de una subestación, se vuelve necesario la acumulación de toda la energía generada lo cual se puede obtener con la conexión en paralelo entre los generadores, acumulando de esta manera la energía generada en cada una de las subestaciones la cual posteriormente será transportada y distribuida a la zona que será beneficiaria de este servicio.

Un aspecto a tener presente para ver si el proyecto es factible o no es el análisis de costos totales, este análisis influirá mucho en la decisión de ejecutar o no el proyecto, teniendo muy en cuenta que la generación de energía es muy importante para el desarrollo y buen vivir de las personas.

# **CAPITULO I: ESTUDIO TOPOGRÁFICO E HIDROLÓGICO DE LA CUENCA BAJA DEL RÍO SAN FRANCISCO DEL CANTÓN GUALACEO EN LA PROVINCIA DEL AZUAY.**

## **INTRODUCCIÓN**

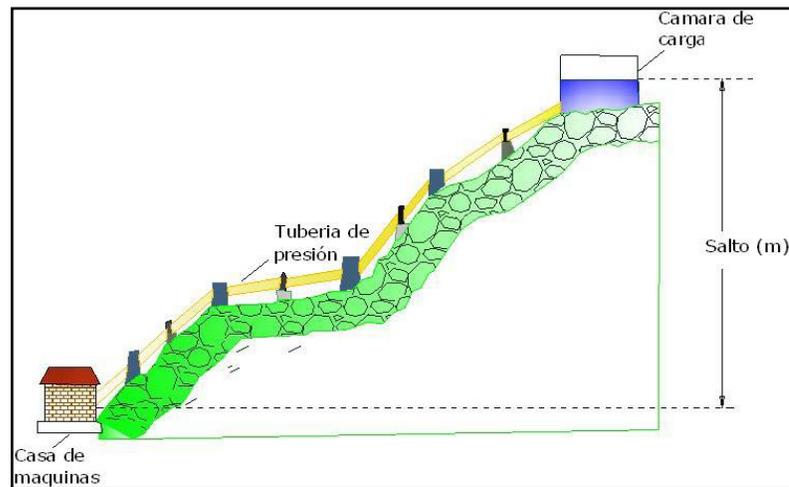
La capacidad de generación de energía mediante el empleo de agua está determinada por el salto o caída que se pueda obtener y del caudal disponible. El salto depende de la topografía del terreno, y el caudal de las características del río o arroyo que se va a utilizar. Conocer la información sobre el caudal del río es muy importante para determinar el caudal de diseño. De igual manera el salto es otro parámetro fundamental para el diseño de la Microcentral Hidroeléctrica (MCH), esta altura deberá ser la máxima permitida por la topografía del terreno y sobre todo teniendo en cuenta que se debe provocar el mínimo impacto ambiental posible en la zona de estudio.

En el presente capítulo se describen métodos sencillos para medir el salto y el caudal en ríos; sin embargo, es necesario evaluar hidrológicamente la cuenca a estudiar, razón de más para explicar métodos de cálculo del caudal de diseño. Es importante orientar el análisis de bases de datos hidrométricos (aforos), a partir de estos se pueden determinar los caudales máximo, medios y mínimos correspondientes a un gran número de años. De igual manera se determinara una potencia estimada de cada subestación así como la potencia total que se puede obtener y aprovechar del Río San Francisco del cantón Gualaceo de la provincia del Azuay.

### **1.1 MEDICIÓN DEL SALTO**

El aprovechamiento de los saltos o caídas de la masa de agua, producidas por los desniveles existentes en los causes por donde aquellas discurren, tienen lugar, no por la velocidad de esta, sino por la presión que puede obtenerse al descender las mismas para obtener de esta manera en su caída el trabajo aprovechable. A esta altura se la conoce como altura bruta  $H_b$ , como se muestra en la figura 1.1.

**Figura 1.1. Concepto de salto**



Fuente: “Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas” Federico Coz.

En la tabla 1.1 se puede apreciar algunos métodos para medir el salto o caída. En esta también se incluyen algunas observaciones sobre la precisión y otros detalles de cada método.

Tabla 1.1. Comparación de métodos para medir el salto				
Método		Ventajas y limitaciones	Precisión	Observaciones
Manguera de nivelación	de	Agotador para caídas altas. Rápido para caídas pequeñas	Aprox. 5%	Es recomendable hacerle entre dos personas
Manguera manómetro	y	Rápido, seguro. Da la posibilidad de medir la longitud de la tubería de presión a la vez	(<5%)	Calibrar instrumentos
Nivel de carpintero y tablas		Inapropiado para pendientes suaves y largas	Aprox. 5% en pendientes pronunciadas	Usar solo para caídas muy pequeñas cuando no se dispone de otro método.
Altímetro		Usado en caídas altas y medianas (> 40 m) rápido.	Probabilidad de errores del (30%)	Necesita calibración de instrumentos y destreza

Eclímetro	Rápido de costo moderado	Buena errores del 5%	Recomendable en terrenos despejados.
Nivel de ingeniero	Rápido de costo elevado	Muy Buena	No es bueno en lugares con demasiados árboles.
Mapa	Solo para caídas altas	Aceptable para prefactibilidad	Destreza para los leer los planos.
GPS	Rápido de costo reducido	Excelente	Para todo tipo de terrenos.

*Fuente: "Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas" - Federico Coz.*

### 1.1.1 Altura neta

La altura neta es aquella aprovechada en forma de presión y resulta del cálculo entre la altura bruta menos las pérdidas que se producen en la tubería de presión y demás accesorios, para una mejor explicación hacemos referencia al principio de energía.

#### 1.1.1.1 Principio de Energía

La Energía en un sistema, desde el punto de vista del Principio de Energía, es la suma de la Energía Potencial y la Cinética. Con miras a lograr una mejor visualización del comportamiento del Sistema Hidráulico, es común que los valores de energía involucrados en el Principio de Energía sean convertidos a unidades de Longitud (al expresarlos como unidades de energía entre unidad de peso de fluido), con lo cual **estaríamos refiriéndonos a la energía en un punto como "Carga", "Cabeza" o, simplemente, "Altura"**.

Entonces, la Energía en cualquier punto en un Sistema Hidráulico, se expresa como la suma de tres partes:

$$H = \frac{P}{\gamma} + z + \frac{V^2}{2g} \quad (\text{ec1.1})$$

Donde:

$H$  : Energía total en m.

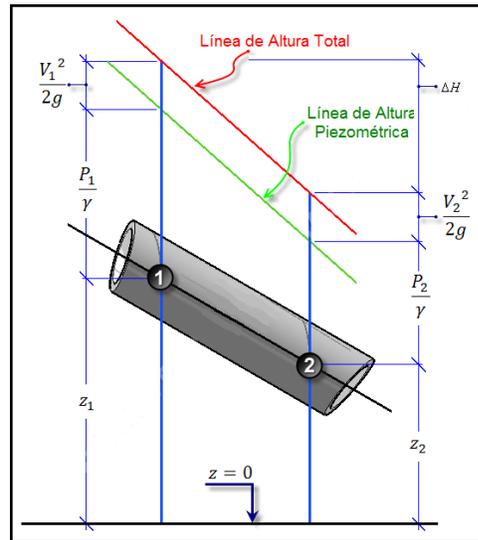
$P$  : Presión en  $\text{N/m}^2$ .

$\gamma$  :Peso Específico en  $\text{N/m}^3$ .

$z$  :Cota o Elevación del punto en consideración en m.

$V$  :Velocidad del Fluido en m/s.

**Figura 1.2. Balance energético entre distintas secciones**



Fuente: Tutorial “Abastecimiento de Agua”

Notemos en la figura 1.2, que entre los dos puntos de control, la Energía Total (la suma de los tres componentes del Principio de Energía), representada por la línea de altura total, es diferente entre los dos puntos o, dicho de otra forma, la Altura Total en el punto 1 es mayor que en el punto 2. Como el Principio de Energía establece que la energía a lo largo de dos puntos en un sistema debe conservarse, el **planteamiento energético** entre los dos puntos debería ser el siguiente:

$$H_1 = H_2$$

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} - \Delta H = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad (\text{ec 1.2})$$

Siendo esta última ecuación conocida como la **Ecuación de Energía**, en la que hemos incluido el término  $\Delta H$  para expresar la **pérdida de energía de total** entre los dos puntos.

La **Altura Piezométrica** es la altura a la que se elevaría el agua en el Sistema Hidráulico, cuando se instala en él un tubo abierto a la atmósfera llamado Piezómetro. La Altura Total, en cambio, sería la altura a la que se elevaría el agua si instalamos en el Sistema un Tubo de Pitot, el cual es similar al piezómetro pero además toma en cuenta la velocidad del fluido.

## **1.2 MÉTODOS DE MEDICIÓN DEL CAUDAL**

### **1.2.1 Cuando existe información histórica**

Cuando se dispone de información se debe determinar el caudal de diseño con base en la curva de caudales y la curva de frecuencia, según el tipo de MCH. Con la información del caudal máximo y mínimo se prevé la estabilidad del azud y se ubica la casa de máquinas a una altura que evite su inundación. Además debe conocerse el volumen de sedimentos que lleva al caudal en suspensión para diseñar el volumen del desarenador. La información histórica existente para una MCH debe ser superior a diez años; para proyectos menores, la información histórica puede ser menor.

#### **1.2.1.1 Curva de caudales**

Es la representación gráfica del registro de caudales medios sobre la base de periodos (días, meses, años) durante un tiempo de medición. La representación gráfica se realiza con base a mediciones instantáneas de caudal, con el apoyo de equipos que permite su registro, o en su defecto con mediciones periódicas y registro del mismo.

#### **1.2.1.2 Caudal pico**

El caudal pico corresponde al caudal máximo de creciente, el cual se presentará transcurrido un tiempo, llamado periodo de retorno; con base a dicho valor y en la magnitud del caudal se hace el diseño de las obras de desvío y el vertedero de exceso.

#### **1.2.1.3 Caudal mínimo**

Es el caudal que se requiere garantizar en el lecho del río para mantener áreas húmedas y no alterar la fauna y la flora del mismo; el caudal mínimo es equivalente al caudal de sequía.

#### **1.2.1.4 Caudal medio**

El caudal medio es el equivalente al promedio de los caudales medidos durante un lapso de tiempo; puede ser diario, mensual o anual.

#### **1.2.1.5 Caudal ecológico**

Para la determinación del caudal ecológico se considera el criterio generalmente aplicado en nuestro sector, esto es que se asume un valor igual al 10% del caudal medio anual, calculado para el río en el sitio de captación.

#### **1.2.1.6 Curva de duración de caudales**

Es una representación gráfica en un diagrama cartesiano. Sobre el eje vertical de las ordenadas se indican los caudales medios ordenados por magnitud del caudal máximo al mínimo; sobre el eje horizontal de las abscisas se indica los periodos (diario, semanal, mensual, u otra). La gráfica se obtiene al ubicar los puntos de caudal contra el número de veces que este caudal ha ocurrido en porcentaje (probabilidad de ocurrencia).

La gráfica de la curva de duración de caudales es una curva que desciende desde un valor máximo registrado  $Q$ , el cual tiene la menor posibilidad de ocurrencia (%), hasta el valor mínimo de caudal  $Q$  que tiene una mayor posibilidad de ocurrencia (%).

#### **1.2.1.7 Curva de frecuencia**

Esta curva indica el caudal de mayor permanencia porcentual durante el periodo correspondiente a 100% de la información; con ella se puede seleccionar el caudal de diseño para una MCH.

La curva de frecuencia indica cuántas veces se repite un determinado caudal durante el año; esta gráfica se representa en un diagrama cartesiano, en el eje vertical de las ordenadas se indica la frecuencia con que cada uno de estos caudales se repite; sobre el eje horizontal de las abscisas se ubica el caudal medio en orden descendente desde el caudal máximo al mínimo.

### **1.2.1.8 Caudal de diseño**

Este caudal se considera en el diseño de la MCH; dependiendo del sistema de embalse y los sistemas de pasada o filo de agua. El caudal seleccionado debe garantizar el funcionamiento de la obra durante la mayor parte del año con la mayor potencia diseñada, asegurando, de esta forma, una generación constante que permita la amortización de la planta en un tiempo razonable.

El caudal de diseño se determina con base en la curva de duración, con la cual se proyecta la MCH. En general, se toma el caudal que dura el 90% para evaluar la potencia disponible y 50% para obtener la potencia adicional con almacenamiento o puede tomarse el caudal que mayor tiempo permanece en el afluente según la curva de frecuencias.

Para seleccionar el caudal de diseño también deben definirse los diferentes caudales mínimos, que se deben garantizar en el afluente. El caudal mínimo corresponde al caudal ecológico y al caudal para otros usos (regadío, acueductos u otros).

### **1.2.1.9 Volumen de sedimentos**

El volumen estimado del transporte de sedimentos debe conocerse para diseñar las compuertas de lavado de la toma y del desarenador. Según el carácter de su movimiento, los sedimentos pueden ser flotantes o de fondo. Estos sedimentos pueden afectar componentes de MCH como la captación, la conducción, el desarenador, el tanque de presión, el equipo mecánico y pueden reducir la capacidad operativa de la planta.

Los factores que influyen en el escurrimiento de los sedimentos son los siguientes:

- Escurrimiento de agua superficial
- Pendiente de la cuenca y de la red fluvial
- Precipitación interna
- Cubierta vegetal y bosques

El mayor o menor contenido de sedimentos flotantes en el agua de un río determina su turbidez, la cual por tanto, es una característica cuantitativa del contenido de sedimentos flotantes y se determina por medio de la siguiente fórmula:

$$\rho_o = \frac{R \times 10^3}{Q} \left[ \frac{m^3}{s} \right] \quad (\text{ec 1.3})$$

Donde:

$R$  : Es la cantidad de sedimentos en  $kg/s$

$Q$  : Es el caudal en  $m^3/s$

$\rho_o$  : Turbidez

## **1.2.2 Métodos de medición alternativos**

La medición del caudal instantáneo del río, es muy importante para el estudio hidrológico, ya que el caudal varía durante todo el año. Los métodos de medición de caudal se describen posteriormente.

### **1.2.2.1 Método del recipiente**

El método del recipiente es una manera muy simple de medir el caudal. Todo el caudal a medir es desviado hacia un balde o barril y se anota el tiempo que toma en llenarlo.

### **1.2.2.2 Medición del caudal con flotador**

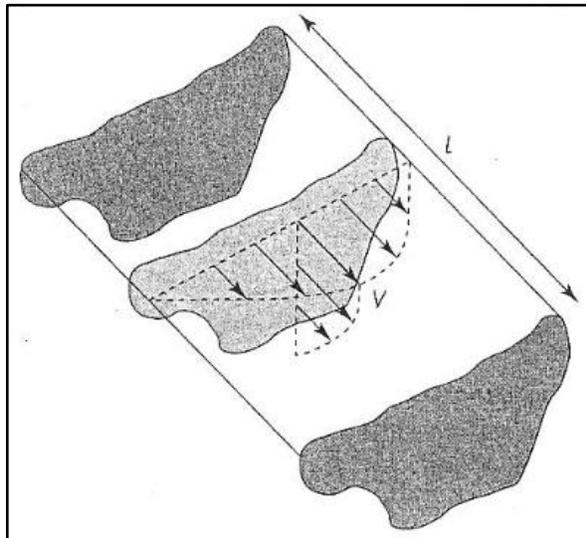
Es un método bastante práctico, se sujeta a cuencas proporcionalmente mayores y permite medir el caudal en forma puntual. Se basa en la medición del tiempo para una distancia determinada que recorre un volumen de agua delimitado por el lecho de la corriente; y se determina de la siguiente forma:

- Se elige un lecho de medida de curso y sección recta y homogénea
- Se mide la longitud del tramo seleccionado  $L$
- Se mide la sección transversal del techo de medida  $A$
- Se prepara un flotador, podría ser una serie de pedazos de madera.

- Se coloca el flotador algunos metros antes del lecho elegido y se cronometra el tiempo utilizado en recorrer la longitud L
- Se determina la velocidad como la relación entre la longitud y el tiempo como se muestra en la ecuación 1.4.

$$V = \frac{L}{t} \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (\text{ec1.4})$$

**Figura 1.3. Gráfica de velocidades en la sección transversal del río**



Fuente: “Pequeñas Centrales Hidroeléctricas” – Ortiz Ramiro

En la figura 1.3 se observa que la velocidad no es homogénea en toda la sección transversal; en este caso es necesario apoyarse de la tabla 1.2, la cual presenta coeficientes de flotación experimentales para diferentes lechos en función de la relación entre la sección transversal S y su perímetro P.

Conociendo el coeficiente c, el área de la sección transversal y la velocidad, se puede determinar el caudal del aprovechamiento con la siguiente expresión:

$$Q = c \times V \times A \left[ \frac{m^3}{s} \right] \quad (\text{ec1.5})$$

Donde:

$V$  :Es la velocidad en m/s.

$A$  :Es el área de la sección transversal en  $m^2/s$ .

$c$  :Es un coeficiente de flotación experimental.

<b>Tabla 1.2. Coeficientes de flotación experimentales para diferentes lechos</b>				
S/P	Madera lisa o cemento	Madera áspera o ladrillo	Pared de pedruscos	Tierra
0.1	0.86	0.84	0.748	0.565
0.2	0.865	0.858	0.7932	0.645
0.3	0.87	0.865	0.812	0.682
0.4	0.875	0.868	0.822	0.712
0.5	0.88	0.87	0.830	0.73
0.6	0.885	0.871	0.835	0.745
0.7	0.89	0.872	0.837	0.755
0.8	0.892	0.873	0.839	0.763
0.9	0.895	0.874	0.842	0.771
1.0	0.895	0.875	0.844	0.778
1.2	0.895	0.876	0.847	0.786
1.4	0.895	0.877	0.85	0.794

*Fuente: "Pequeñas Centrales Hidroeléctricas" – Ortiz Ramiro*

### **1.2.2.3 Medición de caudal con correntómetro**

Es el método de medida más cómodo, el cual requiere un equipo especial consistente en un mango con una hélice. La hélice rota libremente y la velocidad de rotación está relacionada con la velocidad del agua. Un contador mecánico registra el número de revoluciones del propulsor que se ubica a la profundidad deseada.

#### 1.2.2.4 Medición del caudal con escala

Este método determina la velocidad del agua con ayuda de una escala calibrada, que indirectamente determina la velocidad. Por su exactitud en la medición se recomienda emplear este método en velocidades que oscilen entre 0.3 y 3.0 m/s.

#### 1.2.2.5 Medición de caudal con vertedero

La utilización de este método permite la lectura periódica del caudal en una escala. Aparte de su sencillez es recomendable usarlo para seguimiento de caudales.

#### 1.2.2.6 Medición del caudal por el método de descarga

Este método es utilizado para caudales mayores, su implementación requiere un tramo de lecho homogéneo de baja velocidad, preferiblemente recto, en el cual se ubica una escala para determinar el nivel del cauce.

### 1.3 DETERMINACIÓN DEL SALTO Y DEL CAUDAL APROVECHABLE DEL RIO SAN FRANCISCO

#### 1.3.1 Salto

La altura se determina por el método del GPS, tomando los datos leídos en el dispositivo en cada uno de los desniveles, tenemos:

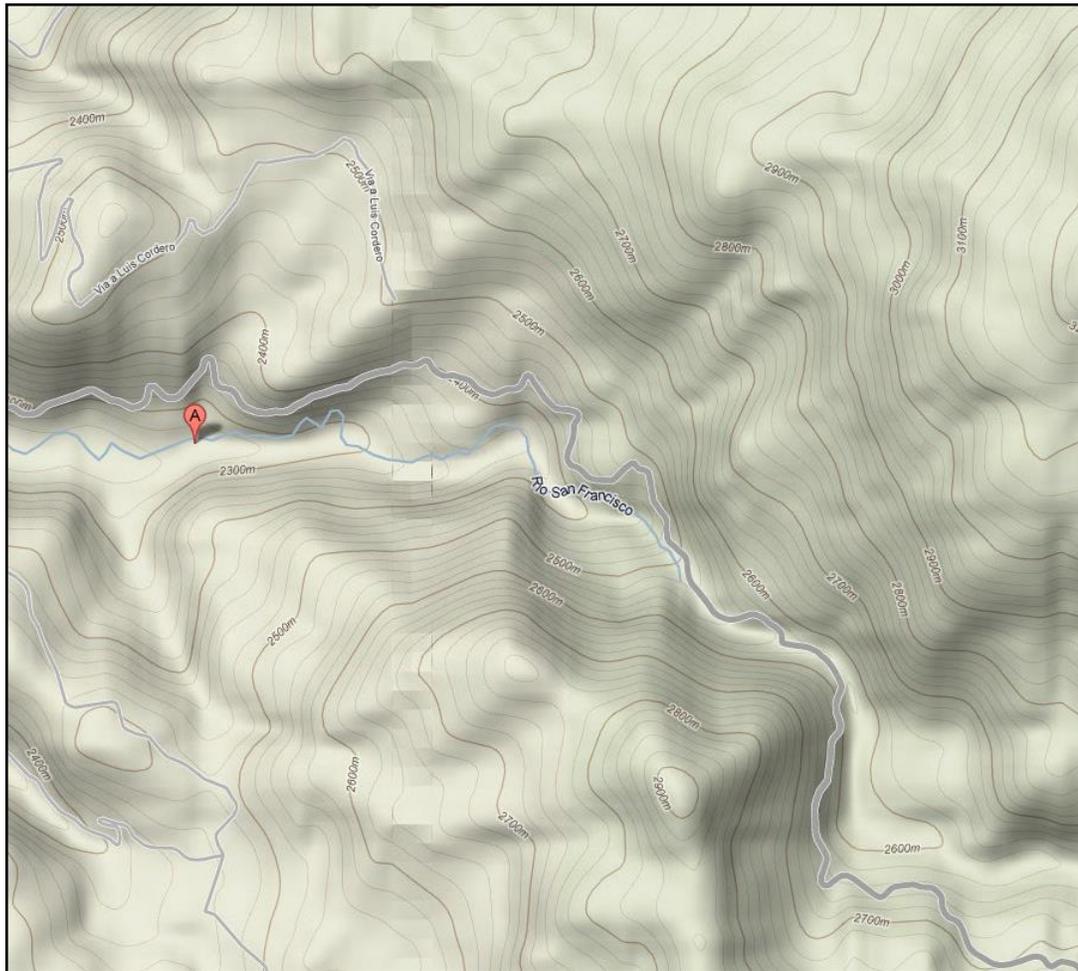
<b>Tabla 1.3. Medición del Salto o Caída del Rio San Francisco</b>			
<b>Punto</b>	<b>Medición</b>	<b>Hora</b>	<b>Longitud de tramos</b>
Punto 1	2580 m	12:48:36 pm	L = 330 m
Punto 2	2541 m	1:34:45 pm	
Punto 3	2524 m	2:16:02 pm	L = 170 m
Punto 4	2496 m	1:05:45 pm	
Punto 5	2496 m	1:05:45 pm	L = 270 m
Punto 6	2427 m	12:37:14 pm	

*Fuente: Autores*

Además de las mediciones del GPS se utilizaron curvas de nivel como se aprecia en la figura 1.4, cabe mencionar que estas curvas nos servirán para una estimación de la altura en la zona de estudio.

La longitud del tramo en la que se tomaron las mediciones entre los puntos 1-6 corresponde a 1026 m.

**Figura 1.4. Curvas de nivel del Rio San Francisco**



*Fuente: Autores*

En la figura 1.5 se puede apreciar el perfil del tramo en estudio del Rio San Francisco del cantón Gualaceo que se obtuvo con la ayuda del software Google Earth.

**Figura 1.5. Perfil del tramo en estudio del Rio San Francisco**



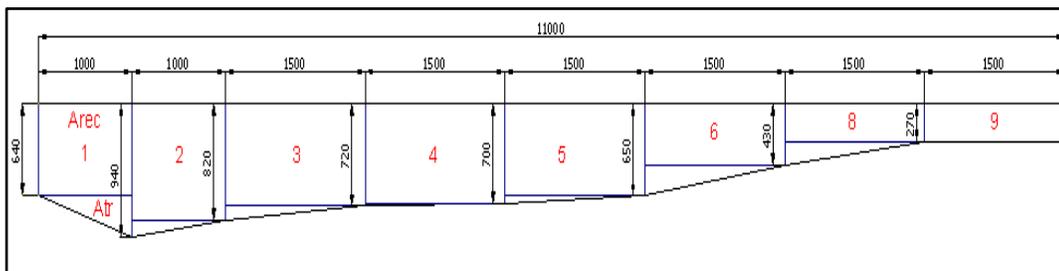
*Fuente: Autores*

### 1.3.2 Medición del Caudal

#### 1.3.2.1 Caudal promedio del rio San Francisco

Para la medición del caudal se utilizó el método del Flotador, en la figura 1.6 se detalla el seccionado aproximado del rio.

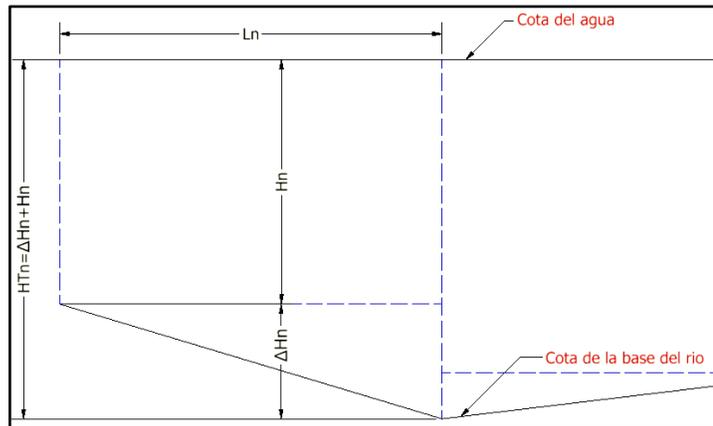
**Figura 1.6. Aproximación de sección del rio**



*Fuente: Autores*

Para facilitar el estudio de las áreas se dividen la sección en diferentes tramos cómo se muestra en la figura 1.7:

**Figura 1.7. Seccionamiento del tramo 1 del río**



*Fuente: Autores*

Obtención de las áreas de cada tramo:

$$A_n = A_{tr} + A_{rec} = \frac{\Delta H_n \times L_n}{2} + H_n \times L_n \quad (\text{ec 1.6})$$

Tramo 1:

$$A_1 = A_{tr} + A_{rec} = \frac{\Delta H_1 \times L_1}{2} + H_1 \times L_1$$

$$A_1 = \frac{0.3 \times 1}{2} + 0.64 \times 1$$

$$A_1 = 0.15 + 0.64$$

$$A_1 = 0.79 \text{ m}^2$$

Para el cálculo de las demás áreas del lecho del río se sigue el mismo procedimiento anterior obteniendo así un área total aproximada de:

$$A_T = 6.643 \text{ m}^2$$

Determinamos los tiempos de desplazamientos del flotador en un tramo de 10 m del lecho del río, se tomaron 10 muestras.

<b>Tabla 1.4. Valores de tiempos de desplazamiento del flotador</b>	
	Tiempo(seg)
T1	6.1
T2	6.41
T3	7.33
T4	6.76
T5	6.13
T6	5.91
T7	6.01
T8	5.59
T9	5.27
T10	6.12
T Aprox.	6.16

*Fuente: Autores*

Con los datos del tiempo y la distancia recorrida por el flotador determinamos la velocidad:

$$V = \frac{e}{T} \quad [m/s] \quad (\text{ec 1.7})$$

$$V = \frac{10}{6.16}$$

$$V = 1.62 \frac{m}{s}$$

Calculamos el caudal aproximado:

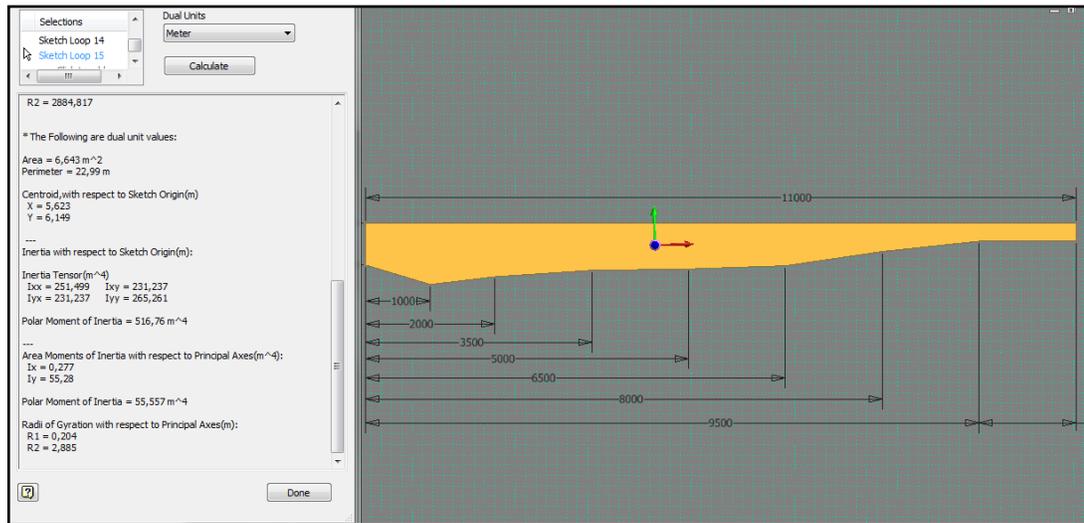
$$Q = V \times A \quad [m^3/s] \quad (\text{ec 1.8})$$

$$Q = 1.62 \cdot 6.643$$

$$Q = 10.762 \frac{m^3}{s}$$

Calculamos el caudal corregido para el método del flotador:

**Figura 1.8. Calculo de sección del Rio San Francisco**



*Fuente: Autores*

En base al software figura 1.8se obtiene el perímetro aproximado del rio, el cual corresponde a 22.99m.

Remplazando valores:

$$\frac{S}{P} = \frac{6.643}{22.99} = 0.289$$

Considerando que la superficie por la cual fluye el agua se encuentra cubierta de elementos sólidos y la mayoría son rocosos, tomamos el valor de 0.812 de la tabla 1.2.

Aplicando la ecuación 1.5 tenemos:

$$Q = c \times V \times A = 0.812 \cdot 10.762 = 8.738 \frac{m^3}{s}$$

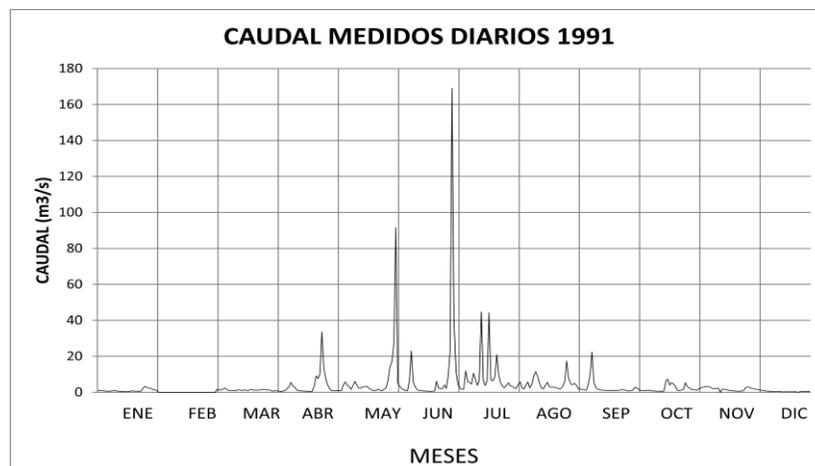
El cual corresponde al caudal instantáneo para el mes de agosto, se puede observar en el cuadro de caudales anuales de la tabla 1.5que este valor se encuentra cercano al promedio de los meses de agosto y septiembre.

### 1.3.3 Análisis de la información meteorológica del Rio San Francisco

El registro de la variación del caudal a lo largo del año se toma de las estaciones de aforo, las cuales están ubicadas en el cauce de los principales ríos, generalmente las instituciones ambientales se encargan de llevar registro de esta información. En muchas de las estaciones meteorológicas se toman los datos en forma interdiaria, ya que sin

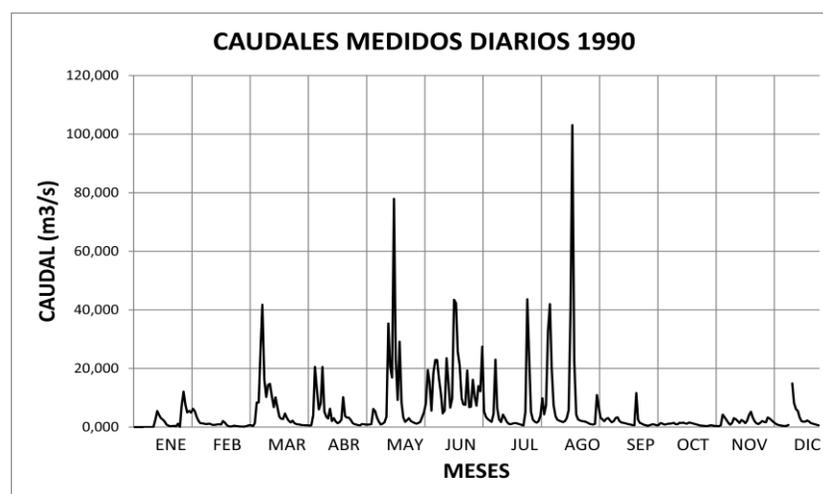
dudas un registro de aforos de varios años resulta de gran utilidad para predecir las variaciones estacionales de un caudal. Estos datos se utilizan para realizar los hidrógramas que muestran como varia el caudal a través del año y también podemos ver en cuantos meses del año se excede un cierto caudal. Esta misma información se presenta a menudo en la curva de duración de caudales. En la figura 1.9 y 1.10 se muestran los hidrógramas del año 1991 y 1990, en el Anexo I se muestran otros hidrógramas para diferentes años.

**Figura 1.9. Hidrógrama Rio San Francisco, año 1991**



*Fuente: Autores*

**Figura 1.10. Hidrógrama Rio San Francisco, año 1990**



*Fuente: Autores*

En la tabla 1.5 puede apreciarse una serie de caudales mensuales de dicha cuenca, proporcionados por el PROMAS de la Universidad de Cuenca.

<b>Tabla 1.5. Cuadro de caudales anuales para la cuenca del Rio San Francisco en Gualaceo (m3/s)</b>													
<b>Año</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>	<b>Anual</b>
1965		1.73	1.80	2.03	5.28	8.26	5.98	3.55	3.67	1.66	2.11	1.34	3.40
1966	2.66	1.34	2.47	2.47	1.73	2.29	4.07	3.55	2.38	1.17	1.73	1.73	2.30
1967	2.38	1.66	1.66	3.08	3.93	4.21	6.94	5.80	2.66	2.29	1.28	1.66	3.13
1968	2.11	1.07	2.11	2.20	2.20	3.08	11.44	22.42	19.14	13.34	8.98	0.22	7.36
1969	7.15	13.34	14.03	21.44	19.14	23.95	25.66	25.01					18.72
1970	14.03	20.04	18.28	18.28	14.38	27.24	23.95	26.11	17.03	10.57	5.62	4.35	16.66
1971	3.93	4.80	7.36	8.26	9.75	17.85	26.11	23.43	21.44	13.68	9.49	8.74	12.90
1972	14.03	8.98	6.54	4.21	6.16	11.74	22.42	13.36	15.10	8.03	6.74	4.49	10.15
1973	6.94	6.74	6.74	5.62	6.35	7.36	13.34	12.36	8.74	5.62	5.11	3.67	7.38
1974	3.93	7.36	4.80	5.28	11.15	10.02	30.87	13.01	13.34	10.57	9.23	9.49	10.75
1975	11.16	8.15	7.83	8.29	11.85	30.69	18.37	21.20	9.30	7.79	5.85	4.55	12.09
1976	6.59	4.67	5.99	14.92	19.17	23.73	30.84	12.88	8.96	2.22	2.45	1.61	11.17
1977	1.05	5.25	5.03	5.03	5.76	10.22	5.08	4.04	5.64	0.91	0.61	1.92	4.21
1978	1.81	2.66	5.26	5.18	4.01	16.14	6.71	6.75	3.50	8.29	1.67	0.99	5.25
1979	1.14	0.74	1.22	3.80	3.24	4.68	6.69	3.45	2.33	2.65	1.67	2.68	2.86
1980	2.04	1.90	2.37	12.65	2.39	5.36	7.91	4.00	6.09	2.27	1.54	0.74	4.11
1981	0.72	1.84	2.18	3.52	1.75	4.77	5.75	3.13	2.46	1.91	1.48	2.04	2.63
1982	1.03	0.73	1.21	4.49	3.41	2.23	8.93	7.29	2.61	2.49	2.41	4.88	3.48
1983	3.29	2.38	4.62	4.48	4.56	3.80	5.02	5.12	3.43	2.86	1.40	1.86	3.57
1984	0.86	1.77	1.94	1.27	5.04	20.37	10.04	9.99	2.36	2.25	3.18	1.27	5.03
1985	1.17	2.11	1.17	3.19	1.66	6.16	7.15	3.31	2.11	1.46	1.07	1.59	2.68
1986	2.18	1.85	3.53	5.37	4.46	11.84	14.71	5.47	9.23			2.89	6.15
1987	2.23	8.02	3.81	5.63	4.71	6.96	5.22	4.75	4.19	3.65	0.82	2.27	4.36
1988	2.14	4.25	4.12	8.99	5.17	2.87	11.24	2.22	2.52	4.19	2.18	1.09	4.25
1990	2.19	1.31	6.70	4.40	8.65	14.17	7.14	11.10	2.54	1.04	1.80	2.48	5.29
2002	1.84	2.28	2.79	4.65	9.17	2.79							3.92
2005		14.75	14.19	18.31	9.61	4.45		3.86	5.86		3.27	0.67	8.33
<b>Qm</b>	<b>3.94</b>	<b>4.88</b>	<b>5.18</b>	<b>6.93</b>	<b>6.84</b>	<b>10.64</b>	<b>12.86</b>	<b>9.89</b>	<b>7.07</b>	<b>4.82</b>	<b>3.40</b>	<b>2.77</b>	<b>6.60</b>

Fuente: PROMAS de la Universidad de Cuenca

### 1.3.3.1 Histograma de frecuencia de caudales del Rio San Francisco

Con base en el número de los registros tabulados de la tabla 1.5,  $N_{registros} = 308$  se establece el intervalo específico para el cálculo de la curva de caudales, así:

- Calculamos el número de clase  $N_c$  :

$$N_c = 1 + 3.3 \ln(N_{registros}) \quad (ec1.9)$$

$$N_c = 1 + 3.3 \ln(308)$$

$$N_c = 19.9 \approx 20$$

- Determinamos los caudales Máximo y Mínimo:

$$Q_{max} = X_{max} = 30.87 m^3 / s$$

$$Q_{min} = X_{min} = 0.22 m^3 / s$$

- El intervalo se calcula en base de la siguiente expresión:

$$\Delta X = \frac{X_{max} - X_{min}}{N_c - 1} \quad (ec 1.10)$$

$$\Delta X = \frac{30.87 - 0.22}{20 - 1}$$

$$\Delta X = 1.61$$

Una vez calculado el intervalo de cada frecuencia, procedemos a elaborar el cuadro de distribución de frecuencias como se aprecia en la tabla 1.6. En esta se puede observar el procesamiento estadístico de los datos. En las primeras columnas se encuentran los rangos de caudales seguidos de la frecuencia absoluta de cada rango y, posteriormente, la frecuencia relativa en términos de porcentaje, finalmente, en la última columna la frecuencia relativa acumulativa en porcentaje.

Para calcular la frecuencia relativa se divide el número de ocurrencias entre el número total de aforos.

$$fr(\%) = \frac{F}{N_{registros}} \times 100 \quad (ec 1.11)$$

<b>Tabla 1.6. Cuadro de Distribución de Frecuencias</b>						
<b>Ítem</b>	<b>Intervalo</b>		<b>Qmin</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>fr (%)</b>	<b>Duración (%)</b>
	<b>LimInf</b>	<b>Limsup</b>	<b>(inter)</b>	<b>Numérica</b>		
1	0.22	1.83	0.22	51.00	16.56	100.00
2	1.83	3.44	1.83	71.00	23.05	83.44
3	3.44	5.05	3.44	49.00	15.91	60.39
4	5.05	6.66	5.05	31.00	10.06	44.48
5	6.66	8.27	6.66	25.00	8.12	34.42
6	8.27	9.88	8.27	18.00	5.84	26.30
7	9.88	11.49	9.88	11.00	3.57	20.45
8	11.49	13.10	11.49	7.00	2.27	16.88
9	13.10	14.71	13.10	13.00	4.22	14.61
10	14.71	16.32	14.71	4.00	1.30	10.39
11	16.32	17.93	16.32	2.00	0.65	9.09
12	17.93	19.54	17.93	7.00	2.27	8.44
13	19.54	21.15	19.54	2.00	0.65	6.17
14	21.15	22.76	21.15	5.00	1.62	5.52
15	22.76	24.37	22.76	4.00	1.30	3.90
16	24.37	25.98	24.37	2.00	0.65	2.60
17	25.98	27.59	25.98	3.00	0.97	1.95
18	27.59	29.20	27.59	0.00	0.00	0.97
19	29.20	30.81	29.20	1.00	0.32	0.97
20	30.81	32.42	30.81	2.00	0.65	0.65

*Fuente: Autores*

### 1.3.3.2 Curva de duración de caudales del Rio San Francisco

La curva de duración es un procedimiento gráfico para el análisis de la frecuencia de los datos de caudales y representa la frecuencia acumulada de ocurrencia de un caudal determinado. Es una gráfica que tiene el caudal,  $Q$ , como ordenada y el número de días del año (generalmente expresados en % de tiempo) en que ese caudal,  $Q$ , es excedido o igualado, como abscisa figura 1.11.

La ordenada Q, para cualquier porcentaje de probabilidad, representa la magnitud del flujo en un año promedio que se espera sea excedido o igualado por un porcentaje, P, del tiempo. Los datos de caudal medio anual, mensual o diario se pueden usar para construir la curva, estos se disponen en orden descendente, usando intervalos de clase si el número de valores es muy grande.

Esta curva nos da la probabilidad como un porcentaje de tiempo de todo el período de aforos, en el que el caudal es igual o menor al caudal correspondiente ha dicho porcentaje de tiempo.

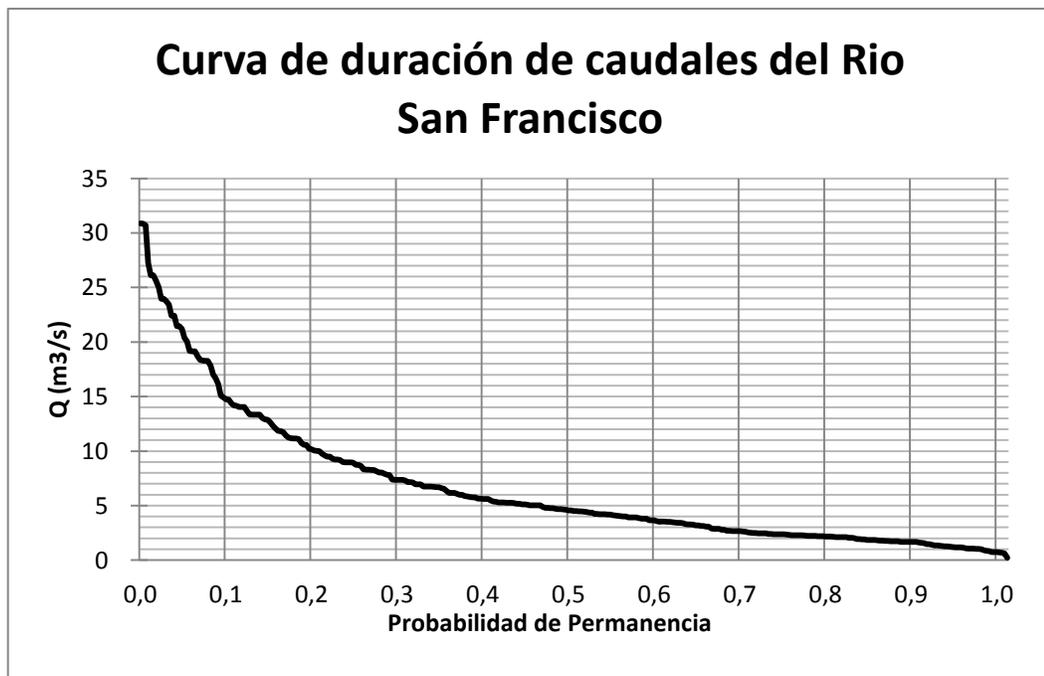
El caudal medio se determina mediante la siguiente expresión:

$$Q_m = \sum Q_i \times \frac{fr}{100} \quad (\text{ec 1.12})$$

$$Q_m = 1.025 \times 0.1656 + 2.635 \times 0.2305 + 4.245 \times 0.1591 + \dots$$

$$Q_m = 6.69 \text{ m}^3 / \text{s}$$

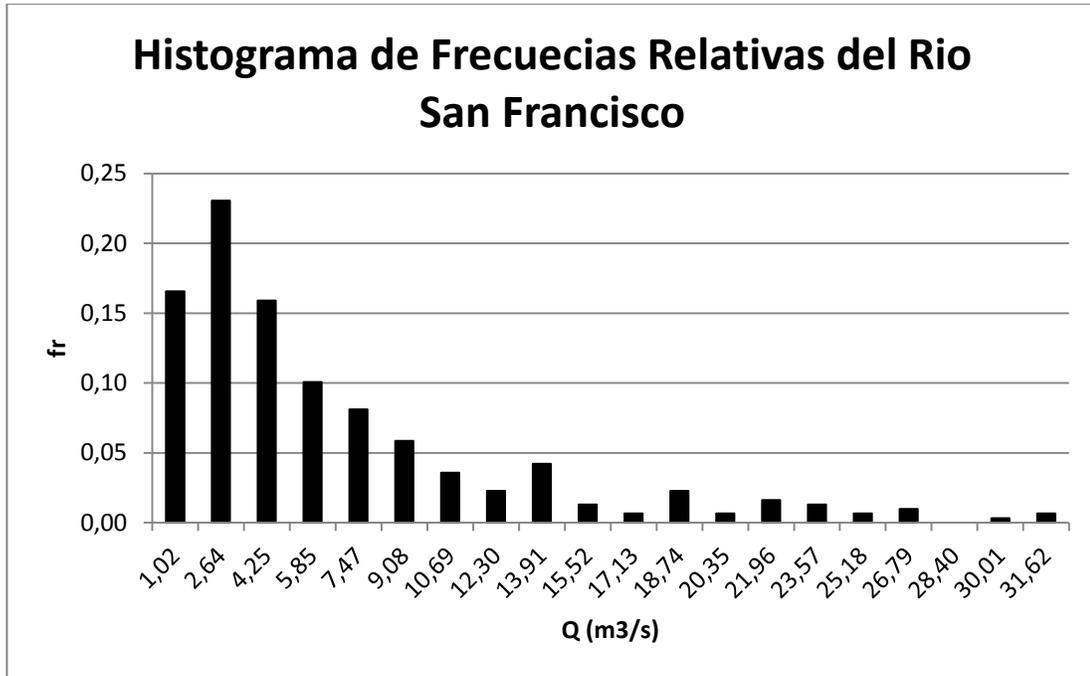
**Figura 1.11. Curva de Duración de Caudales del Rio San Francisco**



*Fuente: Autores*

El caudal de mayor persistencia según la figura 1.12 es de  $2.64m^3 / s$  , este valor nos servirá como referencia para elegir el caudal de diseño.

**Figura 1.12. Histograma de Frecuencias Relativas del rio San Francisco**



*Fuente: Autores*

Una vez obtenida la curva de duración, dependerá del proyectista decidir sobre el caudal de diseño.

En nuestro caso queremos que trabaje a un 97% de tiempo a plena carga entonces tenemos:

$$Q_{diseño} = 0.91m^3 / s$$

Determinamos el caudal aprovechable

$$Q_t = Q_{diseño} - 0.1Q_m \tag{ec1.13}$$

$$Q_t = 0.91 - 0.1 \times 6.69$$

$$Q_t = 0.24 \frac{m^3}{s}$$

#### 1.4 DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA DISPONIBLE DEL RIO SAN FRANCISCO

Un hídrosistema requiere de un caudal de agua y una diferencia de altura (conocida como “salto”) para producir potencia útil. Se trata de un sistema de conversión de energía, es decir, se toma energía en la forma de caudal y salto y se entrega energía en forma de electricidad o energía mecánica en el eje. Ningún sistema de conversión puede entregar la misma cantidad de energía útil como la que absorbe, pues una parte de la energía se pierde en el sistema mismo en forma de fricción, calor, ruido, etc.

La ecuación de conversión es:

$$\text{Potencia de entrada} = \text{Potencia de salida} + \text{Perdidas} \quad (\text{ec 1.14})$$

O también:

$$\text{Potencia de salida} = \text{Potencia de entrada} \times \text{Eficiencia de conversión} \quad (\text{ec 1.15})$$

La ecuación 1.15 expresa por lo general de una manera ligeramente diferente. La potencia de entrada, o potencia total disponible en el sistema hidráulico, es la potencia disponible,  $P_{disponible}$ . La potencia útil entregada es la potencia neta,  $P_{neta}$ . La eficiencia total del sistema (figura 1.13) se representa por  $\eta_o$ .

$$P_{neta(estimada)} = P_{disp} \times \eta_o \quad [kW] \quad (\text{ec 1.16})$$

Donde:

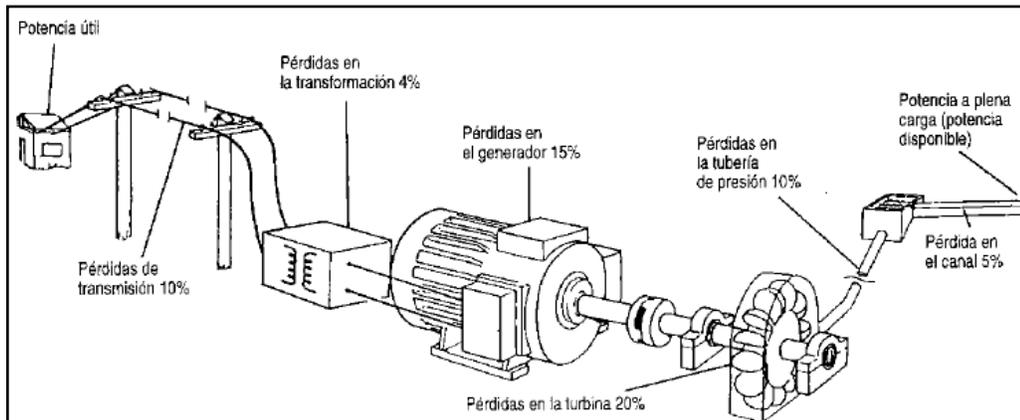
$\eta_o$  : Eficiencia típica del sistema para una Microcentral a plena carga

$$\eta_o = \eta_{obra\ civil} \times \eta_{tuberia} \times \eta_{tuberia} \times \eta_{generador} \times \eta_{transformador} \times \eta_{linea}$$

$$\eta_o = 0.95 \times 0.9 \times 0.8 \times 0.85 \times 0.95 \times 0.9$$

$$\eta_o = 0.5$$

**Figura 1.13. Eficiencias del sistema para una MCH operando a plena carga**



Fuente: “Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas” Federico Coz.

La potencia disponible es igual al salto disponible ( $P_{disp}$ ) multiplicado por el caudal ( $Q$ ) y también multiplicando por un factor de 10, obteniéndose la ecuación fundamental de la potencia hidráulica:

$$P_{neta} = 10 \times H_{disp} \times Q \times \eta_o \quad [kW] \quad (ec1.17)$$

La potencia disponible está definida por la siguiente ecuación:

$$P_{disponible} = \rho \times Q \times g \times H_{disp} \quad [W] \quad (ec1.18)$$

Para el cálculo de la potencia disponible debemos tener en cuenta que este debe realizarse considerando el tramo con menor altura ya que será aquí donde obtendremos la potencia que limitara al resto de subestaciones mismas que luego se sincronizaran para incrementar la potencia instalada.

Se considera que el agua tiene una densidad de  $1000\text{kg}/\text{m}^3$  y la aceleración de la gravedad es  $9.81\text{m}/\text{s}^2$ . Por lo tanto la potencia disponible será según la ecuación 1.18:

$$P_{disponible} = 1000 \times 0.24 \times 9.81 \times 28$$

$$P_{disponible} = 65.9\text{kW}$$

Según la ecuación 1.16 determinamos la potencia neta estimada:

$$P_{neta(estimada)} = 65.9 \times 0.5$$

$$P_{neta(estimada)} = 32.95kW$$

## **1.5 CRITERIOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN PARQUE HIDROELÉCTRICO DE MICROCENTRALES**

Para que un proyecto Hidroeléctrico se considere como una Microcentral su potencia generada debe ser menor a 50kW rango que es establecido por la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), dicha potencia está en función de los datos de caudal y altura aprovechables de la Cuenca en estudio.

Considerando que este estudio se enfoca principalmente en el aprovechamiento de recursos hídricos de pequeña magnitud donde en la mayoría de los casos no es factible la construcción de obra civil a gran escala se vuelve necesario el implementar sistemas que permitan la microhidrogeneración independiente ya que estos presentan una gran ventaja al no requerir de equipos costosos así como también por su construcción que estará ubicada siguiendo el cauce del río, minimizando de esta manera el impacto ambiental y social en la zona de implementación del proyecto ya que no se verán afectados los sistemas de abastecimiento de agua a las zonas Pobladas del Sector. Dentro de este punto cabe mencionar también que los componentes de los cuales estará conformado cada micro estación pueden ser diseñados y construidos por personal local ya que no se exige requerimientos muy estrictos permitiendo usar componentes fabricados en serie.

El número de subestaciones de las que estará conformado el Parque Hidroeléctrico dependerá de la condición topográfica de la Zona en la que se implementara el proyecto debido a que se necesitan tramos accesibles en los que se pueda realizar la obra civil necesaria para la captación y conducción del agua, en este punto se debe considerar que las distancias entre subestaciones no deben ser mayor a 1km debido a que si estas se encuentran a una distancia mayor será necesario el uso de equipos eléctricos elevadores de tensión para la conducción de la energía generada desde la subestación hasta la casa

de máquinas en donde se pretenda realizar la sincronización de las potencias obtenidas, lo cual incrementara los costos de inversión del proyecto.

Otro aspecto a tener en cuenta en la determinación del número de subestaciones de las cuales estará formado el parque Hidroeléctrico está en función de la demanda energética del sector la cual a su vez dependerá del número de habitantes que se beneficiaran de este servicio, para nuestro caso el número de subestaciones que se necesitaran para cubrir la demanda según la evaluación de altura y caudal aprovechable es de 4 unidades de generación, se llegó a esta conclusión en base a la aplicación del Método de Nosaki, el cual asume que la potencia instalada per cápita tiene un rango total que depende del número de habitantes. Para calcular la demanda se promedia el valor más alto y el más bajo de los rangos establecidos por poblaciones en base a la tabla 1.7. Según el último censo Nacional realizado en el año 2010, sabemos que la Parroquia Luis Cordero Vega que sería beneficiaria de este proyecto en caso de que llegara a implementarse tiene una densidad poblacional de 2030 habitantes por lo cual tendríamos lo siguiente:

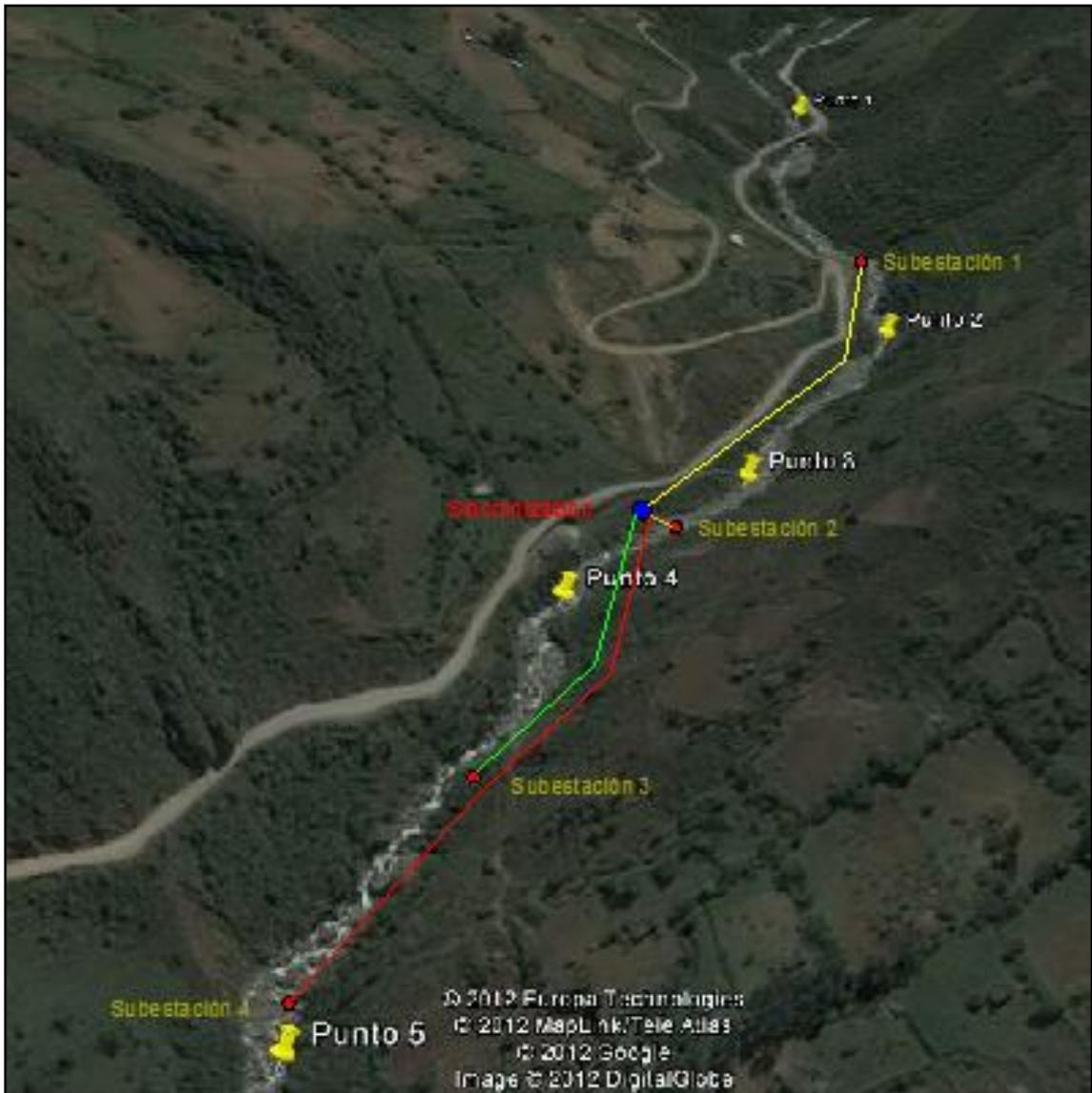
$$Demanda\ actual = \frac{80 + 180}{2} = 130\ kW$$

<b>Tabla 1.7. Demanda para distintas poblaciones</b>	
Población (habitantes)	Demanda de potencia (kW)
500 a 1000	15 – 35
1000 a 2000	35 – 80
2000 a 4000	80 – 180
4000 a 10000	180 – 500
10000 a 20000	500 – 1200

*Fuente: “Manual para la evaluación de la demanda, recursos hídricos, diseño e instalación de Microcentrales Hidroeléctricas”-Soluciones Prácticas.*

Según este estudio de demanda y considerando que cada subestación proporcionara aproximadamente 33 kW asumimos que será necesaria la implementación de 4 microhidrogeneradoras como se observa en la figura 1.14 obteniendo una potencia total de 132 kW que cubrirá la demanda calculada.

**Figura 1.14. Ubicación de las subestaciones en el Rio San Francisco**



*Fuente: Autores*

La implementación de varias unidades de generación eléctrica tiene la ventaja de que cuando ocurra una parada de una de las subestaciones no se ve afectado todo el sistema

evitando de esta manera la falta de suministro energético lo cual no sería posible en caso de implementarse una sola unidad, esta ventaja es de gran importancia cuando se requiere dar mantenimiento a las unidades de generación.

### **Conclusiones:**

La determinación del caudal aprovechable para nuestro sistema se lo realizó en base a los datos históricos proporcionados por PROMAS de la Universidad de Cuenca, obteniendo un caudal aprovechable de  $Q_t = 0.24m^3 / s$  trabajando la Microcentral a un 97% a plena carga.

Como comprobación de los datos de aforo proporcionados por PROMAS se usó el método del flotador para la medición del caudal por tener este río un torrente elevado, como se puede observar en la teoría expuesta para el desarrollo de este método es necesario obtener una aproximación del área por la cual circula el fluido misma que fue realizada tomando medidas en diferentes puntos de la sección del tramo escogido posteriormente se graficaron estos datos en un programa de diseño mecánico para obtener un área de  $6.643m^2$ .

La velocidad a la cual circula el fluido se obtiene con la utilización de un flotador el mismo que se desplazara a la misma velocidad del agua dentro de la longitud del tramo del río, luego de obtener estas tres variables se procedió a remplazar en la fórmula corregida que sugiere el método, teniendo en consideración que el río posee una superficie rocosa, obteniendo un caudal instantáneo para el mes de agosto de  $8.738m^3 / s$ , el cual es muy parecido a los caudales promedio de los meses de agosto y septiembre.

La altura bruta se determina realizando mediciones con el GPS en los dos puntos de desnivel del tramo del río en donde se implementaran las Microcentrales, teniendo una altura total del tramo de 153 m donde se preverá colocar cuatro subestaciones, es importante mencionar que el salto mínimo de las cuatro subestación es de 28 m, siendo esta que nos servirá para el dimensionamiento de nuestro sistema, de la misma manera la longitud es obtenida implementando el GPS para lo cual es necesario marcar un punto

inicial o punto de partida y un punto final, luego por triangulación el equipo nos da como resultado la diagonal a estos dos puntos siendo esta medida de 1026 m la longitud aprovechable del tramo del río.

Con los datos determinados del caudal y salto disponibles se obtiene una potencia estimada de cada estación de 33 kW, como se pretende instalar 4 subestaciones se tendrá una potencia total del sistema de 132 kW aproximadamente.

En base a los datos obtenidos tanto del salto como del caudal, la posible turbina a utilizar es una del tipo Michell Banki ya que esta es la más idónea para las características de nuestro sistema.

## **CAPITULO II: GENERACIÓN MINI-HIDRÁULICA**

### **INTRODUCCIÓN**

Hay diferentes esquemas de Microcentrales Hidroeléctricas. Este capítulo está orientado principalmente al análisis de aquellos sistemas con saltos de pequeña y mediana altura, para la captación y tratamiento del agua es necesario la construcción de obras civiles para lo cual en el presente se desarrolla metodologías de dimensionamiento de cada uno de estos componentes. Así como también el dimensionamiento y selección de la tubería de presión más óptima debido a que esta juega un papel muy importante en este tipo de proyectos.

La turbina mas empleada en MCH es la Michell Banki por encontrarse dentro de los rangos de aplicación y por su sencillez de construcción por lo cual se presenta en este capítulo un procedimiento recomendado por la OLADE para la dimensionamiento de cada uno de los elementos que conforman esta. Además una guía para la conexión y sincronización de generadores y también para la selección más adecuada de los elementos eléctricos necesarios para la transmisión y distribución de la energía generada.

### **2.1 ASPECTOS GENERALES SOBRE MICROCENTRALES HIDROELÉCTRICAS**

Por Microcentral Hidroeléctrica se entiende al complejo de obras civiles, hidráulicas, electromecánicas y eléctricas, que permiten transformar la energía potencial y cinética que contiene el salto de agua en energía mecánica. Esta transformación se realiza en las máquinas instaladas en la Microcentral. Para conseguir un salto lo más alto posible hay que conducir el agua a las máquinas bajo condiciones hidráulicamente favorables, es decir con el mínimo de pérdidas posibles.

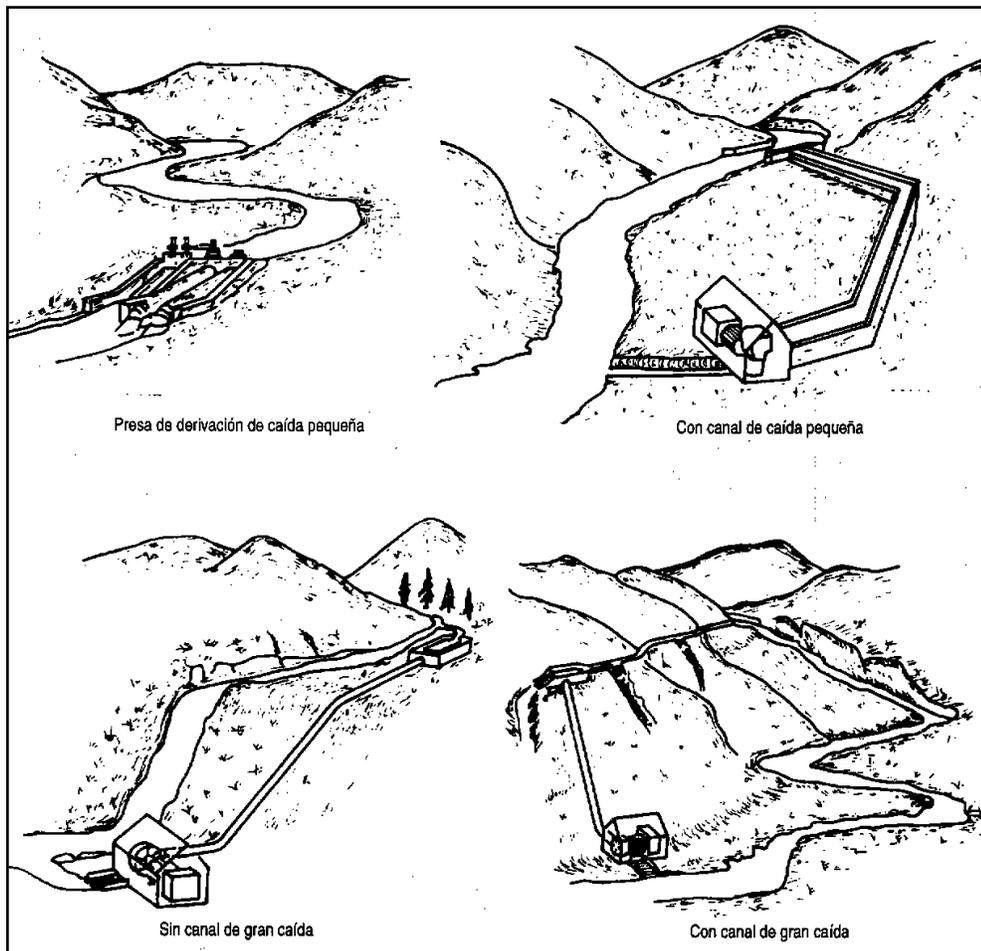
La posibilidad de que la Microhidroenergía se convierta en una fuente confiable, segura y económicamente factible en nuestro país, se encuentra fuertemente respaldada por tres condicionantes:

- La existencia de un potencial hidráulico apenas explotado.
- La posibilidad de difusión y reproducción de la tecnología a nivel local.
- La existencia de recursos humanos con conocimiento del tema.

## 2.2 DESCRIPCIÓN DE LAS OBRAS CIVILES DE UNA MICROCENTRAL HIDROELÉCTRICA

Existen diversos tipos de esquemas de Microcentrales hidráulicas. En la figura 2.1 se muestran algunos de ellos.

**Figura 2.1. Diversos esquemas de Microcentrales Hidroeléctricas.**

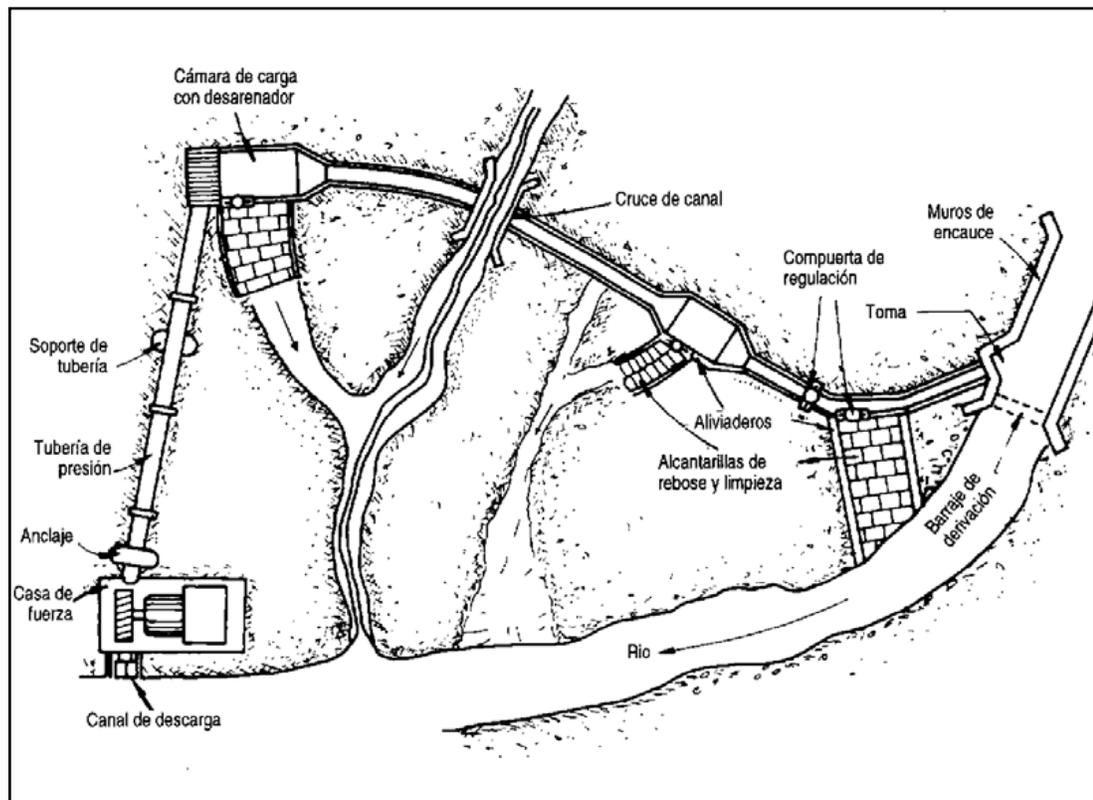


*Fuente: "Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas" - Federico Coz.*

Los distintos componentes de la ruta de abastecimiento de agua para una Microcentral Hidráulica son (figura 2.2):

- Barraje de derivación
- Toma de ingreso
- Compuertas de regulación
- Aliviaderos
- Canales de rebose
- Canal o tubería de Conducción
- Desarenador
- Cámara de carga
- Tubería de presión
- Cruces de canal
- Apoyos de tubería
- Anclajes de tubería

**Figura 2.2. Componentes de una Microcentral Hidráulica**



*Fuente: "Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas" - Federico Coz.*

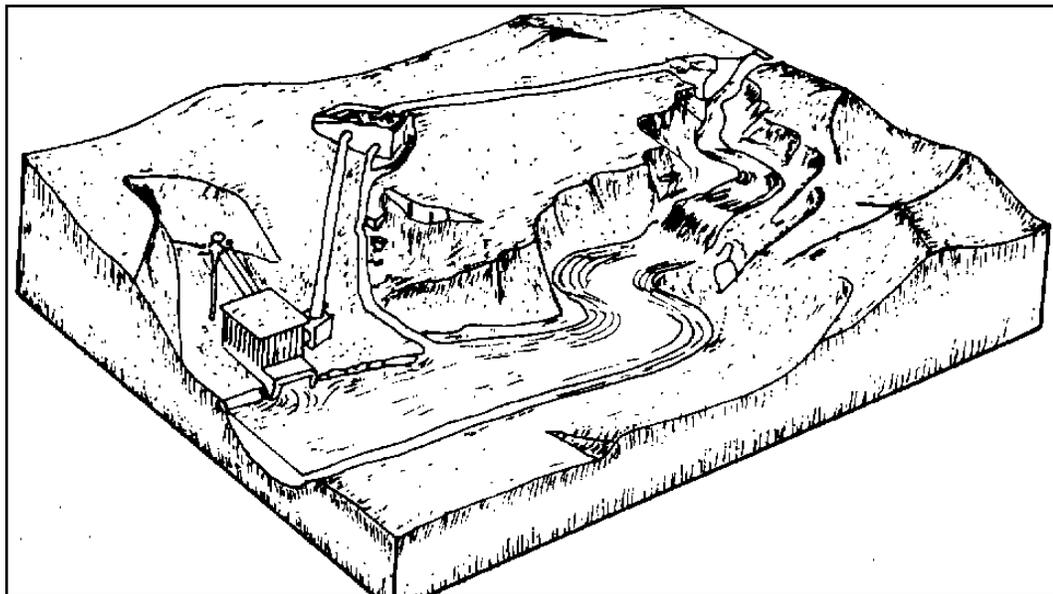
### 2.2.1 Esquema general de una MCH

El uso de tubería resulta considerablemente más caro que el de un canal abierto. Por ello, en el diseño de un sistema es importante conseguir que la tubería sea lo más corta posible. En la figura 2.3 se muestra un esquema con tubería corta que será casi siempre el esquema más económico. Seguidamente en la figura 2.4, se ilustra uno con tubería larga.

#### 2.2.1.1 Tubería corta

Debido a que en este sistema la tubería es corta pero el canal es largo, este último está expuesto a un mayor riesgo de bloqueo. Además su construcción a través de una pendiente escarpada puede ser difícil, costoso y a veces imposible, y no olvidar que hay que construir cruces de torrentes sobre el canal lo cual aumentara el costo del mismo.

**Figura 2.3. Esquema con tubería de presión corta**



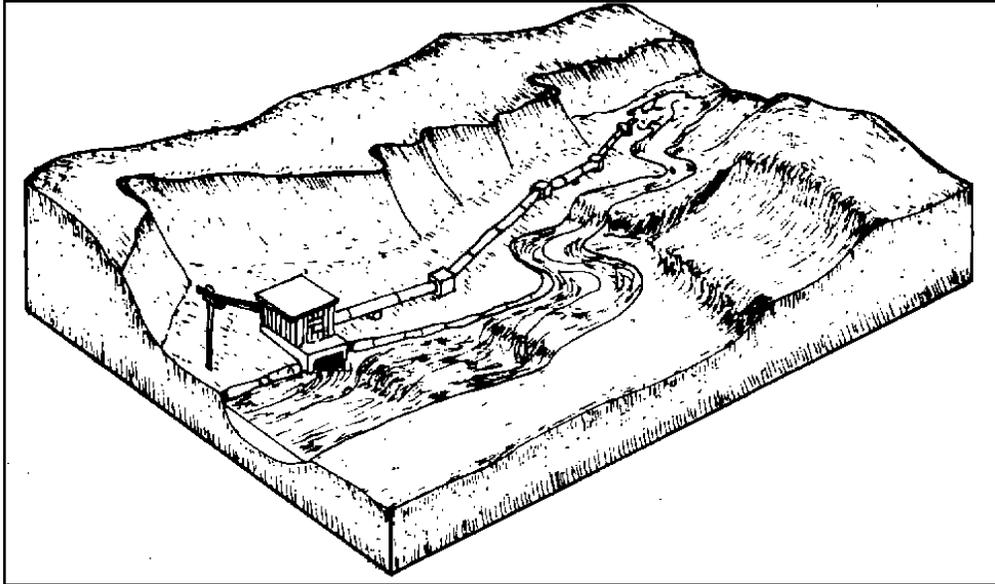
*Fuente: "Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas" - Federico Coz.*

#### 2.2.1.2 Tubería Larga

La tubería para este sistema se instala a lo largo del río. Es muy utilizado cuando resulta imposible construir un canal abierto debido a las características del terreno, hay que tomar siempre algunas precauciones. Lo más importante es asegurar que la avenida

temporal del río no dañe o deteriore la tubería. También es vital calcular el diámetro de la tubería más económico, pues si se trata de una tubería larga el costo será relativamente elevado (figura 2.4).

**Figura 2.4. Esquema de tubería de presión larga**



*Fuente: "Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas" - Federico Coz.*

### **2.2.2 Bocatoma de Fondo**

Su función principal es regular y captar un caudal determinado de agua, para la producción de energía hidroeléctrica. Las bocatomas deben garantizar que la captación de agua sea una cantidad constante, a la vez que impida el ingreso de materiales sólidos y flotantes. Su ubicación más apropiada son los tramos rectos y estables del río, dependiendo de la topografía, la geología, la capacidad portante de los suelos y, principalmente, de las variaciones hidrológicas del lugar que nos servirá de emplazamiento.

En la bocatoma el agua se capta a través de una rejilla colocada en la parte superior del azud y que se ubica en sentido normal de la corriente. El ancho de esta presa puede ser igual o menor que el ancho del río. La bocatoma de fondo consta de una presa o azud, con cota superior al mismo nivel de la cota del fondo del río, construida generalmente en concreto y dentro de la que se encuentra el canal colector.

Las partes integrantes de una bocatoma de fondo son:

#### **2.2.2.1 Azud**

Es una estructura de derivación que sirve para elevar el nivel de las aguas, a la vez cumple la función de captar y dejar escapar el agua excedente que no debe ingresar al sistema. Es conocida también como presa vertedora, porque se construye en sentido transversal al río, levantando de este modo el nivel del agua, y vertedora porque deja pasar el agua no derivada.

#### **2.2.2.2 Soleras**

Tiene por objeto proteger al azud de la erosión y además crea un pozo de sedimentación donde se depositan los materiales en suspensión. Son construidas en concreto o en roca, están ubicadas tanto aguas arriba como aguas abajo del azud.

#### **2.2.2.3 Muros laterales**

Encauzan el agua del río hacia la rejilla y protegen los taludes de avenidas o crecientes, se construyen en concreto donde el espesor y la longitud de estos dependerá del estudio de estabilidad de los muros.

#### **2.2.2.4 Canal colector**

Entrega el agua captada a través de la rejilla a la cámara de recolección. Se recomienda para su construcción la utilización de la sección rectangular, la que debe tener una pendiente entre 1% y 14%, garantizando la velocidad adecuada para que el agua fluya previniendo la sedimentación.

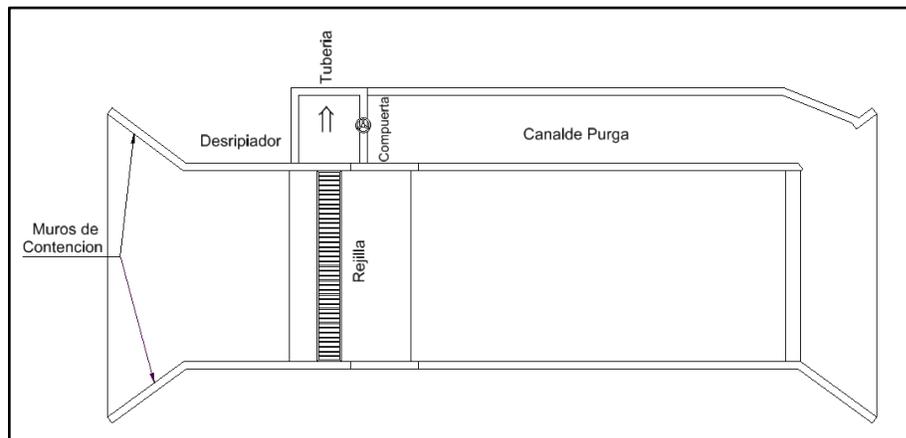
#### **2.2.2.5 Rejilla de admisión**

Esta se coloca sobre el canal colector que se encuentra dentro del azud. La longitud de la rejilla, y por tanto, la del canal colector, puede ser menor que la longitud de la presa, según las necesidades del caudal que se ha de captar. Los barrotes y el marco pueden ser de hierro, con separación entre barrotes de cinco a diez centímetros y diámetro de los mismos de 1/2", 3/4" ó 1".

### 2.2.2.6 Cámara de recolección

Es recomendado que su forma sea rectangular, con muros en concreto reforzado su altura igual a la de los muros laterales. En su interior se encuentra un vertedero de excesos lateral, que entrega el agua a una tubería o canal de excesos, elemento hidráulico-estructural cuya función es regresar el sobrante de agua captada al cauce.

**Figura 2.5. Elementos de la Bocatoma**



*Fuente: Autores*

### 2.2.2.7 Procedimiento de Diseño

#### a) Azud o presa<sup>1</sup>

La secuencia metodológica del cálculo es la siguiente:

1. El diseño de este tipo de estructura toma como base la ecuación general para vertederos, cuando son con cresta libre. El diseño del perfil Creager utilizara la formula general para un vertedero:

$$Q_{\max} = M \times b \times H_o^{\frac{3}{2}} \left[ \frac{m^3}{s} \right] \quad (\text{ec 2.1})$$

Donde:

$Q_{\max}$  : Es el caudal máximo en  $\frac{m^3}{s}$  .

---

<sup>1</sup>MERINO, *Proyecto de tesis "Microcentral Hidroeléctrica Cachimiro"*, 2008, página 81.

$M$  : Coeficiente de acuerdo al perfil hidrodinámico.

$b$  : Es el ancho del río.

2. Calcular la carga sobre la cresta del vertedero  $H_o$  se obtiene despejando de la ecuación 2.1 donde se toma en cuenta la carga energética y la carga que se produce por la velocidad del agua al pasar por sobre el vertedero.

$$H_o = \left( \frac{Q_{\max}}{M \times b} \right)^{\frac{2}{3}} [m] \quad (ec2.2)$$

3. Determinar la altura de agua sobre la cresta del vertedero:

$$h = 0.69 \times H_o [m] \quad (ec2.3)$$

4. Calcular la velocidad del agua al pasar por la cresta del azud:

$$V = \frac{Q_{\max}}{A} \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (ec2.4)$$

5. Determinar la carga energética:

$$h_e = h + \frac{V^2}{2g} [m] \quad (ec2.5)$$

6. Para encontrar las coordenadas del azud se asume las coordenadas X-Y, el perfil del cuadrante aguas abajo tiene la ecuación:<sup>2</sup>

$$X^{1.85} = 2H_o \times Y [m] \quad (ec2.6)$$

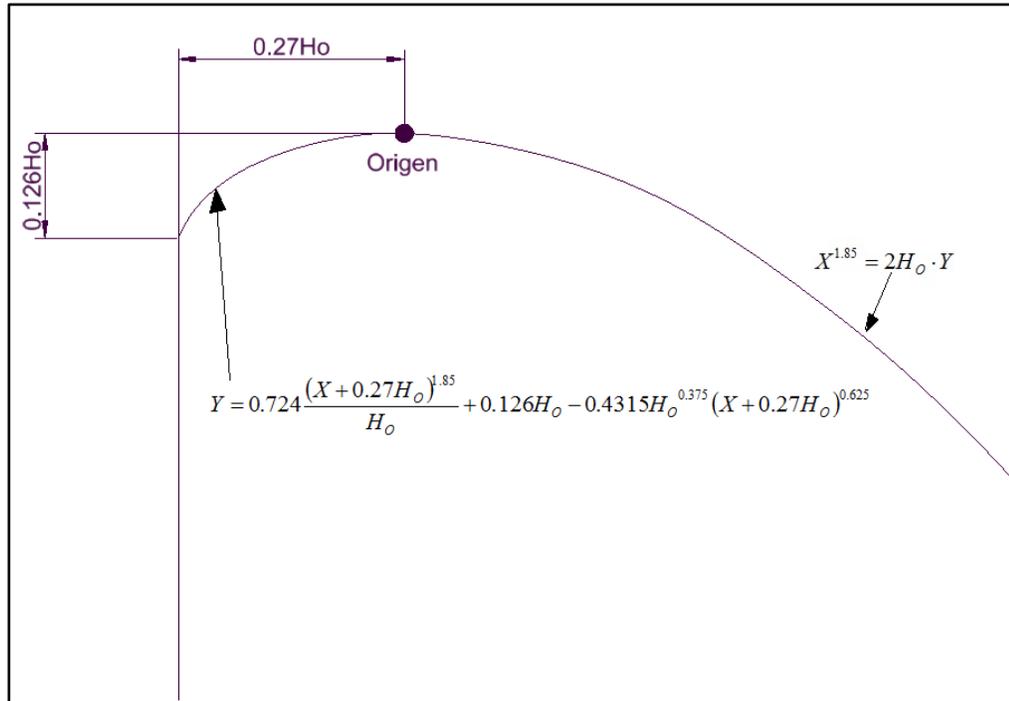
Donde:

$X, Y$  : Son las coordenadas del sistema cartesiano que se muestra en la figura 2.6

---

<sup>2</sup> MOLINA, Daniela ,*Proyecto de tesis “Análisis experimental de la disipación de energía en cimacios con perfil liso y escalonado”*, 2010, pagina 12.

**Figura 2.6. Coordenadas del sistema cartesiano**



Para el perfil del cuadrante aguas arriba, se usa la siguiente ecuación:

$$Y = 0.724 \times \frac{(X + 0.27H_o)^{1.85}}{H_o^{0.85}} + 0.126H_o - 0.4315H_o^{0.375} (X + 0.27H_o)^{0.625} \quad [m] \quad (ec2.7)$$

7. Calcular la velocidad de caída del agua:

$$V_1 = \sqrt{2 \times g \times \Delta h} \quad \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (ec2.8)$$

Donde:

$g = 9.81 \frac{m}{s^2}$  : Aceleración de la gravedad

$\Delta h$  : Valor estimado.

8. Despejando de la ecuación de la continuidad la profundidad o espesor de la lámina vertiente al pie del azud  $h_1$  se determina mediante:

$$h_1 = \frac{Q_{lineal}}{V_1} \quad [m] \quad (ec2.9)$$

Donde:

$Q_{lineal}$  : Caudal de agua sobre el azud, por metro lineal  $m^3 / s / m$

9. Calcular la altura del agua  $H_e$  sobre el lecho del rio aguas arriba:

$$H_e = h_e + h_{azud} \quad [m] \quad ( ec2.10)$$

10. Calcular la profundidad del colchón  $H_C$  de agua:

$$H_C = H_e - \Delta h - h_1 \quad [m] \quad ( ec2.11)$$

11. La profundidad requerida aguas abajo según Merriam es:

$$h_2 = \frac{0.45 \times Q_{lineal}}{\sqrt{h_1}} \quad [m] \quad ( ec2.12)$$

12. La profundidad de la cuenca aguas abajo  $h_2$  es:

$$h_2 = H_C + t_{(aguas\ abajo)} \quad [m] \quad ( ec2.13)$$

Donde:

$t_{(aguas\ abajo)}$  : Es la altura aguas abajo sobre el dentellón.

13. Comprobar si el azud está bien dimensionado para lo cual debe cumplir la siguiente condición:

$$h_2(Merriam) < h_2(aguas\ abajo)$$

14. Si no cumple la condición anterior se debe ajustar la altura del colchón  $H_C$ . Es conveniente que la altura  $h_2$  sea mayor que  $h_1$  para que el resalto este bien diseñado y su construcción sea la más conveniente. En ocasiones es necesario realizar el zampeado en contrapendiente para garantizar esta condición. Se recomienda que el ángulo de inclinación no sea mayor de  $10^\circ$ .

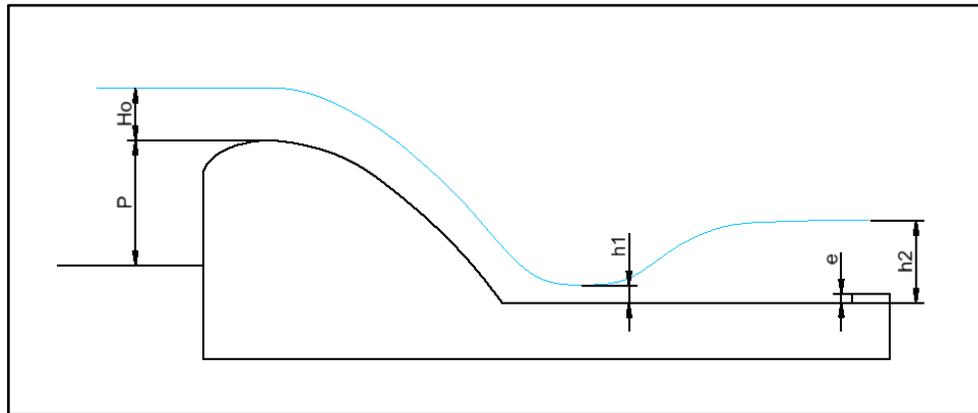
15. La altura del diente al final del zampeado se calcula con la siguiente expresión:

$$e = 0.08 \times H_0^{2/3} \times P \quad [m] \quad (ec2.14)$$

16. Calcular la longitud de zampeado para que pueda formarse el resalto hidráulico mediante la siguiente expresión:

$$L = 5(h_2 - h_1) \quad [m] \quad (ec2.15)$$

**Figura 2.7. Dimensiones del azud**



*Fuente: Autores*

### b) Rejilla de admisión<sup>3</sup>

La secuencia metodológica para el diseño de la rejilla de admisión es la siguiente:

1. Se parte de la ecuación del caudal captado por la bocatoma que cumple con la siguiente expresión

$$Q_t = c \times \mu \times b \times L \times (2 \times g \times h)^{1/2} \quad \left[ \frac{m^3}{s} \right] \quad (ec2.16)$$

Donde:

$Q_t$  : Caudal a captar en  $\left( \frac{m^3}{s} \right)$ .

<sup>3</sup>MERINO, *Proyecto de tesis "Microcentral Hidroeléctrica Cachimiro"*, 2008, pág.

$h$  : Altura inicial del agua ( $m$ ).

$b$  : Ancho total del vertedero ( $m$ ).

$L$  : Longitud de la rejilla ( $m$ ).

$g$  : Aceleración de la gravedad.

$h_0$  : Es el nivel mínimo de aguas en el afluente.

$\beta$  : Es el ángulo de inclinación de la rejilla, el cual debe ser lo mayor posible para facilitar la limpieza.

2. Calcular la constante  $c$  que está dada por:

$$c = 0.6 \times \left( \frac{a}{d} \right) \times (\cos \beta)^{3/2} \quad ( ec2.17)$$

Donde:

$a$  : Abertura entre las barras de la rejilla

$d$  : Distancia entre los ejes de los barros.

3. Calcular la distancia entre los ejes de los barros:

$$d = a + e \quad [m] \quad ( ec2.18)$$

Donde:

$e$  : Espesor de los barros de la rejilla

4. Determinar la altura inicial del agua:

$$h = \frac{2}{3} \times \chi \times h_0 \quad [m] \quad ( ec2.19)$$

Donde:

$\chi$  : Es el coeficiente de captación se toma de la Tabla 2.1

5. Asumir un valor de ancho total de la toma de agua ( $b$ ), de acuerdo al ancho del afluente en el lugar que se va a realizar la captación el cual será corregir posteriormente.

<b>Tabla 2.1. Coeficiente de captación de acuerdo al ángulo de inclinación de la rejilla</b>	
$\beta$	$\chi$
0°	1
2°	0.98
4°	0.64
6°	0.944
8°	0.927
10°	0.91
12°	0.894
14°	0.879
16°	0.865
18°	0.851
20°	0.837
22°	0.812
26°	0.8

6. Calcular el número de espacios entre los barrotes:

$$n = \frac{b}{a} \quad (\text{ec : 2.20})$$

7. Encontrar el número de barrotes:

$$N = n + 1 \quad (\text{ec2.21})$$

8. De la ecuación 2.16 despejar el valor de la longitud de la rejilla:

$$L = \frac{Q_t}{c \times \mu \times b \times (2 \times g \times h)^{1/2}} [m] \quad (\text{ec2.22})$$

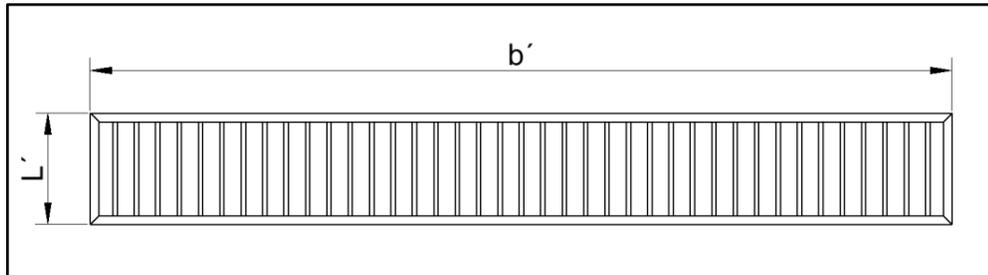
9. Determinar el ancho total de la bocatoma de agua  $b'$  en la que se incluye la rejilla:

$$b' = b + N \times e [m] \quad (\text{ec2.23.})$$

10. Aumentar el 20 % a la longitud de la rejilla con el fin de evitar que hojas y otros elementos puedan reducir el área de captación:

$$L' = 1.2 \times L \text{ [m]} \quad (\text{ ec2.24})$$

**Figura 2.8. Dimensiones de la rejilla**

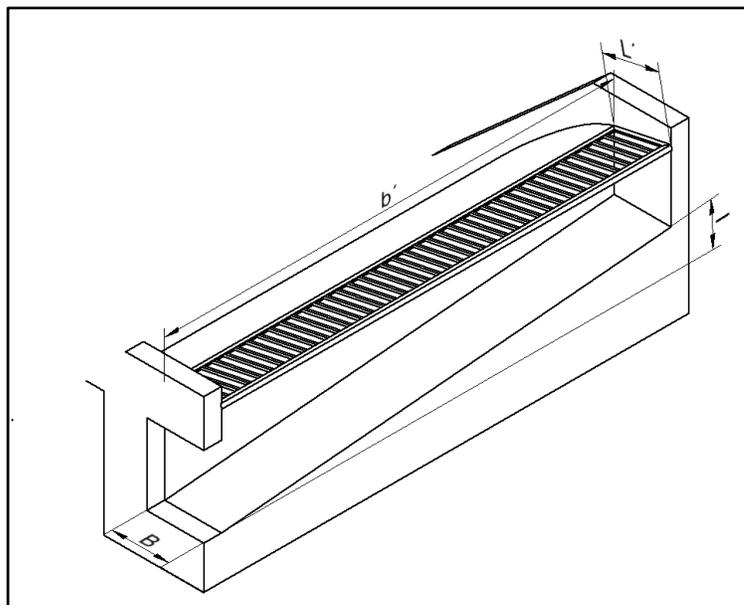


*Fuente: Autores*

### c) Galería o Canal Colector

A continuación se dimensiona el canal colector, en el cual se recomienda una pendiente interna  $I$  del 5%, para un mejor funcionamiento de la bocatoma de fondo. La forma y dimensiones de la cámara colectoras se muestran en la figura 2.9.

**Figura 2.9. Dimensiones del Canal Colector**



*Fuente: Autores*

### Secuencia de cálculo para el dimensionamiento de la galería:

1. Determinar el ancho del canal colector de la toma de agua  $B$  que está dado por:

$$B = L \times \cos \beta \quad [m] \quad (ec2.25)$$

2. Encontrar la profundidad crítica del canal:

$$Y_c = \left( \frac{Q_t^2}{g \times B^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad [m] \quad (ec2.26)$$

3. Determinar la velocidad crítica del agua en el canal:

$$V_c = \sqrt{g \times Y_c} \quad \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (ec2.27)$$

4. Calcular la altura del agua al final del canal:

$$H_2 = 1.2 \times Y_c \quad [m] \quad (ec2.28)$$

5. Elegir un rango de seguridad  $K_s$  para mejorar su funcionamiento, se recomienda un valor de  $K_s = 0.5$ .

$$P_p = K_s \times H_2 \quad [m] \quad (ec2.29)$$

6. Seleccionar un ancho del muro de contención:

$$a_m$$

7. Calcular la longitud del canal colector mediante la siguiente expresión:

$$b^{\wedge} = \frac{(b^{\wedge} + a_m)}{\cos \phi} \quad [m] \quad (ec2.30)$$

Donde:

$\phi$ : Es el ángulo de inclinación del piso de la galería para que los sedimentos no se depositen en la misma. Para mejor eficiencia de la misma se recomienda un ángulo de  $3^\circ$  a  $5^\circ$ .

8. Determinar la altura de la pendiente del canal:

$$h' = b'' \times \sin \phi \quad [m] \quad (ec2.31)$$

9. Calcular la altura inicial que alcanza el agua en el canal:

$$H_1 = \sqrt{\frac{2 \times Y_C^3}{H_2} + \left(H_2 - \frac{b'' \times I}{3}\right)^2} - \frac{2 \times b'' \times I}{3} \quad [m] \quad (ec2.32)$$

10. Determinar la velocidad final del agua en el canal:

$$V_f = \frac{Q_r}{H_2 \times B} \quad \left[\frac{m}{s}\right] \quad (ec2.33)$$

11. Comprobar que el diseño de la galería es acertado mediante la siguiente condición:

$$V_f < V_C$$

12. Una vez que cumpla la condición anterior, se puede decir que la galería o canal colector está bien dimensionada.

### 2.2.3 Conducción

El caudal que es recogido en la bocatoma debe ser conducido hacia el tanque de presión a través de un canal que puede estar a cielo abierto o cerrado manteniéndose el caudal a presión atmosférica o por medio de una tubería de baja presión, mediante la cual el agua fluye debido a la diferencia de alturas entre la bocatoma y el tanque de presión. Para el estudio de nuestro sistema solo se hará referencia a la conducción por medio de tubería de baja presión.

El criterio técnico con el que se deben diseñar éstas obras toma en cuenta las características topográficas de los lugares donde se va a instalar la toma y del caudal que generalmente disminuye aguas arriba. Además de éste criterio se debe tener en cuenta la parte económica que depende de la longitud de la obra pues aumentan los costos.

### 2.2.3.1 Tubería de conducción

Debido a razones de costo, facilidad de instalación y topografía del terreno, se deben tomar en cuenta la instalación de tubería para la conducción teniendo en cuenta las propiedades del material en cuestión. La ecuación de Bernoulli incluye todos los tipos de energía existentes en el agua desde la bocatoma hasta el tanque de presión y de la cual se hará uso para determinar el diámetro de tubería necesario en la conducción:

$$\frac{P_A}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} - \Delta H = \frac{P_A}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

En la que la presión en la bocatoma, punto 1 es igual a la presión en el tanque de presión, punto 2 que es la presión atmosférica, de la misma manera se suprimen las velocidades en los dos puntos debido a que el caudal es siempre constante; entonces quedo:

$$\Delta H = z_1 - z_2$$

Las pérdidas de energía en la tubería son iguales a la diferencia de alturas entre los dos puntos. De la misma manera, las pérdidas de energía se producen debido a dos factores: pérdidas por fricción del agua contra las paredes del tubo a lo largo de la longitud de la tubería, a este tipo de pérdidas se conoce como pérdidas primarias, y pérdidas por turbulencia en los accesorios o pérdidas secundarias, las cuales se toman en cuenta en la siguiente ecuación:

$$\Delta H = \frac{16 \times Q_t^2}{2 \times g \times \pi^2 \times D^4} \left( \lambda \frac{L}{D} + \sum K \right) \quad [m] \quad (ec2.34)$$

### 2.2.3.2 Selección de la tubería de conducción

1. Establecer la altura entre la bocatoma y el tanque de presión  $\Delta H$  y la longitud de la tubería de conducción  $L$ .
2. Determinar las pérdidas de presión que para el cálculo se representan por  $K$  en metros; la sumatoria de las pérdidas por accesorios se deben resumir en una tabla.

3. Elegir el material de la tubería y tomar un valor tentativo del factor de fricción  $\lambda$ .

4. Reemplazar los valores en la ecuación 2.34, y obtener un diámetro inicial.

5. Con el diámetro calculado encontramos el numero de Reynolds:

$$\text{Re} = \frac{Q_t \times D}{A \times \nu} \quad (\text{ec2.35})$$

Donde:

$\nu$  : Es la viscosidad cinemática del fluido  $[m^2 / s]$

6. Determinar la relación:

$$\frac{k}{D} \quad (\text{ec2.36})$$

Donde:

$k$  : Es el valor de la rugosidad absoluta ver Anexo II.

7. Mediante el diagrama de MOODY Anexo III determinar un nuevo valor de  $\lambda$  con el cual se refina el diámetro obtenido en sucesivas iteraciones hasta encontrar el valor definitivo.

8. Resumir en una tabla los valores de las diferentes iteraciones.

9. Determinar el diámetro comercial consultando los catálogos de los fabricantes dependiendo del tipo de material.

10. Con el diámetro comercial de la tubería en cuestión se determina un nuevos valores de  $\text{Re}$ ,  $k/D$  y  $\lambda$ .

11. Encontrar el valor de las perdidas secundarias  $\Delta H$  mediante la ecuación 2.34.

12. Determinar si la tubería escogida es apta y suficiente para conducir el caudal especificado, comparando que la diferencia de alturas entre la bocatoma y el tanque de presión sea mayor que las pérdidas secundarias.

## **2.2.4 Desarenadores y cámara de carga**

### **2.2.4.1 Desarenador**

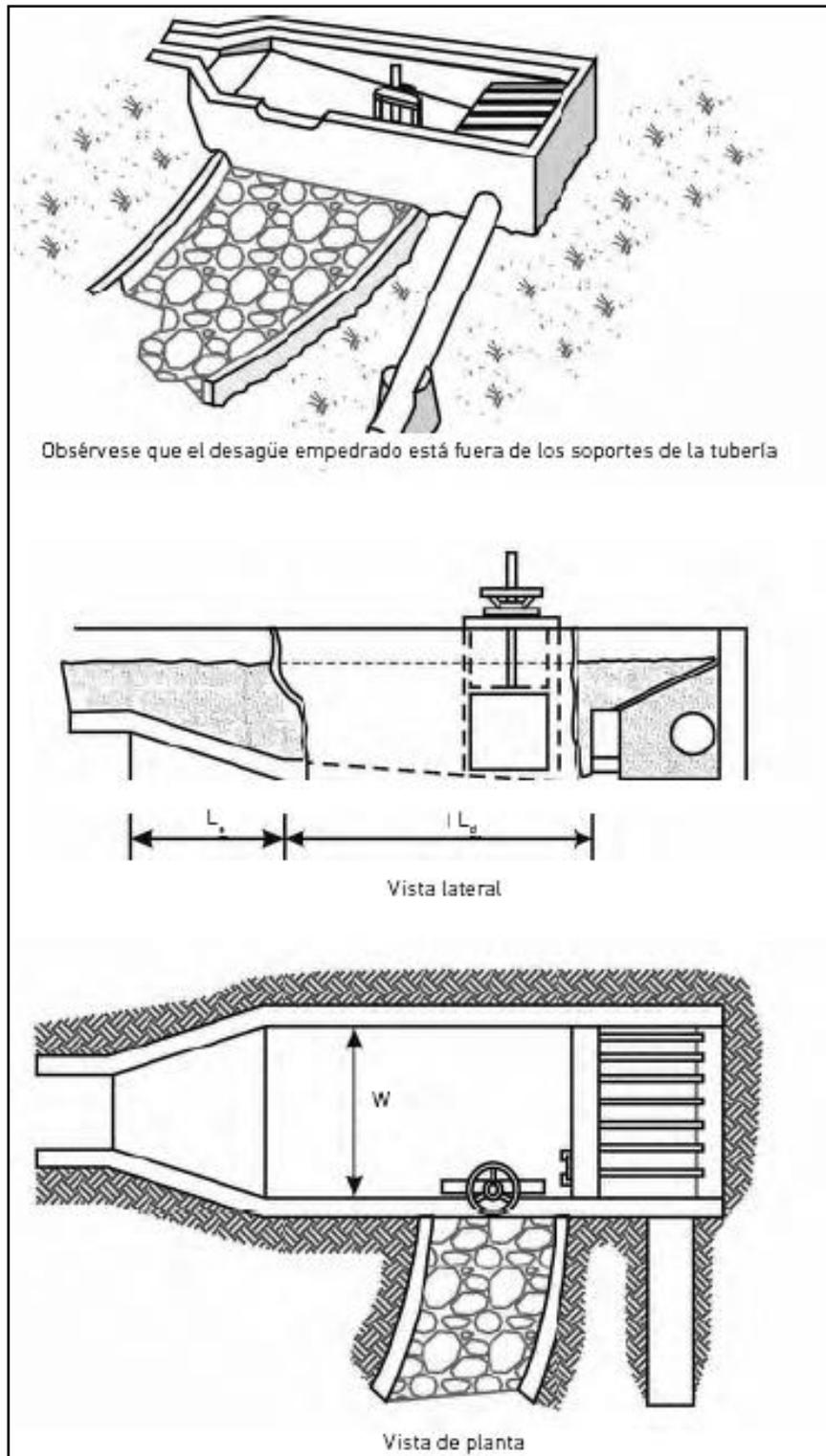
El agua conducida a la turbina transporta pequeñas partículas de materia sólida en suspensión compuesta de materiales abrasivos que ocasionan un acelerado desgaste de los alabes de la turbina. Para eliminar este material se usan los desarenadores.

En ellos la velocidad del agua es reducida con el objeto de que las partículas de arena o piedras se asienten en el fondo de donde podrán ser removidas oportunamente. Las figuras 2.10 se muestra un diseño simple de un desarenador a la entrada del canal y una cámara de carga.

Ambos depósitos deben cumplir estos cinco principios importantes:

- Deben tener una longitud y un ancho adecuados. para que los sedimentos se depositen, sin ser demasiado voluminosos o caros.
- Deben permitir una fácil eliminación de los depósitos.
- La eliminación de sedimentos a través de la compuerta debe hacerse cuidadosamente para evitar la erosión del suelo que rodea y soporta la base de la tubería y del depósito. Es mejor construir una superficie empedrada similar al canal de desagüe del aliviadero.
- Se debe impedir la turbulencia del agua causada por cambios de área o recodos que harían que los sedimentos pasen hacia la tubería de presión.
- Tener la capacidad suficiente para permitir la acumulación de sedimentos

**Figura 2.10. Esquema de una cámara de carga**



Fuente: "Manual para la evaluación de la demanda, recursos hídricos, diseño e instalación de Microcentrales Hidroeléctricas"-Soluciones Prácticas.

### a) Ancho y longitud del desarenador

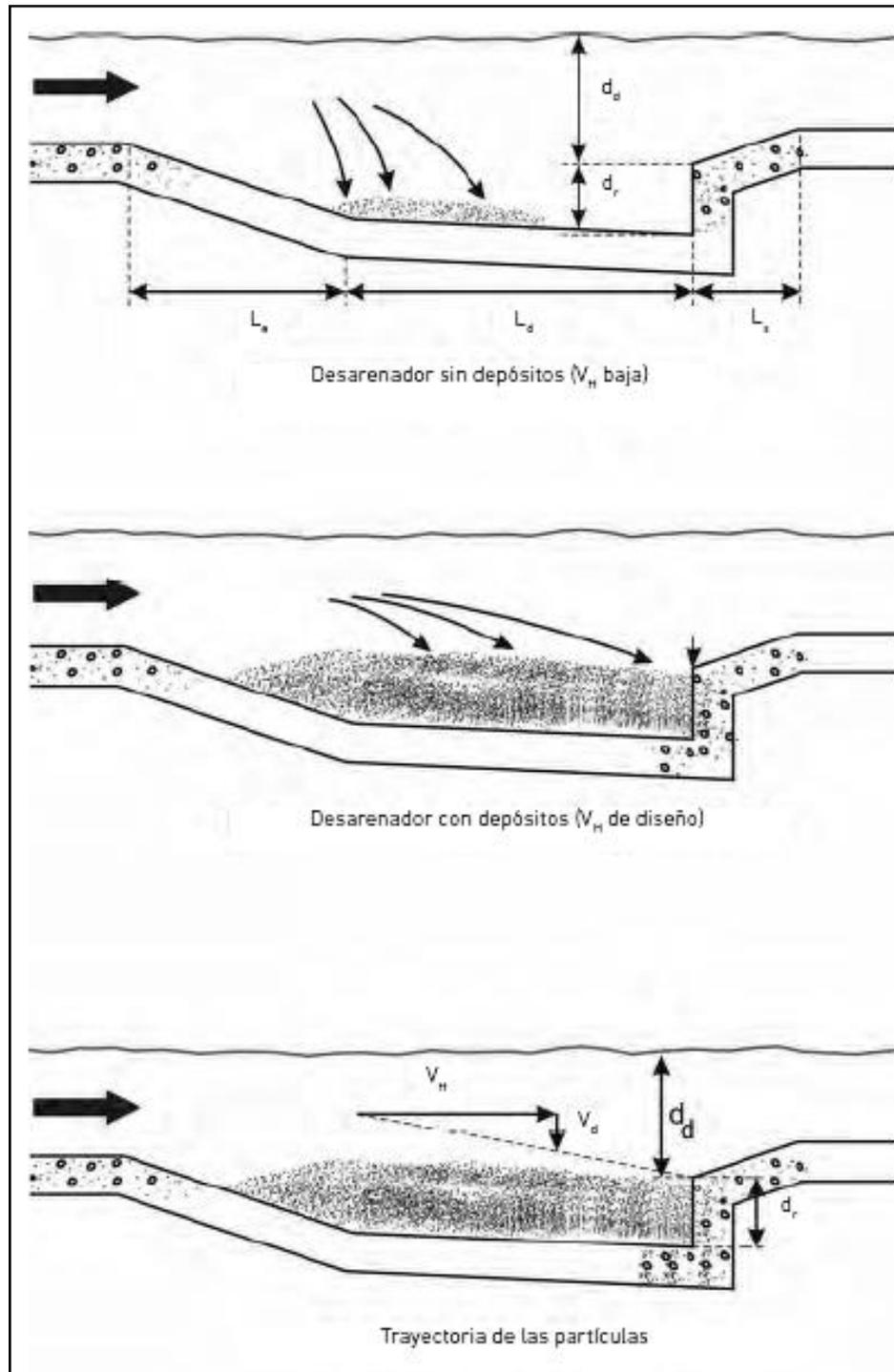
La longitud total del desarenador se divide en tres partes: entrada ( $L_e$ ), decantación ( $L_d$ ) y salida ( $L_s$ ). La parte central es el área de decantación. La longitud de decantación ( $L_d$ ) y el ancho ( $W$ ) aparecen también en la figura anterior.

La profundidad del desarenador se divide en dos partes: decantación ( $d_d$ ) y de recolección ( $d_r$ ). Es muy importante que el ingeniero proyectista sepa distinguir entre estas dos profundidades, ya que el desarenador funcionará correctamente solo si no se permite que la sedimentación que se va formando exceda del borde del área de recolección que se encuentra en el límite superior de la zona de recolección ( $d_r$ ).

La velocidad horizontal del agua ( $V_H$ ) será baja, puesto que la zona de decantación del desarenador tiene una gran sección transversal ( $A$ ). Para diseñar un desarenador se elige una velocidad de agua adecuada. Se recomienda un valor de  $0.2m/s$ , en la mayoría de los casos, pero también pueden adoptarse valores más altos, hasta de  $0.5m/s$ . El siguiente paso es escoger un valor de profundidad de decantación ( $d_d$ ). Se recomienda no seleccionar valores mayores a 1 m para fines de diseño. Otra razón práctica para ello es que el drenaje de la sedimentación del desarenador puede ser difícil de realizar si este es muy profundo. En este punto es posible determinar el ancho del desarenador.

Si el terreno sobre el cual se va a construir el desarenador es muy escarpado, entonces puede ser impracticable construir uno ancho. Los valores de ( $V_H$ ) y de ( $d_d$ ) pueden seleccionarse nuevamente para conseguir un desarenador más angosto pero más largo. La figura 2.11 muestra la trayectoria seguida por las partículas de arena. Inicialmente, al estar el desarenador limpio de depósitos, la velocidad del agua tendrá valores menores que la velocidad calculada. Cuando el tanque recolector está lleno (figuras b y c), la velocidad del agua será mayor y las partículas viajarán hacia adelante del desarenador. La velocidad con que las partículas caen depende de su tamaño, forma, densidad y del grado de turbulencia del agua.

Figura 2.11. Trayectoria de las partículas de un desarenador



Fuente: "Manual para la evaluación de la demanda, recursos hídricos, diseño e instalación de Microcentrales Hidroeléctricas"-Soluciones Prácticas.

Cuando el flujo de agua no es turbulento, la velocidad de decantación  $V_d$  (vertical) de partículas pequeñas es conocida. En la mayoría de las Microcentrales Hidráulicas es suficiente eliminar partículas que tengan más de 0.3 mm de diámetros, las cuales tienen velocidades de decantación mayores de 0,03 m/s. El desarenador debe ser lo suficientemente largo como para permitir que se decanten las partículas más livianas cuando la zona de decantación este llena, tal como se muestra en la figura anterior.

La longitud de decantación se calcula fácilmente:

$$L_d = \frac{V_H}{V_d} \times d_d \times f \quad [m] \quad (ec2.37)$$

Donde:

$f$  = Factor de seguridad (se recomienda de 2 a 3).

El diseño de la cámara de carga se hace en forma similar sin descontar las perdidas por filtración o el agua utilizada para riego si es que la hubiera, a menos que estas sean significativas. En la práctica, la frecuencia de vaciado dependerá de las observaciones que se hagan del tiempo de llenado del tanque colector.

En teoría, la cámara de carga deberá tener una capacidad de colección menor que el desarenador ya que la carga del sedimento debe ser baja. En la práctica, es muy posible que el agua del canal contenga sedimento a causa de desechos o de fallas en el depósito de la entrada. Por esta razón la cámara de carga debe ser dimensionada del mismo modo que el desarenador y vaciada con la frecuencia que sea necesaria.

#### **b) Tanque colector del desarenador.**

El contenido de materia en suspensión en la sección de un río varía de acuerdo a la estación y al tipo de terreno aguas arriba. La variación a lo largo del año puede ser muy grande. La avenida estacional ocasiona altas velocidades y turbulencias que aumentan la carga de sedimentación de manera impresionante. Los desarenadores deben estar diseñados para trabajar durante periodos de gran turbidez.

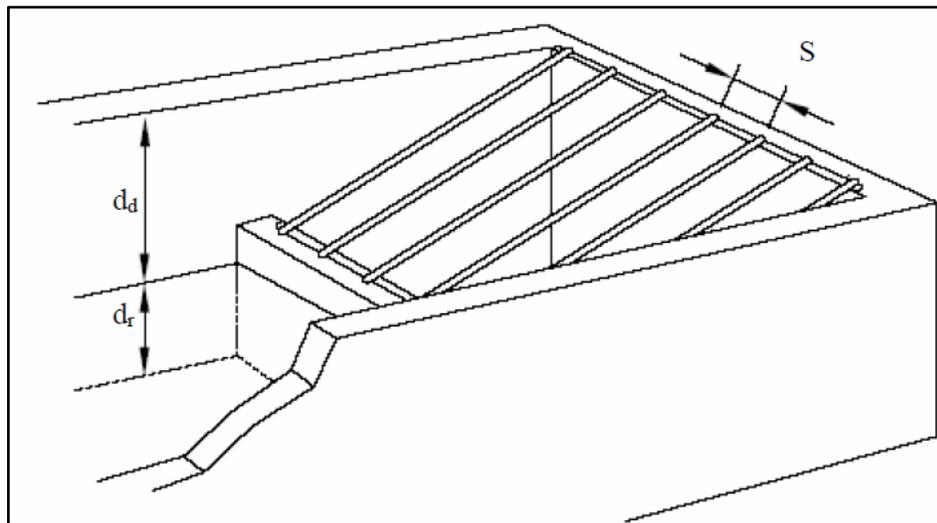
#### 2.2.4.2 Cámara de carga

La figura 2.11 muestra una cámara de carga. El diseño de esta cámara sigue exactamente el procedimiento explicado anteriormente para los desarenadores, excepto para la sección de salida que es remplazada por la toma de la tubería de presión.

##### a) Distancia entre las rejillas.

En el caso de una turbina Pelton, el espacio entre las rejillas “S” no debe ser mayor que la mitad del diámetro del inyector. Si se usa una válvula de aguja debe ser un cuarto de este. Para una turbina Francis, “S” no debe exceder la distancia entre los alabes del rodete figura 2.12.

**Figura 2.12. Rejilla en la cámara de carga**



*Fuente: “Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas” - Federico Coz.*

##### b) Limpieza de las rejillas

Se puede quitar la rejilla y extraer los residuos (dos rejillas utilizadas juntas aseguran que una esté siempre en su lugar), o emplear un rastrillo hecho especialmente para el efecto. Los dientes del rastrillo deben estar lo suficientemente espaciados para que entren entre las barras y el mango debe ser lo bastante largo para permitir el rastrillaje completo de las rejillas. La mejor forma de colocarlas es en un ángulo entre 60° y 80° de

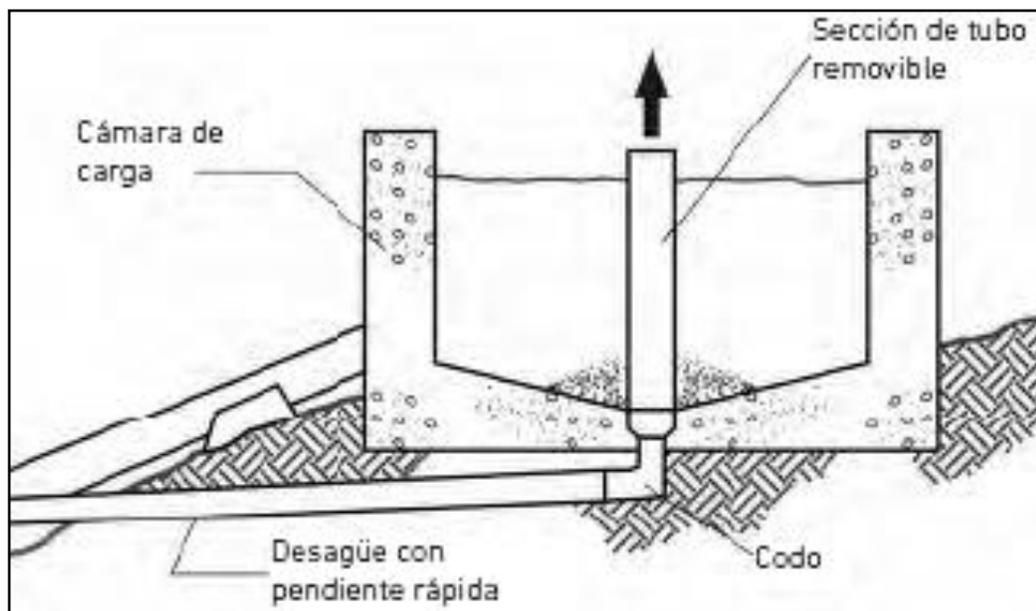
la horizontal, a fin de lograr un buen rastrillaje, pero también para permitir que la gravedad y el movimiento los mantengan limpios.

### 2.2.4.3 Limpieza de desarenadores y corte del agua

Por lo general la limpieza es un proceso bastante tedioso: se abre la compuerta y el sedimento es removido con pala a lo largo del piso del depósito con el fin de dirigirlo a través de la compuerta. El piso del depósito debe estar ligeramente inclinado para facilitar esta operación. Durante la limpieza manual, la compuerta de control de la bocatoma debe estar cerrada a fin de parar la turbina. El vaciado hay que realizarlo en períodos en que no se necesita la energía de la turbina.

Se puede diseñar algunos dispositivos de limpieza semiautomáticos a fin de evitar el excesivo trabajo manual y los cortes de energía. Una posibilidad es el remplazo de una compuerta de apertura lenta por un tubo de desagüe de limpieza, tal como se aprecia en la figura 2.13.

**Figura 2.13. Desagüe de limpieza y aliviadero**



*Fuente: "Manual para la evaluación de la demanda, recursos hídricos, diseño e instalación de Microcentrales Hidroeléctricas"-Soluciones Prácticas.*

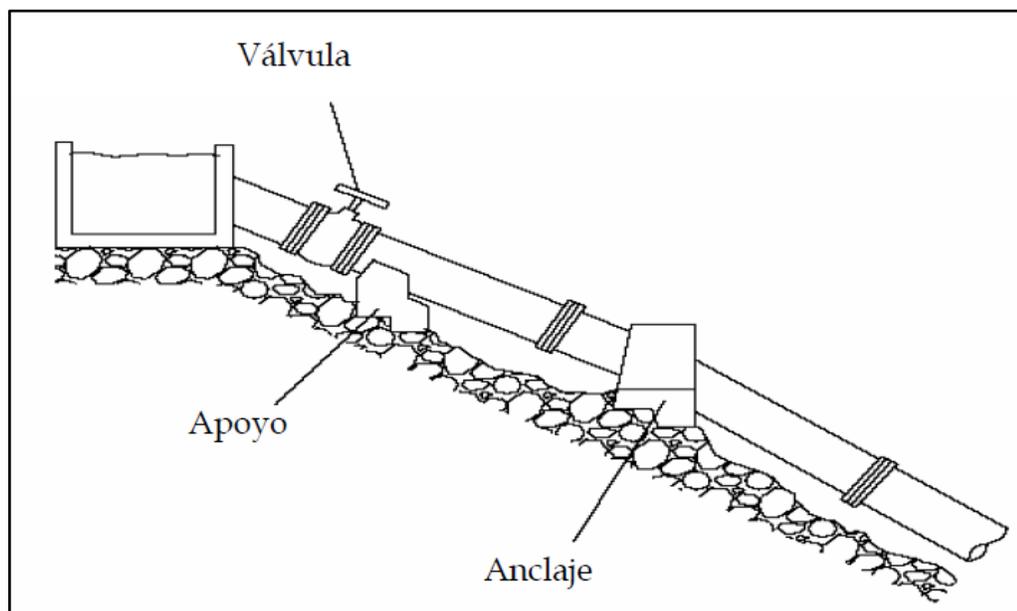
#### 2.2.4.4 Secciones de ingreso del desarenador.

La longitud de entrada y salida ( $L_e$  y  $L_s$ ) debe ser 2.5 veces el ancho de la zona de decantación si es que se quiere evitar la turbulencia en el agua.

### 2.3 TUBERÍA DE PRESIÓN

Son tuberías que transportan agua bajo presión hasta la turbina. Los principales componentes de una estructura de tubería de presión pueden ser apreciados en la figura 2.14.

**Figura 2.14. Componentes de una tubería de presión**



*Fuente: "Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas" - Federico Coz.*

Debido a que el costo de esta tubería puede representar gran parte del presupuesto de toda la Microcentral, es prioritario, pues, optimizar su diseño para reducir no solo los costos de mantenimiento sino la inversión inicial. Para que los costos de mantenimiento sean bajos hay que colocar los soportes y los anclajes de la tubería en pendientes estables y encontrar buenos cimientos. No deberá haber peligro de erosión por desprendimientos en las laderas, pero el acceso seguro para hacer los trabajos de mantenimiento y reparación (por ejemplo, repintado).

Al momento de hacer la proyección de los costos de la tubería es fácil subvalorar los gastos de diversas operaciones secundarias como uniones y pintura. Decidir entre un material para tubería de presión y otro puede implicar grandes diferencias en el costo total si es que se incluyen todos estos factores. Por ejemplo: una tubería de plástico puede ser barata pero las uniones pueden ser caras o de poco fiar.

### **2.3.1 Pautas para seleccionar una tubería de presión**

1. Considerar las diferentes clases de material disponible, tiros de uniones; comparar formas y costos de mantenimiento. Anotar también los diámetros de tubería y los espesores de pared disponibles.
2. Calcular la pérdida de altura por fricción del 4-10% para una serie de materiales y diámetros. Tabular los resultados.
3. Calcular la probable presión adicional por golpe de ariete en caso de un cierre brusco del paso de agua a la tubería, y sumarla a la presión estática. Calcular espesores de pared adecuados para los tamaños de tubería que se prefieran tabular.
4. Diseñar los soportes, anclajes y uniones para la tubería de presión.
5. Preparar una tabla de opciones calculando el costo total de cada una y ver si los componentes están disponibles en el mercado.
6. La selección del diámetro se hará tratando de obtener el menor costo y las menores pérdidas de energía.

### **2.3.2 Materiales para tuberías de presión**

Al decidir el material que se empleara para un proyecto tienen que ser considerados los siguientes factores:

- Presión de diseño
- Tipo de unión

- Diámetro y pérdida por fricción
- Peso y grado de dificultad de la instalación
- Accesibilidad al sitio
- Terreno y tipo de suelo
- Mantenimiento y vida esperada de la instalación
- Condiciones climáticas
- Disponibilidad
- Costo relativo

Los materiales frecuentemente utilizados en las tuberías de presión son:

- Acero comercial
- Policloruro de vinilo (PVC)
- Polietileno de alta densidad
- Hierro dúctil centrifugado
- Asbesto-cemento
- Resina poliéster con fibra de vidrio reforzado

A continuación nos referiremos brevemente a estos materiales.

#### **2.3.2.1 Acero comercial**

El acero comercial ha sido uno de los materiales más usados para tuberías de presión. Estas tuberías pueden ser fabricadas con maquinaria común en la mayoría de talleres de regular tamaño que trabajen con acero. Se fabrican con planchas de acero y soldadas. Sus diámetros y espesores son variados. Tienen un factor de pérdida por fricción regular y si están protegidas por una capa de pintura u otra capa de protección pueden durar hasta 20 años.

#### **2.3.2.2 Policloruro de vinilo (PVC)**

La tubería de PVC es una de las más empleadas en las Microcentrales Hidráulicas. Es relativamente económica, se produce en diámetros que van hasta cerca de 400 mm, y es adecuada para presiones elevadas (100 a 150 m). Al variar el espesor de la pared de la tubería se obtienen diferentes niveles de presión. Es liviana y fácil de transportar e

instalar. Tiene un factor de pérdidas por fricción bajo y es resistente a la corrosión. No obstante, es relativamente frágil y puede ser dañada por golpes o impactos de rocas, especialmente a bajas temperaturas.

La principal desventaja es que el PVC se deteriora cuando se expone a la luz ultravioleta, la cual raja la superficie afectando seriamente la resistencia de la tubería. Por ello, siempre debe estar protegida de la luz solar directa ya sea enterrándola, cubriéndola con vegetación, envolviéndola o pintándola. Las tuberías de PVC tienen uniones tipo espiga y campana, las cuales se unen empleando pegamento o también con un anillo flexible de sellado.

#### **2.3.2.3 Hierro dúctil centrifugado**

El hierro dúctil ha remplazado en gran medida al hierro fundido, aunque este último todavía se utiliza en sistemas antiguos. En ocasiones, las tuberías de hierro dúctil están revestidas en su interior con cemento, lo que las dota de protección contra la corrosión y de una baja pérdida por fricción.

#### **2.3.2.4 Asbesto-cemento**

Las tuberías hechas de cemento reforzado con fibra de asbesto son frágiles y adecuadas para trabajar a una presión moderada. Su transporte e instalación requiere de cuidado. Son más pesadas que las de PVC y tienen una apreciable pérdida por fricción.

#### **2.3.2.5 Resina de poliéster con fibra de vidrio reforzado**

Las tuberías hechas de resina reforzada con fibra de vidrio insertada en forma de espiral son livianas y poseen bajo coeficiente de fricción. Son frágiles y hay que instalarlas con bastante cuidado.

#### **2.3.2.6 Polietileno de alta densidad**

Las tuberías fabricadas con este material son una buena alternativa frente a las de PVC. Son particularmente útiles para pequeños sistemas debido a su fácil instalación.

Tienen un coeficiente de pérdidas de fricción bajo, son resistentes a la corrosión y no se deterioran cuando están expuestas a la luz solar. Estas tuberías con frecuencia se unen calentando los extremos y fusionándolos a presión utilizando un equipo especial, lo cual es una desventaja.

En las tablas 2.2 y 2.3 se puede observar una comparación entre cada uno de los materiales para tubería de presión, así como las propiedades de cada material.

<b>Tabla 2.2. Comparación de los diferentes materiales para tuberías de presión</b>					
<b>Materia</b>	<b>Perdida por fricción</b>	<b>Peso</b>	<b>Corrosión</b>	<b>Costo</b>	<b>Presión de trabajo</b>
Hierro dúctil	4	3	2	1	5
Asbesto cemento	3	3	4	4	4
PVC	5	5	4	4	4
Acero comercial	3	3	3	2	5
Polietileno	5	5	5	3	4

Rango: Malo = 1 Excelente = 5

Fuente: "Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas" - Federico Coz.

<b>Tabla 2.3. Propiedades de los materiales para tuberías</b>				
<b>Material</b>	<b>Módulo de Young</b> <i>GN / m<sup>2</sup></i>	<b>Coef. Exp. Lineal</b> <i>m / m<sup>o</sup> C</i>	<b>Esfuerzo de rotura</b> <i>MN / m<sup>2</sup></i>	<b>Densidad</b> <i>kN / m<sup>3</sup></i>
Acero bajo % C	207	12x10 <sup>-6</sup>	350	78,6
PVC	2.75	54x10 <sup>-6</sup>	28	14
Polietileno	0.19-0.78	140x10 <sup>-6</sup>	5.9-8.8	9.4
Hierro dúctil	170	11x10 <sup>-6</sup>	310-520	70

Fuente: "Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas" - Federico Coz.

### 2.3.3 Tipos de uniones

Las tuberías, por lo general vienen en longitudes estándar y deben ser unidas. Hay muchas maneras de hacerlo. Al escoger el mejor método de unión para un sistema determinado, hay que considerar los siguientes aspectos:

- Adecuación al material de tubería seleccionado.
- Grado de destreza del personal que instala las tuberías.
- Grado de flexibilidad requerido en las uniones.
- Costos relativos.
- Grado de dificultad de la instalación.

Los tipos de uniones de tuberías pueden clasificarse en 4 categorías:

1. Embridadada
2. Espiga y campana
3. Mecánica
4. Soldada

### 2.3.4 Juntas de expansión

En las tuberías de presión de acero tiene que haber juntas de expansión o dilatación figura 2.15. Generalmente existe una inmediatamente debajo de la cámara de carga o del anclaje superior. La dilatación de la tubería debe ser calculada como sigue:

$$E = \alpha \times \Delta T \times L \quad [m] \quad (ec2.38)$$

Donde:

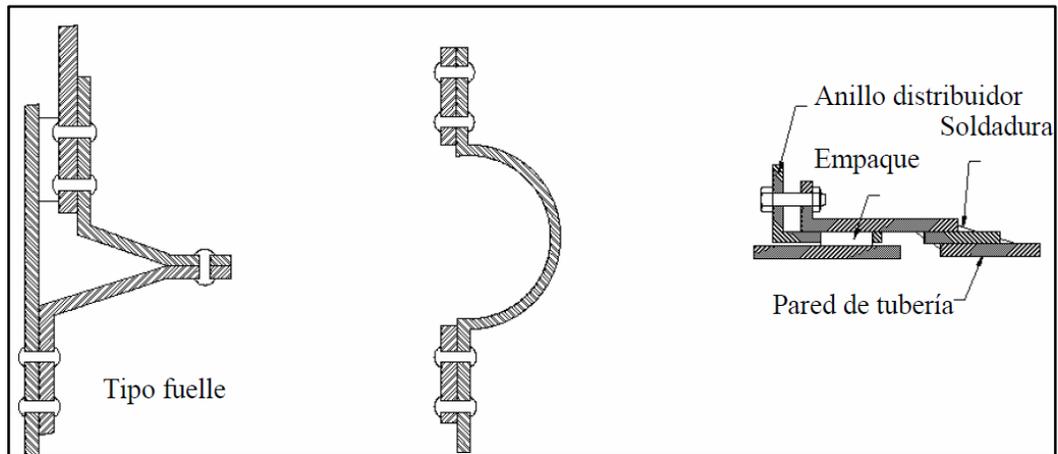
$E$  : Dilatación en metros

$\alpha$  : Coeficiente de dilatación del acero.

$\Delta T$  : Cambio de temperatura experimentada por la tubería ( $^{\circ}C$ ).

$L$  : Longitud de la tubería ( $m$ ).

**Figura 2.15. Juntas de dilatación**



*Fuente: "Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas" - Federico Coz.*

### **2.3.5 Válvulas para tuberías de presión**

Las válvulas controlan el paso de agua en la tubería de presión y las hay de diferentes tipos. Para el caso de las Microcentrales Hidráulicas nos limitaremos tan sólo a las válvulas de compuerta y de mariposa debido a que estas tienen una mayor aplicación. Por lo general, las válvulas están instaladas inmediatamente antes de la turbina pero en ciertos casos se encuentran a la entrada de la tubería de presión.

#### **2.3.5.1 Válvula de compuerta**

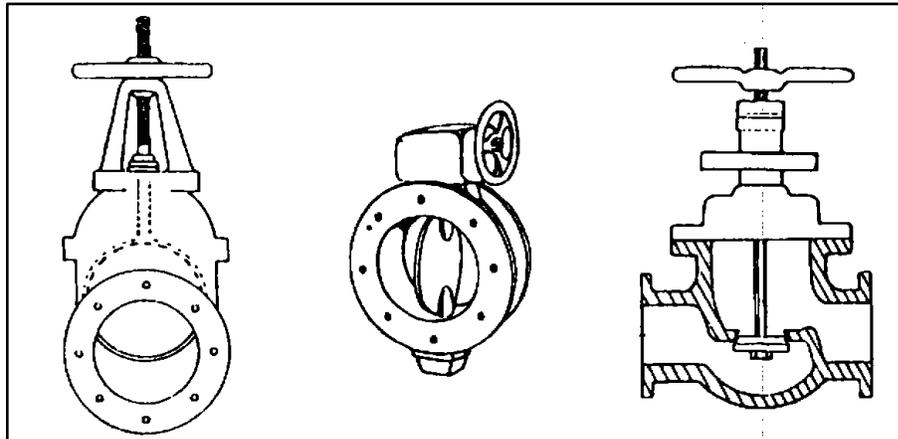
Una válvula de compuerta consiste básicamente de un disco metálico que sube y baja a voluntad y que está ubicado en el cuerpo de la válvula. A presiones elevadas o con válvulas de gran diámetro se precisa de una fuerza importante para operadas y vencer las fuerzas de fricción en la válvula. Por esta razón, cuando se coloca una válvula de compuerta grande en la parte inferior de la tubería de presión se coloca también una pequeña válvula de bypass para conectar el lado de alta presión con el de baja presión. Si el lado de baja presión no está abierto a la atmósfera, habrá un aumento de presión que eventualmente igualará a la presión a ambos lados de la válvula, facilitando su apertura.

#### **2.3.5.2 Válvula de mariposa**

Básicamente se trata de una extensión de la tubería dentro del canal se coloca un disco en forma de lente montado en un eje central. Para operar este tipo de válvulas se requiere

de poca fuerza, ya que la presión de contra corriente de cada mitad del disco es prácticamente balanceada. Debido a su diseño, una válvula de mariposa puede ser cerrada con facilidad. Es importante que sea cerrada lentamente, a fin de evitar el golpe de ariete en la tubería (figura 2.16).

**Figura 2.16. Válvulas de mariposa con diferentes mecanismos de apertura**



*Fuente: "Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas" - Federico Coz.*

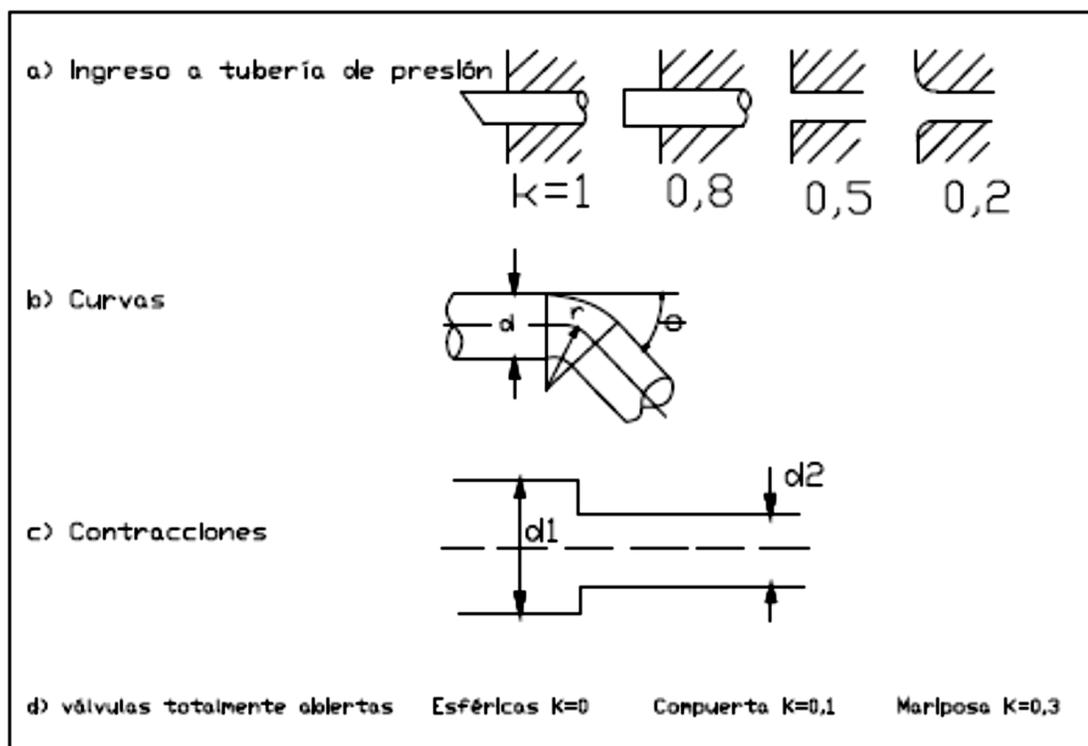
### **2.3.6 Selección del diámetro de la tubería de presión**

A continuación se ofrece un método para seleccionar una tubería con un espesor de pared y diámetro adecuado. Este proceso de optimización puede ser completado rápidamente mientras se considera la factibilidad de un sistema obteniendo información de un mapa si es que éste existe.

También se utiliza para la selección final de la tubería, en cuyo caso es una buena práctica trazar el perfil de la ruta de la tubería sobre la base de una cuidadosa inspección del sitio. Debe tomarse nota detallada de estructuras rocosas y del tipo de suelo, de los obstáculos, cambios de dirección horizontal y del gradiente. Estas observaciones permitirán que codos, anclajes y soportes sean incluidos en el análisis de costos y en el cálculo de pérdidas en la tubería.

La figura 2.17 y la tabla 2.4, 2.5 muestran los factores de pérdida asociados con codos y otras fuentes de turbulencia en el caudal de agua.

**Figura 2.17. Pérdidas debido a turbulencias**



Fuente: "Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas" - Federico Coz.

Tabla 2.4. Coeficiente de pérdidas en curvas				
$\theta$	r/d			
	1	2	3	5
20°	0.36	0.25	0.20	0.15
45°	0.45	0.38	0.30	0.23
90°	0.60	0.50	0.40	0.30

Fuente: "Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas" - Federico Coz.

Tabla 2.5. Coeficientes de pérdidas en contracciones					
d1/d2	1	1.5	2	2.5	5
<b>k</b>	0	0.25	0.35	0.40	0.50

Fuente: "Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas" - Federico Coz.

### 2.3.6.1 Cálculo de las pérdidas por fricción y diámetro de tubería de presión

1. Establecer la caída bruta y el valor del caudal de diseño de turbina.
2. Seleccionar un material, tomar un diámetro tentativo  $D$ , determinar un diámetro interno consultando los catálogos de fabricantes.
3. Medir o calcular la longitud de la tubería. En caso de no poder hacer las mediciones directamente, esta se puede determinar a través de mapas y relaciones trigonométricas.
4. Elegir un valor para la rugosidad utilizando el Anexo II. Calcular la rugosidad relativa ( $K/d$ ) y luego calcular el número de Reynolds ( $Re$ ). Leer en el diagrama de MOODY el valor del factor de fricción ( $\lambda$ ) Anexo III.
5. Calcular la pérdida de carga debida a la fricción de la pared en la tubería ( $h_f$ ).

$$h_f = 0.08 \frac{\lambda \times L \times Q_t^2}{D^5} \quad [m] \quad (ec2.39)$$

6. Calcular la velocidad del agua en la tubería ( $V$ ).

$$V = \frac{4Q_t}{\pi \times D^2} \quad \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (ec2.40)$$

7. Con los coeficientes del diagrama de MOODY, calcular las pérdidas por turbulencia ( $h_t$ ) en las secciones de entrada, codos, válvulas y otros accesorios.

$$h_t = \frac{V^2}{2g} (K_1 + K_2 + \dots + K_n) \quad [m] \quad (ec2.41)$$

En donde  $K$  es un factor asociado a codos, válvulas, cambios de dirección, y  $g$  es la constante de aceleración de la gravedad. Por lo general, las pérdidas por turbulencia son menores comparadas con el efecto de la fricción de pared. Si se

hace un rápido cálculo inicial del tamaño y se cree que los efectos de la turbulencia son menores, obviar el paso 7.

La pérdida de carga total será la suma de pérdidas por fricción más las pérdidas por turbulencia.

$$h_p = h_f + h_t \quad [m] \quad (ec2.42)$$

8. Calcular la pérdida porcentual de caída debida a la fricción:

$$Perdidas \% = \frac{h_p \times 100}{H_b} \quad (ec2.43)$$

9. Si ésta no está entre el 3 y el 11%, seleccionar un diámetro de tubería más adecuado y repetir los pasos del 1 al 7. Si está entre el 3 y el 11%, incluir detalles en una tabla. Luego seleccionar un tamaño y/o material de tubería diferente, y repetir los pasos del 1 al 8.

10. Si se piensa en una tubería de PVC, comparar los resultados de este proceso de selección con las indicaciones dadas en la carta de pérdida de fricción del fabricante.

### 2.3.6.2 Cálculo del espesor de pared de tuberías de presión

Al calcular el espesor requerido de pared es necesario tener en cuenta dos cosas:

- a) Las presiones más altas que se espera que resista la tubería.
- b) Los efectos corrosivos que tienden a adelgazar sus paredes con el transcurso del tiempo, la rigidez para darle resistencia, las limitaciones de la soldadura allí donde sean relevantes y los cambios de espesor u ondulación ocurridos durante su fabricación.

En cuanto al punto a), las presiones altas se dan por corto tiempo en determinadas situaciones, como por ejemplo el cerrar la válvula. Como son temporales, se conocen con el nombre de presiones transitorias. Tal como se explicó antes, las presiones pueden

ser expresadas como altura de agua. La presión transitoria se sumara a la presión normal de funcionamiento (altura bruta).

$$H_t = H_b + \Delta h_{trans} \quad [m] \quad (ec2.44)$$

El método recomendado para calcular  $h$  se da como parte del cálculo del espesor de la pared de la tubería. En vista que el método esta simplificado, no es suficientemente exacto en todos los casos de diseño de tuberías.

### 2.3.6.3 Secuencia del cálculo

1. Establecer la velocidad del flujo en la tubería y hacer una con diferentes posibilidades de tubería de presión. Incluir en la el valor del espesor de pared para cada opción.

2. La presión transitoria puede expresarse como caída de agua ( $\Delta h$ ).

$$\Delta H = \frac{a \times \Delta V}{g} \quad [m] \quad (ec2.45)$$

Donde:

$$g = 9.8m/s^2$$

$V$  : *velocidad del agua*

$a$  : Es la velocidad de propagación de la onda de presión que depende del material, diámetro y del espesor de la pared de la tubería. Una aproximación simple se haría empleando los siguientes valores:

Tubería de acero blando  $a = 900m/s$

Tubería de hierro fundido  $a = 1250m/s$

Tubería de PVC  $a = 350m/s$

En algunos casos el cálculo de la sobrepresión por golpe de ariete puede dar valores excesivamente altos. Si se piensa emplear una turbina Pelton multichorros, no es

probable que haya altas presiones transitorias. En ese caso sería recomendado aproximarla.

3. Calcular la caída total en la tubería cuando ocurren golpes de ariete.

$$H_t = \Delta H + h_p \quad [m] \quad (ec2.46)$$

4. Elegir los factores de corrección pertinentes

Factor por tipo de junta: soldadura  $k_j = 1.1$

Plancha rolada y soldada  $k_j = 1.2$

Factor por corrosión  $K_C = 1mm$  (por 10 años de vida)

$K_C = 2mm$  (Por 20 años de vida)

Obsérvese que en una primera aproximación la tubería de PVC tiene un factor de multiplicación igual a 1.

5. Calcular en mm el espesor teórico de la pared ( $T$ ) considerando los factores de espesor y la presión total.

$$T = \frac{5 \times f_s \times h_t \times 10^6 \times d \times k_j}{S} + K_C \quad [mm] \quad (ec2.47)$$

Donde:

$f_s$  : Es un factor de seguridad

$S$  :Representa el esfuerzo de rotura del material de la tubería en unidades de  $N/m^2$  o Pascales (ver tabla 2.3) y  $d$  ,  $h$  total están en metros.

6. Seleccionar el espesor de la pared más delgado disponible y que exceda el espesor de pared calculado e incluirlo en la de distintas opciones de tuberías de presión. Si ello no es posible, hacer un cálculo más completo de la velocidad de onda  $a$  basada en el diámetro de tubería que resultara en una caída transitoria y un espesor de pared menor.

7. Si se piensa emplear una tubería de PVC, comparar los resultados de este cálculo con el espesor de pared y recomendaciones de nivel de presión hecha por el fabricante.

8. Repetir los pasos 2 al 6 para diferentes materiales de tubería de presión.

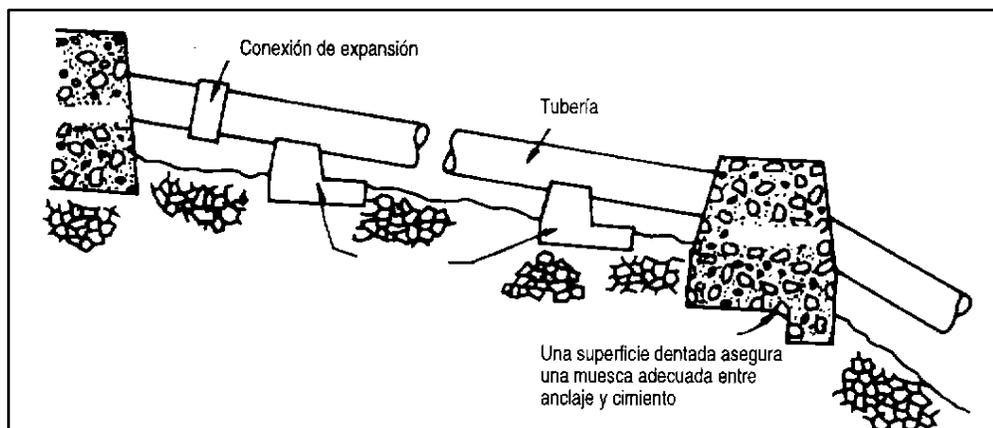
### 2.3.7 Apoyos y anclajes para tuberías de presión

Su función principal es dar el peso necesario para contrarrestar las fuerzas de los fluidos que podrían hacer que la tubería se mueva y corra el peligro de romperse.

El soporte sostiene el peso de esta y del agua que contiene. Los anclajes sirven para mantener en tierra a la tubería, así como para fijarla y evitar los movimientos laterales. El bloque de empuje se usa en codos de tuberías enterradas a fin de transmitir las fuerzas a la tierra circundante.

Los apoyos o soportes deben construirse de manera tal permitan el movimiento longitudinal de la tubería al contraerse o dilatarse debido a cambios de temperatura. Los soportes tienen que ser construidos sobre suelo firme y no un relleno. La superficie de contacto del apoyo con el suelo de cimentación debe estar calculada para soportar el peso sin exceder el límite de capacidad de resistencia del suelo. Además es necesario hacer canaletas de drenaje a lo largo de la tubería para evitar la erosión de los cimientos de los soportes figura 2.18.

**Figura 2.18. Apoyos y anclajes para tuberías de presión**



*Fuente: "Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas" - Federico Coz.*

### 2.3.7.1 Espaciamiento de soportes

Hay que calcular el máximo de espaciamiento entre los soportes de una tubería a fin de que esta no se fracture o flexione excesivamente. La tabla 2.6, da una serie de pautas para el espaciamiento de pilares basándose en la experiencia y en las recomendaciones de los fabricantes de tuberías. Por lo general, y si se tiene dudas, usar un soporte por cada pieza de tubería.

<b>Tabla 2.6. Espaciamiento entre apoyos (m) para tuberías de acero comercial</b>					
<b>Espesor</b>	<b>Diámetro (mm)</b>				
	100	200	300	400	500
2 mm	2	2	2.5	3	3
4 mm	3	3	3	4	4
6 mm	4	4.5	5	6	6

*Fuente: "Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas" - Federico Coz.*

### Tubería de acero

Lo importante en este caso es el sistema de unión. Para cualquier método de acoplamiento flexible se requiere de un soporte por pieza. Para bridas que siguen la norma ISO, las tuberías pueden ser consideradas como si fueran una pieza.

### Tuberías unidas con espiga y campana

Las tuberías de hierro fundido, hierro dúctil y concreto emplean por lo general uniones de espiga y campana. Estas pueden tener una flexión mínima, de allí que haya que usar un soporte por unidad.

### 2.3.7.2 Calculo de apoyos

#### a. Fuerzas que intervienen en los apoyos (figura 2.19)

$W$  : Peso del tubo más peso del agua por unidad de longitud

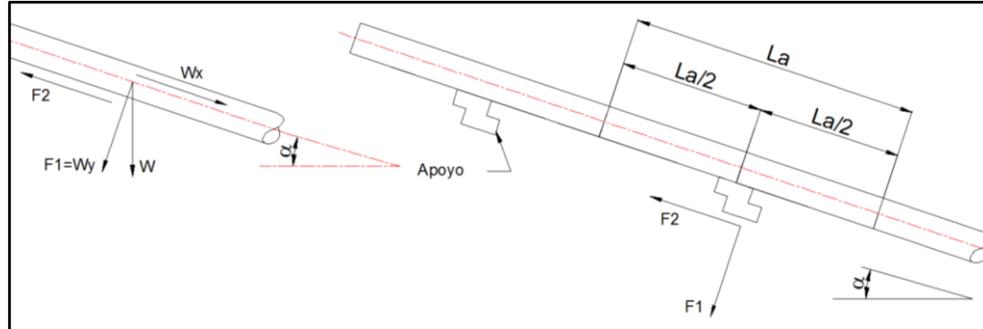
Esta a su vez tiene 2 componentes

$W_x$  : Fuerza longitudinal, paralela al tubo

$W_y$  : Fuerza perpendicular al tubo

$F_2$  : Fuerza de fricción entre tubo y apoyo, originada por  $W_y$

**Figura 2.19a. Fuerzas que intervienen los apoyos**



Fuente: Autores

**b. Fuerzas que intervienen para el calculo**

$F_1 = W_y$  : Componente del peso del tubo con agua por unidad de longitud perpendicular al tubo.

$F_2$  : Fuerza de fricción entre apoyo y tubo.

La componente  $W_x$  no actúa para el apoyo sino para el cálculo del anclaje.

**c. Valor de  $F_1$  y  $F_2$**

$$F_1 = W \times L_a \times \cos \alpha \quad [kg] \quad (ec2.48)$$

Pero:

$$W = W_t + W_a \quad \left[ \frac{kg}{m} \right] \quad (ec2.49)$$

Remplazando la ecuación 2.49 en la ecuación 2.48tenemos:

$$F_1 = (W_t + W_a) \times L_a \times \cos \alpha \quad [kg] \quad (ec2.50)$$

$$F_2 = \mu \times F_1 \quad [kg] \quad (ec2.51)$$

Donde:

$W_t$  :Peso del tubo por unidad de longitud ( $N/m$ ) ó ( $kg/m$ ).

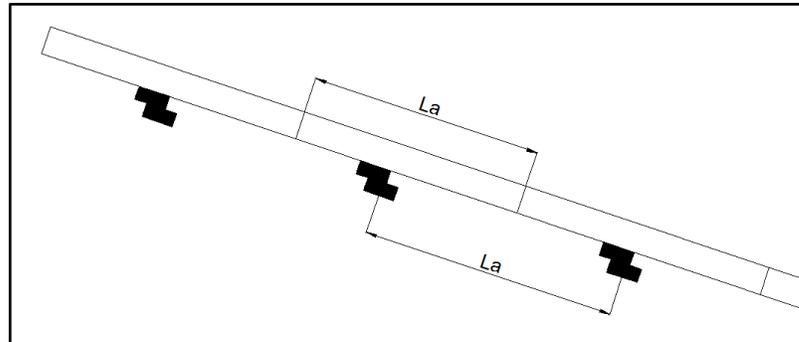
$W_a$  :Peso del agua en el tubo por unidad de longitud ( $N/m$ ) ó ( $kg/m$ )

$\mu$  : Coeficiente de fricción entre tubo y concreto (acero y concreto) ( $\mu = 0.5$  ó  $0.6$ ).

$L_a$  = Distancia entre apoyos o entre los puntos medios de 2 tramos consecutivos (figura 2.19 b).

$\alpha$  : Angulo de inclinación de la tubería

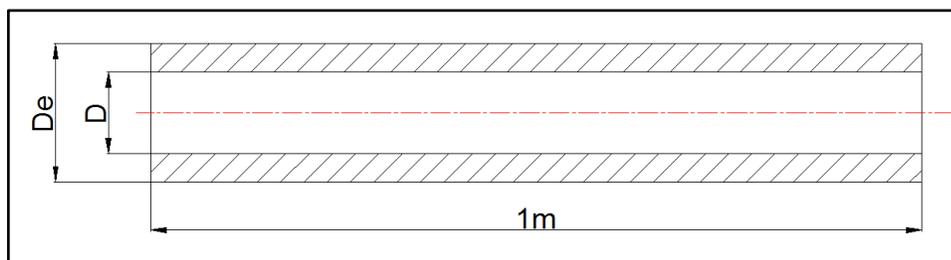
**Figura 2.19b. Distancia  $L_a$**



*Fuente: Autores*

Operando las formulas, haciendo intervenir el concepto de peso, en función del peso específico, volumen y características geométricas del tubo y agua, tenemos (figura 2.19 c).

**Figura 2.19c. Características geométricas del tubo**



*Fuente: Autores*

$$W_t = \gamma_t \times V_t \quad (ec2.52)$$

$$W_t = \gamma_t \times \frac{\pi}{4} (D_e^2 - D^2) \left[ \frac{kg}{m} \right] \quad (ec2.53)$$

$$W_a = \gamma_a \times \frac{\pi}{4} D^2 \left[ \frac{kg}{m} \right] \quad (ec2.54)$$

Donde:

$\gamma_t$  : Peso específico del material de la tubería,  $(N/m^3)$  ó  $(kg/m^3)$

$D_e$  : Diámetro exterior del tubo en m

$D$  : Diámetro interior del tubo en m

$L_a$  : Longitud entre apoyos en m

Esta longitud no debe causar deflexiones excesivas, ni esfuerzos de flexión mayores a los admisibles en la tubería.

Generalmente se aconseja que:

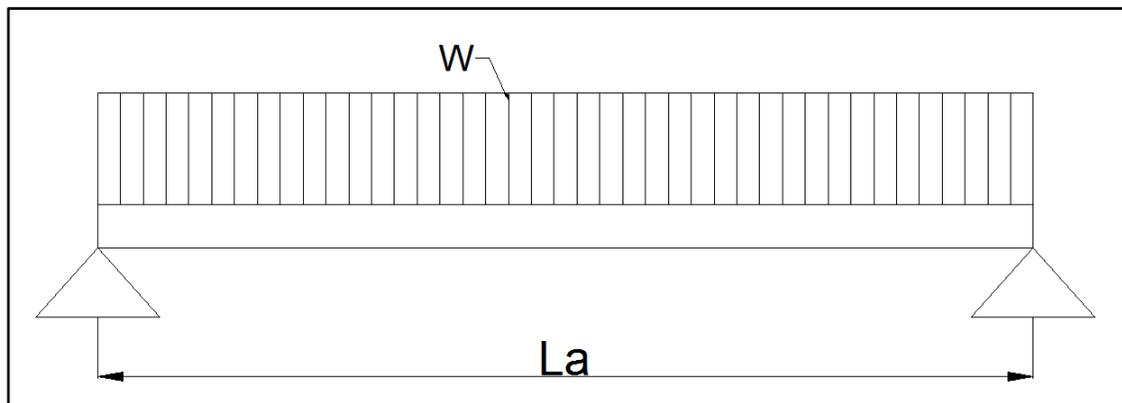
$$L_a \leq 8m$$

La flecha máxima  $\Delta$  se calcula mediante:

$$\Delta_{\max} = \frac{5}{384} \times W \times \frac{L_a^4}{(E \times I)} \quad [m] \quad (ec2.55)$$

Y el momento flector máximo es (como viga simplemente apoyada (figura 2.19 d)).

**Figura 2.19d. Diagrama de cargas**



Fuente: Autores

$$M = W \times \frac{L_a^2}{8} \quad [kg \cdot m] \quad (ec2.56)$$

$$W = W_t + W_a$$

Donde:

$E$  : Módulo de elasticidad del material de la tubería

$I$  : Momento de inercia de la sección

Para el caso de vigas se conoce que:

$$\Delta_{adm} = \frac{1}{360} \times L_a \quad [m] \quad (ec2.57)$$

Para comprobar si los espaciamientos de los apoyos de la tubería de presión son correctos debe cumplir la condición de que la flecha admisible sea mayor que la flecha máxima

$$\Delta_{max} < \Delta_{adm}$$

#### **d. Calculo de las fuerzas**

Se presentan dos cosas:

1. Cuando la tubería se está dilatando.
2. Cuando la tubería se está contrayendo.

Para el primer caso:

La figura 2.20 muestra las fuerzas y observamos que  $F_2$  es hacia arriba.

$W$  : Peso del apoyo:

$$W_c = V_c \times \gamma_c \quad [kg] \quad (ec2.58)$$

Donde:

$V_c$  : Volumen de concreto del apoyo

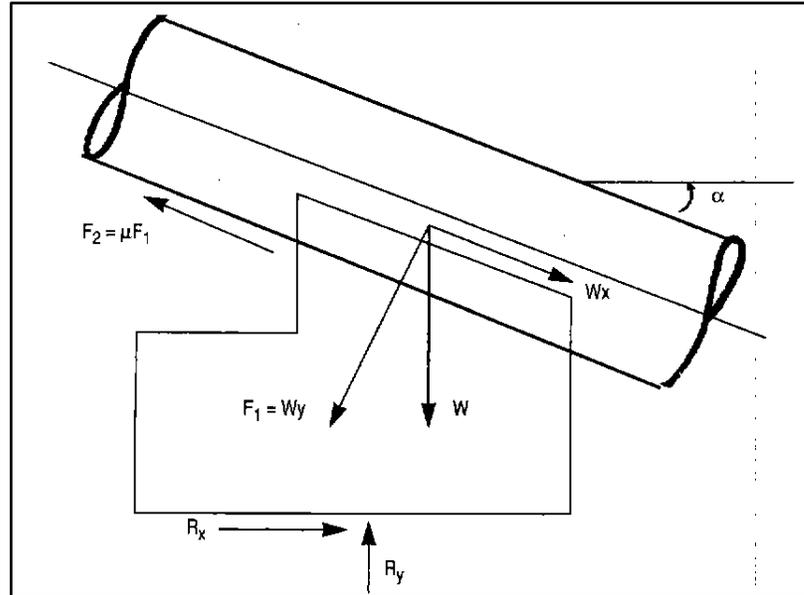
$\gamma_c = 2300kg/m^3$  : Peso específico del concreto

$R_x$  : Reacción horizontal del suelo contra el apoyo.

$R_y$  :Reacción vertical del suelo contra el apoyo.

$x$ :Distancia de la  $R_x$  al punto 0

**Figura 2.20. Fuerzas cuando la tubería se dilata**



Fuente: "Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas" - Federico Coz.

Para asegurar la estabilidad del apoyo se deben cumplir tres condiciones:

1.  $\sum F_x < \mu_t \times \sum F_y$

Donde:

$\mu_t$  : Coeficiente de fricción entre el apoyo de concreto y el terreno

$\sum F_x$  : Sumatoria de las fuerzas en  $x$

$\sum F_y$  : Sumatoria de las fuerzas en  $y$

2.  $S_{base} < S_{adm}$  del terreno

$S_{base}$  : Esfuerzo de compresión sobre el terreno.

$S_{adm}$  : Esfuerzo de compresión admisible del terreno

$$S_{base} = \frac{R_y}{A} \times \left( 1 \pm \frac{6 \times e}{b} \right) \left[ \frac{kg}{m^2} \right] \quad (ec2.59)$$

El doble signo significa que habrá  $S_{max}$ ,  $S_{min}$

$R_y$  :Reacción vertical del suelo contra el apoyo

$b$  :Largo de la base del apoyo

$e$  :Excentricidad de la reacción vertical

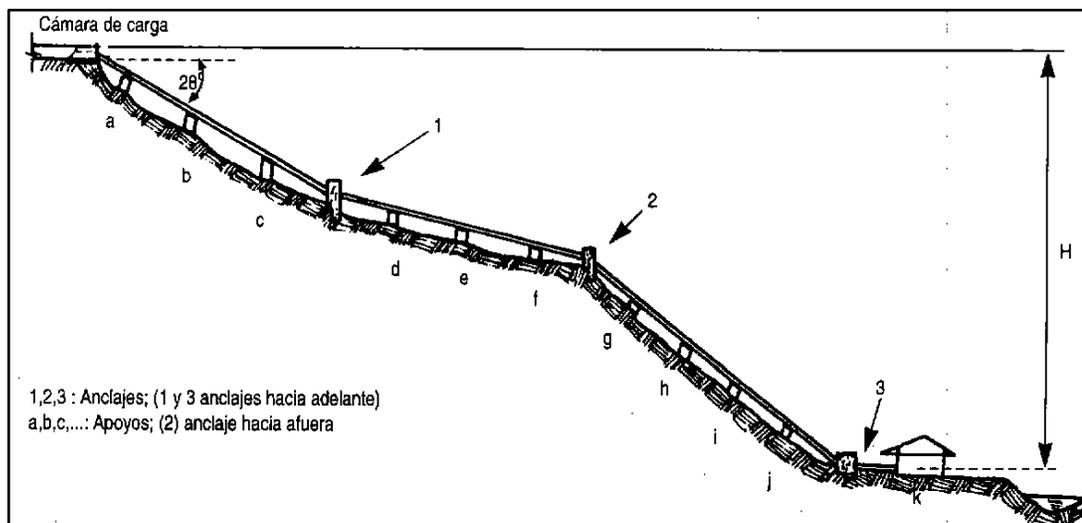
$$e = X - \frac{b}{2} \quad [m] \quad (ec2.60)$$

3. El  $S_{base}$  mínimo debe ser positivo, en caso contrario significara que se produce el volteo del apoyo.

### 2.3.8 Calculo de anclajes

Los anclajes son bloques de concreto que envuelven la tubería de presión con el propósito de fijarla al terreno. Por lo tanto, deben resistir cualquier fuerza que la tubería ejerza sobre ellos. Generalmente, estos se ubican en aquellos lugares donde hay cambios de dirección o de pendiente, o donde existen ambos de sección (figura 2.21).

**Figura 2.21. Tubería de presión**



Fuente: "Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas" - Federico Coz.

Al diseñar los anclajes, es necesario tener en cuenta los cambios de pendiente. Dependiendo de la idea de pendiente que se trate, hay dos tipos de anclajes: hacia afuera y hacia adentro. Los anclajes hacia adentro influyen favorablemente en su estabilidad, ya que los esfuerzos debidos a la desviación del movimiento del agua actúan contra el terreno. En cambio, los anclajes hacia afuera estos esfuerzos actúan en el otro sentido: en dirección al aire o espacio. Para estos últimos, es importante conocer bien la magnitud de los ángulos y el tipo de suelo se ubica.

Para ambos casos, las fuerzas que actúan sobre los anclajes son:

**a. Componente del peso de la tubería con agua perpendicular a ella ( $F_1$ )**

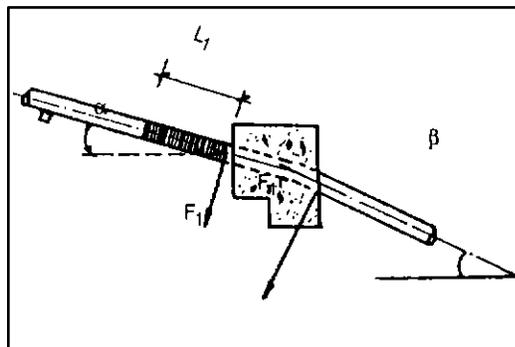
Esta fuerza es similar a la fuerza  $F_1$  considerada para los apoyos.

Para el cálculo del anclaje, deben considerarse los tramos de tubería: el que esta aguas arriba y el que esta aguas abajo del anclaje (figura 2.22).

$$F_1 = (W_t + W_a) \times L_1 \times \cos \alpha \quad [kg] \quad (ec2.61)$$

Para aguas arriba  $L_1$

**Figura 2.22. Calculo de la fuerza  $F_1$**



Fuente: "Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas" - Federico Coz.

Donde:

$L_1$  : Distancia del anclaje al punto medio del tramo

$\alpha$  : Angulo de inclinación del tramo de tubería analizado aguas arriba del anclaje

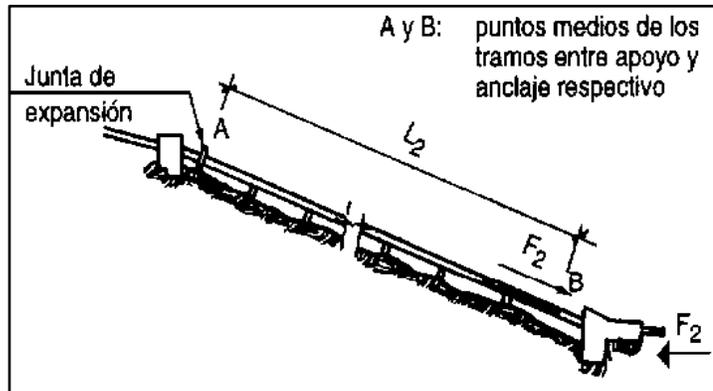
$\beta$  : En el caso del tramo de tubería aguas abajo del anclaje

**b. Fuerzas de fricción entre la tubería y los apoyos ( $F_2$ )**

Esta fuerza existe solo en el caso de que exista uno o más apoyos entre el anclaje y la junta de dilatación (figura 2.23)

$$F_2 = \mu \times (W_t + W_a) \times L_2 \times \cos \alpha \quad [kg] \quad (ec2.62)$$

**Figura 2.23. Calculo de la fuerza  $F_2$**



Fuente: "Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas" - Federico Coz.

Donde:

$L_2$  :Longitud de la tubería sujeta a movimiento

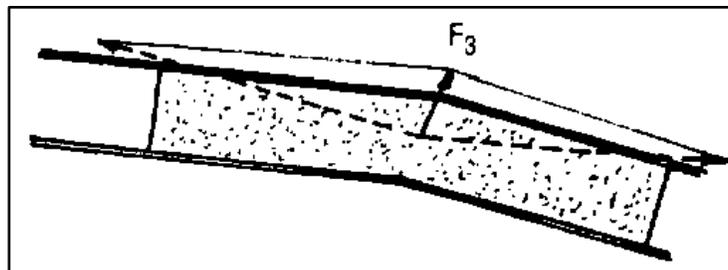
$\alpha$  :Angulo de inclinación de la tubería aguas arriba del anclaje

Usar  $\beta$  para aguas abajo del anclaje

**c. Fuerza en los cambios de dirección debido a la presión hidrostática ( $F_3$ ) (figura 2.24)**

$$F_3 = 1.6 \times 10^3 \times H \times D^2 \times \sin \frac{(\beta - \alpha)}{2} \quad [kg] \quad (ec2.63)$$

**Figura 2.24. Calculo de la fuerza  $F_3$**



Fuente: "Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas" - Federico Coz.

Donde:

$H$  : Presión estática en la tubería a la altura del anclaje en m

$D$  : Diámetro interno de la tubería en m

$\alpha$  : Angulo de inclinación de la tubería con respecto a la horizontal en el tramo aguas arriba del anclaje

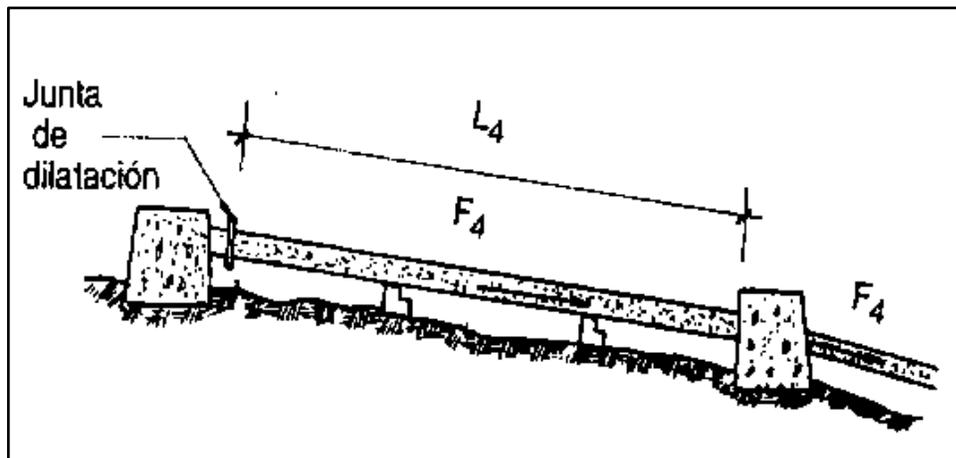
$\beta$  : Angulo de inclinación de la tubería con respecto a la horizontal aguas abajo del anclaje.

**d. Componente del peso de la tubería paralela a ella ( $F_4$ )**

El tramo de tubería aguas arriba del anclaje tratara de empujar a este, mientras que el tramo aguas abajo del anclaje tratara de halarlo en la dirección de la pendiente (figura 2.25).

$$F_4 = W_t \times L_4 \times \sin \alpha \quad [kg] \quad (ec2.64)$$

**Figura 2.25. Calculo de la fuerza  $F_4$**



Fuente: "Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas" - Federico Coz.

Donde:

$L_4$  : Es la longitud de tubería a considerar en cada tramo. Generalmente, es el tramo entre la junta de dilatación y el anclaje.

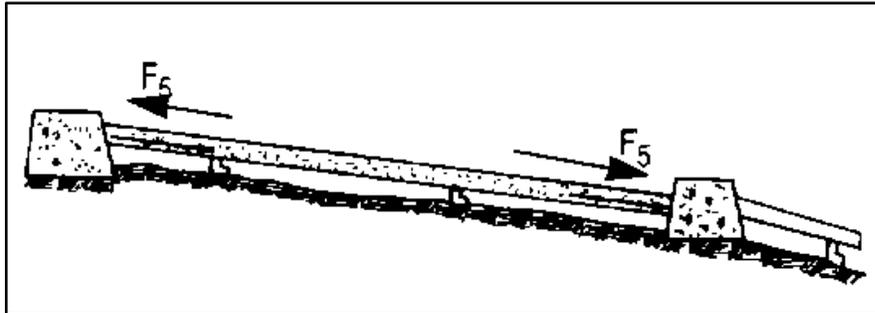
$\alpha$  : Angulo de inclinación de la tubería (usar  $\beta$  cuando se esté analizando el tramo aguas arriba del anclaje).

**e. Fuerza debida a cambios de temperatura en la tubería ( $F_5$ )**

Esta fuerza se origina cuando la tubería no tiene juntas de dilatación y cuando esta se encuentra en la superficie (figura 2.26).

$$F_5 = 31 \times D_e \times t \times E \times a \times \Delta T \quad [kg] \quad (ec2.65)$$

**Figura 2.26. Calculo de la fuerza  $F_5$**



*Fuente: "Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas" - Federico Coz.*

Donde:

$D_e$  : Diámetro exterior del tubo en m

$t$  : Espesor de la pared del tubo en mm

$a$  : Coeficiente de dilatación lineal de la tubería  $^{\circ}C^{-1}$

$\Delta T$  : Máxima variación de la temperatura ( $^{\circ}C$ )

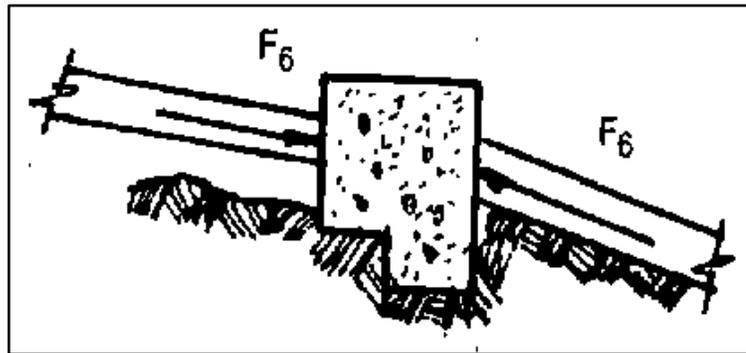
$E$  : Módulo de elasticidad de Young ( $kg/cm^2$ )

**f. Fuerza de fricción en la junta de dilatación ( $F_6$ )**

Esta fuerza se origina entre la empaquetadura y las partes de la junta de dilatación, cuando se contrae o se dilata la tubería (figura 2.27).

$$F_6 = 3.1 \times D \times C \quad [kg] \quad (ec2.66)$$

**Figura 2.27. Calculo de la fuerza  $F_6$**



Fuente: "Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas" - Federico Coz.

Donde:

$D$  : Diámetro interior de la tubería en m

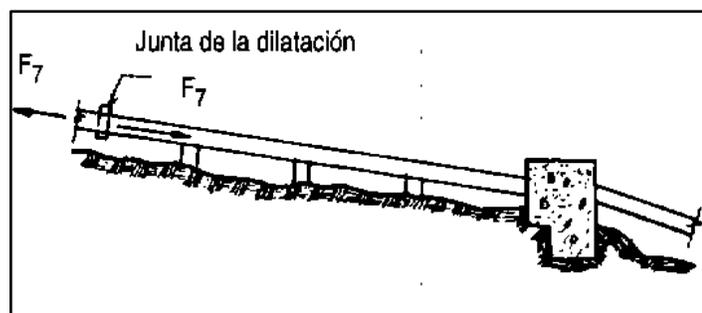
$C$  : Fricción en la junta de expansión por unidad de longitud de circunferencia en  $kgf/m$

(un valor aproximado es  $F_6 = 10 \cdot D$  en  $kg$ , en este caso  $D$  en  $mm$ ).

**g. Fuerza debida a la presión hidrostática dentro de las juntas de expansión ( $F_7$ )**

$$F_7 = 3.1 \times H \times D \times t \quad [kg] \quad (ec2.67)$$

**Figura 2.28. Calculo de la fuerza  $F_7$**



Fuente: "Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas" - Federico Coz.

Donde:

$H$  : Presión estática en la tubería a la altura del anclaje en m

$D$  : Diámetro interior de la tubería

$t$  : Espesor de la pared de la tubería en mm

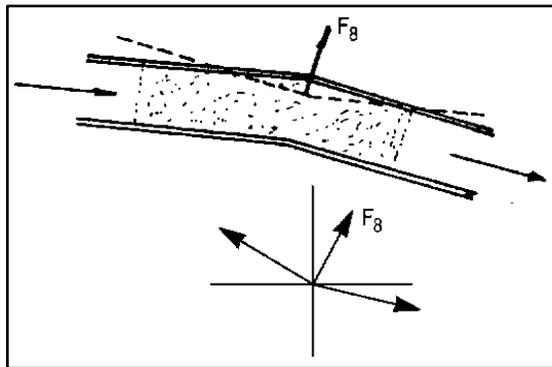
**h. Fuerza debida al cambio de dirección de la cantidad de movimiento ( $F_8$ )**

En los codos o cambios de pendiente, la velocidad del agua cambia de dirección. Ello ocasiona una fuerza resultante sobre el codo, al final tiene la misma dirección y sentido que  $F_3$  (figura 2.29)

Generalmente, la magnitud de esta fuerza es mínima, por lo que no se toma en cuenta.

$$F_8 = 250 \times \left( \frac{Q_t}{D} \right)^2 \times \sin \frac{(\beta - \alpha)}{2} \quad [kg] \quad (ec2.68)$$

**Figura 2.29. Calculo de la fuerza  $F_8$**



Fuente: "Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas" - Federico Coz.

Donde:

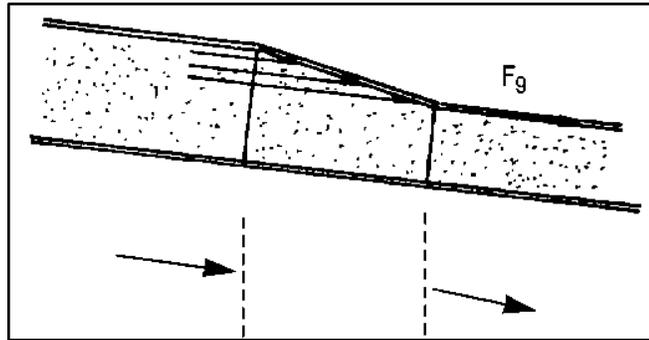
$$Q_t = m^3 / s$$

**i. Fuerza debida al cambio del diámetro en la tubería cuando hay reducción ( $F_9$ )**

Esta fuerza actúa en el sentido de la reducción, es decir, hacia la tubería de menor diámetro (figura 2.30).

$$F_9 = 1 \times 10^3 \times H \times \Delta A \quad [kg] \quad (ec2.69)$$

**Figura 2.30. Cálculo de la fuerza  $F_9$**



*Fuente: "Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas" - Federico Coz.*

Donde:

$H$  : Presión estática en la tubería a la altura de la reducción en m

$\Delta A$  : Cambio de las áreas de las tuberías en  $m^2$

Las figuras que se han mostrado anteriormente, indican la dirección de las fuerzas para el caso en que la tubería se esté dilatando. Si la tubería se estuviera contrayendo, las fuerzas  $F_2$ ,  $F_5$  y  $F_6$  tiene sentido contrario. Una vez calculada la magnitud de las fuerzas, se procede al cálculo de la estabilidad del anclaje siguiendo el mismo procedimiento que para el cálculo de los apoyos, es decir considerando los dos casos: dilatación y contracción de la tubería.

## **2.4 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO ELECTROMECAÁNICO DE UNA MICROCENTRAL HIDROELÉCTRICA.**

En este punto se presenta el desarrollo general para el diseño de las turbinas, Michell Banki, además se mencionan los tipos de regulación de la turbina. Se analiza la máxima capacidad que tiene el generador y las características constructivas del mismo.

### **2.4.1 Tipo de turbinas**

Existen varios tipos de turbinas hidráulicas, que son utilizados con grandes resultados y una mejor eficiencia; cada tipo de turbina tiene su respectiva característica técnica y de

aplicación. En la actualidad, las turbinas que más se utilizan en las centrales de generación y MCH, ya que su rendimiento supera el 90%, son los siguientes:

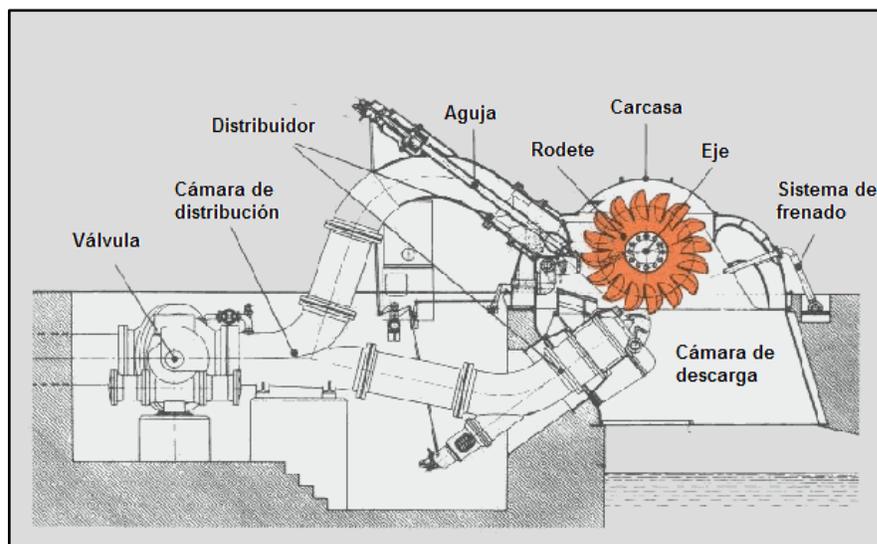
- Pelton
- Michell Banki
- Francis
- Hélice y Kaplan

#### 2.4.1.1 Turbinas Pelton

Se les conoce como turbinas de presión, porque ésta es constante en la zona del rodete, de chorro libre, de impulsión o de admisión parcial. En esta actúa la energía cinética del agua, en forma de chorro libre, se genera en una tobera colocada al final de la tubería de presión. La tobera está provista de una aguja de cierre para regular el gasto, constituyendo el conjunto, el órgano de alimentación y de regulación de la turbina.

Las turbinas Pelton pueden ser de eje horizontal cuando el número de chorros por rueda se reduce generalmente a uno o dos. En las de eje vertical se facilita la colocación del sistema de alimentación en un plano horizontal, lo que permite aumentar el número de chorros por rueda de 4 a 6 chorros; y de esta manera se puede incrementar el caudal y tener mayor potencia por unidad.

**Figura 2.31. Componentes de una turbina Pelton de eje horizontal**



*Fuente: "Turbinas Hidráulicas" - Fernández Pedro*

### 2.4.1.2 Turbinas Francis

Las turbinas Francis son conocidas como turbinas de sobrepresión, tiene las componentes, radial y circunferencial. A medida que el agua recorre la máquina la componente radial se transforma gradualmente en componente axial; y la componente circunferencial se va reduciendo, de forma que a la salida del rodete, el flujo es prácticamente axial. Las turbinas se clasifican en función de la velocidad específica del rodete, ya que el número de revoluciones depende de la característica del salto. Se tienen las turbinas Francis lentas, normal, rápida y extra rápidas, según se puede apreciar en la tabla 2.7.

<b>Tabla 2.7. Valores de velocidad específica para diferentes tipos de turbinas Francis</b>	
<b>Francis</b>	
<b>Turbina</b>	<b>ns</b>
Francis	Lenta 60 – 150 Normal 150 -250 Rápida 250 – 450 Extra rápida 450 - 600

*Fuente: Manual de Mini y Microcentrales hidroeléctricas, Federico Coz.*

Las turbinas Francis pueden ser instaladas con el eje en posición horizontal, o con el eje en posición vertical. Las componentes de una turbina Francis son las siguientes:

- Cámara espiral
- Distribuidor
- Rodete
- Tubo de aspiración
- Eje
- Equipo de sellado del eje de turbina
- Cojinete guía de turbina
- Cojinete de empuje

### **2.4.1.3 Turbina Kaplan**

Son turbinas de admisión total y de reacción, son empleadas en saltos de pequeña altura, alrededor de 50m con caudales medios y grandes aproximadamente de 15m<sup>3</sup>/s en adelante. Debido a su diseño permite desarrollar elevadas velocidades específicas obteniendo buenos rendimientos.

Se puede instalar el eje en posición vertical, o el eje en posición horizontal, pero la más adecuada para un diseño es de eje vertical; las turbinas Kaplan se componen de las siguientes partes:

- Cámara espiral
- Distribuidor
- Rotor o rodete
- Tubo de aspiración
- Eje
- Equipo de sellado
- Cojinete guía
- Cojinete de empuje

Las partes constitutivas de las turbinas Francis y aquellas de las turbinas Kaplan, son similares, pero difiere en el rotor o rodete.

### **2.4.1.4 Turbina Turgo**

Se utilizan en saltos con alturas comprendidas entre 15 y 300 metros. El rodete Turgo es parecido al rodete Pelton partido por la mitad. A diferencia de la Pelton, en la turbina Turgo el chorro incide simultáneamente sobre varios álabes. La turbina Turgo puede manejar un mayor flujo de agua que la Pelton debido a que el agua que sale no interfiere con las poleas adyacentes.

### **2.4.1.5 Turbina Michell Banki**

La turbina de flujo transversal o Michell Banki es una máquina utilizada principalmente para pequeños aprovechamientos hidroeléctricos. Sus ventajas principales están en su

sencillo diseño y su fácil construcción lo que la hace atractiva en el balance económico de un aprovechamiento a pequeña escala. No obstante esto no impide que la turbina se utilice en grandes instalaciones. Aunque la turbina de flujo transversal se conoce como una máquina de pequeña escala, existen actualmente máquinas de este tipo de hasta 6 MW.

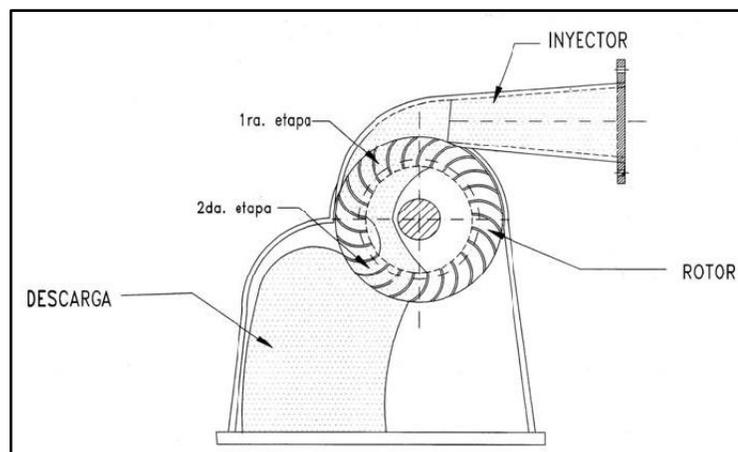
Las principales características de esta máquina son las siguientes:

- La velocidad de giro puede ser seleccionada en un amplio rango.
- El diámetro de la turbina no depende necesariamente del caudal.
- Se alcanza un aceptable nivel de rendimiento con pequeñas turbinas.
- Se puede regular el caudal y la potencia por medio de un álabe ajustable.

#### a) Principio de funcionamiento

La turbina consta de dos elementos principales: un inyector y un rotor (figura 2.32). El agua es restituida mediante una descarga a presión atmosférica. El rotor está compuesto por dos discos paralelos a los cuales van unidos los álabes curvados en forma de sector circular.

**Figura 2.32. Partes principales Turbina Michell Banki**



*Fuente: Soluciones Prácticas IDTG*

El inyector posee una sección transversal rectangular que va unida a la tubería por una transición rectangular - circular. Este inyector es el que dirige el agua hacia el rotor a

través de una sección que toma una determinada cantidad de álabes del mismo, y que guía el agua para que entre al rotor con un ángulo determinado obteniendo el mayor aprovechamiento de la energía.

La energía del agua es transferida al rotor en dos etapas, lo que también da a esta máquina el nombre de turbina de doble efecto, y de las cuales la primera etapa entrega un promedio del 70% de la energía total transferida al rotor y la segunda alrededor del 30% restante.

Una característica atractiva de esta máquina es la forma aplanada de su curva de rendimiento. Esto se logra con un diseño de la turbina con admisión parcial. Por ejemplo: si se divide el rotor en 3 partes iguales y la admisión del agua se puede realizar por 1/3, 2/3 o la totalidad del rodete.

#### **b) Descripción general y parámetros de diseño**

La turbina Michell-Banki es una turbina de acción, de flujo transversal, de adición parcial y de doble efecto que es ideal para la utilización en MCH por su simplicidad y facilidad de construcción. Sus partes principales son: el inyector y el rodete.

Su rango de aplicación lo define los números específicos de revoluciones  $n_q$  y  $n_s$ , los cuales se obtienen mediante las siguientes formulas:

$$n_q = n \frac{Q^{1/2}}{H^{3/4}} \quad [rpm] \quad (ec2.70)$$

Y

$$n_s = n \frac{P_T^{1/2}}{H^{5/4}} \quad [rpm] \quad (ec2.71)$$

Donde:

$P$  : Es la potencia al freno de la turbina en CV

$Q$  : Es el caudal máximo que fluye por la turbina en  $m^3 / s$ .

$H$  : Es el salto neto de la central en  $m$

$n$  : Es la velocidad de giro de la turbina en  $rpm$ .

En la tabla 2.8 se muestra el rango de aplicación de las turbinas Michell Banki con respecto a los rangos de aplicación de los otros tipos de turbinas. Estos parámetros están definidos en base a las limitaciones de su diseño mecánico.

<b>Tabla 2.8. Rango de aplicación de las turbinas Hidráulicas</b>		
<b>Tipo de Turbina</b>	$n_q$	$n_s$
Turbina Pelton de 1 Tobera	Hasta 9	Hasta 30
Turbina Pelton de 2 Tobera	4-13	14-42
Turbina Pelton de 3 Tobera o mas	5-22	17-73
Turbina Michell Banki	18-60	60-200
Turbina Francis Lenta	18-38	69-125
Turbina Francis Normal	38-68	125-225
Turbina Francis Rápida	68-135	225-450
Turbina Axiales	105-300	350-1000

*Fuente: Soluciones prácticas IDTG*

Para el diseño de la turbina Michell Banki es importante deducir la potencia al freno de la turbina que deberá entregar al generador para que se entregue la potencia determinada mediante la siguiente expresión:

$$P_T = \frac{P_G}{\eta_G \times \eta_{Tr}} \quad [kW] \quad (ec2.72)$$

Donde:

$P_G$  :Potencia máxima que el generador entrega al sistema eléctrico.

$\eta_G$  :Eficiencia del generador

$\eta_{Tr}$  :Eficiencia de la transmisión mecánica entre la turbina y el generador

Otro parámetro fundamental para el diseño de la turbina es el número óptimo de revoluciones con que deberá operar la misma.

$$n = \frac{39.85 \times H^{1/2}}{D_e} \quad [rpm] \quad (ec2.73)$$

Donde:

$D_e$  :Diámetro exterior del rodete en  $m$ .

Cuando la transmisión entre la turbina y el generador es a través de un sistema de bandas o engranajes se debe asumir el diámetro del rodete y se aplica la ecuación 2.73.

### c) Diseño hidráulico

Los cálculos hidráulicos sirven para determinar las dimensiones de sus elementos principales, en función de las características de cada tipo de turbinas.

#### Diagrama de velocidades

Para determinar los perfiles de los alabes de la turbina es necesario conocer los diagramas de velocidades de cada uno de los puntos del rodete, para lo cual se debe determinar la velocidad de salida del agua en el inyector, mediante la aplicación de la ecuación de Bernoulli entre ella superficie del tanque de presión donde la velocidad es aproximadamente cero y a la salida del inyector.

$$\frac{P_o}{\gamma} + \frac{C_o^2}{2g} + z_o = \frac{P_i}{\gamma} + \frac{C_i^2}{2g} + z_i + \Delta H_t + \Delta H_i \quad (ec2.74)$$

Donde:

$c_o$  y  $c_i$  : Velocidades de una partícula de agua en la superficie del tanque de presión y en la salida del inyector, respectivamente.

$P_o$  y  $P_i$  : Presiones en la superficie del tanque de presión y en la salida del inyector, respectivamente, estas pueden ser iguales cuando la descarga de la turbina se la realiza sin tubo de succión.

$z_o$  y  $z_i$  : Niveles topográficos en la superficie del tanque de presión la posición del inyector, respectivamente, su diferencia es igual al salto bruto.

$\gamma$ : Peso específico del agua

$g$  : Aceleración de la gravedad

$AH_i$  : Pérdida de presión debido a la fricción del agua con las paredes de la tubería presión.

$\Delta H_i$  : Pérdida de presión debido a la fricción del agua con las paredes del inyector

Entonces la velocidad del agua a la salida del inyector es:

$$c_i = \sqrt{1 - \frac{\Delta H_i}{H}} \times \sqrt{2 \times g \times H} \quad [m/s] \quad (ec2.75)$$

Donde:

$H$  : Es el salto neto

El coeficiente de velocidad del inyector es:

$$K_c = \sqrt{1 - \frac{\Delta H_i}{H}} \quad (ec2.76)$$

La velocidad de salida del agua del inyector queda expresada como:

$$c_i = c_2 = K_c \times \sqrt{2 \times g \times H} \quad [m/s] \quad (ec2.77)$$

$K_c$  = Esta comprendido entre 0.97 y 0.98

La velocidad del agua a la salida del inyector es igual a la velocidad de ingreso del agua al rodete. Este chorro de agua tiene una orientación promedio en casos prácticos de  $16^\circ$ .

$$\alpha_2 = 16^\circ$$

En las turbinas de acción, la velocidad se expresa como:

$$u_2 = K_u \times c_2 \times \cos \alpha_2 \quad [m/s] \quad (ec2.78)$$

Donde:

$K_u$  : Es el coeficiente de velocidad tangencial, en las turbinas de acción es un valor aproximado de 0.5.

La velocidad relativa se expresa como:

$$w_2 = c_2 \times \sqrt{1 - K_u \times (2 - K_u) \cos^2 \alpha_2} \quad [m/s] \quad (ec2.79)$$

Con el ángulo  $\beta_2$  se concluye la construcción del diagrama de velocidades, mostrado en la figura 2.33, en la entrada del rodete.

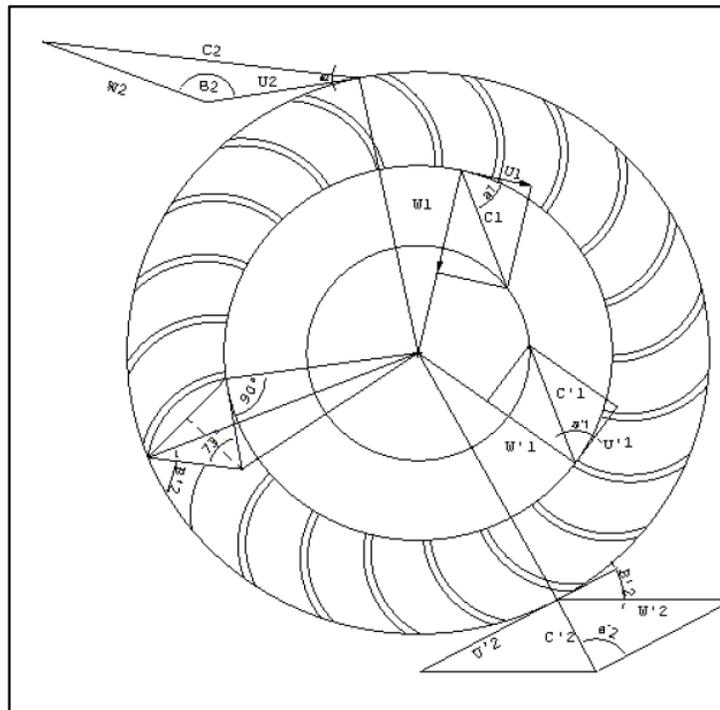
En el interior del rodete se cumple que los triángulos de velocidades son iguales debido a que:

$$\begin{aligned} u_1 &= u'_1 \\ c_1 &= c'_1 \\ \alpha_1 &= \alpha'_1 \\ \beta_1 &= \beta'_1 \end{aligned}$$

Por lo tanto se llega a la conclusión de que:

$$\beta_1 = \beta'_1 = 90^\circ$$

**Figura 2.33. Diagrama de velocidades en el rodete Michell Banki**



*Fuente: Soluciones prácticas IDTG*

Para la salida del agua del rodete, se forma el diagrama de velocidades en el que:

$$u'_2 = u_2 = K_u \times c_2 \times \cos \alpha_2 \quad [m/s] \quad (ec2.80)$$

$$\beta_2 = 180 - \beta'_2 \quad (ec2.81)$$

$$\beta'_2 = \arcsen \left[ \frac{\text{sen } \alpha_2}{(1 - K_u \times (2 - K_u) \cos^2 \alpha_2)^{1/2}} \right] \quad (ec2.82)$$

La velocidad relativa se determina mediante:

$$w'_2 = K_f \times w_2 \quad [m/s] \quad (ec2.83)$$

Donde:

$K_f$  : Es el coeficiente de pérdida de fricción del agua con los alabes del rodete, es aproximadamente igual a 0.98.

La velocidad absoluta del agua a la salida del rodete se expresa como:

$$c'_2 = c_2 \times \sqrt{\frac{K_f^2 \times (1 - K_u \times (2 - K_u) \times \cos^2 \alpha_2) + K_u \times \cos^2 \alpha_2 - 2 \times K_f \times \cos^2 \alpha_2 \times (1 - K_u) \times K_u}{K_f^2 + K_u \times \cos^2 \alpha_2 \times (K_u \times K_f^2 \times (2 - K_u) - K_f)}} \quad [m/s] \quad (ec2.84)$$

El ángulo de salida con respecto a la tangente del rodete se obtiene con la siguiente expresión:

$$\alpha'_2 = \arcsen \left[ \frac{K_f \times \text{sen } \beta'_2 \times \sqrt{1 - K_u \times (2 - K_u) \times \cos^2 \alpha_2}}{\sqrt{K_f^2 + K_u \times \cos^2 \alpha_2 \times (K_u \times K_f^2 \times (2 - K_u) - K_f)}} \right] \quad (ec2.85)$$

La eficiencia hidráulica de turbina Michell Banki se determina mediante la siguiente expresión:

$$\eta_{\max} = 0.771 - 0.384 \frac{D}{H} \quad (ec2.86)$$

## Geometría del Inyector

Existen formas variadas de la geometría del inyector para las turbinas Michell Banki. Para definir la geometría del inyector es necesario considerar una buena condición y aceleración del flujo de agua, así como también una adecuada orientación y regulación de este flujo hacia los alabes del rodete. Cuando se define una geometría de un inyector con alabe directriz, es necesario definir el perfil del mismo, teniendo un balance de pérdidas de presión en los flujos de agua en que se divide el caudal por efecto del alabe. De tal manera que al tener igualadas ambas perdidas, se obtenga la misma velocidad de salida en ambos conductos.

El análisis de la geometría de un inyector con alabe directriz, está basado en la metodología descrita en el párrafo anterior considerando un alabe cuya geometría aerodinámica reduzca el torque de accionamiento, para la regulación del agua. El perfil es función del diámetro del rodete y este no varía para diferentes saltos y caudales. La única dimensión que varía en función del salto y el caudal es el ancho del inyector, que se determina con la siguiente expresión:

$$B = \frac{Q}{P \times (\pi \times D_e - e \times Z) \times K_o \times K_c \times \sqrt{2 \times g \times H_n} \times \text{sen } \alpha_2} \quad [m] \quad (ec2.87)$$

Donde:

$Q$ : Caudal máximo que fluirá por la turbina,  $m^3/s$

$P$ : Factor de arco de admisión, que para este caso, toma un valor de 1.

$D_e$ : Diámetro exterior del rodete,  $m$

$e$ : Espesor del álabe del rodete,  $m$

$z$ : Número de álabes del rodete.

$K_o$ : Porcentaje de la circunferencia exterior del rodete por donde ingresa el agua  $\cong 33\%$

Una forma práctica para determinar el ancho del inyector cuya geometría se expresa como:

$$B = \frac{0.96 \times Q}{D_e \times \sqrt{H}} \quad [m] \quad (ec2.88)$$

### Geometría del Rodete

Se determina en base a los ángulos obtenidos de los diagramas de velocidades, así se tiene entonces; que la relación del diámetro interno  $D_i$ , con respecto al diámetro externo

$D_e$ , es:

$$\frac{D_i}{D_e} = \sqrt{\frac{(2 \times K_u \times \cos^2 \alpha_2 - 1) + \sqrt{1 - 4 \times \cos^2 \alpha_2 \times (1 - K_u)} \times K_u}{2 \times K_u^2 \times \cos^2 \alpha_2}} \quad (ec2.89)$$

Ahora, si consideramos  $\alpha_2 = 16^\circ$ , y  $K_u = 0.5$ , se obtiene el diámetro interno igual a (figura 2.33):

$$D_i = 0.66 \times D_e \quad (ec2.90)$$

El radio de curvatura  $r$ , de los álabes del rodete, se expresa también en función del diámetro del rodete y del ángulo del álabe  $\beta'_2$ , entonces:

$$r = \frac{D_e}{4 \times \cos \beta'_2} \left[ 1 - \left( \frac{D_i}{D_e} \right)^2 \right] \quad (ec2.91)$$

Sustituyendo los valores conocidos, se puede expresar mediante:

$$r = 0.163 \times D_e \quad (ec2.92)$$

El ángulo de curvatura de los álabes del rodete  $\phi$ , se determina mediante:

$$\phi = 2 \arctan \left[ \frac{\cos \beta'_2}{\frac{D_i}{D_e} + \sin \beta'_2} \right] \quad (ec2.93)$$

Si consideramos que  $\alpha_2 = 16^\circ$ , entonces  $\phi = 73^\circ$ .

El ancho del interno del rodete se obtiene de realizar el diseño del inyector. Una forma práctica para determinar el ancho del rodete es considerarlo como un 50% mayor que el ancho del inyector.

$$B_r = 1.5 \times B \quad [m] \quad (ec2.94)$$

Cuando se diseña la turbina es importante considerar que desde el punto de vista teórico existe una limitante en cuanto al arco de admisión:

$$\angle BOC = 2 \arctan \left| \frac{\sqrt{1 - K_u \times (2 - K_u) \times \cos^2 \alpha_2}}{\left| \frac{D_i}{D_e} \right| \times K_u \times \cos \alpha_2} \right| \quad (ec2.95)$$

El máximo porcentaje de arco de admisión se obtiene mediante:

$$K_o = \frac{\angle BOC}{360^\circ} \quad (ec2.96)$$

Para valores de  $\alpha_2 = 16^\circ$  y  $K_u = 0.5$  obtenemos un valor de  $K_o = 0.334$ .

El porcentaje de admisión para el inyector mostrado en este capítulo es de 0.30. Si consideramos que la trayectoria de una partícula de agua en el interior del rodete es rectilínea, podemos obtener el diámetro máximo del eje que atraviesa el rodete:

$$d = D_i \times \cos \left| \frac{\angle BOC}{2} \right| \quad (ec2.97)$$

La forma práctica de la ecuación anterior tenemos:

$$d = 0.328 \times D_e \quad (ec2.98)$$

### Geometría de la Carcasa

Para el diseño de la geometría de la carcasa se debe considerar el arco de la salida del flujo de agua en el rodete y su trayectoria. El arco del rodete se obtiene con la formula

$$\theta_t = \theta_o + \theta_1 + \theta_2 + \theta_{ad} \quad (ec2.99)$$

Donde:

$$\theta_o = K_o \times 360^\circ \quad (ec2.100)$$

$$\theta_1 = \frac{r \times \phi}{W_2} \times \frac{360}{60} \times n \quad (ec2.101)$$

$$\theta_2 = \frac{\theta_1}{K_f} \quad (ec2.102)$$

Sabiendo que:

$\phi$  : Radianes

La forma práctica de la relación se puede expresar como:

$$\theta_t = \theta_o + 163^\circ \quad (ec2.103)$$

#### **d) Diseño mecánico**

Este diseño tiene como función principal determinar las dimensiones de cada una de sus piezas, considerando sistemas adecuados de montaje, aspectos de hermeticidad y lubricación. Además para verificar si los materiales utilizados soportan a los esfuerzos que se presentan en la turbina.

#### **Diseño y cálculo del Inyector**

El cálculo mecánico de las paredes del inyector se realiza considerando a cada una de ellas como una placa empotrada en sus extremos y cargada uniformemente. También se asume un espesor adicional con el fin de prever su desgaste por la abrasión del agua. En los Anexos IV y V se puede observar las propiedades de los materiales utilizados en la construcción de las turbinas.

El diámetro del eje del álabe directriz se calcula en base al torque máximo  $T$  requerido para la regulación:

$$T = 31 \times D_e \times Q \times H_n \quad [kg \cdot m] \quad (ec2.104)$$

El diámetro del eje se determina mediante la siguiente expresión:

$$di^3 = \frac{16 \times T}{\pi \times S_d} \quad (ec2.105)$$

Donde:

$S_d$  :Esfuerzo de diseño del material utilizado en el alabe directriz.

Como es conocido que el esfuerzo de diseño de un eje con un canal chavetero posee un valor igual a:

$$S_d = 0.2 \times S_y \quad (ec2.106)$$

Donde:

$S_y$  :Es el esfuerzo a la fluencia del material del eje en  $kg/m^2$  .

Por limitaciones de espacio, el diámetro permitido en el eje del álabe directriz para cada diámetro de rodete se muestra en la tabla 2.9:

<b>Tabla 2.9. Diámetro del eje álabe directriz</b>	
$D_e$ (mm)	$di$ (mm)
200	26
300	38
400	50
500	63
600	76

*Fuente: Manual de Diseño Estandarización y Fabricación de Equipos para pequeñas centrales Hidroeléctricas, Volumen I*

### **Diseño y Calculo del Rodete**

Existen diferentes maneras de fijar los alabes al disco, una de las opciones es fresar en el disco el perfil del alabe, para luego montarlo y efectuar una soldadura exterior, para tener una buen acabado.

El espesor de los alabes generalmente se asume, que luego se deberá hacer un análisis de los esfuerzos, considerándolo como una viga empotrada en los extremos, por efecto de la soldadura.

Tomando el caso más desfavorable cuando el rodete es frenado y la turbina se encuentra con apertura, la fuerza que actúa en cada uno de ellos será:

$$F = \frac{Q \times C_2 \times \cos \theta'}{g_0 \times K_0 \times Z} \quad [kg] \quad (ec2.107)$$

Donde:

$F$  : Componente Y, de la fuerza del agua sobre cada álabe figura 2.34.

$Q$  : Caudal máximo que fluye por el inyector,  $m^3 / s$

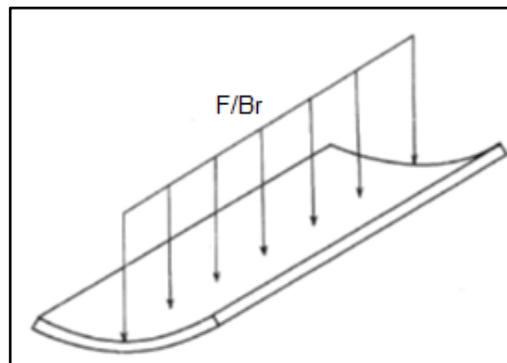
$c_2$  : Velocidad del agua a la salida del inyector,  $m / s$

$z$  : Número de álabes.

$$g_0 = 9.81 \frac{kgm \cdot m}{kgf \cdot s^2}$$

$K_0$  : Factor de porcentaje de admisión

**Figura 2.34. Fuerzas actuantes sobre el alabe del rodete**



*Fuente: Manual de Diseño Estandarización y Fabricación de Equipos para pequeñas centrales Hidroeléctricas, Volumen I*

Para fines prácticos la fuerza se puede expresar como (figura 2.34):

$$F = 46.5 \times Q \times \sqrt{H} \quad (ec2.108)$$

$$\theta' = \alpha_2 + \theta_o \quad (ec2.109)$$

$$\theta_o = \arcsen \frac{r_e^2 + r_3^2 + r_i^2}{2 \times r_e \times 2 \times r_3} \quad (ec2.110)$$

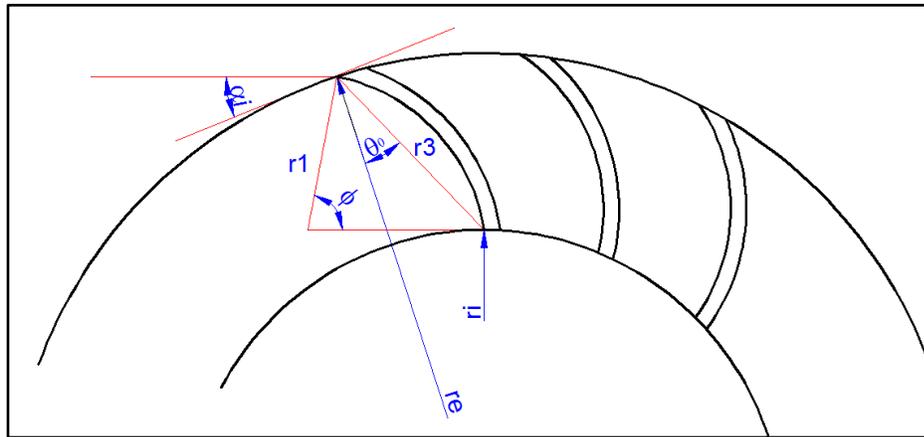
Donde:

$$r_3 = 2 \times r \times \text{sen} \left( \frac{\phi}{2} \right) \quad (ec2.111)$$

$$r_e = \frac{D_e}{2} \quad (ec2.112)$$

$$r_i = \frac{D_i}{2} \quad (ec2.113)$$

**Figura 2.35. Ángulos en el Alabe**



*Fuente: Autores*

El esfuerzo máximo al que estará sometido el alabe del rodete por acción de la fuerza del agua a lo largo del mismo, se obtiene mediante:

$$\sigma_{\max} = \frac{F \times B_r \times c}{12 \times I_{g_x}} \quad [kg/m^2] \quad (ec2.114)$$

El radio de giro del álabe se obtiene mediante:

$$c = r + e - (1000 \times C_g) \quad [mm] \quad (ec2.115)$$

Siendo,  $C_g$ , es el centro de gravedad del rodete que se determina con la ecuación:

$$C_g = \frac{120 \times |(r+e)^3 - r^3| \times (\cos\theta_1 - \cos\theta_2)}{\phi \times \pi \times |(r+e)^2 - r^2|} \quad (ec2.116)$$

Donde:

$r$ : Radio de curvatura de los álabes,  $m$

$$\theta_1 = \frac{180 - \phi}{2}$$

$$\theta_2 = \phi + \theta_1$$

$\phi$ : Ángulo de curvatura del álabe.

El momento de inercia  $I_{gx}$  del álabe se determina por:

$$I_{gx} = [(r+e)^4 + r^4] \times \left| \phi - \frac{\text{sen}(2\theta_2) - \text{sen}(2\theta_1)}{2} \right| \quad [mm^4] \quad (ec2.117)$$

Donde:

$\phi$ : *radianes*

En el análisis de los esfuerzos se debe cumplir que el esfuerzo máximo resultante en el alabe debe poseer un valor inferior al 66% del esfuerzo de fluencia, del material seleccionado.

$$\sigma_{\max} < 0.66S_y$$

Para casos prácticos los valores de  $c$ ,  $I_{gx}$  y  $C_g$  se pueden obtener mediante la Anexo VI donde se calculan estos para diferentes diámetros y espesores de alabes. El cubo del rodete se diseña en base al diámetro del eje:

$$D_{cubo} = 2 \times d \quad (ec2.118)$$

Los canales chaveteros, se deben dimensionar considerando chavetas estándar, cuyo ancho sea aproximadamente la cuarta parte del diámetro del eje, y su longitud tenga un valor de 1.2 a 1.3 veces el diámetro del eje.

## Cálculo y Diseño del Eje Principal

El diámetro mínimo del eje se realiza según el cálculo mecánico ASME, será:

$$d^3 = \frac{16}{\pi \times S_d} \sqrt{(K_m \times M_{\max})^2 + (K_t \times T_{\max})^2} \quad [m] \quad (ec2.119)$$

Donde:

$K_m = 1.5$ : Factor del momento flector para carga estable.

$K_t = 1$ : Factor del momento torsor para carga estable.

$S_d$ : Esfuerzo de diseño, que se estima como un 20% del valor de esfuerzo de fluencia cuando se utiliza canal chavetero en  $kg/m^2$ .

El momento flector máximo que se presenta en el eje es:

$$M_{\max} = \sqrt{M_x^2 + M_y^2} \quad [kg \cdot m] \quad (ec2.120)$$

$$M_x = F_r \times \frac{a}{2} \quad (ec2.121)$$

$$M_y = W_r \times \frac{a}{2} \quad (ec2.122)$$

La fuerza tangencial del rodete es:

$$F_r = \frac{1948 \times P_T}{n \times D_e} \quad [kg] \quad (ec2.123)$$

El momento torsor máximo que se presenta en el eje se obtiene con la siguiente expresión:

$$T = \frac{974 \times P_T}{n} \quad [kg \cdot m] \quad (ec2.124)$$

Para definir el escalonamiento de los diámetros en el eje se debe considerar las dimensiones de los rodamientos, las de los retenes estándares que se encuentran en el mercado, el diámetro máximo permitido esta dado por:

$$d = 0.328 \times D_e \quad (ec2.125)$$

Determinado el diámetro del eje es necesario realizar un análisis por medio de la velocidad crítica del eje, la cual debe ser superior a la velocidad de embalamiento, que tiene un valor de 1.8 veces a la velocidad de la turbina.

La primera velocidad crítica de la turbina se determina mediante:

$$n_{crit} = \frac{29.88}{y^{1/2}} \quad [rpm] \quad (ec2.126)$$

La flecha resultante producida en el eje por la acción del peso y la fuerza del rodete se según la figura 2.36 es igual a:

$$y = \frac{W \times a^2}{6 \times E \times I} (3L_{eje} - 4a) \quad [m] \quad (ec2.127)$$

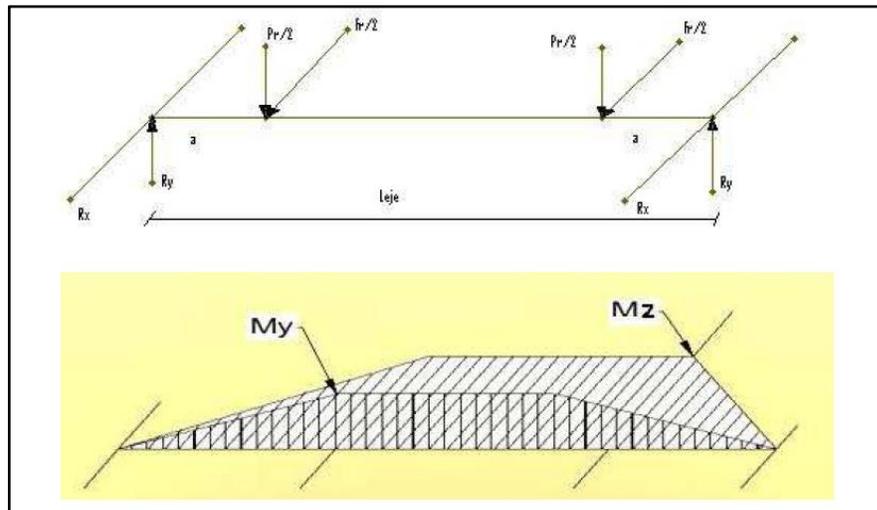
Donde:

$$E = 2.1 \times 10^{10} \text{ kg} / \text{m}^2$$

$$W = \sqrt{W_r^2 + F_r^2} \quad [kg] \quad (ec2.128)$$

$$I = \frac{\pi \times d^4}{64} \quad [m^4] \quad (ec2.129)$$

**Figura 2.36. Diagrama de fuerzas y Momentos en el Eje de la Turbina.**



Fuente: *Manual de Diseño Estandarización y Fabricación de Equipos para pequeñas centrales Hidroeléctricas, Volumen I*

Se recomienda que la velocidad crítica sea un 40%, superior a la velocidad de embalamiento de la turbina.

## Diseño de Soporte de Rodamientos

Para el diseño del soporte de rodamiento se requiere realizar previamente una selección del rodamiento. Esta selección se realiza determinando la capacidad de base dinámica requerida:

$$C = (X \times F_R + Y \times F_a) \left| \frac{60 \times n \times L_h}{10^6} \right|^p \quad [kg] \quad (ec2.130)$$

Donde:

$X$  : Es el coeficiente radial del rodamiento considerado como 1.

$Y$  : Es el coeficiente axial del rodamiento que para el caso de la turbina no se utiliza por no existir carga axial  $F_a$

$n$  : Número de revoluciones de la turbina

$L_h$  : Duración nominal en horas de funcionamiento.

$p$  : Es 1/3 para rodamientos de bolas y 3/10 para rodamientos de rodillos

$F_R$  : Es la carga axial sobre el rodamiento del diagrama de Fuerzas y Momentos de la figura 2.37.

$$F_R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} \quad [kg] \quad (ec2.131)$$

Con la capacidad de base dinámica, el diámetro del eje obtenido y el número máximo de revoluciones a los que girara la turbina se realiza la selección de rodamiento en los catálogos comerciales.

## Diseño del Mecanismo de Regulación

En caso en que el inyector se diseña con un compartimiento el mecanismo de regulación consiste solo en una palanca instalada en el eje directriz que se acopla directamente al regulador de velocidad

### 2.4.2 Estandarización y Selección

Una vez conocido el diseño de la turbina Michell Banki se puede establecer criterios para definir una serie de estandarización de esto tipo de turbinas, para seleccionarla. Hoy

en día muchos fabricantes han optado por definir series estandarizadas, reduciendo así costos de fabricación y de ingeniería. Permitiendo al ingeniero proyectista realizar una adecuada selección de la turbina.

#### 2.4.2.1 Estandarización

Consiste en diseñar un número adecuado de turbinas, de tal modo que se complementen en su campo de aplicación y que es su conjunto cubran el rango de aplicación de este tipo de turbina. Para establecer serie de turbinas estandarizadas, se puede utilizar la fórmula del número específico de revoluciones en función del caudal:

$$n_q = n \frac{Q^{1/2}}{H^{3/4}} \quad [rpm] \quad (ec2.132)$$

En donde remplazamos el valor optimo del número de revoluciones de la turbina:

$$n = \frac{39.85 \times \sqrt{H}}{D_e} \quad [rpm] \quad (ec2.133)$$

Con estas expresiones obtenemos el número específico de revoluciones expresado en función del diámetro del rodete:

$$n_q = \frac{39.85 \times Q^{1/2}}{D_e \times H^{1/4}} \quad [rpm] \quad (ec2.134)$$

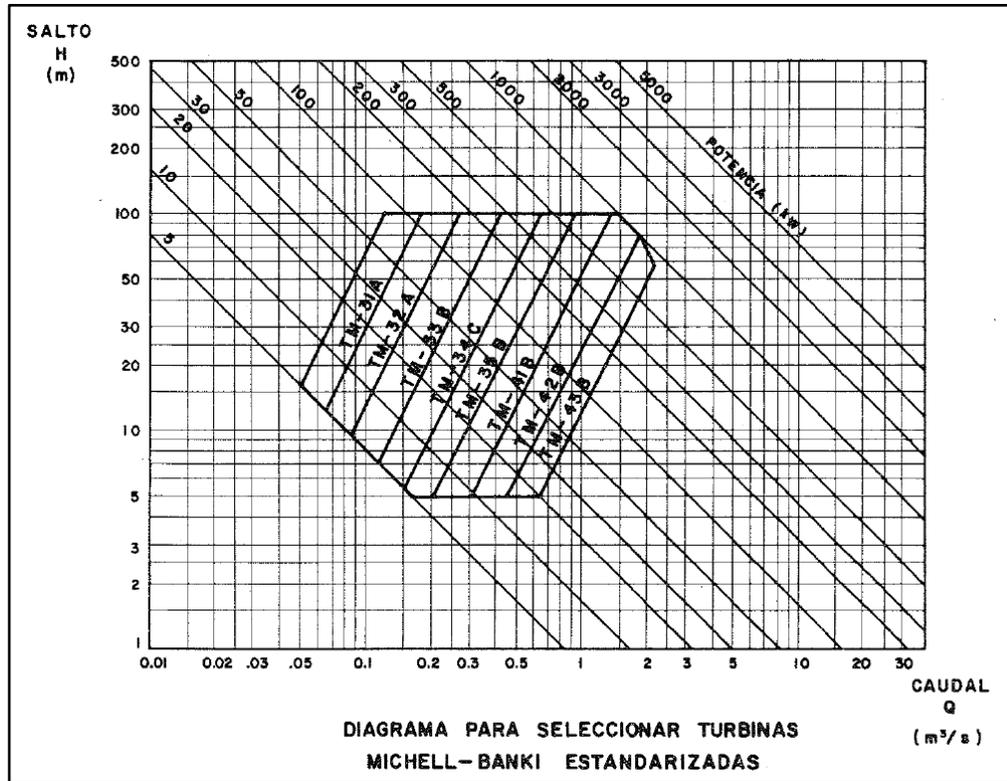
Cuando se diseña una turbina Michell Banki para una determinada condición de salto y caudal, al asumir el diámetro del rodete, estamos definiendo un número específico de revoluciones que corresponden a las dimensiones de la turbina. Desde el punto de vista hidráulico, la turbina podría operar en todas las combinaciones de salto y caudal que cumplan con la siguiente expresión:

$$\frac{Q}{\sqrt{H}} = \left| \frac{D_e \times n_q}{K} \right|^2 = \text{constante}$$

De esta forma se puede diseñar otras turbinas que se complementen en su aplicación y con ello se conseguiría el rango de aplicación de la turbina Michel Banki. En la figura

2.37 se puede observar que cada área corresponde al campo de aplicación de una turbina estándar.

**Figura 2.37. Diagrama para seleccionar Turbinas Michell Banki Estandarizadas**



Fuente: *Manual de Diseño Estandarización y Fabricación de Equipos para pequeñas centrales Hidroeléctricas, Volumen I*

### 2.4.2.2 Selección

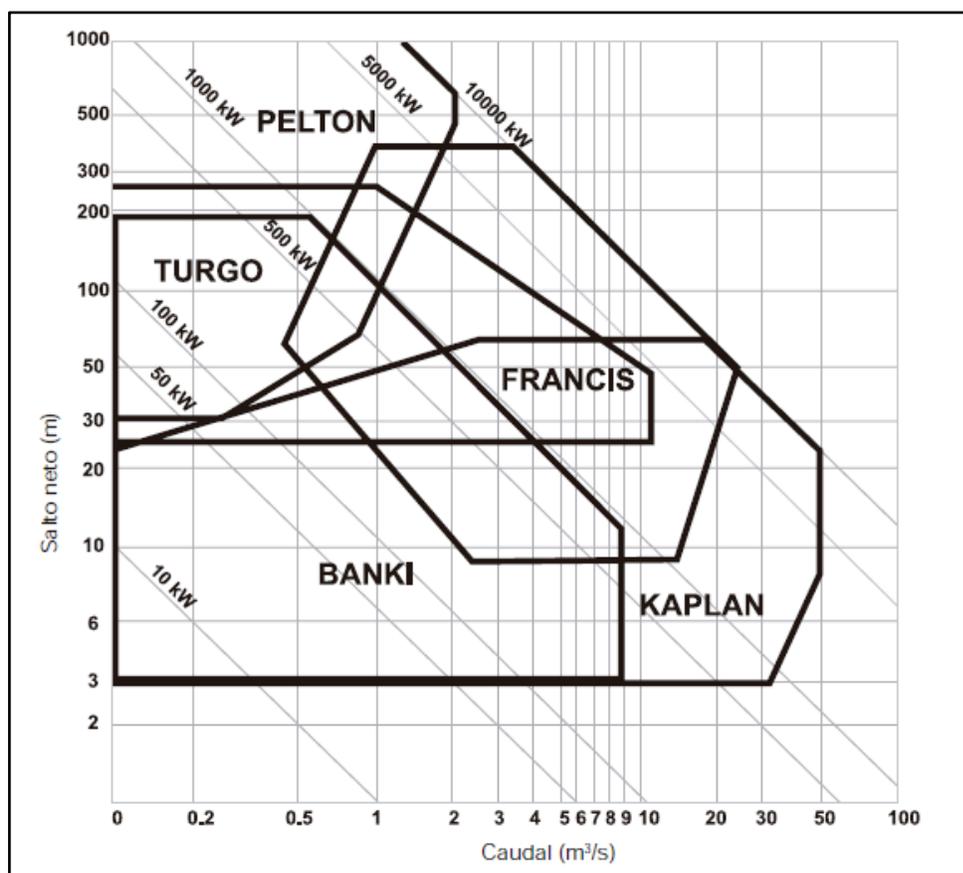
Cuando se disponen de catálogos similares al indicado en la figura 2.38, la selección de la turbina Michell Banki se realiza intersecando los datos de salto y caudal del proyecto.

#### Selección rápida de la Turbina

Se puede realizar una selección rápida de la turbina para un MCH, utilizando el diagrama de la figura 2.38 en la que aparecen las diversas turbinas que se usan en la actualidad ubicadas por zonas de aplicación referidas al salto neto, caudal, potencia y una eficiencia promedio, en base a la siguiente ecuación:

$$H_n = \frac{P}{\rho \times g \times \eta} \times \frac{1}{Q} \quad (ec : 2.135)$$

**Figura 2.38. Diagrama de selección de Turbinas Hidráulicas**



Fuente: "Manual para la evaluación de la demanda, recursos hídricos, diseño e instalación de Microcentrales Hidroeléctricas"-Soluciones Prácticas.

En el caso de no tener información directa de las eficiencias de la turbina o del generador, pueden usarse los valores de la tabla 2.10 para las eficiencias del grupo de generación y de la tabla 2.11 para las eficiencias de la turbina.

Tabla 2.10. Eficiencia del grupo de generación ( $\eta_{GR}$ )				
Potencia(kW)	Tipo de Turbina			
	PELTON	MICHELL-BANKI	FRANCIS	AXIAL
Menor a 50	58-65%	54-62%	59-65%	58-66%
51-500	65-69	62-65	66-70	66-70
501-5000	69-73	65	70-74	70-74

Fuente: "Manual de Mini y Micro-Centrales Hidráulicas" - Federico Coz.

<b>Tabla 2.11. Características principales de turbinas hidráulicas</b>							
	Turbina	Inventor	Ns (rpm, HP,m) rpm	$Q m^3 / s$	H m	P kW	$\eta_{max}$ %
A C C I O N	PELTON	Lester Pelton	1Ch:30 2Ch: 30-50 4Ch: 30-50 6Ch: 50-70	0.05 - 50	30-1800	2- 300000	91
	TURGO	Eric Crewdson	60-260	0.025-10	15-300	5-8000	85
	MICHELL-BANKI	A.G. Michell D. Banki	40-160	0.025-5	1-50 (200)	1-750	82
R E A C C I Ó N	Bomba Roto dinámica	Dionisio Papin Francia (1689)	30-170	0.05-0.25	10-250	5-500	80
	FRANCIS	James Francis	L: 60-150 N:150-250 R:250-400	1-500	2-750	2- 750000	92
	DERIAZ	P. Deriaz	60-400	500	30-130	100,00	92
	KAPLAN y de Hélice	V. Kaplan	300-800	1000	5-80	2- 200000	93
	AXIALES: -Tubular -Bulbo -Generador Periférico	Kuhne-1930 Hugenin-1933 Harza-1919	300-800	600	5-30	100,000	93

Fuente: "Manual de Mini y Micro-Centrales Hidráulicas" - Federico Coz.

El límite superior de estos diagramas en cuanto a potencia dependerá de la definición nacional o regional, de los rangos establecidos y de lo que se denomina una MCH, como se muestra en la tabla 2.12.

<b>Tabla 2.12. Clasificación de MCH según la potencia</b>				
Región	Institución	Microcentral	Minicentral	Pequeña Central
Mundial	ONUDI	Menor a 100kW	101-2000kW	2000-10000kW
Latinoamérica	OLADE	Menor a 50kW	51-500kW	500-5000kW

Fuente: "Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas" - Federico Coz.

Cuando no se dispone de catálogos que incluyen gráficos. Se recomienda solicitar la turbina al proveedor de equipos, dándole los siguientes datos:

- a. Potencia al reno de la turbina
- b. Salto neto de la central
- c. Número de unidades requeridas
- d. Sistema de regulación de velocidad requerido
- e. Características físicas y químicas del agua

A si mismo se solicitara a los fabricantes, que en la cotización se incluyan los siguientes datos técnicos:

- Potencia al freno de la turbina
- Salto neto que aprovecha
- Velocidad optima de giro
- Eficiencia
- Curvas de funcionamiento a carga parcial
- Peso y dimensiones generales
- Materiales de sus componentes
- Facilidades y disponibilidad de repuestos
- Instrumentos requeridos para su operación
- Tipo de herramientas requeridas para su mantenimiento

Finalmente la selección definitiva de la turbina resultaría de una evaluación técnica-económica que tomara en cuenta los siguientes criterios:

- Costos de inversión y facilidades de pago
- Plazo de entrega
- Costos de los repuestos
- Eficiencia
- Posibilidad de obtener localmente los repuestos
- Antecedentes de vida útil de otras turbinas producidas por el fabricante
- Infraestructura requerida para su mantenimiento

### **2.4.3 Sistema de control de la turbina hidráulica**

#### **2.4.3.1 Regulación de velocidad**

Su principal función es controlar la velocidad de la turbina para que el generador suministre energía eléctrica con una frecuencia constante, debido a que es muy importante mantener la frecuencia constante dentro del valor establecido que en nuestro país es de 60 Hz. Debido que en las MCH existirá variación de demanda es necesario instalar algún sistema de compensación que mantenga constante la velocidad de la turbina.

Existen básicamente dos maneras de controlar la velocidad del grupo generador:

- a) Por regulación de caudal de agua en la turbina.
- b) Por regulación de carga.

#### **a) Regulación de velocidad por medio del caudal de agua en la turbina**

Cuando existe una demanda variable, para mantener la velocidad del grupo generador constante es necesario que en todo momento la potencia disponible al ingreso sea igual a la potencia eléctrica a la salida de este, más las pérdidas internas del grupo.

$$Pot.ingreso = Pot.salida + pérdidas$$

Este equilibrio se logra regulando la cantidad de agua que ingresa a la turbina, de tal manera que si se produjera un incremento en la demanda, se abrirá una banda que permite el mayor ingreso de agua a la turbina ocasionando que la potencia generada se iguale a la demanda. Existen dos maneras de realizar esta regulación: manualmente o automáticamente.

#### **Regulación manual**

Son utilizados en MCH menores a 50 KW, debido a su costo reducido. Además donde no existen grandes variaciones en la demanda de la energía. Una desventaja de este sistema es que debe existir un operario en la casa de maquinas. La variación del caudal se realiza por medio de la válvula de aguja o de alabes directrices, según el tipo de turbina empleada.

### **Regulación automática**

Este tipo de sistemas es utilizado en centrales de más de 100 kW de potencia donde se prevea que existan grandes variaciones en la demanda de energía eléctrica, debido a su alto costo son muy poco empleados en MCH. Es sistema de regulación utiliza los llamados reguladores de velocidad oleomecánicos y sus variaciones como los taquimétricos electromecánicos y electrohidráulicos, entre otros.

#### **c) Regulación de la velocidad por regulación de carga**

En este tipo de regulación el grupo generador entrega una potencia constante; esto es, no hay regulación del caudal de agua. Se debe tener mucho cuidado que el grupo no genere una potencia mayor o igual a la máxima potencia esperada por la demanda. El exceso de potencia generada se disipa en forma de calor a través de resistencia sumergida en agua o al aire.

### **Regulación manual**

Es poco utilizada. Se requiere básicamente tener un banco de resistencias (hornillas eléctricas, focos incandescentes, baterías, etcétera), que el operador ira conectando o desconectando según aumente o disminuya la frecuencia en la red eléctrica. Una ventaja de este sistema es que el operador puede realizar esta regulación en su casa y no tiene que estar permanentemente en la casa de fuerza. Este sistema es especialmente para Microcentrales muy pequeñas, que atienden a un número reducido de usuarios.

### **Regulación automática de carga**

Este sistema ha encontrado su campo de aplicación principalmente en el rango de las Microcentrales hidroeléctricas, es decir, para potencias menores de 100 kW. Este sistema regula a través de unas válvulas electrónicas conocidas como transistores, deriva la energía no consumida por la demanda a un sistema de disipación de energía.

### **Características técnicas de los reguladores electrónicos de carga**

Los fabricantes de reguladores electrónicos por lo general proporcionan las siguientes especificaciones de sus reguladores electrónicos:

- a) Respuesta a la aplicación o retiro del 100% de la carga: Desviación transitoria de la frecuencia: menos de 0.25 s.
- b) Estatismo: de 0% a 3% (regulación digital).
- c) Temperatura máxima de operación: 55°C.
- d) Tipo de alternador a utilizar: cualquiera que trabaje con voltajes o frecuencias nominales entre 100-500 voltios y entre 45 y 65 Hz.
- e) Tipo de demanda: indiferente (capacitiva, inductiva o resistiva).
- f) Tipo de carga de lastre a utilizar: resistiva, de 10% a 20% mayor que la máxima demanda esperada.
- g) Factor de potencia de la demanda: mayor de 0.7.

### **Sistema de disipación de energía**

Los sistemas de disipación de energía más usados son:

- Resistencias calefactoras de aire: debe ponerse cuidado en que el ambiente donde se va a instalar las resistencias debe ser un espacio amplio donde exista libre circulación de aire.
- Resistencias sumergidas en agua: debe acondicionarse un pequeño tanque donde se instalaran las resistencias. Debe ponerse atención en que en todo momento las resistencias estén sumergidas en agua, y que además exista agua en permanente circulación, lo que se puede lograr sacando una derivación de la tubería de presión.

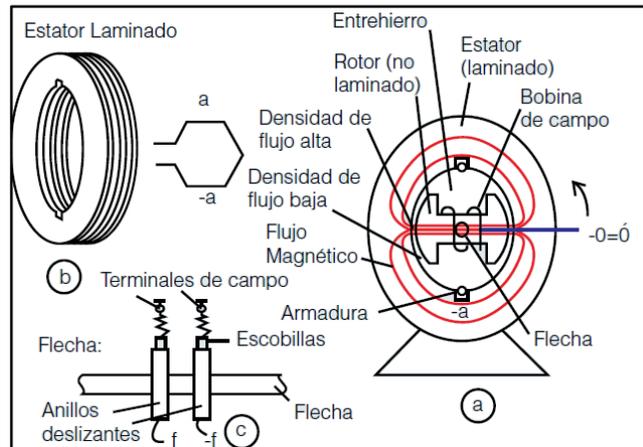
## **2.5 GENERADORES ELÉCTRICOS EN MCH**

Los generadores eléctricos para estas aplicaciones son máquinas eléctricas rotativas que se acoplan directa o indirectamente a los rodets de las turbinas y así, conjuntamente, producen energía eléctrica o electricidad.

### **2.5.1 Generador síncrono**

El generador síncrono es la máquina de uso prioritario en las unidades de generación. Con el tiempo ha tenido una tremenda evolución en su análisis, magnitud de potencia, y métodos de enfriamiento; pero manteniendo su forma básica (figura 2.39).

**Figura 2.39. Esquema en partes del Generador Síncrono**



Fuente: Manual Electrosector, Adrián Criollo

### 2.5.1.1 Velocidad síncrona

Es la velocidad de giro de la máquina en rpm, que permanece invariable y origina en la corriente alterna la frecuencia síncrona normalizada. La velocidad rotativa es dada por la máquina, en este caso la turbina hidráulica, (Tabla 2.13).

Tabla 2.13. Velocidades síncronas		
Frecuencia (Hz)	Polos	Velocidad síncrona (rpm)
50	2	3000
	4	1500
	6	1000
	8	750
	10	600
	12	500
60	2	3600
	4	1800
	6	1200
	8	900
	10	720
	12	600

Fuente: "Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas" - Federico Coz.

- a) Frecuencias síncronas normalizadas: 50 Hz y 60 Hz.
- b) Velocidades síncronas deducibles de la frecuencia  $f$  y el número de polos  $p$  de la máquina.

$$n_s = \frac{120 \times f}{p} \quad [rpm] \quad (ec : 2.136)$$

### 2.5.1.2 Generador síncrono-principio de operación

El generador síncrono tiene el bobinado de campo excitado por corriente continua y la tensión desarrollada en la armadura es alterna, de ahí que también se denomina **alternador**.

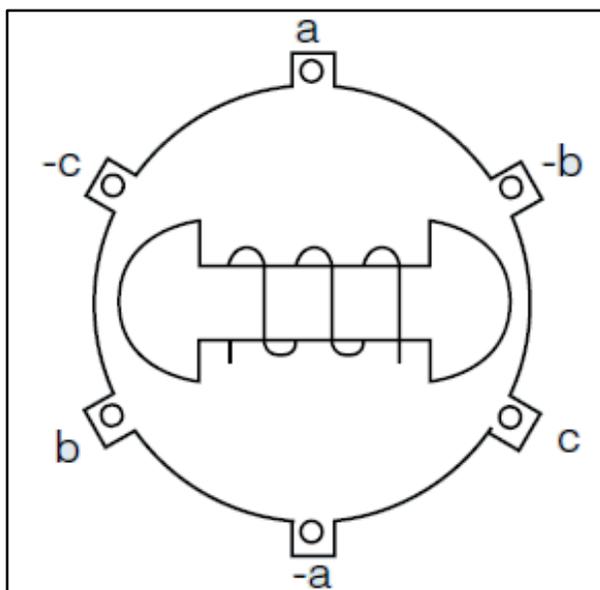
El alternador **trifásico** tiene tres fases distanciadas  $120^\circ$  entre sí. La forma de interconectar las fases da lugar a dos principales tipos de conexión:

- Conexión estrella, y
- Conexión triángulo.

El sistema trifásico es el más difundido por lo siguiente:

- Es el método más simple y económico de producir energía eléctrica; su transporte es más liviano (alternador 75% de peso y conductor 87% de peso del equivalente monofásico).
- Es el método más simple y económico de consumo de energía (5% de pérdidas en la conducción, dispositivos por lo menos 2% más eficientes que el monofásico equivalente).
- Motores eléctricos más simples (no usan condensadores para el arranque), menos pesados, más eficientes que el monofásico equivalente, y con amplia difusión comercial.
- En la figura 2.40 se muestra el esquema de un generador trifásico, en la que se puede observar que cada fase debe estar separada por  $120^\circ$ . La expresión de voltaje para “a” y “-a” es la misma a igual que para “b-b” y “c-c”.

**Figura 2.40. Esquema de Generador Trifásico**



*Fuente: Manual Electrosector*

### **2.5.2 Regulación de tensión**

En sistemas autónomos como las MCH que no se interconectan a otra red de energía eléctrica, los alternadores atienden carga doméstica, iluminación pública y energía industrial. Para un trabajo adecuado es necesario el control de la tensión de salida que se logra manteniendo la regulación de tensión en estrechos valores.

La regulación de tensión es la relación porcentual entre la tensión de vacío (sin carga)  $V_o$  menos la tensión con carga  $V$  referida a la tensión de vacío.

$$V\% = \frac{(V_o - V)}{V_o} \times 100 \quad (ec : 2.137)$$

Por frecuencia de aplicación describiremos los siguientes tipos de reguladores.

#### **2.5.2.1 Regulador automático de tensión (AVR) electrónico.**

Su misión es mantener el nivel de tensión constante a cualquier condición de carga dentro del valor nominal del alternador aun con variaciones de velocidad (5%). Toma como señal la tensión de salida del alternador, la compara y emite automáticamente

hacia el campo de la excitatriz la corriente continua necesaria para mantener la tensión en el nivel de calibración.

Dividiendo un AVR en circuitos operativos tenemos:

- a) **Circuito sensor y comparador.** Toma la señal, compara con una frecuencia pre calibrada y detecta el error.
- b) **Circuito amplificador del error y de control de disparo.** Detectado el error, es traducido y retenido por un tiempo, luego del cual se emite la señal que dispara el tiristor (rectificador de silicio cuya conducción de corriente es controlable).
- c) **Circuito de control de potencia.** Formado por diodos de silicio y tiristores. Toma la potencia del mismo alternador; según el error y la señal del disparo rectifica la corriente que se aplica al campo de excitatriz para corregir las variaciones de tensión.
- d) **Circuito de estabilidad.** Es un circuito de realimentación de señal para detectar si la corrección de excitación es la apropiada. Es calibrable y depende de las características del conjunto AVR y Alternador. De este circuito depende la velocidad de respuesta del equipo ante cambios bruscos de carga.
- e) **Circuito de protección por baja velocidad motriz.** El AVR básico solo censa tensión. Consecuentemente, para evitar sobrecitación por caída en la velocidad de giro; estos dispositivos incluyen un circuito que censa la frecuencia y, ante una disminución de la misma por debajo de un valor calibrado, dejan pasar menos corriente de excitación de manera que la tensión de salida disminuye proporcionalmente a la caída de la velocidad. Este circuito no actúa sobre el regulador de velocidad de la turbina.

Este sistema de excitación fue construido especialmente para los generadores sin escobillas por la reducida potencia de excitación que demandan las excitatrices, pero luego se ha extendido su aplicación a los alternadores de mayor potencia constituyendo los llamados excitadores estáticos. Los niveles de regulación de tensión se encuentran en valores usuales de  $\pm 1.5\%$  llegando hasta  $\pm 0.25\%$ .

### 2.5.2.2 Calibración

- a) **Tensión.** Todo AVR dispone de un potenciómetro para calibrar la tensión desde la misma unidad. Puede existir un segundo potenciómetro que se coloca en el panel de control del equipo generador. El calibrado de este último es posterior al primero y, para realizarlo, se gira el cursor del potenciómetro en sentido horario si se quiere aumentar la tensión de salida. El calibrado se hace con el alternador girando a velocidad nominal y sin carga; el valor no debe exceder del 5% del nivel del valor nominal, salvo indicación del fabricante.
- b) **Estabilidad.** En la unidad hay otro potenciómetro que sirve para calibrar la estabilidad; en sentido horario la respuesta del sistema es más lenta. Sin embargo, se tiene que girar en ambos sentidos hasta conseguir que la tensión de salida este sin oscilar. El calibrado se realiza a velocidad nominal y con carga, mejor aún si es la total.
- c) **Protección por baja velocidad motriz.** Los métodos difieren según el fabricante del AVR y es necesario guiarse por el manual respectivo.

### 2.5.3 Criterios de selección

El alternador síncrono, desde hace mucho, es el más importante dispositivo de conversión de potencia electromecánica y es pieza clave en la producción de electricidad. Conocidas las características de operación describiremos algunas consideraciones para el uso en MCH.

Cargas con factor de potencia menor de 0.8 en atraso. El  $\cos\phi = 0.8$  es un valor convencional de fabricación y corresponde al promedio de la carga mixta industrial y doméstica. Si el  $\cos\phi = 0.6$  dimensionar el alternador a 110% los  $kVA$  de la carga. Si es 0.7 el dimensionado será a 105% los  $kVA$ . Con cargas parciales menores a 80% de la potencia nominal del generador, éste puede llevar cargas bajo factor de potencia.

Los generadores con AVR electrónico están preparados para trabajar en paralelo con otra máquina con excitación similar de igual o diferente potencia. Es necesario solicitar, para cada una, el llamado equipo de cuadratura, con el fin de hacer el reparto automático

de la carga reactiva. Si el AVR es compuesto, la operación en paralelo sin dispositivos adicionales especiales, se limita a maquinas iguales o de la misma familia, de manera que tengan excitación de igual valor.

**Desequilibrio de corriente de carga.** Los alternadores normales permiten desbalances de la corriente de carga de 25% sin superar la corriente nominal, es decir:

Caso a: 75%, 100%, 75%

Caso b: 100%, 75%, 100%

A cargas parciales, los desbalances pueden ser mayores, pero sin superar el 40% para evitar desequilibrio de tensiones y hasta sobretensiones. Los alternadores se preparan para arreglos de dos o más tensiones de generación según la conexión elegida. Por ejemplo: estrella paralelo 220V, estrella serie 440V, etc.

#### **2.5.4 Operación en paralelo de generadores síncronos**

La finalidad de conectar generadores en paralelo es de suministrar mayor potencia a un sistema o cuando se requiera una mayor demanda de energía. Para operar en paralelo los generadores deben cumplir las siguientes condiciones:

- Los voltajes de línea de los generadores en paralelo deben de ser iguales.
- Deben de tener la misma secuencia de fase.
- Los ángulos de fases de los generadores deben de ser iguales.
- La frecuencia de los generadores debe de ser iguales.

##### **2.5.4.1 Procedimiento general para conectar generador en paralelo**

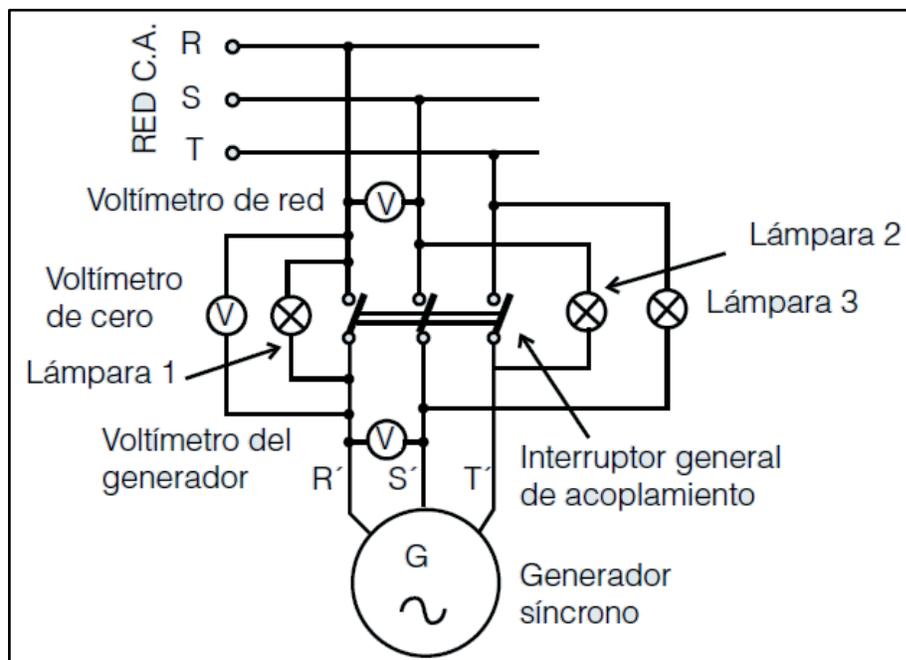
En primer lugar se debe ajustar la corriente de campo del generador en aproximación hasta que su voltaje en los terminales sea igual al voltaje del sistema de operación esto se logra con la ayuda de voltímetros.

Segundo, la secuencia de fase del generador se debe comparar con la secuencia de fase del sistema en operación, esto se puede lograr conectando un pequeño motor de inducción a los terminales de cada uno de los generadores. Si el motor gira en la misma

dirección en ambas ocasiones, entonces, la secuencia de fases es la misma en ambos generadores

Otro método muy utilizado para comparar es el de las tres lámparas incandescentes. En la figura 2.41 se puede observar un circuito de este tipo. Este proceso consiste en que cuando arranca el generador las tres lámparas deberán encender y apagar al mismo tiempo. Esto indica que existe la misma secuencia de fase, pero si prenden y apagan muy rápido es debido a que tiene diferentes frecuencias, lo cual se arregla subiendo la velocidad de la turbina. Ahora, si prenden y apagan en desorden esto indica que no tienen la misma frecuencia de fases, lo cual se hace intercambiando la secuencia de fases del alternador hacia la red.

**Figura 2.41. Esquema de Frecuencia de Fases**

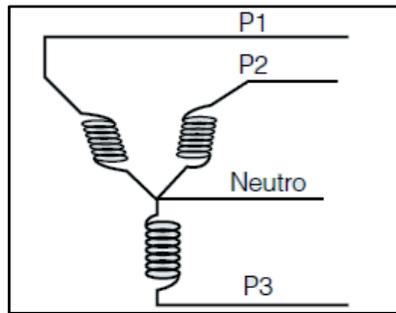


*Fuente: Manual Electrosector, Adrián Criollo*

#### **2.5.4.2 Conexión de las fases y excitatriz**

Los devanados del alternador se conectan en estrella para obtener tres fases y un neutro como se muestra en la 2.42, la excitatriz se conecta a la rueda polar con el cuidado de no exceder las magnitudes nominales

**Figura 2.42. Devanados del Generador**



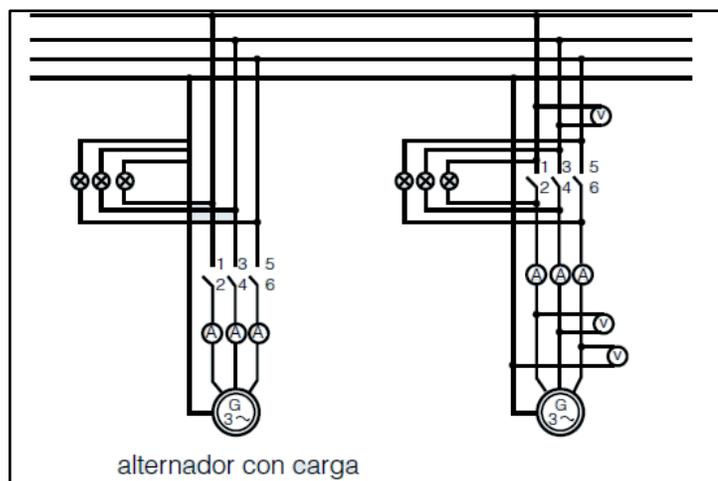
*Fuente: Manual Electrosector, Adrián Criollo*

Para acoplar los alternadores se usa el método de las tres lámparas apagadas. Este método se basa en conectar las lámparas en serie con ambas fases. Cuando las lámparas se encienden al mismo tiempo y lentamente esto indica que la secuencia de fases es la correcta.

### 2.5.4.3 Acoplamiento correcto

En la figura 2.43 se muestra como las lámparas se apagan al mismo tiempo esto indica que existe la misma frecuencia de fases y podemos acoplar la máquina; hay que tener mucho cuidado con las tensiones de las máquinas ya que éstas deben ser iguales, asegurar que las tensiones de fase sean las mismas tomando las tensiones de línea de cada una de las dos máquinas y teniendo cuidado de no excederlos datos nominales de placa corriente de excitación tensión, corrientes de fases.

**Figura 2.43. Método de las tres lámparas**

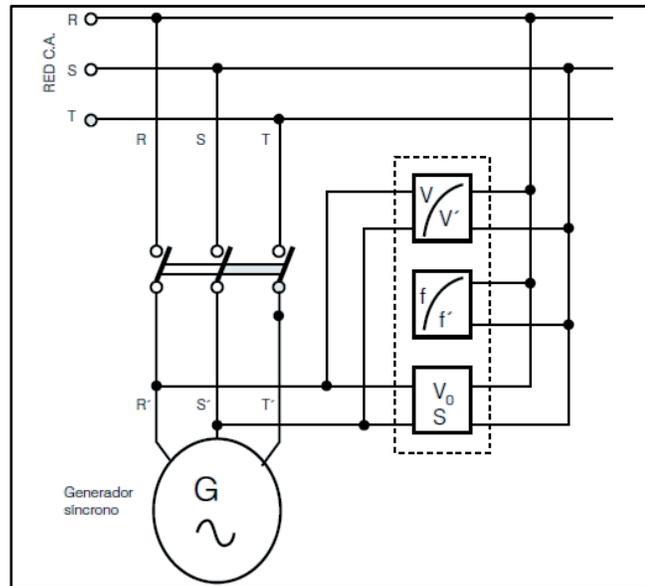


*Fuente: Manual Electrosector, Adrián Criollo*

#### 2.5.4.4 Modernas instalaciones

En las modernas instalaciones se emplea unas columnas de sincronización figura 2.44, compuestas por un brazo saliente y giratorio del cuadro general de la central y que tiene dos voltímetros, dos frecuencímetros (red y generador) un voltímetro de cero y un sin cronoscopio de aguja.

Figura 2.44. Columna de sincronización para el acoplamiento de un alternador a la red



Fuente: Manual Electrosector, Adrián Criollo

## 2.6 SISTEMAS DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA MECÁNICA

En MCH, se produce una continua conversión de energía hidráulica en energía mecánica en la turbina, y de energía mecánica en energía eléctrica en el generador. Debido a que rara vez coinciden las velocidades de las turbinas con la de los generadores, por lo cual en las MCH deben emplearse sistemas de transmisión de movimiento y potencia mecánica entre la turbina y el generador.

### 2.6.1 Elementos de un sistema de transmisión de potencia mecánica

En todo sistema de transmisión movimiento y potencia mecánica se distinguen dos tipos de elementos:

- Conductor motriz
- Conducido

Los elementos mecánicos involucrados en una transmisión son:

- Una rueda impulsora
- Una rueda conducida
- Ejes que soportan las ruedas y giran con ellas
- Soportes de los ejes
- Acoplamientos

### **2.6.2 Tipos de Transmisión**

Hay varios sistemas, los más importantes son:

**Transmisiones flexibles por Bandas, que pueden ser:**

- Planas
- Trapezoidales o en V
- Dentadas

**Transmisiones flexibles por cadena de rodillos, que pueden ser:**

- Simples
- Múltiples

**Transmisión por ruedas de fricción, que pueden ser:**

- Cilíndricas de ejes paralelos
- Cilíndricas de ejes transversales
- Cónicas

**Transmisiones por engranajes, las que pueden ser:**

- Cilíndricas de dientes rectos
- Cilíndricas de dientes helicoidales
- Cónicos de dientes rectos
- Cónico de dientes espirales
- Tornillo sin fin con rueda dentada

### **2.6.3 Comparación entre sistemas de transmisión**

A continuación se presenta las características más importantes de los principales sistemas.

#### **2.6.3.1 Transmisión por Bandas**

Tiene una amplia aplicación. La capacidad de transmisión de potencia depende de la fricción entre la banda y las ruedas que, a su vez, depende del coeficiente de rozamiento y del ángulo de contacto de la banda con la polea menor.

##### **Ventajas**

- Posibilidad de unir el eje conductor con el conducido a distancias relativamente grandes.
- No se requiere lubricación
- Debido a que se produce resbalamientos entre la banda y poleas, sirve de protección a otros elementos de la transmisión.
- Funcionamiento relativamente suave sin golpeteo
- Sencillez
- Costo relativamente bajo.

##### **Desventajas**

- Grandes dimensiones exteriores
- Esta limitado su empleo a bajas potencias
- Debido al resbalamiento entre la banda y poleas, no se puede garantizar una relación e transmisión constante
- Duración relativamente baja (1000 hasta 5000 horas)
- Se producen grandes cargas sobre los ejes

#### **2.6.3.2 Transmisión por cadena de rodillo**

Son transmisiones que tienen flexibilidad pues están construidas por articulaciones de eslabones metálicos que, al entrar en contacto con los dientes de las ruedas, permiten una transmisión sincronizada.

## **Ventajas**

- Se pueden tener grandes distancias entre ejes (hasta 5m)
- Es posible transmitir movimiento a varios ejes con una misma cadena
- Se consiguen eficiencias relativamente altas (98%)
- Se producen menores cargas sobre los ejes
- Mayor vida útil (10000 horas)

## **Desventajas**

- Costo relativamente alto
- Requieren sistemas de lubricación
- En casos de cambio de cadenas quedan inutilizables debido al estiramiento sufrido
- Necesidad de montaje y mantenimiento mas cuidados

### **2.6.3.3 Transmisión por engranajes**

Las cajas reductoras de engranajes pueden significar una opción para la transmisión de movimiento entre el eje de la turbina y el generador, con la ventaja de ocupar poco espacio, originar menos perdidas y evitar cargas fuertes en los cojinetes del generador.

### **2.6.4 Criterios para el dimensionamiento de sistemas de transmisión**

Para poder dimensionar un sistema de transmisión debe contarse con la siguiente información:

- Potencia a transmitir
- Velocidad de entrada y salida
- Condiciones de servicio

Las condiciones de servicio están relacionadas con el tipo de maquina motriz y el tipo de maquina conducida según la tabla 2.14 y 2.15, en cuanto a las vibraciones que ellas originen en la transmisión; también dependen de las horas de servicio, condiciones ambientales, etc.

Tabla 2.14. Ejemplos de grado de irregularidad de las maquinas accionales	
Maquina accionada	Irregularidad
Casi sin sacudidas: generadores de corriente, banda transportadora, tornillo transportador, maquinas herramientas, ventilador, turbo soplador, compresor rotativo, agitador, mezclador para densidad uniforme.	I
Sacudidas moderadas: accionamiento principal en maquinas herramientas, mecanismos de giro de grúas, bombas e embolo de varios cilindros.	II
Sacudidas violentas: prensas, estampadoras, cizallas, centrifugas pesadas, perforadas, molinos.	III

Fuente: "Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas" - Federico Coz.

Tabla 2.15. Valores de aproximados de factor de servicio													
Transmisión	Grado de irregularidad en maquina conductora	MAQUINA PROPULSORA											
		Motor eléctrico h/día				Turbinas, motores multicilindro. h/día				Motores monocilindricos. h/día			
		0.5	3	8	24	0.5	3	8	24	0.5	3	8	24
Engranajes cilíndricos, cónicos	I	0.5	0.8	1.0	1.25	0.8	1.0	1.25	1.5	1.0	1.25	1.5	1.75
	II	0.8	1.0	1.25	1.5	1.0	1.25	1.5	1.75	1.25	1.5	1.75	2.0
	III	1.25	1.5	1.75	2.0	1.5	1.75	2.0	2.25	1.75	2.0	2.25	2.5
Transmisión por tornillo sin fin,	I	0.5	0.75	1.0	1.25	0.7	0.95	1.2	1.45	0.85	1.1	1.35	1.6
	II	0.7	0.95	1.2	1.45	0.85	1.1	1.35	1.6	1.0	1.25	1.50	1.75
	III	1.0	1.25	1.5	1.75	1.2	1.45	1.7	1.95	1.35	1.6	1.85	2.1
Transmisión por bandas	I	0.5	0.75	1.0	1.25	0.65	0.9	1.15	1.4	0.75	1.0	1.25	1.5
	II	0.65	0.9	1.15	1.4	0.75	1.0	1.25	1.5	0.9	1.15	1.4	1.65
	II	0.90	1.15	1.4	1.65	1.0	1.25	1.5	1.75	1.1	1.35	1.6	1.85

Fuente: "Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas" - Federico Coz.

#### 2.6.4.1 Selección de Bandas en V

La selección de Bandas en V puede realizarse siguiendo el procedimiento general que se aplica a los diferentes sistemas de transmisión de potencia, siendo requisito fundamental contar con los datos iniciales sobre potencia a transmitir, relación de transmisión y condiciones de servicio, así como algunas restricciones de espacio.

#### 2.6.4.2 Selección del tipo de sección

Las secciones de mayor uso son las designadas con las letras A, B, C, D y E. Existen también secciones compactas: 3V, 5V y 8V.

#### 2.6.4.3 Diámetro de poleas

La determinación de los diámetros de las poleas se ha considerado varios criterios:

- La relación de velocidad a obtener
- El diámetro mínimo tolerable por las diferentes secciones
- La conveniencia de utilizar diámetros normalizados
- La influencia del diámetro de la polea menor en la capacidad de transmitir potencia de las bandas
- La influencia de los diámetros en las tensiones y fuerzas en los ejes y rodamientos

#### 2.6.4.4 Longitud de la banda

La longitud requerida de la banda se calcula mediante la ecuación:

$$L = 2C + \pi \frac{D+d}{2} + \frac{(D-d)^2}{4C} \quad (ec : 2.138)$$

Donde:

$C$  : Distancia entre centros

$D$  : Diámetro de la polea mayor

$d$  : Diámetro de la polea menor

La distancia entre centros “ $C$ ” se determina de acuerdo a restricciones de espacio impuestas por los equipos motriz y conducido. En caso de que no exista estas

restricciones la distancia entre centros se puede tomar como el mayor valor entre las expresiones:

$$C = \frac{D+3d}{2} \text{ y } C = D \quad (ec : 2.139)$$

En el Anexo VII se muestran las longitudes normalizadas de bandas trapezoidales

#### 2.6.4.5 Numero de Bandas

Para poder determinar el número de banas, en primer lugar debe calcularse la capacidad de transmisión de potencia por banda mediante la ecuación:

$$P_{nom} = \left[ 2.19 \times a \times \left( \frac{10^3}{V} \right)^{0.09} - \frac{6.2 \times c}{K_d \times d} - 26.26 \times e \times \frac{V^2}{10^6} \right] \times \frac{V}{1000} \left[ \frac{kW}{Banda} \right] \quad (ec : 2.140)$$

Donde:

$a, c, e$  : Constantes que corresponden a una sección de banda determinada

$K_d$  : Coeficiente de diámetro pequeño (Anexo VIII)

$V$  : Velocidad tangencial en  $m/min$

$d$  : Diámetro de la polea menor  $m$

La capacidad nominal se obtenida debe corregirse para la longitud de correa y el arco de contacto, en la siguiente ecuación:

$$P_{nom-ajustada} = P_{nom} \times K_{\theta} \times K_L \quad (ec : 2.141)$$

Donde:

$K_{\theta}$  : Coeficiente de corrección por un arco de contacto diferente a  $180^\circ$  (Anexo IX)

$K_L$  : Coeficiente de corrección del efecto de la longitud (Anexo X)

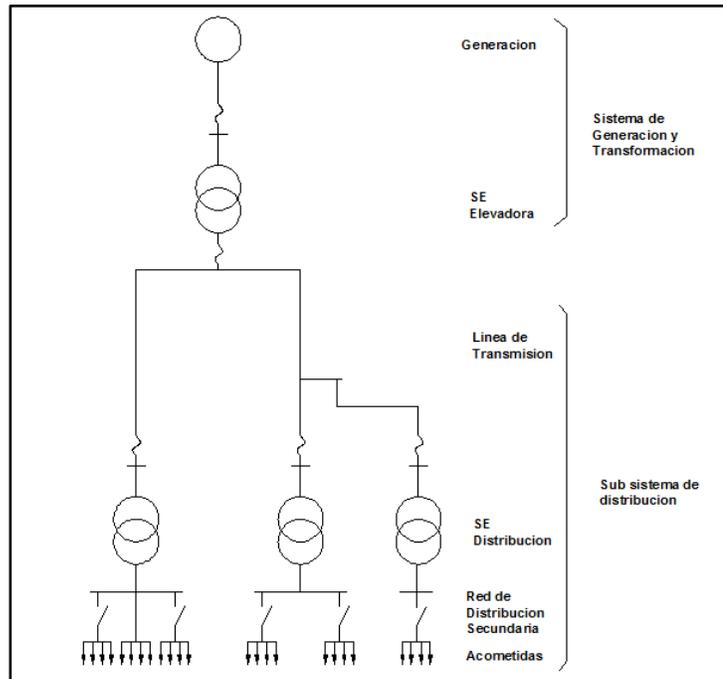
Finalmente el número de banas se puede obtener mediante la ecuación:

$$Numero \ de \ bandas = \frac{P_{dis}}{P_{nom-ajustada}} \quad (ec : 2.142)$$

## 2.7 LÍNEAS DE TRANSMISIÓN Y REDES DE DISTRIBUCIÓN

Un sistema general del sistema de MCH consta de líneas de transmisión (*LT*), y redes de distribución (*RD*) como se observa en la figura 2.45.

**Figura 2.45. Esquema eléctrico de LT y RDS**



*Fuente: Autores*

El sistema de generación, está conformado por la central eléctrica y la sub-estación (*SE*) elevadora. La línea de transmisión inicia desde *SE* elevadora y se prolonga hasta la *SE* de reducción. El sistema de distribución comienza desde la *SE* de reducción hasta el tablero general de acometidas.

### 2.7.1 Diseño de la línea de transmisión

El sistema más utilizado en estos proyectos es de redes trifásicas de tres conductores y de una sola terna.

#### Forma de la Línea

La forma más común es la radial, con carga concentrada en la cual la línea parte de la salida de la *SE* elevadora y hasta la población o centro de carga, terminando en una o más *SE* de llegada.

### **Trazado de la línea.**

Es importante determinar el posible recorrido que tendría la línea con el objeto de determinar los principales parámetros de diseño, como la longitud, los cambios de dirección, etc. Para realizar este trabajo se recomienda tener en cuenta lo siguiente:

- Pre-seleccionar un trazo de partida y llegada con la línea más corta posible, aprovechando las ventajas del terreno así como caminos, linderos de propiedades, etc.
- Verificación del trazo, mediante un recorrido de campo.
- Establecido el trazo definitivo, se efectúa el levantamiento topográfico de las rutas y se ubica y marcan en el terreno, con pinturas, estacas u otras señales permanentes los puntos principales de la línea, tales como los cambios de dirección, puntos relevantes, así como una ubicación preliminar de los portes, para lo cual se consideran vanos de 100 a 150 m.

### **Selección de la tensión de la línea**

Las tensiones que se pueden seleccionar están establecidas en los códigos y reglamentos nacionales. Como referencia, en la tabla 2.16 se presentan las tensiones recomendadas. Para los sistemas trifásicos de 3 líneas, de hasta 15 km de longitud es recomendable utilizar líneas de 10 kV.

<b>Tabla 2.16. Tensiones de Líneas de Transmisión y Redes de Distribución Primaria recomendadas</b>	
<b>Tensiona Nominal (kV)</b>	<b>Tensión más elevada (kV)</b>
3	3.6
6	7.2
10	12.0
15	17.5
20	24.0

*Fuente: "Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas" - Federico Coz.*

### Regulación de la Tensión.

Es la variación o caída de tensión que se puede permitir a lo largo de la línea; está señalada por los códigos y la práctica de cada país. Como referencia en la tabla 2.17 se dan valores generalmente aceptados.

<b>Tabla 2.17. Máxima caída de tensión permisible en Líneas de Transmisión y Distribución Primaria</b>	
Alimentador Urbano	3.5 %
Alimentador Rural	6%

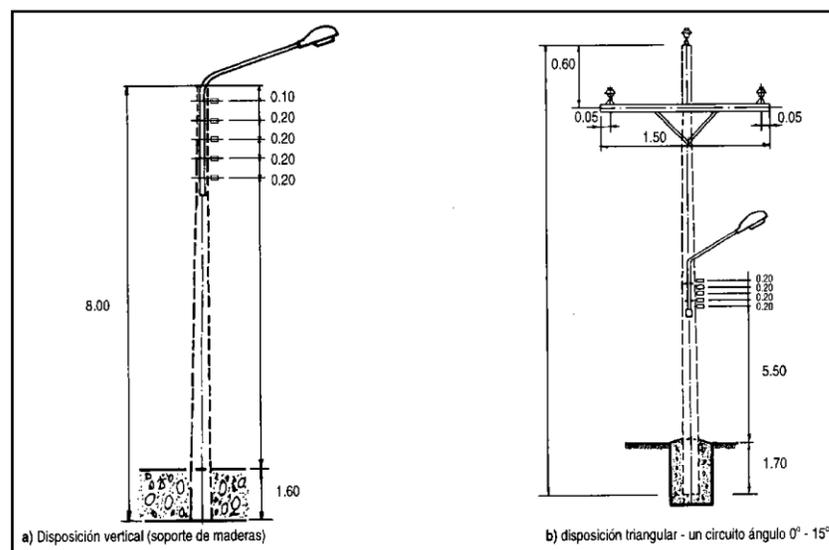
Fuente: "Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas" - Federico Coz.

Para el caso de MCH, se recomienda considerar esta caída de tensión, desde la salida de SE elevadora hasta el centro de carga.

### 2.7.2 Selección técnico-económica de los componentes de la LT

La selección de cada uno de los componentes serán normalizados, solo se tendrá en cuenta elementos como conductores, aisladores postes y transformadores. Existen dos posiciones que pudiera tener la LT: triangular y la vertical figura 2.46.

**Figura 2.46. Disposición de conductores**



Fuente: "Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas" - Federico Coz.

### Selección de los conductores

Los conductores normalmente utilizados en redes de MCH y sus características específicas se presentan en la tabla 2.18 y con mayores detalles en las tablas del Anexo XII.

<b>Tabla 2.18. Conductores generalmente usados en electrificación rural</b>			
<b>Usos</b>	<b>Características de los conductores</b>	<b>Calibre (<math>mm^2</math>)</b>	<b>Nº de Hilos</b>
Líneas de transmisión, en 10 kV o tensiones superiores	Aleación de Aluminio Cobre de alta pureza, (99.9 %) refinado electrolíticamente, temple duro, desnudo. Normas de fabricación ASTM-B8	6	7
		10	7
		16	7
		25	7
Redes de distribución primaria en general, con tensiones de 10kV o menos.	Cobre de alta pureza, (99.9 %) refinado electrolíticamente, temple duro, desnudo. Normas de fabricación ASTM-B8	6	7
		10	7
		16	7
		25	7
Redes de distribución secundaria en general, con tensiones de 2200 V a 380/220 V.	Cobre de alta pureza, (99.9 %) refinado electrolíticamente, temple duro, o semiduro. Especificaciones ASA-C8-35	6	1
		10	1
		16	1

*Fuente: "Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas" - Federico Coz.*

### Calculo del % de caída de tensión.

Para realizar este cálculo se debe disponer de los siguientes datos:

- Potencia a transmitir, en kW.
- Longitud de la línea, en km.

Se debe asumir:

- Factor de potencia. Algunas normas y la buena práctica recomienda asumir  $\cos \varphi = 0.9$  donde  $\varphi = 25.8^\circ$ .

- Tensión de la línea, de acuerdo a la tabla 2.16.
- Sistema de la línea: trifásico o monofásico.
- Disposición de los conductores, triangular o vertical (figura 2.46).
- Material y sección de los conductores.
- Temperatura máxima de operación de los conductores, que generalmente se asume como  $50^{\circ} C$ .

Se deben conocer:

- Resistencia del material conductor, dato generalmente dado por el fabricante para una temperatura de  $20^{\circ} C$ .
- Coeficiente de corrección por temperatura  $\alpha$ , también suministrado por los fabricantes.

El cálculo del porcentaje de caída de tensión se realizara por el método del factor de caída de tensión (FCT), el cual se obtienen de tablas o se calcula para una situación específica; luego se aplica la siguiente expresión:

$$\Delta V\% = P \times L \times FCT \quad (ec2.143)$$

Donde:

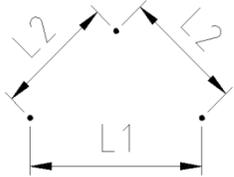
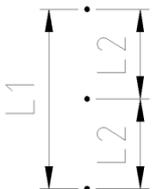
$\Delta V\%$  : Porcentaje de caída de tensión.

$P$  : Potencia en kW

$L$  : Longitud de la línea, en m.

$FCT$  : Factor de caída de tensión.

El FCT se puede encontrar en la tabla 2.19. Los valores de esta tabla se calcularon teniendo como base de datos las suposiciones presentadas al inicio de esta sección. Para usar la tabla, se parte de la tensión de la línea. Para lo disposición geométrica de los conductores analizados se selecciona un calibre de conductor, para el cual se encuentra el FCT en la columna de la tensión.

Tabla 2.19. Factores de caída de tensión (FCT)						
Tipo	Disposición geométrica	Selección del conductor ( $mm^2$ )	Tensión nominal de la línea			
			6 kV	10 kV	15 kV	20 kV
TT		6	0.01004	0.003751		
		10	0.00644	0.002231		
		20	0.004256	0.001534		
		25	0.00291	0.001043		
TV		6				
		10				
		20				
		25				

Fuente: "Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas" - Federico Coz.

### Calculo de la resistencia de la línea

$$R_t = R_o(1 + \alpha \times \Delta T) \quad [\Omega / km] \quad (ec2.144)$$

Donde:

$R_t$  : Resistencia a la temperatura de trabajo de la línea,  $t_m$ , en  $\Omega / km$ .

$R_o$  : Resistencia a la temperatura de referencia,  $t_o$ ; generalmente  $20^\circ C$ , dada por los fabricantes.

$$\Delta T = t_m - t_o \quad (ec2.145)$$

$t_m$  : Temperatura de trabajo de la línea, establecida por normas o reglamentos,  $^\circ C$ .

$t_o$  : Temperatura de referencia, generalmente en  $20^\circ C$ .

$\alpha$  : Coeficiente de temperatura,  $^\circ C^{-1}$ .

El valor de  $\alpha$  se obtiene de la tabla 2.20.

<b>Tabla 2.20. Coeficiente de temperatura (<math>\alpha</math>)</b>	
<b>Material</b>	$\alpha(^{\circ}C^{-1})$
Cobre Duro	0.00382
Cobre semiduro	0.00384
Aleación de Aluminio	0.00360

Fuente: "Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas" - Federico Coz.

### Calculo de la Reactancia (para 60 Hz)

Se determina con la expresión:

$$\chi = 377 \times \left( 0.05 + 0.4605 \times \text{Log} \frac{|DMG|}{RMG} \times 10^{-3} \right) \left[ \frac{\Omega}{km} \right] \quad (ec2.146)$$

Donde:

$DMG$ : Es la distancia media geométrica.

$$DMG = \sqrt[3]{L_1 \times L_2 \times L_3} \quad [mm] \quad (ec2.147)$$

Con  $L_1, L_2$  y  $L_3$  = separación entre los conductores en mm.

$RMG$ : Es el radio medio geométrico.

$$RMG = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad (ec2.148)$$

Área del conductor en  $mm^2$

### Calculo del ángulo $\varphi$

Se determina tomando el  $\cos^{-1} \varphi$  del factor de potencia considerado.

### Calculo del Factor de Caída de Tensión (FCT)

Utilizar la siguiente expresión:

$$FCT = \frac{R_t + \chi \tan \varphi}{10 \times V^2} \quad (ec2.149)$$

Donde:

$FCT$  :Es el factor de caída de tensión.

$R_l$  :Es la resistencia de la línea ( $\Omega/km$ ).

$\chi$  :Es la reactancia de la línea ( $\Omega/km$ ).

$V$  :Es la tensión de la línea, en kV.

### **Selección del conductor**

Si el  $\Delta V\%$  calculado con el FCT es menor al máximo permitido (tabla 2.19) se selecciona el conductor con el cual se ha determinado el FCT.

### **Selección de los aisladores**

Los aisladores deben proporcionar un adecuado aislamiento eléctrico a los conductores con tensión; además, deben soportar los esfuerzos mecánicos que producen los conductores.

- **Materiales.** Los aisladores se fabrican de porcelana de color castaño vidriado, o de vidrio.
- **Tipos.** En LT y redes primarias se utilizan aisladores tipo espiga, llamados también tipo PIN y aisladores tipo suspensión.
- **Normas técnicas.** Los aisladores deberán cumplir con las normas técnicas, según la clase a la que pertenezcan.
- **Aplicaciones.** Existen aisladores de diseño apropiado para ser usados en zonas sin contaminación (atmosferas limpias), diferentes a aquellos diseñados para zonas de alta contaminación ambiental y para zonas costeras donde el medio ambiente tienen elementos de fuerte acción corrosiva.

La manera más sencilla y practica de seleccionar los aisladores para zonas rurales es a partir de la tabla 2.21.

<b>Tabla 2.21. Aisladores recomendados para ambientes con atmosfera limpia (Clases IEE-NEMA)</b>		
<b>Nivel de Tensión(kV)</b>	<b>Altura de instalación máxima(msnm)</b>	<b>Aislador recomendado IEE-NEMA Clase:</b>
10	0-3600	55-4
	3600-5000	55-5
13.2	0-2200	55-4
	2200-4700	55-5
29	0-2600	56-1
	2600-4200	56-2

*Fuente: "Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas" - Federico Coz.*

### **Selección de los postes**

Las principales consideraciones que deben tener al seleccionar los postes son que tengan la altura adecuada y que tengan una adecuada resistencia mecánica para soportar los esfuerzos producidos sobre ellos por los conductores.

### **Selección de postes de madera**

La principal finalidad al usar estos postes es de reducir los costos y por la facilidad de adquisición. Señalamos a continuación algunas normas técnicas sobre las características de los postes de madera y también se puede observar en el ANEXO XIII:

- **Longitudes de los postes (m):** 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14 y 15.
- **Clase:** La clase representa la carga de rotura del poste, expresada en kg. Existen 9 clases que se designan con numeral del 1 al 9.
- **Grupo:** representa el máximo esfuerzo de flexión del poste expresado en kg. Existen 5 grupos que se designan con las letras A, B, C, D y E.
- **Diámetro de la Punta:** Expresado en mm, sirve para identificar la clase y grupo del poste.
- **Diámetro en la sección de empotramiento:** Expresado en mm, sirve para la identificación de la clase y grupo del poste.

## Selección de transformadores de distribución

Los transformadores generalmente tienen las siguientes características:

- Son monofásicos o trifásicos.
- Son refrigerados por baño de aceite.
- Son construidos por montaje exterior.
- Se estandariza a base de la potencia nominal, en kVA. En la tabla 2.22 se presenta la potencia nominal recomendada por las Normas Técnicas, en la tabla 2.23 se representa los estándares de algunos Fabricantes.
- La relación de transformación está normalizada. Generalmente se considera, en el lado de alta tensión, a las tensiones normalizadas para las líneas; en baja tensión las de 440, 380 o 220 V. la tensión de 110 V, aun cuando se usa en muchos países, tienen a caer en desuso en América Latina.
- La relación de transformación es regulable, pues la transformación tiene tomas o taps que permiten obtener las siguientes variaciones: +5%, +2.5%, o -2.5%, -5% de la tensión nominal.

<b>Tabla 2.22. Potencias Nominales de Transformadores</b>	
<b>Transformador Monofásico (kVA)</b>	<b>Transformador Trifásico (kVA)</b>
15	50
25	75
37.5	100
50	160
75	250
100	315
	400
	500
	630
	800
	1000
	1600

Fuente: "Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas" - Federico Coz.

<b>Tabla 2.23. Potencias nominales de transformadores de distribución (estándares de fabricantes)</b>	
<b>Transformadores Monofásicos (kVA)</b>	<b>Transformadores Trifásicos (kVA)</b>
5	10
15	25
25	37.5
37.5	50
75	75
100	100
	125
	200
	315
	500
	800
	1000

*Fuente: "Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas" - Federico Coz.*

### **Selección**

Para la selección del transformador de una SE, se deben tener en cuenta las condiciones de la red en el punto en que el transformador se va instalar:

- La potencia nominal.
- La relación de transmisión.
- La forma del equipamiento.
- Otras características: impedancia de corto circuito, formas de conexión, etc.; que son complementarias.

## **Conclusiones:**

En este capítulo se considero los criterios y procedimientos de Diseño para el dimensionamiento de una Microcentral Hidroeléctrica. En la primera parte del capítulo se planteo la metodología para el dimensionamiento de la Obra Civil, proponiendo para la captación una Bocatoma de fondo (Tipo Tirolesa) debido a su sencillez constructiva y además porque garantiza una captación constante de caudal.

La turbina con mas aplicación en proyectos de Microcentrales es la Michell Banki debido a su funcionalidad en el rango de saltos y caudales pequeños, por lo cual en este capítulo se analiza el procedimiento para el diseño mecánico e hidráulico de sus componentes o a su vez para la selección de una turbina estandarizada en función del salto y caudal aprovechables.

Los generadores más utilizados en estos proyectos son los del tipo Síncrono Trifásicos por ser este el método más sencillo y económico para producir energía, su configuración eléctrica nos permite realizar conexiones en paralelo entre generadores de las mismas características lo cual es una gran ventaja ya que se logra incrementar la potencia aprovechable de un proyecto hidroeléctrico mediante la implementación de varios de estos.

Una vez generada la electricidad es necesario transportarla y distribuirla para lo cual en este capítulo se dan las pautas necesarias para la selección más económica y factible tanto de los conductores y transformadores como también de los postes que servirán para conducir la energía.

## **CAPITULO III: DISEÑO DEL PARQUE HIDROELÉCTRICO DE MICROCENTRALES PARA EL RIO SAN FRANCISCO DEL CANTÓN GUALACEO**

### **INTRODUCCIÓN**

En el capítulo anterior se expuso los criterios establecidos por la OLADE para el dimensionamiento de una MCH partiendo desde el levantamiento de datos y las obras civiles necesarias para la captación del agua hasta el dimensionamiento de los equipos eléctricos y mecánicos que serán usados para nuestro propósito.

En el presente capítulo consideraremos estos criterios para realizar el diseño de todos los elementos necesarios para garantizar el funcionamiento de una MCH al 97% del tiempo. Primero se definirá el modelo y dimensionamiento de la obra civil necesaria para la captación del agua así como los elementos necesarios para reducir las partículas sólidas que acarrea esta, mismas que pudieran provocar daños en nuestro sistema mecánico.

Posteriormente trabajaremos en el sistema de conducción de agua hasta el tanque de presión considerando en este punto la facilidad de instalación del sistema así como también la topografía de la zona, llegando así a determinar los valores de caudal y altura neta disponible que nos serán útiles para el dimensionamiento de los componentes eléctricos y mecánicos los cuales en función de su eficiencia nos permitirán determinar la potencia máxima de nuestro proyecto hidroeléctrico.

### **3.1 DISEÑO DE OBRAS CIVILES DE LA MICROCENTRAL**

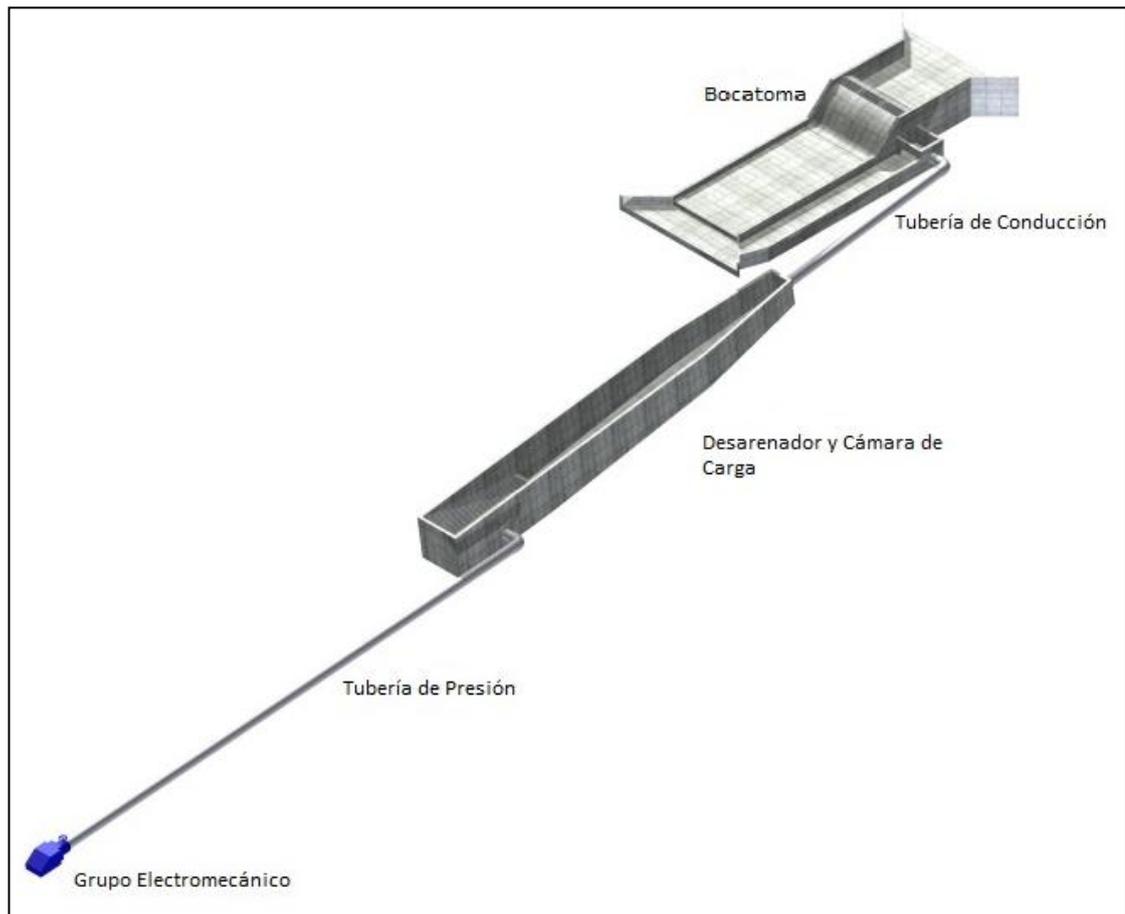
#### **3.1.1 Bocatoma**

La bocatoma, tienen la función de captar y regular un determinado caudal de agua para su aprovechamiento en la producción de energía hidroeléctrica.

##### **3.1.1.1 Dimensionamiento del Azud**

La bocatoma en cuestión corresponde a las de tipo Tirolesa debido a las facilidades de construcción que este tipo de estructuras presenta y a la eficiencia que prestan en torrentes de montaña.

**Figura 3.1. Sistema de Generación Hidroeléctrica**



*Fuente: Autores*

Sabiendo que:

$$Q_{\max} = 30.87 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$Q_{\min} = 0.22 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$Q_m = 6.69 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$Q_t = 0.24 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$Q_{eco} = 0.67 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$b = 9 \text{ m (ancho del río)}$$

El diseño del perfil de Creager utilizará la ecuación 2.1:

$$Q_{\max} = M \times b \times H_o^{\frac{3}{2}}$$

Donde:

$M = 2.21$ : Coeficiente de acuerdo al perfil hidrodinámico

$h_{azud} = 0.5 \text{ m}$  Valor estimado

Carga sobre la cresta del vertedero ecuación 2.2:

$$H_o = \left( \frac{Q_{\max}}{M \times b} \right)^{\frac{2}{3}}$$
$$H_o = \left( \frac{30.87}{2.21 \times 9} \right)^{\frac{2}{3}}$$
$$H_o = 1.34m$$

Altura de agua sobre la cresta del vertedero según la ecuación 2.3 es:

$$h = 0.69H_o$$
$$h = 0.69 \times 1.34$$
$$h = 0.925m$$

Velocidad del agua al pasar por la cresta del azud ecuación 2.4 será:

$$Q_{\max} = A \times V$$
$$A = h \times b$$
$$A = 0.925 \times 9$$
$$A = 8.325m^2$$
$$V = \frac{Q_{\max}}{A}$$
$$V = \frac{30.87}{8.325}$$
$$V = 3.705m/s$$

La carga energética  $h_e$  ecuación 2.5 será:

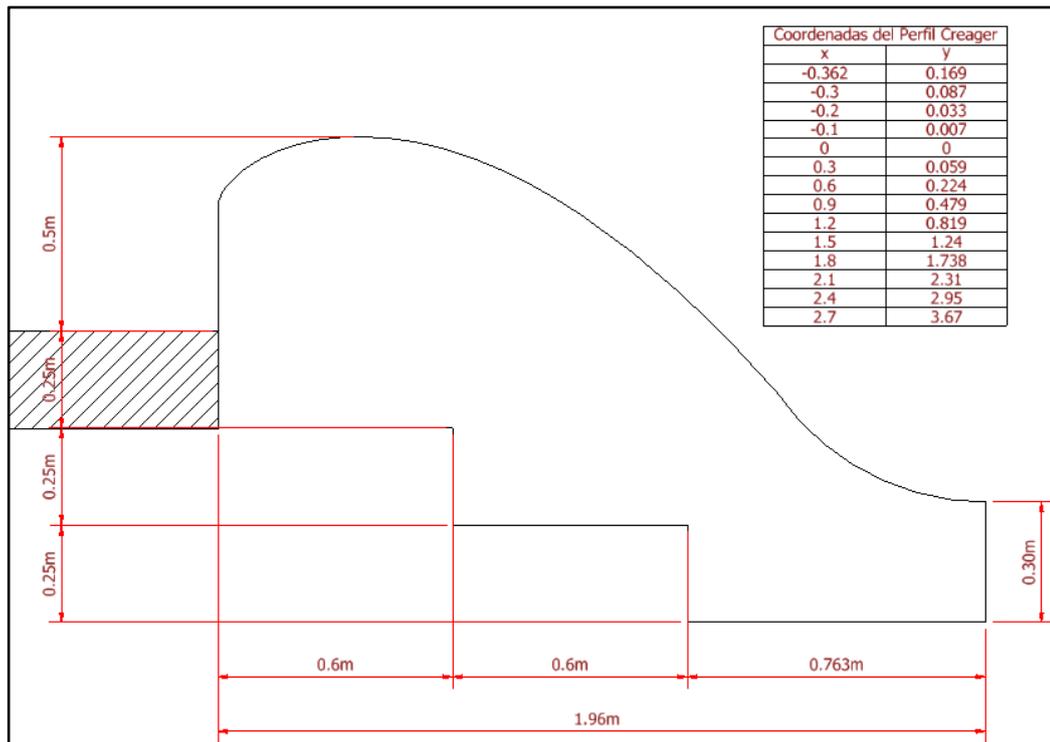
$$h_e = h + \frac{V^2}{2g}$$
$$h_e = 0.925 + \frac{3.705^2}{2 \times 9.81}$$
$$h_e = 1.625m$$

Con la ecuación 2.6 y 2.7 se determinan las coordenadas del azud:

$$X^{1.85} = 2H_o \times Y$$

$$Y = 0.724 \frac{(X + 0.27H_o)^{1.85}}{H_o} + 0.126H_o - 0.4315H_o^{0.375} (X + 0.27H_o)^{0.625}$$

**Figura 3.2. Coordenadas del Perfil Creager**



Fuente: Autores

Suponemos  $\Delta h = 1m$ , entonces la velocidad de caída del agua ecuación 2.8 es:

$$V_1 = \sqrt{2g\Delta h}$$

$$V_1 = \sqrt{2 \times 9.81 \times 1}$$

$$V_1 = 4.439m/s$$

El caudal sobre el azud, por metro lineal.

$$Q_{lineal} = \frac{Q_{max}}{b}$$

$$Q_{lineal} = \frac{30.87}{9}$$

$$Q_{lineal} = 3.43(m^3/s)/m$$

El espesor de la vertiente al pie del azud  $h_1$  ecuación 2.9:

$$Q_{max} = A \times V_1 = (h_1 \times b) \times V_1$$

$$h_1 = \frac{Q_{max}}{V_1 \times b}$$

Sabiendo que:

$$Q_{lineal} = \frac{Q_{max}}{b}$$

$$h_1 = \frac{Q_{lineal}}{V_1}$$

$$h_1 = \frac{3.43}{4.439}$$

$$h_1 = 0.774m$$

Altura total del agua  $H_e$  ecuación 2.10, sobre el lecho del río aguas arriba:

$$H_e = h_e + h_{azul}$$

$$H_e = 1.625 + 0.5$$

$$H_e = 2.125m$$

La profundidad de la cuenca o colchón  $H_c$  de agua ecuación 2.11 será:

$$H_c = H_e - \Delta h - h_1$$

$$H_c = 2.125 - 1 - 0.774$$

$$H_c = 0.352m$$

De acuerdo a la fórmula de Merriam ecuación 2.12, aguas abajo se requiere tener una profundidad de:

$$h_2 = \frac{0.45Q_{lineal}}{\sqrt{h_1}}$$

$$h_2 = \frac{0.45 \times 3.43}{\sqrt{0.352}}$$

$$h_2 = 1.756m$$

Y la profundidad de la cuenca aguas abajo  $h_2$  según la ecuación 2.13 es de:

$$h_2 = H_c + t_{(aguas\ abajo)}$$

$$t_{(aguas\ abajo)} = h_{azul} - \Delta h$$

$$t_{(aguas\ abajo)} = 0.5 - 1$$

$$t_{(aguas\ abajo)} = 0.5m$$

$$h_2 = 0.352 + 0.5$$

$$h_2 = 0.85m$$

Debe cumplir que:

$$h_2(\text{Merriam}) < h_2(\text{aguas abajo})$$
$$1.756 < 0.85$$

Como no cumple la condición ajustamos  $H_c = 1.3m$

$$h_2 = H_c + t_{(\text{aguas abajo})}$$
$$h_2 = 1.3 + 0.5$$
$$h_2 = 1.8m$$

Entonces:

$$h_2(\text{Merriam}) < h_2(\text{aguas abajo})$$
$$1.756 < 1.8$$

Debido a que el requerimiento de la profundidad de la cuenca aguas abajo, de acuerdo a la fórmula de Merriam es menor que el que se acaba de conseguir, se puede decir que las dimensiones de las profundidades de la cuenca  $h_1$  y  $h_2$  son correctas. Es conveniente que la altura  $h_2$  sea mayor que  $h_1$  para que el resalto este bien diseñado y su construcción sea la más conveniente.

El cálculo del diente al final del zampeado se realiza con la ecuación 2.14:

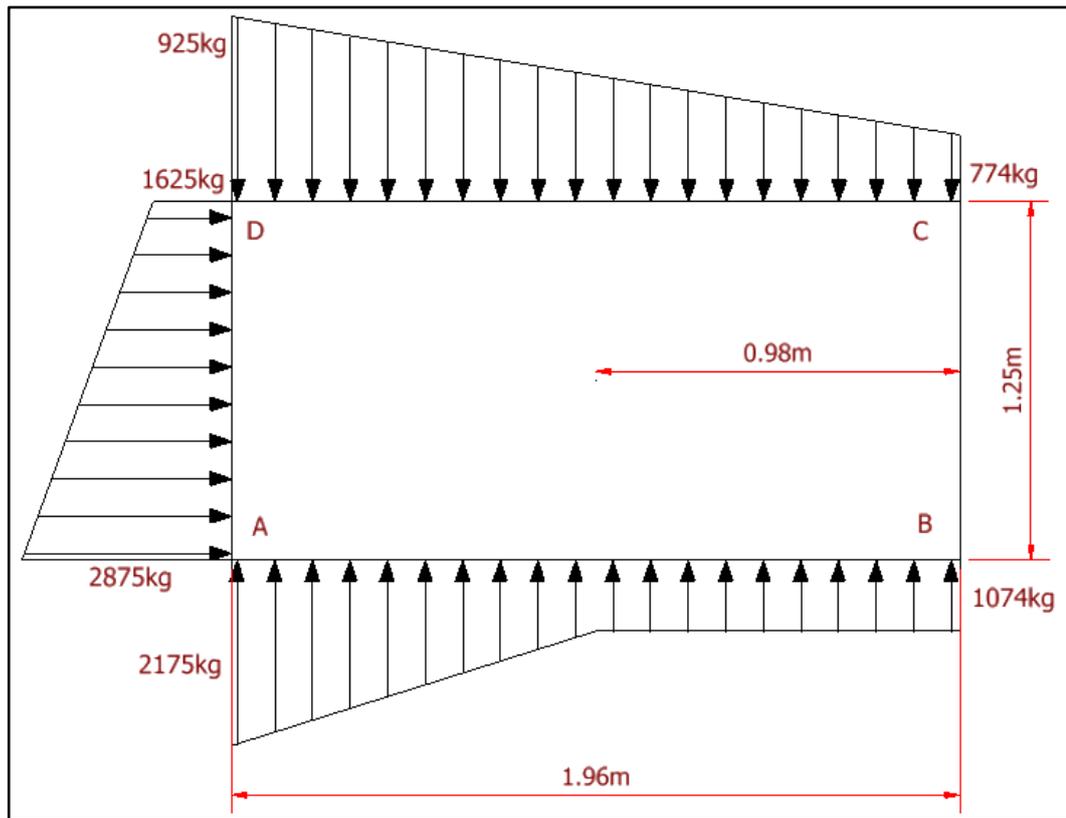
$$e = 0.08H_0^{2/3}h_{azud}$$
$$e = 0.08 \times 1.34^{2/3} \times 0.5$$
$$e = 0.048m \approx 0.05m$$

Calculo de longitud de la cuenca según la ecuación 2.15:

$$L = 5(h_2 - h_1)$$
$$L = 5(1.8 - 0.773)$$
$$L = 5.14m$$



**Figura 3.5. Diagrama de fuerzas actuantes sobre el Azud.**



Fuente: Autores

### Calculo de fuerzas

#### Fuerzas de presión, sub-presión y empuje

Fuerzas en C :

$$\delta x h_1 = \rho \left( h + \frac{V^2}{2g} \right)$$

$$\delta x h_1 = 1000(0.925 + 0.7) = 1625kg$$

$$\delta x h_2 = \rho(h)$$

$$\delta x h_2 = 1000(0.925) = 925kg$$

Fuerzas en A :

$$\delta x h_3 = \rho \left( y_h + h + \frac{V^2}{2g} \right)$$

$$\delta x h_3 = 1000(1.25 + 0.925 + 0.7) = 2875kg$$

$$\sin V^2 / 2g \rightarrow \delta x h_4 = \rho(y_h + h)$$

$$\delta x h_4 = 1000(1.25 + 0.925) = 2175kg$$

Fuerzas en B:

$$\delta x h_5 = \rho(y_3 + h_1)$$

$$\delta x h_5 = 1000(0.3 + 0.774) = 1074 \text{ kg}$$

Fuerzas en D:

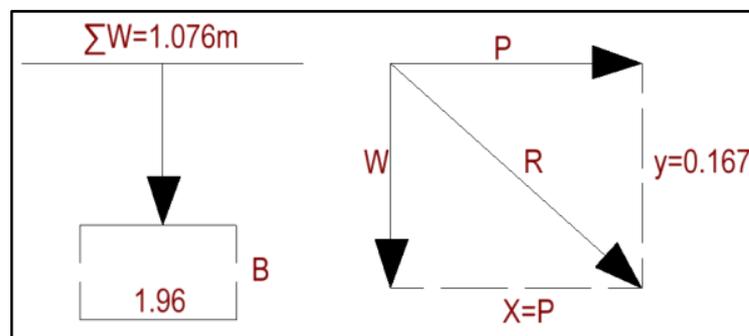
$$\delta x h_6 = \rho(h_1)$$

$$\delta x h_6 = 1000(0.774) = 774 \text{ kg}$$

Tabla 3.1. Calculo de momentos de cada uno de los elementos					
Elemento	Dimensión	Peso Especifico	Peso	Brazo (B)	Momento
1	0.75 × 1.2	2200	1980	1.36	2692.8
2	0.45 × 0.76 / 2	2200	376.2	0.76 × 2 / 3	190.608
3	0.76 × 0.3	2200	501.6	0.76 × 1 / 2	190.608
Total			2858		3074

Punto de aplicación del peso:

Figura 3.6. Punto de aplicación del peso del Azud



Fuente: Autores

$$\sum W = \frac{\sum \text{Momento}}{\sum \text{Peso}} = \frac{3074}{2858} = 1.076 \text{ m}$$

### Análisis de la sección equivalente

Calculo de pesos y momentos con respecto al punto B

$$\text{Excent} = x_m - \frac{\sum M}{\sum W} = 0.98 - 1.076 = -0.096$$

El signo indica que está a la izquierda del centro.

Empuje con  $h_{azud} = 0.5m$

$$P = \delta \times \frac{h_{azud}^2}{2}$$

$$P = 1000 \times \frac{0.5^2}{2}$$

$$P = 125 \text{ kg}$$

Punto de aplicación medido desde la cresta del vertedero:

$$Y_f = \frac{h_{azud}}{3} = \frac{0.5}{3} = 0.167 \text{ m}$$

Las fuerzas de empuje y peso son dos vectores cuyo diagrama se puede expresar así.

Dicha relación permite la siguiente proporción:

$$\frac{x}{y} = \frac{P}{W}$$

$$x = P$$

$$\frac{y}{W} = P \times \frac{h_{azud}/3}{\sum W} = 125 \times \frac{0.167}{2858} = 0.007$$

La resultante pasa desde B a:

$$F_a = \frac{\sum M}{\sum W} - \frac{y}{W} = 1.076 - 0.007 = 1.069m$$

Ahora la excentricidad es:

$$e = x_m - F_a = 0.98 - 1.069 = -0.089m$$

Esto quiere decir que la resultante pasa a  $8.9cm$  desde el centro de la base.

La presión que ejerce la estructura sobre la roca en el extremo A es la presión máxima y será:

$$f_A = \frac{W}{A} \left( 1 \pm 6 \times \frac{e}{d} \right)$$

$$f_A = \frac{2858}{1.96 \times 1} \left( 1 + 6 \times \frac{0.089}{1.96} \right)$$

$$f_A = 1060.8 \frac{kg}{m^2}$$

$$f_A = 0.106 \frac{kg}{cm^2}$$

$$f_A = \frac{2858}{1.96 \times 1} \left( 1 - 6 \times \frac{0.089}{1.96} \right)$$

$$f_A = 1855.4 \frac{kg}{m^2}$$

$$f_A = 0.186 \frac{kg}{cm^2}$$

Determinamos  $f_A$  es sumamente inferior a resistencia de la roca que tiene:

$$P_t > 1 \frac{kg}{cm^2}$$

## Deslizamiento

### Carga horizontal

Empuje del agua:

$$E_{agua} = \left[ \left( \frac{F_A + F_D}{2} \right) \right] \times 1.25 = \left[ \left( \frac{2875 + 1625}{2} \right) \right] \times 1.25 = 2812.5 \text{ kg}$$

Resistencia del agua:

$$R_{agua} = \left[ \frac{F_B \times (h_1 + 0.3)}{2} \right] = \left[ \frac{1074 \times (0.3 + 0.774)}{2} \right] = 576.738 \text{ kg}$$

$$Fr_{agua} = E_{agua} - R_{agua} = 2812.5 - 576.738 = 2235.762 \approx 2235.8 \text{ kg}$$

## Carga Vertical

$$\text{Concreto} = 2860 \text{ kg}$$

$$E_{\text{agua}} = \frac{F_C + F_D}{2} \times L = \frac{925 + 774}{2} \times 1.96 = 1665.02 \text{ kg}$$

$$R_{\text{agua}} = \frac{F_A + F_B}{2} \times \frac{L}{2} = \frac{2175 + 1074}{2} \times \frac{1.96}{2} = 1592.01 \text{ kg}$$

$$Fr_{\text{agua}} = \sum W + E_{\text{agua}} - R_{\text{agua}} = 2860 + 1665.02 - 1592.01 = 2933.01 \text{ kg}$$

Este peso actuando sobre la roca con un coeficiente de fricción de  $f_r = 0.85$  provoca una fuerza de:

$$F_{RT} = F_R \times f_r$$

$$F_{RT} = 2933.01 \times 0.85$$

$$F_{RT} = 2493.06 \text{ kg}$$

Esta fuerza se opone a la fuerza de resistencia del agua. Por lo tanto hay seguridad contra el deslizamiento porque:

$$2493.06 \text{ kg} > 2235.8 \text{ kg}$$

## Volteo

Momentos con respecto al punto B

Agua:

$$\text{Volt} = F_D \times \frac{h_t}{2} + (F_A - F_D) \times \frac{1.25^2}{2} + (2175 - 925) \times \frac{1.25}{2} \times \frac{1.25}{3} = 1595 \text{ kg.m}$$

Agua:

$$\text{Volt}_a = F_B \times \frac{x_t^2}{2} + (F_A - F_B) \times \frac{x_m}{2} \left( x_m + \frac{2}{3} \times x_m \right) =$$

$$1074 \times \frac{1.96^2}{2} + (2175 - 1074) \times \frac{0.98}{2} \left( 0.98 + \frac{2}{3} \times 0.98 \right) = 2944 \text{ kg.m}$$

$$\sum Mv = \text{Volt} + \text{Volt}_a = 1595 + 2944 = 4539 \text{ kg.m}$$

Este es el momento total de volteo. Ahora calculamos el momento total resistente:

$$M_{concreto} = 3074kg.m$$

$$M_{ag} = F_C \times \frac{x_t^2}{2} + (F_D - F_C) \frac{x_t}{2} \times x_t \times \frac{2}{3}$$

$$= 774 \times \frac{1.96^2}{2} + (925 - 774) \frac{1.96}{2} \times 1.96 \times \frac{2}{3} = 1680kg.m$$

$$\sum M_R = M_{concreto} + M_{ag} = 3074 + 1680 = 4754kg.m$$

$$\sum M_R > \sum M_v$$

$$4754 > 4539$$

### 3.1.1.3 Rejilla de admisión

Según la ecuación 2.16 se tiene:

$$Q_t = c \times \mu \times b \times L(2 \times g \times h)^{1/2}$$

Sabiendo que:

$$Q_t = 0.24m^3 / s$$

$h$ : Altura inicial del agua

$\mu = 0.75$  Para barrotes rectangulares

$h_0 = 0.2$ : Es el nivel mínimo de Aguas en Afluyente.

$\beta = 26^\circ$ : Donde  $\beta$  es el ángulo de inclinación de la rejilla, el cual debe ser lo mayor posible para facilitar la limpieza, el coeficiente de captación  $\chi$  se observa en la Tabla 2.1 que toma en cuenta el ángulo  $\beta$ .

De acuerdo a la tabla 2.1  $\chi = 0.8$  para un ángulo de  $26^\circ$  según la ecuación 2.17 tenemos:

$$c = 0.6 \times \left( \frac{a}{d} \right) \times (\cos \beta)^{3/2}$$

$a = 5cm$  Para Rejas Comunes esta abertura está entre  $3/4" - 1 1/2"$

Se escoge el espesor  $e$  de los barrotes de la rejilla:

$$e = \frac{1}{2}in = 0.0127m$$

Se encuentra el valor de la distancia entre ejes de los barros  $d$  según la ecuación 2.18:

$$d = a + e$$

$$d = 0.05 + 0.0127$$

$$d = 0.0627m$$

Remplazando en la ecuación 2.17 se tiene:

$$c = 0.6 \times \left( \frac{0.05}{0.0627} \right) \times (\cos 26)^{3/2}$$

$$c = 0.408$$

La altura inicial del agua ecuación 2.19 es:

$$h = \frac{2}{3} \times \chi \times h_0$$

$$h = \frac{2}{3} \times 0.8 \times 0.2$$

$$h = 0.107m$$

De acuerdo al ancho del afluente en el lugar que se va a realizar la captación se asume el valor del ancho de la toma de agua ( $b$ ), el cual será corregido posteriormente.

$$b = 2m \text{ (Valor asumido)}$$

El número de espacios entre los barros se calcula mediante la ecuación 2.20:

$$n = \frac{b}{a}$$

$$n = \frac{2}{0.05}$$

$$n = 40$$

Encontramos el número de barros según la ecuación 2.21:

$$N = n + 1$$

$$N = 40 + 1$$

$$N = 41$$

Con la ecuación 2.22 la longitud de la rejilla será:

$$L = \frac{Q_r}{c \times \mu \times b \times (2 \times g \times h)^{1/2}}$$

$$L = \frac{0.24}{0.408 \times 0.75 \times 2 \times (2 \times 9.81 \times 0.107)^{1/2}}$$

$$L = 0.27m$$

El ancho total de la bocatoma de agua  $b'$  ecuación 2.23 incluida la rejilla es:

$$b' = b + N \times e$$

$$b' = 2 + 41 \times 0.0127$$

$$b' = 2.52m$$

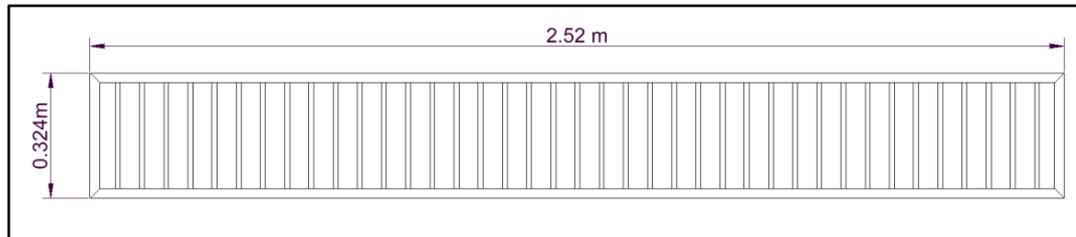
Para evitar que hojas y otros elementos puedan reducir el área de captación se aumenta el 20% de la longitud de la rejilla según la ecuación 2.24:

$$L' = 1.2L$$

$$L' = 1.2 \times 0.27$$

$$L' = 0.324m$$

**Figura 3.7. Dimensiones de la rejilla**



*Fuente: Autores*

#### 3.1.1.4 Galería o Canal Colector

El ancho del canal colector de la toma de agua  $B$  ecuación 2.25 es:

$$B = L' \times \cos \beta$$

$$B = 0.324 \times \cos 26$$

$$B = 0.29m$$

La profundidad crítica del canal según la ecuación 2.26 es:

$$Y_C = \left( \frac{Q_t^2}{g \times B^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$Y_C = \left( \frac{0.24^2}{9.81 \times 0.29^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$Y_C = 0.41m$$

La velocidad crítica del agua en el canal ecuación 2.27 es:

$$V_C = \sqrt{(g \times Y_C)}$$

$$V_C = \sqrt{(9.81 \times 0.41)}$$

$$V_C = 2m/s$$

La altura del agua al final del canal según la ecuación 2.28 es:

$$H_2 = 1.2 \times Y_C$$

$$H_2 = 1.2 \times 0.41$$

$$H_2 = 0.49m$$

Para asegurar un mejor funcionamiento se elige un factor de seguridad  $K_s = 0.5$  según la ecuación 2.29 tenemos:

$$P_p = 0.5 \times H_2$$

$$P_p = 0.5 \times 0.49$$

$$P_p = 0.25m$$

Para el muro de contención se escoge un ancho de 10 cm:

$$a_m = 0.1m$$

Calculamos la longitud del canal colector con la ecuación 2.30:

$$b'' = \frac{(b' + a_m)}{\cos \phi}$$

$$\phi = 5^\circ$$

Remplazando los valores tenemos:

$$b'' = \frac{(2.52 + 0.1)}{\cos 5}$$

$$b'' = 2.63m$$

La altura de la pendiente de la canal ecuación 2.31 es:

$$h' = b'' \sin \phi$$

$$h' = 2.63 \sin 5$$

$$h' = 0.23m$$

La altura inicial del agua ecuación 2.32 es:

$$H_1 = \sqrt{\frac{2 \times Y_c^3}{H_2} + \left(H_2 - \frac{b'' \times I}{3}\right)^2} - \frac{2 \times b'' \times I}{3}$$

$$H_1 = \sqrt{\frac{2 \times 0.41^3}{0.49} + \left(0.49 - \frac{2.63 \times 0.05}{3}\right)^2} - \frac{2 \times 2.63 \times 0.05}{3}$$

$$H_1 = 0.65m$$

La velocidad final del agua en el canal según la ecuación 2.33 es:

$$V_f = \frac{Q_t}{H_2 \times B}$$

$$V_f = \frac{0.24}{0.49 \times 0.29}$$

$$V_f = 1.69m/s$$

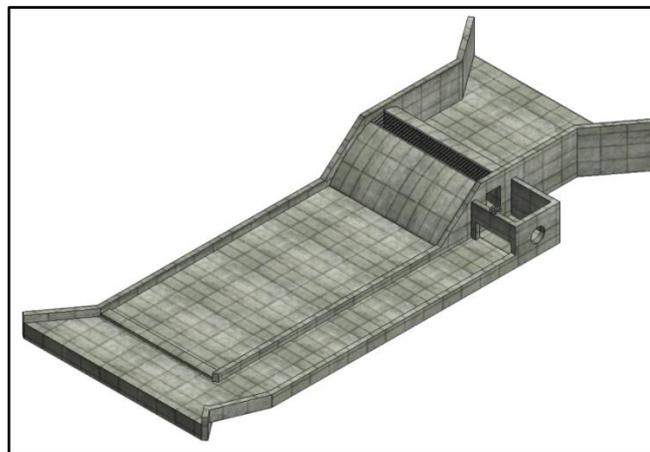
Para comprobar que el diseño de la galería es correcto debe cumplir que:

$$V_f < V_c$$

$$1.69 < 2$$

Debido a que cumple la condición anterior, se puede decir que la galería o canal colector está bien dimensionada. La forma de la bocatoma se puede observar en la figura 3.8.

**Figura 3.8. Bocatoma**

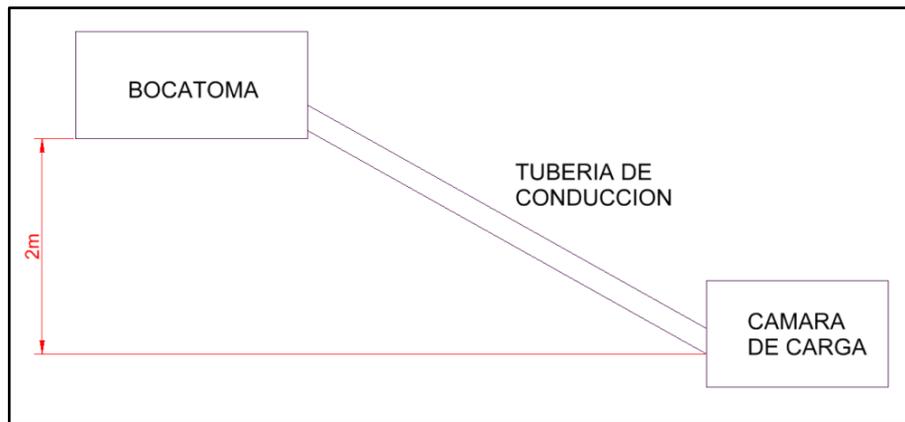


*Fuente: Autores*

### 3.1.2 Tubería de Conducción

Debido a razones de costo, facilidad de instalación y topografía del terreno, se tomará en cuenta la instalación de la tubería para la conducción de PVC por lo que se debe tener en cuenta las propiedades del material en cuestión, ya que la construcción de un canal abierto resultaría muy difícil y costosa por la topografía del sector en estudio.

**Figura 3.9. Tubería de conducción**



*Fuente: Autores*

La figura 3.9 da una idea para el cálculo del diámetro de la tubería de conducción en la misma que no se incluyen accesorios para la instalación de la tubería desde la bocatoma hasta la cámara de carga. Estos accesorios producen pérdidas de presión que para el cálculo se representan por  $k$  en metros; la sumatoria de las pérdidas por accesorios se resumen en la tabla 3.2.

<b>Tabla 3.2. Pérdidas en accesorios en la tubería de conducción</b>			
Accesorios	Cantidad	K(m)	Total Pérdidas
Codo 90°	1	0.6	0.6
Entrada	1	1	1
			Total =1.6 m

*Fuente: Autores*

Sabiendo que:

$$L = 6m$$

$$\Delta H = 2m$$

$$\lambda = 0.015 \text{ Valor tentativo}$$

Remplazamos en la ecuación 2.34 obtenemos una ecuación de 5to grado:

$$4.2 \times 10^4 D^5 - 160D - 9 = 0$$

Al resolver la ecuación anterior tenemos un diámetro inicial de:

$$D = 0.26m$$

Con este diámetro calculamos el número de Reynolds según la ecuación 2.35:

$$Re = \frac{Q_t \times D}{A \times \nu}$$

Donde:

$$\nu = 8.94 \times 10^{-7} m^2 / s$$

$$A = \frac{\pi \times D^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi \times 0.26^2}{4}$$

$$A = 0.05m^2$$

Remplazando valores tenemos:

$$Re = \frac{0.24 \times 0.26}{0.05 \times 8.94 \times 10^{-7}}$$

$$Re = 1.4 \times 10^6$$

Determinamos la relación según la ecuación 2.36:

$$\frac{k}{D}$$

Donde  $k = 0.003mm$  es el valor de la rugosidad absoluta. (Anexo II)

$$\frac{k}{D} = 0.00001$$

Mediante el diagrama de MOODY Anexo III determinamos un nuevo valor de  $\lambda$  con el cual se refina el diámetro obtenido en sucesivas iteraciones hasta encontrar el valor definitivo. Los valores de las iteraciones se resumen en la tabla 3.3.

<b>Tabla 3.3. Valores de iteración de tubería de conducción</b>			
$\lambda$	Diámetro (m)	Reynolds	$k / D$
0.015	0.26	$1.4 \times 10^6$	0.00001
0.0168	0.262	$1.3 \times 10^6$	0.000012
0.0169	0.262	$1.3 \times 10^6$	0.000012

Fuente: Autores

Como los diámetros últimos no difieren se puede decir que se acepta el diámetro de 0.262 m, es decir se toma una tubería de PVC cuyo diámetro comercial tiene las siguientes dimensiones, en el Anexo XIV se muestran las características de la tubería según el fabricante.

<b>Tabla 3.4. Elección de diámetro comercial de la tubería de conducción</b>					
Marca	Diámetro Nominal (mm)	Diámetro Interior (mm)	Presión de trabajo		
			MPa	Psi	kgf / cm <sup>2</sup>
Plastigama	315	299.6	0.63	91	6.43

Fuente: Autores

Con el diámetro de la tubería comercial se tiene:

$$Re = 1.2 \times 10^6$$

$$\frac{k}{D} = 0.00001$$

$$\lambda = 0.017$$

Las pérdidas secundarias se obtienen mediante la ecuación 2.34.

$$\Delta H = \frac{16 \times 0.24^2}{2g\pi^2 \times 2996^4} \left( 0.017 \frac{6}{0.2996} + 1.6 \right)$$

$$\Delta H = 1.15m$$

La diferencia de alturas entre la bocatoma y el tanque desarenador es mayor que las pérdidas se demuestra que la tubería escogida es apta y suficiente para conducir el caudal especificado.

### 3.1.3 Desarenador y Cámara de Carga

La longitud de decantación se calcula con la ecuación 2.37:

$$L_d = \frac{V_H}{V_d} \times d_d \times f$$

Donde:

$$f = 2$$

$$V_H = 0.2 \text{ m/s}$$

$$V_d = 0.03 \text{ m/s}$$

$$d_d = 1 \text{ m Valor asumido}$$

Remplazando valores tenemos:

$$L_d = \frac{0.2}{0.03} \times 1 \times 2$$

$$L_d = 13 \text{ m}$$

El ancho del desarenador es:

$$W = \frac{Q_t}{V_H \times d_d}$$

$$W = \frac{0.24}{0.2 \times 0.8}$$

$$W = 1.5 \text{ m}$$

La longitud de entrada y salida del desarenador debe ser 2.5 veces el ancho de la zona de decantación, es decir:

$$L_e = L_s = 2.5 \times W$$

$$L_e = L_s = 2.5 \times 1.5$$

$$L_e = L_s = 3.75 \text{ m}$$

Se supone que el volumen de sedimento que se deposita antes de la limpieza del desarenador es  $20 \text{ m}^3$ , la profundidad del tanque colector es de:

$$d_r = \frac{\text{Capacidad del Tanque}}{W \times L_d}$$

$$d_r = \frac{10}{3.75 \times 13}$$

$$d_r = 0.512m$$

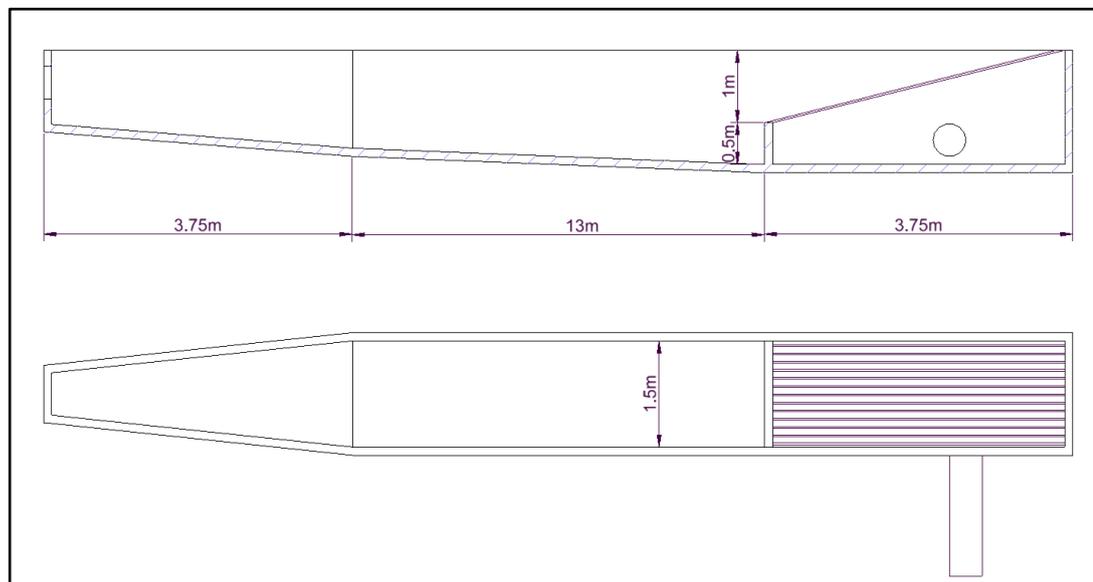
La altura total es igual a:

$$h_{total} = d_d + d_r$$

$$h_{total} = 1 + 0.512$$

$$h_{total} = 1.512m$$

**Figura 3.10. Dimensiones del desarenador y Cámara de Carga**



*Fuente: Autores*

## 3.2 DISEÑO HIDRÁULICO

### 3.2.1 Tubería de Presión

Para la tubería de presión se analiza la alternativa de PVC, por todas las ventajas que esta poseen, para lo cual tentativamente asumimos un diámetro de:

$$D_{ext} = 400mm$$

$$D = 362mm$$

La rugosidad absoluta del PVC es  $k = 0.003mm$

A continuación se halla la relación:

$$\frac{k}{D} = 0.000008$$

Calculamos el número de Reynolds:

$$\text{Re} = \frac{Q_t \times D}{A \times v}$$

$$A = \frac{\pi \times D^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi \times 0.362^2}{4}$$

$$A = 0.1m^2$$

$$\text{Re} = \frac{0.24 \times 0.362}{0.1 \times 8.94 \times 10^{-7}}$$

$$\text{Re} = 1 \times 10^6$$

En el diagrama de MOODY Anexo III se encuentra el factor de fricción:

$$\lambda = 0.017$$

Se calcula las pérdidas de carga en metros debido a la fricción en las paredes de la tubería con la ecuación 2.39:

$$h_f = 0.08 \frac{\lambda \times L \times Q_t^2}{D^5}$$

$$h_f = 0.08 \frac{0.017 \times 206 \times 0.24^2}{0.362^5}$$

$$h_f = 2.59m$$

La velocidad del agua en la tubería viene dada por la ecuación 2.40:

$$Q_t = A \times V$$

$$V = \frac{Q_t}{A}$$

$$V = \frac{0.24}{0.1}$$

$$V = 2.4 \frac{m}{s}$$

Calculamos las pérdidas por turbulencia en cada uno de los accesorios como se muestra en la tabla 3.5.

<b>Tabla 3.5. Pérdidas por turbulencia en accesorios en la tubería de presión</b>			
Accesorios	Cantidad	$k(m)$	Total Pérdidas
Codo 90°	1	0.6	0.6
Codo 45°	2	0.45	0.9
Válvula de compuerta	1	0.1	0.19
Entrada	1	1	1
			<b>Total = 2.6 m</b>

*Fuente: Autores*

De la ecuación 2.41 se tiene la expresión que sirve para hallar las pérdidas de presión en los accesorios, expresados en metros de columna de agua en la tubería de presión:

$$h_t = \frac{V^2}{2g} (\sum k)$$

$$h_t = \frac{2.4^2}{2 \times 9.81} \times (2.6)$$

$$h_t = 0.76m$$

Las pérdidas de carga total están dadas por la ecuación 2.42:

$$h_p = h_f + h_t$$

$$h_p = 2.59 + 0.76$$

$$h_p = 3.35m$$

Calculamos la pérdida porcentual de caída debido a la fricción con la ecuación 2.43:

$$perdidas \% = \frac{h_p \times 100}{H}$$

$$perdidas \% = \frac{3.35 \times 100}{28}$$

$$perdidas \% = 11.9\%$$

$$3\% < perdidas \% < 13\%$$

Como se cumple con la relación se puede decir que se necesita una tubería de  $D_{ext} = 400mm$ , marca PLASTIGAMA para la tubería de presión de tal manera que las pérdidas por rozamiento en las paredes de la tubería y las pérdidas por turbulencia en los accesorios no sobrepasen los estándares establecidos.

Luego de encontrar el diámetro de la tubería se procede a calcular el espesor de esta, para que pueda soportar las presiones máximas que se espera que soporte la tubería. La presión transitoria puede expresarse como caída de agua  $\Delta H$ , que se calcula a continuación, ecuación 2.45:

$$\Delta H = \frac{a \times V}{g}$$

Donde:

$a = 350 \frac{m}{s}$ , Es la velocidad de propagación de la onda de presión

$V$  = Es la velocidad del agua

Remplazando valores tenemos:

$$\Delta H = \frac{350 \times 2.4}{9.81}$$

$$\Delta H = 85.63m$$

Calculamos la caída total en la tubería cuando ocurren golpes de ariete, ecuación 2.46:

$$H_t = \Delta H + h_p$$

$$H_t = 85.63 + 3.35$$

$$H_t = 88.98m$$

Por último se procede a calcular el espesor de la tubería de presión  $T$ , en este caso no existen juntas soldadas por lo que  $k_j$  no se incluye y el factor de corrosión  $K_C$  no se incluye debido a la naturaleza del material, ecuación 2.47:

$$T = \frac{5 \times f_s \times H_t \times 10^6 \times D \times k_j}{S} + K_C$$

Donde:

$f_s = 3$ . Factor de seguridad se recomienda un valor de 3

$$S = 28 \frac{MN}{m^2}$$

Remplazando tenemos:

$$T = \frac{5 \times 3 \times 88.98 \times 10^6 \times 0.362}{28 \times 10^6}$$

$$T = 17.3mm$$

Las dimensiones de la tubería a usarse. Estos cálculos se resumen en la tabla 3.6 además en el Anexo XV se puede ver las características generales de la tubería

Tabla 3.6. Dimensiones de la tubería de presión					
Material	Marca	Diámetro exterior (mm)	Diámetro Interior (mm)	Presión de trabajo	
				MPa	Psi
PVC	PLASTIGAMA	400	362	1.25	181

Fuente: Autores

### 3.2.1.1 Apoyos

Para tuberías de PVC como en nuestro caso se recomienda un apoyo por cada pieza de tubería, con el propósito de evitar que existan flexiones excesivas que puedan fracturar a la tubería. Es necesario determinar el peso de la tubería con y sin agua para iniciar el proceso de cálculo de los apoyos como se muestra a continuación:

El peso del tubo por unidad de longitud según la ecuación 2.53 es:

$$W_t = \gamma_t \times \frac{\pi}{4} (D_e^2 - D^2)$$

Donde:

$$\gamma_t = 1440 \frac{kg}{m^3}$$

$$D_e = 0.4m$$

$$D = 0.362m$$

Remplazando en la ecuación 2.53 se tiene:

$$W_t = 1440 \times \frac{\pi}{4} (0.4^2 - 0.362^2)$$

$$W_t = 32.75 \frac{kg}{m}$$

Peso del agua por unidad de longitud dentro del tubo según la ecuación 2.54:

$$W_a = \gamma_a \times \frac{\pi}{4} D^2 \quad (ec : 3.2)$$

Donde:

$$\gamma_a = 1000 \frac{kg}{m^3}.$$

Remplazando en la ecuación 3.2 tenemos:

$$W_a = 1000 \times \frac{\pi}{4} \times 0.362^2$$

$$W_a = 102.92 \frac{kg}{m}$$

El peso total que interviene en los apoyos será, ecuación 2.49:

$$W = W_t + W_a$$

$$W = 32.75 + 102.92$$

$$W = 135.67 \frac{kg}{m}$$

Según la ecuación 2.48 la componente del peso del tubo con agua por unidad de longitud perpendicular al tubo es:

$$F_1 = W \times L_a \times \cos \alpha$$

$$F_1 = 135.67 \times 6 \times \cos(8^\circ)$$

$$F_1 = 806 \text{ kg}$$

Fuerza de fricción entre el apoyo y el tubo ecuación 2.51 es:

$$F_2 = \mu F_1$$

Donde:

$$\mu = 0.6$$

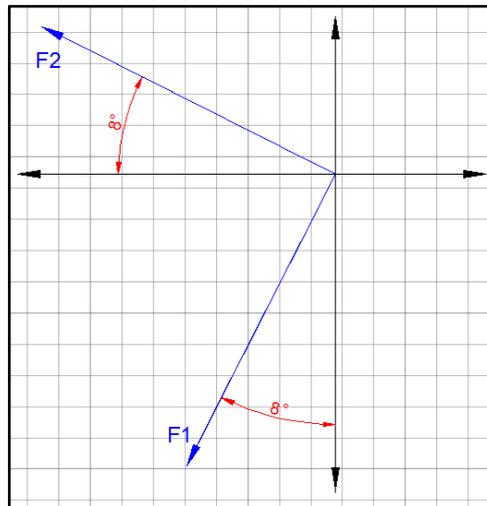
Remplazando en la ecuación 2.51 tenemos:

$$F_2 = 0.6 \times 806$$

$$F_2 = 483.6 \text{ kg}$$

Al dibujar estas fuerzas en un diagrama de cuerpo libre tenemos:

**Figura 3.11. Diagrama fuerzas F1 y F2**



*Fuente: Autores*

Calculamos el momento flector originado por el peso del tubo y agua, ecuación 2.56:

$$M = W \times \frac{L_a^2}{8}$$

$$M = 135.67 \times \frac{6^2}{8}$$

$$M = 610.52 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

De la misma manera calculamos la flecha máxima, ecuación 2.55.

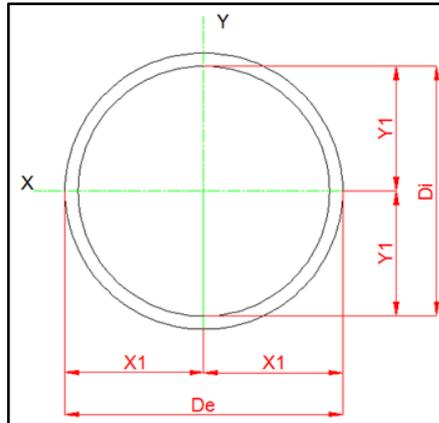
$$\Delta_{\max} = \frac{5}{384} \times \frac{W \times L_a^4}{E \times I}$$

Donde:

$E = 2.75 \text{ GPa}$ : Módulo de elasticidad del material de la tubería, en nuestro caso para el PVC.

$I$  : Momento de inercia de la sección.

**Figura 3.12. Inercia de la sección**



*Fuente: Autores*

$$I = I_x = I_y$$

$$I = \frac{\pi}{64} (D_e^4 - D_i^4)$$

$$I = \frac{\pi}{64} (0.4^4 - 0.362^4)$$

$$I = 4.14 \times 10^{-4} \text{ m}^4$$

Remplazando los valores en la ecuación 2.55, la máxima deformación en la tubería debido al peso de la misma es igual a:

$$\Delta_{\max} = \frac{5}{384} \times \frac{135.67 \times 6^4}{2.75 \times 10^9 \times 4.14 \times 10^{-4}}$$

$$\Delta_{\max} = 0.0073 \text{ m}$$

$$\Delta_{\max} = 7.3 \text{ mm}$$

En el caso de una viga simplemente apoyada se tiene que la flecha admisible es, ecuación 2.57:

$$\Delta_{adm} = \frac{1}{360} \times L_a$$

$$\Delta_{adm} = \frac{1}{360} \times 6$$

$$\Delta_{adm} = 0.017 \text{ m}$$

$$\Delta_{adm} = 17 \text{ mm}$$

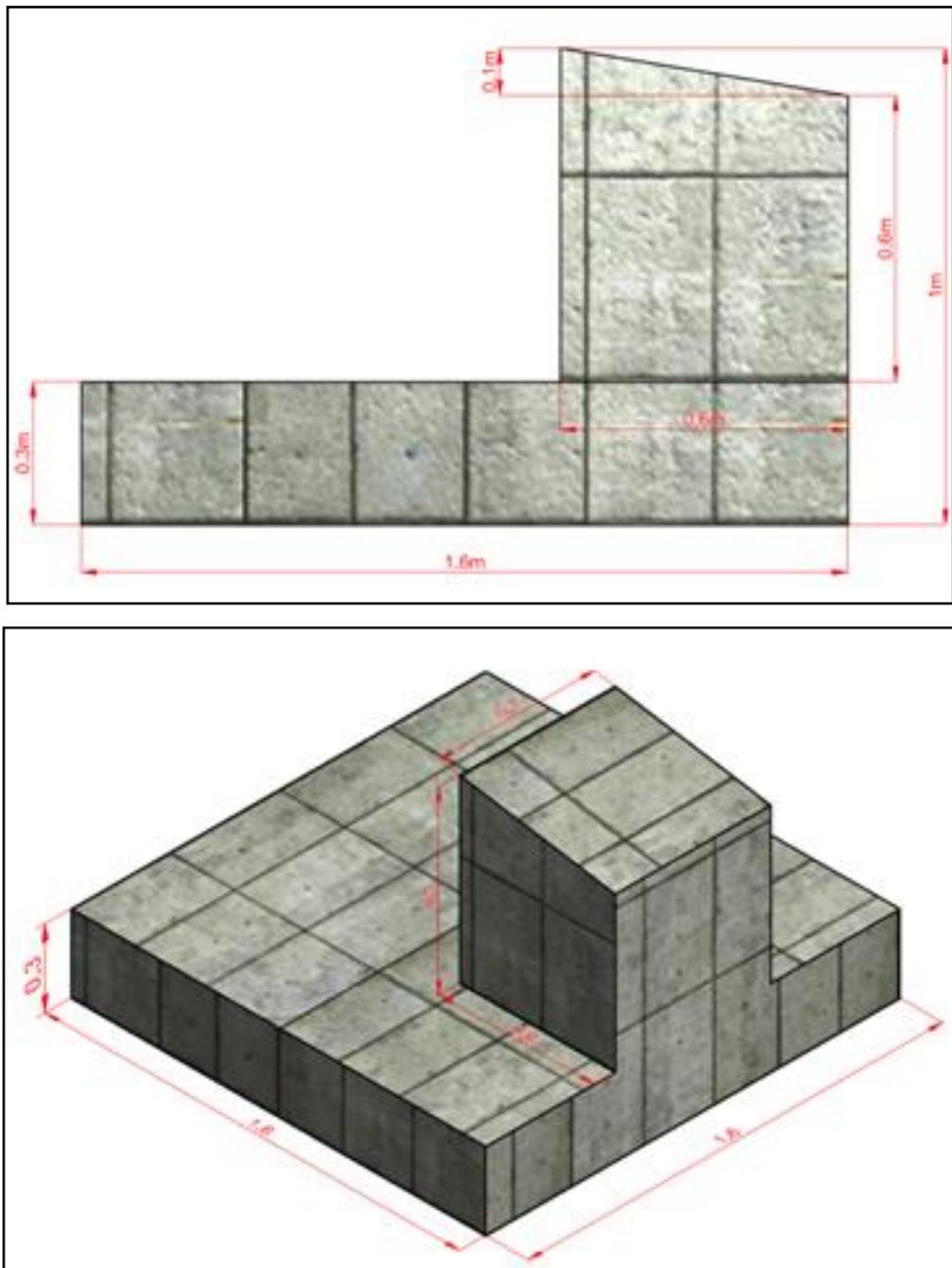
Luego:

$$\Delta_{\max} < \Delta_{adm}$$

$$7.3\text{mm} < 17\text{mm}$$

Como la flecha admisible es mucho mayor que la flecha máxima encontrada en la tubería se demuestra que el espaciamiento entre apoyos es suficiente y no produce deformaciones excesivas que puedan dañar la tubería. Una vez determinado la distancia entre apoyos se procede a escoger unas medidas tentativas del apoyo como se muestra en la figuras 3.13.

**Figura 3.13. Dimensiones del apoyo**



Fuente: Autores

Calculamos el peso del bloque de concreto, ecuación 2.58:

$$W_C = \gamma_C \times V_C$$

Donde:

$$\gamma_C = 2300 \frac{kg}{m^3}.$$

**Volumen del apoyo:**

$$V_1 = 1.6 \times 1.6 \times 0.3 = 0.77m^3$$

$$V_2 = 0.6 \times 0.6 \times 0.6 = 0.22m^3$$

$$V_3 = \frac{0.6 \times 0.1}{2} \times 0.6 = 0.018m^3$$

$$V_C = V_1 + V_2 + V_3$$

$$V_C = 1m^3$$

Remplazando los valores en la ecuación 2.58 tenemos:

$$W_C = 2300 \times 1$$

$$W_C = 2300kg$$

**Calculo de estabilidad del apoyo**

Las tres condiciones que determinan si el apoyo es estable son las siguientes:

- 1ra condición:  $\sum F_x < \mu \sum F_y$
- 2da condición:  $S_{adm} > S_{base}$
- 3ra condición:  $S_{min} > 0$

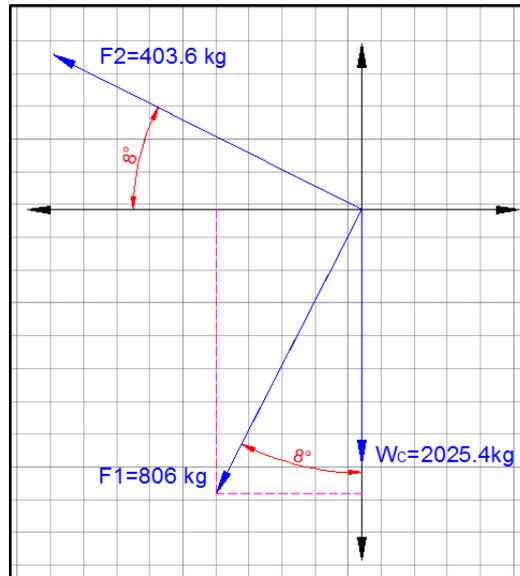
Para determinar la estabilidad de los apoyos hay que analizar para los dos casos que se presentan en la tubería de presión estos son cuando la tubería se dilata y cuando se contrae.

**Primer caso: Cuando la tubería se dilata**

**Primera condición:**

Para verificar la primera condición se realiza la sumatoria de fuerzas como se muestra en la figura 3.14:

**Figura 3.14. Diagrama de fuerzas en el Apoyo**



Fuente: Autores

Calculamos  $\sum F_x$

$$\begin{aligned} \rightarrow +: \sum F_x &= -F_2 \cos(\alpha) - F_1 \sin(\alpha) \\ \sum F_x &= -483.6 \cos(8) - 806 \sin(8) \\ \sum F_x &= -591 \text{ kg} \end{aligned}$$

Calculamos  $\sum F_y$

$$\begin{aligned} \uparrow +: \sum F_y &= F_2 \sin(\alpha) - F_1 \cos(\alpha) - W_c \\ \sum F_y &= 483.6 \sin(8) - 806 \cos(8) - 2300 \\ \sum F_y &= -3030.9 \text{ kg} \end{aligned}$$

Aplicando la primera condición:

$$\sum F_x < \mu \sum F_y$$

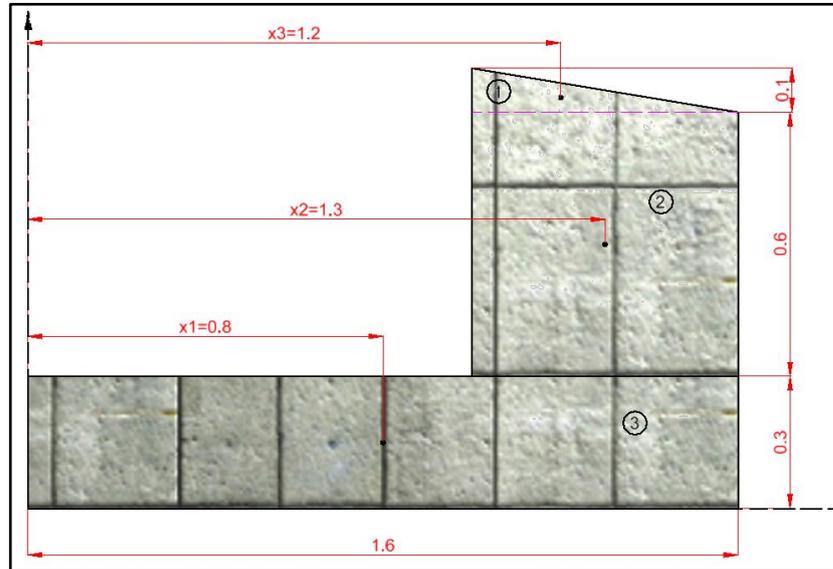
Tomamos el caso más desfavorable  $\mu_t = 0.2$ :

$$\begin{aligned} 591 &< 0.2 \times 3030.9 \\ 591 &< 606.2 \end{aligned}$$

**Segunda condición:**

Primero encontramos la abscisa  $x$ , del centro de gravedad del bloque por el método de las áreas.

**Figura 3.15. Centro de gravedad del Apoyo**



*Fuente: Autores*

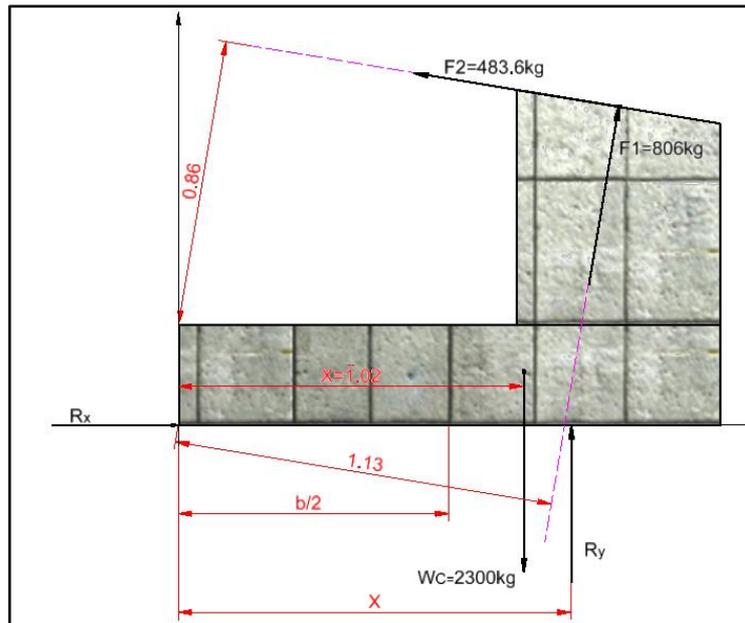
$$\bar{X} = \frac{\sum A_i X_i}{\sum A_i}$$

$$\bar{X} = \frac{1.6 \times 0.3 \times 0.8 + 0.6 \times 0.6 \times 1.3 + \frac{(0.6 \times 0.1)}{2} \times 1.2}{1.6 \times 0.3 + 0.6 \times 0.6 + \frac{0.6 \times 0.1}{2}}$$

$$\bar{X} = 1.02m$$

Calculo de  $R_y$  y  $X$

**Figura 3.16. Fuerzas que intervienen en el Apoyo**



Fuente: Autores

$$\sum M_o + = 0$$

$$F_1 \times 1.13 - F_2 \times 0.86 + W_c \times 0.94 - R_y \times X = 0$$

$$806 \times 1.13 - 483.6 \times 0.86 + 2300 \times 1.02 - R_y \times X = 0$$

$$R_y \times X = 2840 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$\uparrow + \sum F_y = 0$$

$$F_2 \sin(\alpha) - F_1 \cos(\alpha) - W_c + R_y = 0$$

$$483.6 \sin(8) - 806 \cos(8) - 2300 + R_y = 0$$

$$R_y = 3030.9 \text{ kg}$$

Remplazando valores tenemos:

$$3030.9 X = 2840$$

$$X = 0.94 \text{ m}$$

Conociendo  $X = 0.94 \text{ m}$ ;  $b/2 = 0.8 \text{ m}$ . Determinamos los esfuerzos máximo y mínimo de compresión sobre el terreno según la ecuación 2.59:

$$S_{base} = \frac{R_y}{A} \times \left( 1 \pm \frac{6e}{b} \right)$$

La excentricidad de la relación está dada por la ecuación 2.60.

$$e = X - \frac{b}{2}$$

$$e = 0.94 - 0.8$$

$$e = 0.14m$$

Remplazando los valores en la ecuación 2.59 tenemos:

$$S_{base(min)} = \frac{R_y}{A} \div \left( 1 \pm \frac{6e}{b} \right)$$

$$S_{base(min)} = \frac{3030.9}{1.6 \times 1.6} \times \left( 1 + \frac{6 \times 0.04}{1.6} \right)$$

$$S_{base(min)} = 1805.5 \frac{kg}{m^2}$$

$$S_{base(min)} = 0.18 \frac{kg}{cm^2}$$

$$S_{base(max)} = \frac{R_y}{A} \times \left( 1 \pm \frac{6e}{b} \right)$$

$$S_{base(max)} = \frac{3030.9}{1.6 \times 1.6} \times \left( 1 - \frac{6 \times 0.14}{1.6} \right)$$

$$S_{base(max)} = 562.4 \frac{kg}{m^2}$$

$$S_{base(max)} = 0.06 \frac{kg}{cm^2}$$

Consideramos  $S_{base(adm)} = 1 \frac{kg}{cm^2}$  del suelo:

$$S_{adm} > S_{base}$$

$$1 > 0.18$$

$$1 > 0.06$$

**Tercera condición:**

$$S_{base(min)} > 0$$

$$0.14 > 0$$

**Segundo caso: cuando la tubería se contrae**

$$\begin{aligned}\sum F_x &= -F_1 \sin(\alpha) + F_2 \cos(\alpha) \\ \sum F_x &= -806 \sin(8) + 483.6 \cos(8) \\ \sum F_x &= 366.7 \text{ kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sum F_y &= -F_1 \cos(\alpha) - F_2 \sin(\alpha) - W \\ \sum F_y &= -806 \cos(8) - 483.6 \sin(8) - 2300 \\ \sum F_y &= -806 \cos(8) - 483.6 \sin(8) - 2300 \\ \sum F_y &= -3165.5 \text{ kg} \\ R_y &= 3165.5 \text{ kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sum M_o &= 0 \\ F_1 \times 1.13 + F_2 \times 0.86 + W_c \times 0.94 - R_y \times X &= 0 \\ 806 \times 1.13 + 483.6 \times 0.86 + 2300 \times 1.02 - R_y \times X &= 0 \\ R_y \times X &= 3672.7 \text{ kg} \cdot \text{m}\end{aligned}$$

Remplazamos valores tenemos:

$$\begin{aligned}3165.5X &= 3672.7 \\ X &= 1.16 \text{ m}\end{aligned}$$

Conociendo  $X = 1.16 \text{ m}$ ;  $b/2 = 0.8 \text{ m}$ . Determinamos los esfuerzos máximo y mínimo de compresión sobre el terreno según la ecuación 2.59:

$$S_{base} = \frac{R_y}{A} \times \left( 1 \pm \frac{6e}{b} \right)$$

La excentricidad de la relación vertical está dada por la ecuación 2.60.

$$\begin{aligned}e &= X - \frac{b}{2} \\ e &= 1.16 - 0.8 \\ e &= 0.36 \text{ m}\end{aligned}$$

Remplazando valores tenemos:

$$S_{base(\min)} = \frac{R_y}{A} \times \left(1 \pm \frac{6e}{b}\right)$$

$$S_{base(\min)} = \frac{3165.5}{1.6 \times 1.6} \times \left(1 + \frac{6 \times 0.36}{1.6}\right)$$

$$S_{base(\min)} = 2905.8 \frac{kg}{m^2}$$

$$S_{base(\min)} = 0.3 \frac{kg}{cm^2}$$

$$S_{base(\max)} = \frac{R_y}{A} \times \left(1 \pm \frac{6e}{b}\right)$$

$$S_{base(\max)} = \frac{3165.5}{1.6 \times 1.6} \times \left(1 - \frac{6 \times 0.36}{1.6}\right)$$

$$S_{base(\max)} = -432.8 \frac{kg}{m^2}$$

$$S_{base(\max)} = -0.4 \frac{kg}{cm^2}$$

**Primera condición:**

$$\sum F_x < \mu \sum F_y$$

$$366.7 < 0.2 \times 3165.5$$

$$366.7 < 633.1$$

**Segunda condición:**

$$S_{adm} > S_{base}$$

$$1 > 0.3$$

$$1 > -0.4$$

**Tercera condición:**

$$S_{base(\min)} > 0$$

$$0.3 > 0$$

Como se comprobó que cumplen las tres condiciones de estabilidad tanto para el caso en la tubería se expande, como para el caso en el que la tubería se contrae podemos decir entonces que el apoyo está bien diseñado.

### 3.2.1.2 Anclajes

Debemos determinar las fuerzas actuantes en los anclajes la cual depende mucho del material de la tubería de presión como se observara posteriormente.

a. **Componente del peso de la tubería con agua perpendicular a ella  $F_1$  :**

**Figura 3.17. Fuerza debido al peso de la tubería con agua**



*Fuente: Autores*

Aplicando la ecuación 2.61 tenemos:

$$F_1 = (W_t + W_a) \times L_1 \times \cos \alpha$$

$$F_1 = (32.75 + 102.92) \times 3 \times \cos(8)$$

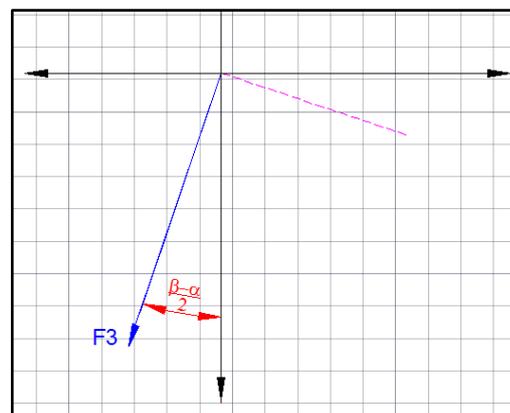
$$F_1 = 403 \text{ kg}$$

b. **Fuerza de fricción entre la tubería y los apoyos  $F_2$**

El valor de  $F_2 = 0$  debido a que no existen juntas de dilatación

c. **Fuerza en los cambios de dirección debido a la presión hidrostática  $F_3$  :**

**Figura 3.18. Fuerza debido a cambio de presión hidrostática**



Fuente: Autores

Con la ecuación 2.63 se obtiene:

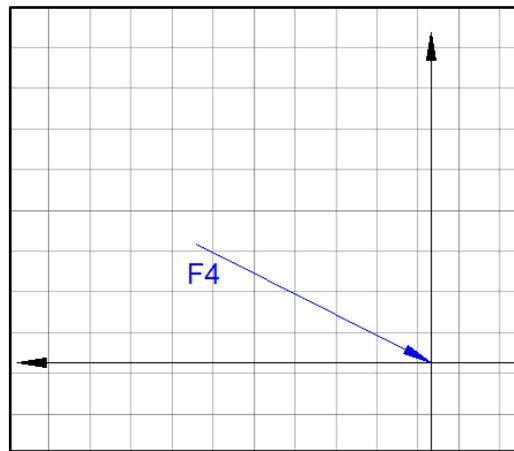
$$F_3 = 1.6 \times 10^3 \times H \times D^2 \times \sin\left(\frac{\beta - \alpha}{2}\right)$$

$$F_3 = 1.6 \times 10^3 \times 28 \times 0.362^2 \times \sin\left(\frac{0 - 8}{2}\right)$$

$$F_3 = -409.5 \text{ kg}$$

d. Fuerza del peso de la tubería paralela a ella  $F_4$  :

Figura 3.19. Fuerza del peso de la tubería paralela a ella



Fuente: Autores

Aplicando la ecuación 2.64:

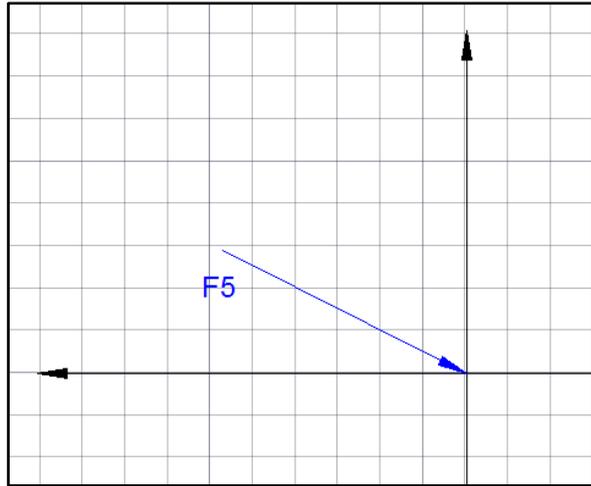
$$F_4 = W_t \times L_4 \times \sin \alpha$$

$$F_4 = 32.75 \times 6 \times \sin(8)$$

$$F_4 = 27.4 \text{ kg}$$

e. Fuerza debido a cambios de temperatura en la tubería  $F_5$  :

Figura 3.20. Fuerza debido a cambio de temperatura



Fuente: Autores

La fuerza 5 se determina mediante la ecuación 2.65:

$$F_5 = 31 \times D_{ext} \times T \times E \times a \times \Delta t$$

$$F_5 = 31 \times 0.4 \times 19 \times 28 \times 10^3 \times 54 \times 10^{-6} \times 10$$

$$F_5 = 2913.4 \text{ kg}$$

**f. Fuerza de fricción en la junta de dilatación  $F_6$  :**

Debido que no tenemos junta de dilatación

$$F_6 = 0$$

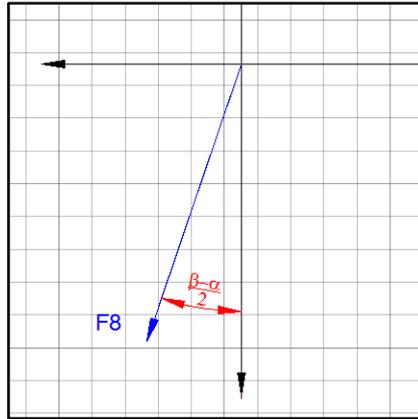
**g. Fuerza debida a la presión hidrostática dentro de las juntas de expansión  $F_7$  :**

Como no existen juntas de expansión en consecuencia la fuerza es:

$$F_7 = 0$$

**h. Fuerza debida al cambio de dirección de la cantidad de movimiento  $F_8$  :**

**Figura 3.21. Fuerza debido al cambio de dirección**



Fuente: Autores

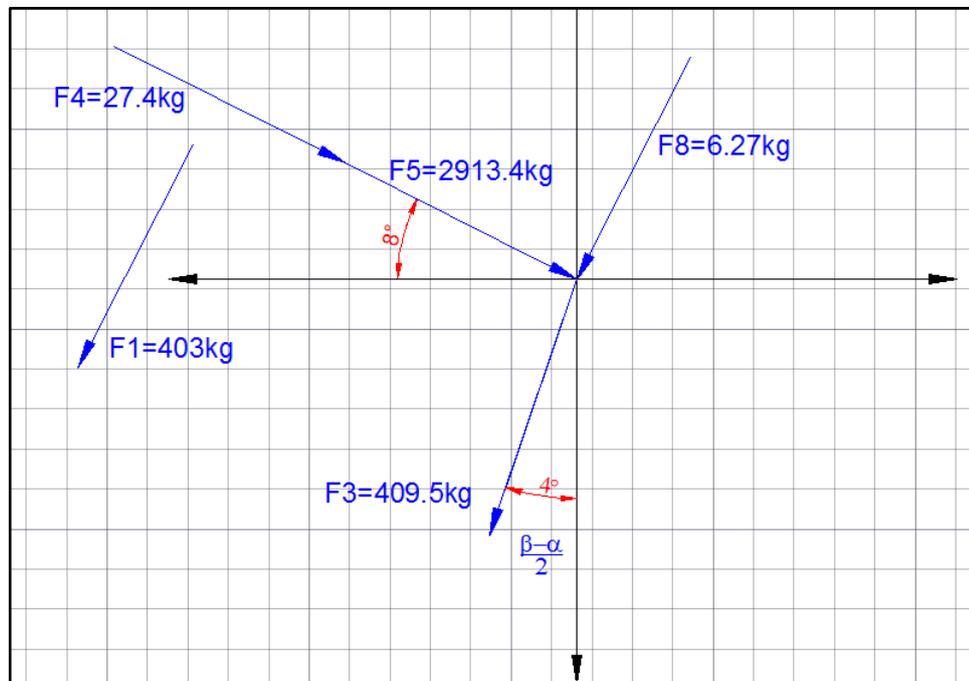
$F_8$  Esta dada por la ecuación 2.68:

$$F_8 = 250 \left( \frac{Q_t}{D} \right)^2 \times \sin \left( \frac{\beta - \alpha}{2} \right)$$

$$F_8 = 250 \left( \frac{0.24}{0.4} \right)^2 \times \sin \left( \frac{0 - 8}{2} \right)$$

$$F_8 = -6.27 \text{ kg}$$

**Figura 3.22. Resumen de fuerzas actuantes del Apoyo**



Fuente: Autores

**i. Fuerza de fricción en la junta de dilatación  $F_9$  :**

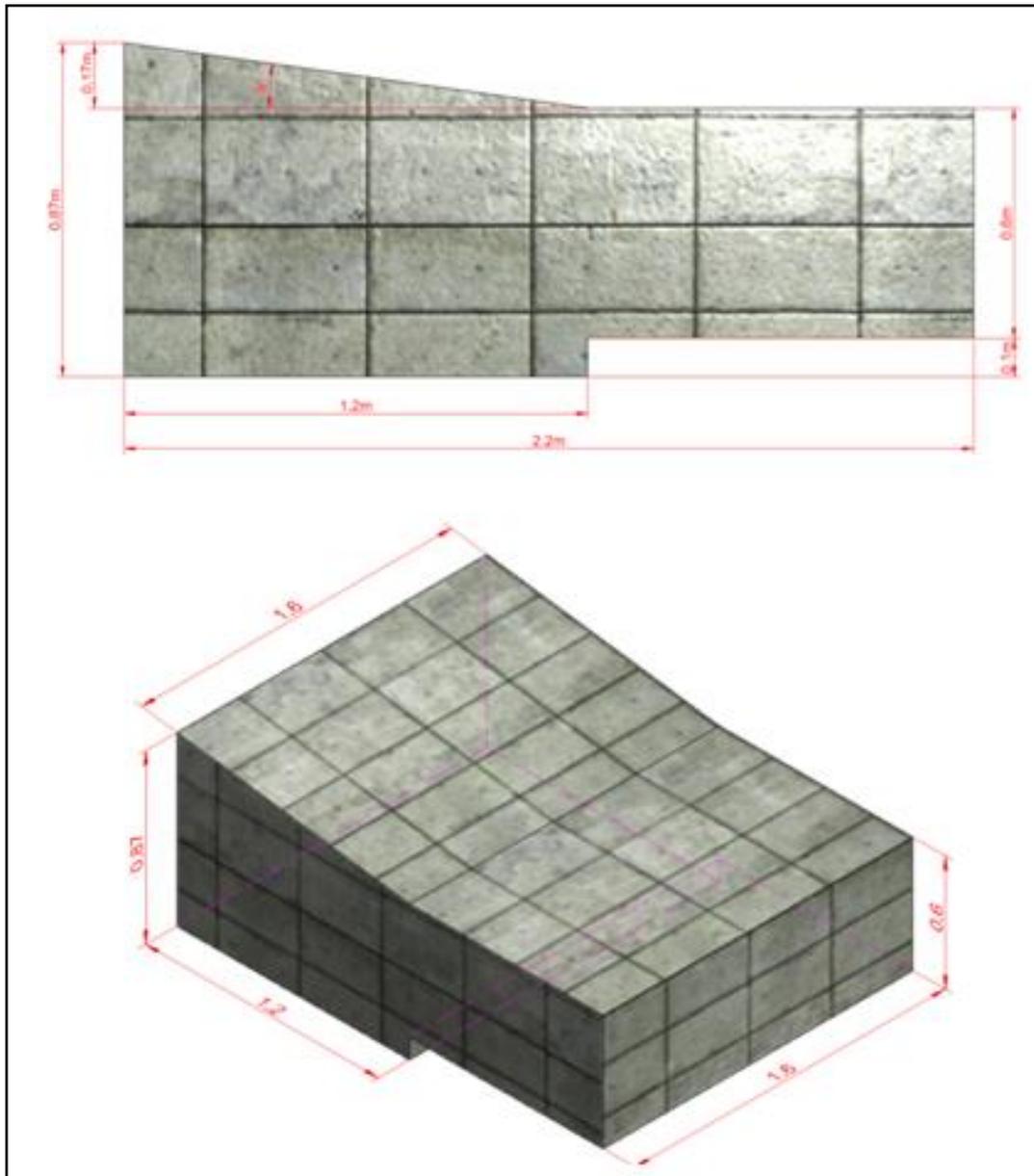
Debido que no tenemos reducción en la tubería de presión tenemos que

$$F_9 = 0$$

### Calculo de la estabilidad del anclaje

Para el cálculo de la estabilidad del anclaje es necesario dar dimensiones y geometría al anclaje:

**Figura 3.23. Dimensiones del Anclaje**



*Fuente: Autores*

a. Calculo del peso del anclaje  $W$  :

$$W = W_1 + W_2 + W_3$$

$$W_1 = \left( \frac{1.2 \times 0.17}{2} \times 1.6 \right) \times 2300$$

$$W_1 = 375.6 \text{ kg}$$

$$W_2 = (2.2 \times 0.6 \times 1.6) \times 2300$$

$$W_2 = 4857.6 \text{ kg}$$

$$W_3 = (1.2 \times 0.1 \times 1.6) \times 2300$$

$$W_3 = 441.6 \text{ kg}$$

$$W = 375.6 + 4857.6 + 441.6$$

$$W = 5674.8 \text{ kg}$$

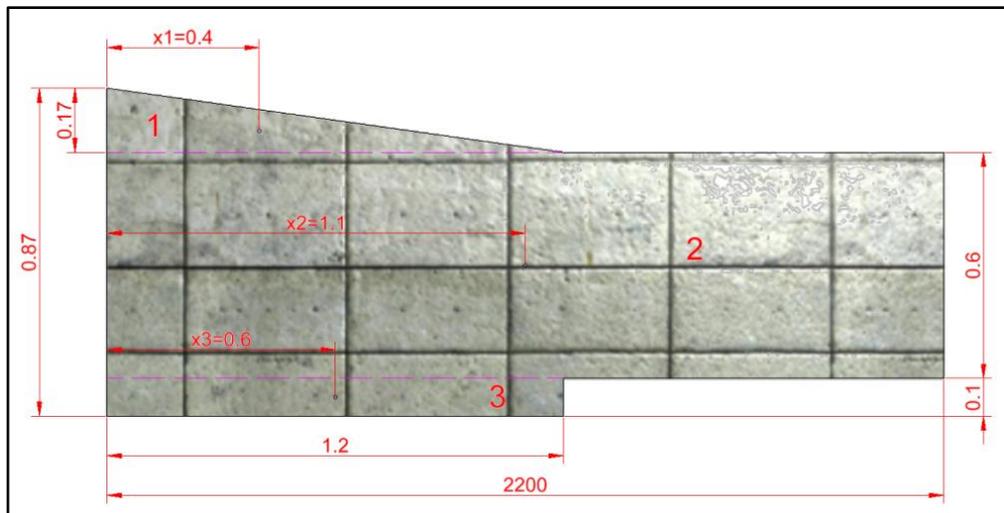
b. Cálculo del centro de gravedad del anclaje (método de las áreas)

$$A_1 = \left( \frac{1.2 \times 0.17}{2} \right) = 0.102 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 2.2 \times 0.6 = 1.32 \text{ m}^2$$

$$A_3 = 1.2 \times 0.1 = 0.12 \text{ m}^2$$

**Figura 3.24. Centro de gravedad del Anclaje**



*Fuente: Autores*

$$x_g = \frac{0.102 \times 0.4 + 1.32 \times 1.1 + 0.12 \times 0.6}{0.102 + 1.32 + 0.16}$$

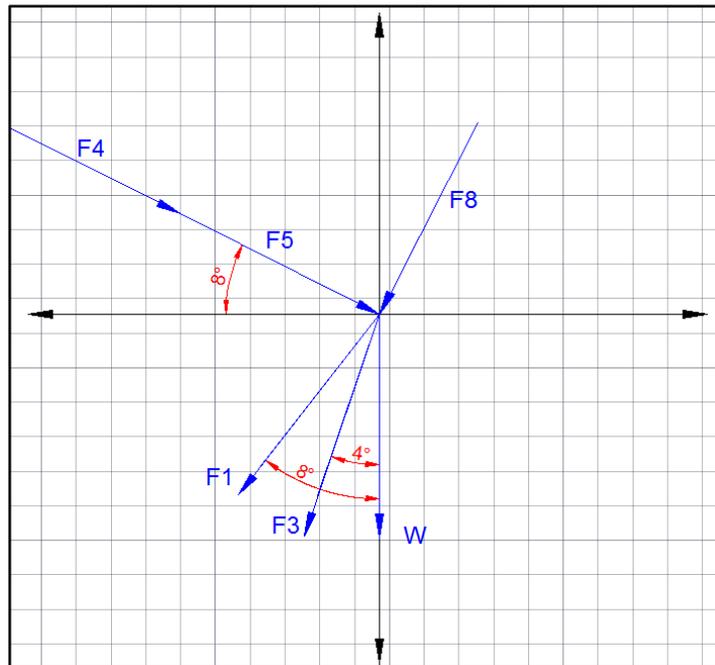
$$x_g = 0.989 \text{ m}$$

$$y_g = \frac{0.102 \times 0.76 + 1.32 \times 0.4 + 0.12 \times 0.05}{0.102 + 1.32 + 0.12}$$

$$y_g = 0.397m$$

c. Cálculo de la estabilidad del anclaje:

**Figura 3.25. Diagrama de fuerzas actuantes en el Anclaje**



*Fuente: Autores*

Cálculo de  $\sum F_x$

$$\sum F_x = -F_1 \sin(8) - (F_3 + F_8) \sin(4) + (F_5 + F_4) \cos(8)$$

$$\sum F_x = -403 \sin(8) - (409.5 + 6.27) \sin(4) + (2913.4 + 27.4) \cos(8)$$

$$\sum F_x = 2827.1kg$$

Cálculo de  $\sum F_y$

$$\sum F_y = -F_1 \cos(8) - (F_3 + F_8) \cos(4) - (F_5 + F_4) \sin(8) - W$$

$$\sum F_y = -403 \cos(8) - (409.5 + 6.27) \cos(4) - (2913.4 + 27.4) \sin(8) - 5674.8$$

$$\sum F_y = -6897.9kg$$

Una vez conocidas las sumatorias de fuerzas, aplicamos las condiciones de equilibrio a igual que la de los apoyos:

### Primera condición de equilibrio

$$\sum F_x < \mu_t \sum F_y$$

Donde:

$\mu_t = 0.5$ : Coeficiente de fricción entre el concreto y el suelo

$$2827.1 < 0.5 \times 6897.9$$

$$2827.1 < 3449$$

Aplicamos la segunda condición de equilibrio: Calculamos la suma de momentos en el punto O

$$\sum M_o = 0$$

$$\sum F_x(0.403) + \sum F_y(1.2) + W(0.989) - R_y \times X = 0$$

$$2827.1(0.403) + 6897.9(1.2) + 5674.8(0.989) - R_y \times X = 0$$

$$R_y \times X = 15029.2 \text{ kg}$$

Para hallar  $R_y$  aplicamos  $\sum F_y = 0$

$$R_y = \sum F_y + W$$

$$R_y = 6897.9 + 5674.8$$

$$R_y = 12572.7 \text{ kg}$$

Remplazamos

$$X = \frac{15029.2}{12572.7}$$

$$X = 1.195$$

### Segunda condición de equilibrio

Con los valores de  $R_y$  y  $X$ , comprobamos que:

$$S_{base} < S_{adm(terreno)}$$

$$S_{base} = \frac{R_y}{A} \times \left( 1 \pm \frac{6 \times e}{b} \right)$$

La excentricidad de la relación vertical será:

$$e = X - \frac{b}{2}$$

$$e = 1.195 - \frac{2.2}{2}$$

$$e = -0.095$$

El esfuerzo de compresión admisible del terreno es:

$$S_{base(min)} = \frac{12572.7}{(2.2 \times 1.6)} \times \left(1 + \frac{6 \times (-0.095)}{2.2}\right)$$

$$S_{base(min)} = 2646.4 \frac{kg}{m^2}$$

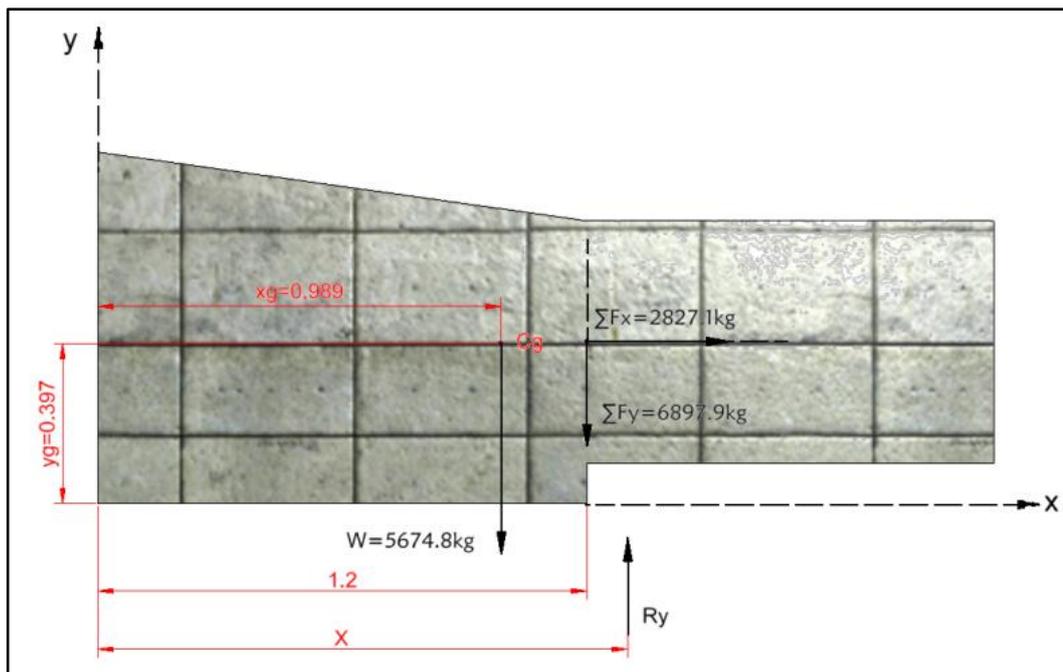
$$S_{base(min)} = 0.26 \frac{kg}{cm^2}$$

$$S_{base(max)} = \frac{12572.7}{(2.2 \times 1.6)} \times \left(1 - \frac{6 \times (-0.095)}{2.2}\right)$$

$$S_{base(max)} = 4497.2 \frac{kg}{m^2}$$

$$S_{base(max)} = 0.45 \frac{kg}{cm^2}$$

**Figura 3.26. Fuerzas actuantes en el Anclaje**



Fuente. Autores

Asumiendo la resistencia del suelo es de  $0.5 \frac{kg}{cm^2}$  entonces se cumple:

$$S_{base} < S_{adm(terreno)}$$

### Tercera condición de equilibrio

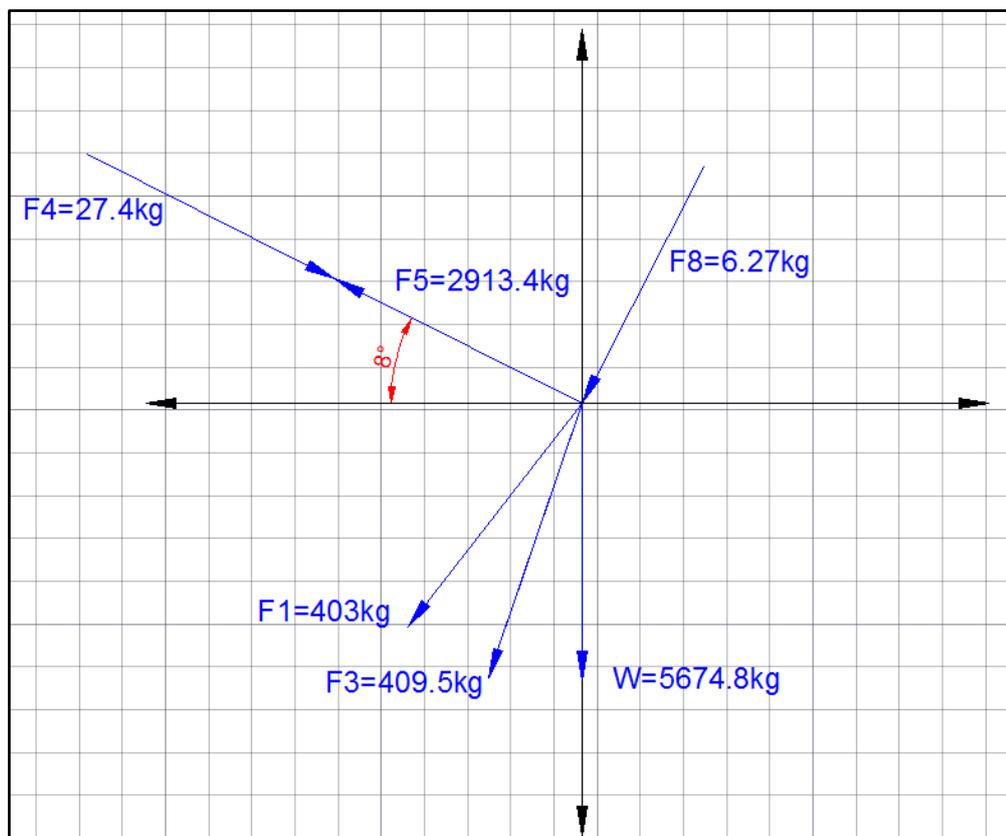
$$S_{base(min)} > 0$$

$$0.26 > 0$$

Hasta aquí hemos comprobado la estabilidad del anclaje por la forma y dimensiones que hemos asumido como un primer intento cuando la tubería se esté dilatando.

Ahora se comprobara, bajo las mismas condiciones para el caso que la tubería se contraiga. En este caso, solamente las fuerzas  $F_5$  cambia de sentido; las magnitudes son las mismas, las fuerzas actuantes son tal como se muestra en la figura 3.27:

**Figura 3.27. Diagrama de fuerzas cuando la tubería se contrae**



Fuente: Autores

Siguiendo el mismo procedimiento de cálculo, obtenemos los siguientes resultados:

Calculo de  $\sum F_x$

$$\begin{aligned}\sum F_x &= -F_1 \sin(8) - (F_3 + F_8) \sin(4) - F_5 \cos(8) + F_4 \cos(8) \\ \sum F_x &= -403 \sin(8) - (409.5 + 6.27) \sin(4) - 2913.4 \cos(8) + 27.4 \cos(8) \\ \sum F_x &= -2943 \text{ kg}\end{aligned}$$

Calculo de  $\sum F_y$

$$\begin{aligned}\sum F_y &= -F_1 \cos(8) - (F_3 + F_8) \cos(4) + F_5 \sin(8) - F_4 \sin(8) - W \\ \sum F_y &= -403 \cos(8) - (409.5 + 6.27) \cos(4) + 2913.4 \sin(8) - 27.4 \sin(8) - 5674.8 \\ \sum F_y &= -6087 \text{ kg}\end{aligned}$$

Una vez conocidas las sumatorias de fuerzas, aplicamos las condiciones de equilibrio:

### Primera condición de equilibrio

$$\sum F_x < \mu_t \sum F_y$$

Donde:

$\mu_t = 0.5$ : Coeficiente de fricción entre el concreto y el suelo

$$2943 < 0.5 \times 6087$$

$$2943 < 3043.5$$

Aplicamos la segunda condición de equilibrio: Calculamos la suma de momentos en el punto O

$$\begin{aligned}\sum M_o &= 0 \\ -\sum F_x(0.403) + \sum F_y(1.2) + W(1.03) - R_y \times X &= 0 \\ -2943(0.403) + 6087(1.2) + 5674.8(1.03) - R_y \times X &= 0 \\ R_y \times X &= 11963.4 \text{ kg}\end{aligned}$$

Para hallar  $R_y$  aplicamos  $\sum F_y = 0$

$$R_y = \sum F_y + W$$

$$R_y = 6087 + 5674.8$$

$$R_y = 11761.8 \text{ kg}$$

Remplazando valores tenemos:

$$X = \frac{11963.4}{11761.8}$$

$$X = 1.017 \text{ m}$$

### Segunda condición de equilibrio

Con los valores de  $R_y$  y  $X$ , comprobamos que:

$$S_{base} < S_{adm(\text{terreno})}$$

$$S_{base} = \frac{R_y}{A} \times \left( 1 \pm \frac{6 \times e}{b} \right)$$

$$e = X - \frac{b}{2}$$

$$e = 1.017 - \frac{2.2}{2}$$

$$e = -0.083 \text{ m}$$

$$S_{base(\text{min})} = \frac{11761.8}{(2.2 \times 1.6)} \times \left( 1 + \frac{6 \times (-0.083)}{2.2} \right)$$

$$S_{base(\text{min})} = 2585 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$S_{base(\text{min})} = 0.26 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$S_{base(\text{max})} = \frac{4854.7}{(1.6 \times 0.7)} \times \left( 1 - \frac{6 \times (-0.019)}{1.6} \right)$$

$$S_{base(\text{max})} = 4097.8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$S_{base(\text{max})} = 0.41 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Asumiendo la resistencia del suelo es de  $0.5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$  entonces se cumple:

$$S_{base} < S_{adm(\text{terreno})}$$

### Tercera condición de equilibrio:

$$S_{base(min)} > 0$$
$$0.41 > 0$$

Como el anclaje cumple las tres condiciones de estabilidad para los dos casos podemos decir que este seta bien diseñado.

### 3.3 DISEÑO Y SELECCIÓN DE LA TURBINA

Según la figura 2.38 y la tabla 2.11 en base a nuestros datos de caudal y altura estamos en el rango de aplicación de una turbina Michell Banki. En primer lugar determinaremos el número óptimo de revoluciones con que debe girar la turbina según la ecuación 2.73:

$$n = \frac{38 \times \sqrt{H}}{D_e}$$

Asumimos un diámetro del rodete de:

$$D_e = 0.3m$$

Remplazando tenemos que la velocidad óptima es de:

$$n = \frac{38 \times \sqrt{24.5}}{0.3}$$
$$n = 626.9rpm$$
$$n \approx 627rpm$$

Realizando una comprobación de la aplicación de la turbina Michell Banki, calcularemos el número específico de revoluciones según la ecuación 2.70:

$$n_q = n \frac{Q^{1/2}}{H^{3/4}}$$
$$n_q = 658 \times \frac{0.24^{1/2}}{24.5^{3/4}}$$
$$n_q = 29.3$$

Según la tabla 2.8 estamos dentro del rango de aplicación de la Michell Banki por lo cual procederemos con el dimensionamiento general de cada una de las partes de la turbina.

La eficiencia máxima de la turbina será:

$$\begin{aligned}\eta_{\max} &= 0.771 - 0.384 \frac{D}{H} \\ \eta_{\max} &= 0.771 - 0.384 \frac{0.3}{24.5} \\ \eta_{\max} &= 0.766 \\ \eta_{\max} &= 77\%\end{aligned}$$

La potencia máxima será entonces:

$$P_{\max} = \frac{\rho \times g \times Q \times H \times \eta_{\max}}{K}$$

Donde:

$$K = 1000 \frac{W}{kW}$$

Remplazando tenemos que la potencia máxima es:

$$\begin{aligned}P_{\max} &= \frac{1000 \times 9.81 \times 0.24 \times 24.5 \times 0.766}{1000} \\ P_{\max} &= 44.2 kW\end{aligned}$$

### 3.3.1 Diseño Hidráulico

Velocidad del agua a la salida del inyector según la ecuación 2.77 es:

$$c_i = c_2 = K_c \times \sqrt{2 \times g \times H}$$

Tomamos para:

$$K_c = 0.98$$

Remplazando valores tenemos:

$$\begin{aligned}c_i &= 0.98 \times \sqrt{2 \times 9.81 \times 24.5} \\ c_i = c_2 &= 21.48 \frac{m}{s}\end{aligned}$$

La velocidad según la ecuación 2.78 se expresa por:

$$u_2 = K_u \times C_2 \times \cos(\alpha_2)$$

Sabiendo que:

$$K_u = 0.5$$

$$\alpha_2 = 16^\circ$$

Remplazando valores en la ecuación 2.78 tenemos que la velocidad es:

$$u_2 = 0.5 \times 21.48 \times \cos(16)$$

$$u_2 = 10.32 \frac{m}{s}$$

Según la ecuación 2.79 la velocidad relativa es:

$$w_2 = c_2 \times \sqrt{1 - K_u(2 - K_u) \times \cos^2(\alpha_2)}$$

$$w_2 = 21.48 \times \sqrt{1 - 0.5(2 - 0.5) \times \cos^2(16)}$$

$$w_2 = 11.9 \frac{m}{s}$$

Ahora analizaremos el triángulo de velocidades del agua a la salida del rodete

El ángulo  $\beta'_2$  se determina mediante la ecuación 2.82:

$$\beta'_2 = \arcsin \left[ \frac{\sin \alpha_2}{(1 - K_u(2 - K_u) \cos^2(\alpha_2))^{1/2}} \right]$$

$$\beta'_2 = \arcsin \left[ \frac{\sin(16)}{(1 - 0.5(2 - 0.5) \cos^2(16))^{1/2}} \right]$$

$$\beta'_2 = 29.83^\circ$$

El ángulo  $\beta_2$  a la salida del inyector se determina mediante la ecuación 2.81.

$$\beta_2 = 180 - \beta'_2$$

$$\beta_2 = 180 - 29.83^\circ$$

$$\beta_2 = 150.16^\circ$$

La velocidad relativa está dada por según la ecuación 2.83 es:

$$w'_2 = K_f \times w_2$$

Sabiendo que:

$$K_f = 0.98$$

Remplazando valores tenemos que la velocidad relativa es:

$$w'_2 = 0.98 \times 11.9$$

$$w'_2 = 11.66 \frac{m}{s}$$

Velocidad absoluta del agua a la salida del rodete según la ecuación 2.84 es:

$$c'_2 = c_2 \times \sqrt{\frac{K_f^2 (1 - K_u (2 - K_u) \cos^2(\alpha_2)) + K_u \times \cos^2(\alpha_s) - 2 \times K_f \times \cos^2(\alpha_2) (1 - K_u) K_u}{0.98^2 (1 - 0.5(2 - 0.5) \cos^2(16)) + 0.5 \times \cos^2(16) - 2 \times 0.98 \times \cos^2(16) (1 - 0.5) 0.5}}$$

$$c'_2 = 21.48 \times \sqrt{\frac{0.98^2 (1 - 0.5(2 - 0.5) \cos^2(16)) + 0.5 \times \cos^2(16) - 2 \times 0.98 \times \cos^2(16) (1 - 0.5) 0.5}{0.98^2 (1 - 0.5(2 - 0.5) \cos^2(16)) + 0.5 \times \cos^2(16) - 2 \times 0.98 \times \cos^2(16) (1 - 0.5) 0.5}}$$

$$c'_2 = 11.84 \frac{m}{s}$$

El ángulo de salida con respecto a la tangente del rodete se obtiene mediante la ecuación 2.85:

$$\alpha'_2 = \arcsin \left[ \frac{K_f \times \sin(\beta'_2) \times \sqrt{1 - K_u (2 - K_u) \cos^2(\alpha_2)}}{\sqrt{K_f^2 + K_u \times \cos^2(\alpha_2) \times K_u (K_f^2 (2 - K_u) - K_f)}} \right]$$

$$\alpha'_2 = \arcsin \left[ \frac{0.98 \times \sin(29.83) \times \sqrt{1 - 0.5(2 - 0.5) \cos^2(16)}}{\sqrt{0.98^2 + 0.5 \times \cos^2(16) \times 0.5(0.98^2 (2 - 0.5) - 0.98)}} \right]$$

$$\alpha'_2 = 17.12^\circ$$

### Geometría del inyector

Con diámetro del rodete asumido determinamos el ancho del inyector mediante la ecuación 2.88:

$$B = \frac{0.96 \times Q}{D_e \times \sqrt{H}}$$

$$B = \frac{0.96 \times 0.24}{0.3 \times \sqrt{24.5}}$$

$$B = 0.155m$$

### Geometría del rodete

El diámetro interno del rodete se determina mediante la ecuación 2.90:

$$D_i = 0.66 \times D_e$$

$$D_i = 0.66 \times 0.3$$

$$D_i = 0.198m$$

El radio de curvatura de los alabes del rodete ecuación 2.92 es:

$$r = 0.163 \times D_e$$

$$r = 0.163 \times 0.3$$

$$r = 0.0489m$$

Cuando  $\alpha = 16^\circ$  entonces el ángulo de curvatura de los alabes es  $\phi = 73^\circ$

El ancho del rodete según la ecuación 2.94 es:

$$B_r = 1.5 \times B$$

$$B_r = 1.5 \times 0.155$$

$$B_r = 0.232m$$

Determinamos la limitante en cuanto al arco de admisión mediante la ecuación 2.95:

$$\angle BOC = 2 \arctan \left| \frac{\sqrt{1 - K_u(2 - K_u) \times \cos^2 \alpha_2}}{\left| \frac{D_i}{D_e} \right| \times \cos \alpha_2} \right|$$

$$\angle BOC = 2 \arctan \left| \frac{\sqrt{1 - 0.5 \times (2 - .5) \times \cos^2 16}}{\left| \frac{198}{300} \right| \times \cos 16} \right|$$

$$\angle BOC = 82.3^\circ$$

El diámetro máximo del eje que atraviesa el rodete ecuación 2.98 será:

$$d = 0.328 \times D_e$$

$$d = 0.328 \times 0.3$$

$$d = 0.0984m$$

$$d = 98.4mm$$

### Geometría de la carcasa

El arco total del rodete se obtiene mediante la ecuación 2.103:

$$\begin{aligned}\theta_i &= \theta_o + 163^\circ \\ \theta_o &= K_o \times 360^\circ \\ \theta_o &= 0.33 \times 360^\circ \\ \theta_o &= 118.8^\circ \\ \theta_i &= 118.8^\circ + 163^\circ \\ \theta_i &= 281.8^\circ\end{aligned}$$

### 3.3.2 Diseño Mecánico

El diseño mecánico se realiza para establecer las dimensiones de la turbina así como para verificar si los materiales usados soportan los esfuerzos que se presentan en estos.

#### Diseño y cálculo del Inyector

El torque máximo requerido para la regulación está dado por la ecuación 2.104:

$$\begin{aligned}T &= 31 \times D_e \times Q \times \sqrt{H} \\ T &= 31 \times 0.3 \times 0.24 \times \sqrt{24.5} \\ T &= 11.1 \text{ kg} \cdot \text{m}\end{aligned}$$

El diámetro del eje del alabe directriz se obtiene mediante la ecuación 2.105:

$$d_i^3 = \frac{16 \times T}{\pi \times S}$$

Despejamos de la ecuación 2.105 el esfuerzo de diseño del material

$$S = \frac{16 \times T}{\pi \times d_i^3}$$

Según la tabla 2.5 el diámetro máximo permitido en el eje del alabe directriz es:

$$d_i = 38 \text{ mm}$$

Remplazando tenemos que el esfuerzo es de:

$$S = \frac{16 \times 11.1}{\pi \times 0.038^3}$$

$$S = 1.03 \times 10^6 \frac{kg}{m^2}$$

$$S = 1.03 \frac{kg}{mm^2}$$

El esfuerzo de diseño en el alabe directriz según la ecuación 2.106 será:

$$S_d = 0.2 \times S_y$$

El material que se escogió del Anexo V es el Acero al 18% Cr, 8% Ni (AISI 304) el cual tiene un esfuerzo a la fluencia de:

$$S_y = 15 \frac{kg}{mm^2}$$

Entonces tenemos el esfuerzo de diseño es:

$$S_d = 0.2 \times 15$$

$$S_d = 3 \frac{kg}{mm^2}$$

Para comprobar si el inyector está bien diseñado debe cumplir la siguiente condición:

$$S < S_d$$

$$1.03 < 3$$

### Calculo del Rodete

Para el análisis del rodete asumimos un espesor del alabe de 2 mm, y una cantidad de 26 alabes.

El esfuerzo máximo al que estará sometido según la ecuación 2.114:

$$\sigma_{\max} = \frac{F \times B_r \times c}{12 \times I g_x}$$

Fuerza de frenado del rodete ecuación 2.108 será:

$$F = 46.5 \times Q \times \sqrt{H}$$

$$F = 46.5 \times 0.24 \times \sqrt{24.5}$$

$$F = 55.23 kg$$

El radio de giro  $c$  se determina mediante la ecuación 2.115:

$$c = (r + e) - C_g$$

El centro de gravedad del rodete según la ecuación 2.116 es:

$$C_g = \frac{120[(r+e)^3 - r^3] \times [\cos(\theta_1) - \cos(\theta_2)]}{\phi \times \pi \times [(r+e)^2 - r^2]}$$

$$\theta_1 = \frac{180 - \phi}{2}$$

$$\theta_1 = \frac{180 - 73}{2}$$

$$\theta_1 = 53.5^\circ$$

$$\theta_2 = \phi + \theta_1$$

$$\theta_2 = 73 + 53.5$$

$$\theta_2 = 126.5^\circ$$

Determinaremos los radios del rodete ecuaciones 2.111, 2.112 y 2.113:

$$r_3 = 2r \times \sin\left(\frac{\phi}{2}\right)$$

$$r_3 = 2 \times 0.0489 \times \sin\left(\frac{73}{2}\right)$$

$$r_3 = 0.058m$$

$$r_e = \frac{D_e}{2}$$

$$r_e = \frac{0.3}{2}$$

$$r_e = 0.15m$$

$$r_i = \frac{D_i}{2}$$

$$r_i = \frac{0.198}{2}$$

$$r_i = 0.099m$$

Remplazando tenemos que el centro de gravedad es:

$$C_g = \frac{120[(0.0489 + 0.002)^3 - 0.0489^3] \times [\cos(53.5) - \cos(126.5)]}{73 \times \pi \times [(0.0489 + 0.002)^2 - 0.0489^2]}$$

$$C_g = 0.0466m$$

Entonces remplazando valores el radio de giro c ecuación 2.115 será:

$$c = (0.0489 + 0.002) - 0.0466$$

$$c = 0.0043m$$

Tanto el valor del centro de gravedad como el del centro de giro coinciden con los datos estandarizados mostrados en el Anexo VI para diferentes diámetros y espesores de alabes con  $\alpha_i = 16^\circ$

Entonces tenemos según la tabla del Anexo VI tenemos:

$$C_g = 4.66cm$$

$$c = 0.43cm$$

$$I_{g_x} = 0.1134cm^4$$

Remplazando el esfuerzo máximo que está sometido el alabe del rodete por acción de la fuerza del agua a lo largo del mismo será:

$$\sigma_{\max} = \frac{55.23 \times 0.232 \times 0.0043}{12 \times 1.134 \times 10^{-9}}$$

$$\sigma_{\max} = 14158291.01 \frac{kg}{m^2}$$

$$\sigma_{\max} = 14.16 \frac{kg}{mm^2}$$

Para el caso del alabe tomaremos el Acero al 13% Cr (AISI 403) tenemos un esfuerzo de fluencia de:

$$S_y = 45 \frac{kg}{mm^2}$$

Sabiendo que:

$$S_d = 0.66S_y$$

$$S_d = 29.7 \frac{kg}{mm^2}$$

Para comprobar si el alabe está bien diseñado debe cumplir la siguiente condición:

$$\sigma_{\max} < S_d$$
$$14.16 < 29.7$$

### Diseño del Eje

El diámetro mínimo del eje se realiza según el cálculo mecánico ASME según la ecuación 2.119:

$$d^3 = \frac{16}{\pi \times S_d} \times \sqrt{(K_m \times M_{\max})^2 + (K_T \times T_{\max})^2}$$

Sabiendo que:

$$K_m = 1.5$$

$$K_T = 1$$

El momento flector máximo ecuación 2.120 es:

$$M_{\max} = \sqrt{M_x^2 + M_y^2}$$

$$M_x = F_r \times \frac{a}{2}$$

$$M_y = W_r \times \frac{a}{2}$$

La fuerza tangencial del rodete según la ecuación 2.123 es:

$$F_r = \frac{1948 \times P_T}{n \times D_e}$$

La potencia de frenado de la turbina se determina según la ecuación:

$$P_T = \frac{P_g}{\eta_g \times \eta_{tr}}$$

Sabiendo que:

$$P_g = 40 \text{ kW}$$

$\eta_g = 91\%$  :Eficiencia del generador.

$\eta_{tr} = 95\%$  :Eficiencia del sistema de transmisión por bandas.

Remplazando valores tenemos que la potencia del frenado será:

$$P_T = \frac{40}{0.91 \times 0.95}$$
$$P_T = 46.3 \text{ kW}$$

Entonces la fuerza tangencial será:

$$F_r = \frac{1948 \times 46.3}{627 \times 0.3}$$
$$F_r = 479.5 \text{ kg}$$

Es necesario conocer la distancia desde el rodete hacia las chumaceras:

$$a = 0.8 \times B_r$$
$$a = 0.8 \times 0.232$$
$$a = 0.186 \text{ m}$$

Remplazando valores tenemos que:

$$M_x = 479.5 \times \frac{0.186}{2}$$
$$M_x = 44.6 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

Para la turbina estandarizada en estudio el peso estimado del rodete es de:

$$W_r = 20 \text{ kg}$$

Remplazando tenemos que el momento es:

$$M_y = 20 \times \frac{0.186}{2}$$
$$M_y = 1.86 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

Remplazando valores en la ecuación 2.120 el momento máximo es:

$$M_{\max} = \sqrt{44.6^2 + 1.86^2}$$
$$M_{\max} = 44.64 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

El momento torsor máximo que se presenta en el eje se determina mediante la ecuación 2.124:

$$T = \frac{974 \times P_T}{n}$$

$$T = \frac{974 \times 46.3}{627}$$

$$T = 71.92 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

El esfuerzo a la fluencia para un acero AISI 304 es:

$$S_y = 15 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$$

Entonces tenemos el esfuerzo de diseño será:

$$S_d = 0.2 \times S_y$$

$$S_d = 0.2 \times 15$$

$$S_d = 3 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$$

$$s_d = 3 \times 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Con los valores calculamos determinamos el diámetro del eje:

$$d^3 = \frac{16}{\pi \times 3 \times 10^6} \times \sqrt{(1.5 \times 44.64)^2 + (1 \times 71.92)^2}$$

$$d^3 = 1.668 \times 10^{-4}$$

$$d = 0.055 \text{ m}$$

El diámetro obtenido es aproximadamente  $d = 55 \text{ mm}$ , en la parte del rodamiento.

El escalonamiento del eje se lo realiza mediante la ecuación 2.125:

$$d = 0.28 \times D_e$$

$$d = 0.28 \times 0.3$$

$$d = 0.084 \text{ m}$$

### Diseño de Chavetas

$$L_a = \frac{4 \times F_r \times \eta_{chaveta}}{0.577 \times S_{y-chaveta} \times d}$$

Donde:

$\eta_{chaveta} = 3$  Factor de seguridad de la chaveta

$$S_{y-chaveta} = 15.29 \times 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Remplazando valores tenemos:

$$L_a = \frac{4 \times 479.5 \times 3}{0.577 \times 15.29 \times 10^6 \times 0.055}$$
$$L_a = 0.011m$$

La longitud total del chavetero será:

$$L_{T-\text{chavetero}} = (L_a + t) \times 1000$$
$$L_{T-\text{chavetero}} = (0.011 + 4 \times 10^{-3}) \times 1000$$
$$L_{T-\text{chavetero}} = 15mm$$

El ancho de la chaveta está definido por la ecuación:

$$A_{\text{chaveta}} = \frac{d}{4} \times 1000$$
$$A_{\text{chaveta}} = \frac{0.055}{4} \times 1000$$
$$A_{\text{chaveta}} = 13.75mm$$

Por aplastamiento a la chaveta:

$$L_{\text{chaveta-apl}} = \frac{F_r \times 3 \times 4 \times 1000}{S_{y-\text{chaveta}} \times A_{\text{chaveta}}}$$
$$L_{\text{chaveta-apl}} = \frac{479.5 \times 3 \times 4 \times 1000}{15.29 \times 10^6 \times 0.01375}$$
$$L_{\text{chaveta-apl}} = 27.36mm$$

Por aplastamiento al chavetero:

$$L_{\text{chavetero-apl}} = \frac{F_r \times 3 \times 8 \times 1000}{S_{y-\text{rodete}} \times d}$$
$$L_{\text{chavetero-apl}} = \frac{479.5 \times 24 \times 1000}{15.29 \times 10^6 \times 0.055}$$
$$L_{\text{chavetero-apl}} = 13.7mm$$

La longitud del eje se determina mediante la siguiente ecuación:

$$L_{\text{eje}} = 1.3 \times (B_r + 2t + 3L_a)$$
$$L_{\text{eje}} = 1.3 \times (0.232 + 2 \times 4 \times 10^{-3} + 3 \times 0.011)$$
$$L_{\text{eje}} = 0.36m$$

Para el chequeo del eje por la velocidad crítica según la ecuación 2.126 es:

$$n_{\text{crit}} = \frac{29.88}{y^{1/2}}$$

La fuerza producida en el eje por acción del peso y fuerza del rodete ecuación 2.127:

$$y = \frac{W \times a^2}{6 \times E \times I} (3L_{eje} - 4a)$$

Sabiendo que:

$$E = 2.1 \times 10^{10} \frac{kg}{m^2}$$

$$W = \sqrt{W_{T-rodete}^2 + F_r}$$

$$W = \sqrt{20^2 + 479.5^2}$$

$$W = 479.91 kg$$

La inercia es:

$$I = \frac{\pi \times d^4}{64}$$

$$I = \frac{\pi \times 0.55^4}{64}$$

$$I = 4.5 \times 10^{-7} m^4$$

Remplazando valores la fuerza producida en el eje por acción del peso y fuerza del rodete será:

$$y = \frac{479.91 \times 0.186^2}{6 \times 2.1 \times 10^{10} \times 4.5 \times 10^{-7}} (3 \times 0.36 - 4 \times 0.186)$$

$$y = 1.99 \times 10^{-4} m$$

Entonces la velocidad crítica será:

$$n_{crit} = \frac{29.88}{(1.99 \times 10^{-4})^{1/2}}$$

$$n_{crit} = 2114 rpm$$

Debido a que es imposible que la turbina llegue a esta velocidad crítica podemos decir que el diseño del eje es correcto.

### Diseño del Soporte del Rodamiento

La capacidad dinámica se determina mediante la ecuación 2.130:

$$C = (X \times F_R + Y \times F_a) \times \left| \frac{60 \times n \times L_h}{10^6} \right|^P$$

Donde:

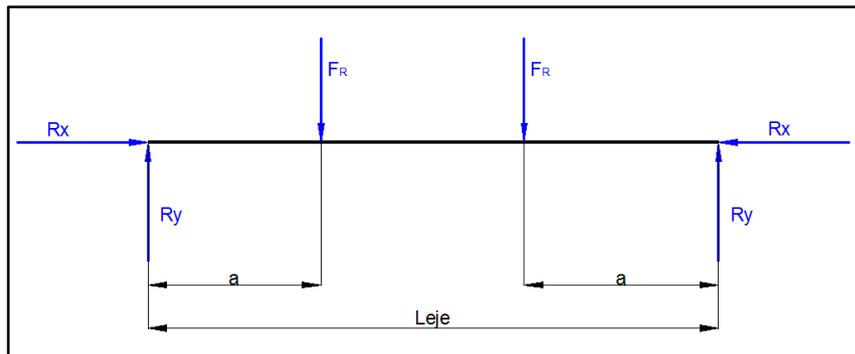
$$X = 1$$

$$F_a = 0$$

$$P = \frac{3}{10} : \text{Para rodamiento de rodillos}$$

$$L_h = 200000 \text{ horas}$$

**Figura 3.28. Diagrama de fuerzas en el eje de la turbina**



*Fuente: Autores*

La fuerza radial se determina mediante la ecuación 2.131 y según el diagrama de la figura 3.28:

$$F_R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}$$

$$\sum F_x = 0$$

$$2R_x = 0$$

$$\sum F_y = 0$$

$$2R_y - \frac{W_{T-rodete}}{2} - \frac{W_{T-rodete}}{2} - \frac{F_r}{2} - \frac{F_r}{2} = 0$$

$$R_y = \frac{W_{T-rodete} + F_r}{2}$$

$$R_y = 20 + 456 \cdot p$$

$$R_y = 476.9 \text{ kg}$$

Entonces la fuerza radial será:

$$F_R = \sqrt{0^2 + 476.9^2}$$

$$F_R = 476.9 \text{ kg}$$

Remplazando valores tenemos que la capacidad dinámica es:

$$C = (1 \times 476.9) \times \left| \frac{60 \times 627 \times 200000}{10^6} \right|^{\frac{3}{10}}$$
$$C = 7041.3 \text{ kg}$$

Con la capacidad dinámica calculada acudimos a un catálogo de fabricantes con lo cual se obtiene un rodamiento SKF 22211 CC. En el Anexo XVI se puede observar las dimensiones generales de las Turbinas Michell Banki Estandarizadas.

### 3.4 SELECCIÓN DEL GENERADOR

Como sabemos el alternador síncrono es el más importante dispositivo de conversión de potencia electromecánica. En primer lugar debemos determinar la velocidad síncrona con la ecuación 2.136:

$$n_s = \frac{120 \times f}{p}$$
$$n_s = \frac{120 \times 60}{4}$$
$$n_s = 1800 \text{ rpm}$$

Al momento de seleccionar el generador se debe considerar los siguientes aspectos:

#### Potencia

La potencia del generador y de la turbina se deberá seleccionar en conjunto.

La siguiente ecuación relaciona las potencias del generador y de la turbina:

$$P_G = P_T \times \eta_G$$

Donde:

$P_G$  : Potencia del generador

$P_T$  : Potencia de la turbina

$\eta_G$  : Rendimiento del generador

Del catálogo del generador (ANEXO XVII) Marca MAGNAPLUS tenemos las siguientes características:

$$P_G = 40kW$$

$$n_G = 1800rpm$$

3 Fases

Numero Modelo : 284CLS1542

$$\cos\varphi = 0.8$$

$$f = 60Hz$$

4 polos

Y sabiendo que la potencia de la turbina es de 44.2kW la eficiencia del generador será:

$$\eta_G = \frac{P_G}{P_T}$$
$$\eta_G = \frac{40}{44.2}$$
$$\eta_G = 0.91$$

El rendimiento del generador esta en el orden del 91 %. Por lo que se supone que la potencia si puede alcanzar los 44.2 KW trabajando en forma óptima. En el ANEXO XVII se detallan las dimensiones características del generador MAGNAPLUS seleccionado.

### 3.5 TRANSMISIÓN DE POTENCIA MECÁNICA

#### Selección del tipo de sección:

De las condiciones de servicio y empleando las tablas 2.13 y 2.14 se obtiene:

Factor de servicio = 1.4

$$P_{dis} = T_{trans} \times F_{serv}$$

$$P_{dis} = 44.2 \times 1.4$$

$$P_{dis} = 61.9kW(84.2CV)$$

Como la polea pequeña gira a 1800 rpm, se escoge la sección tipo B

#### Diámetro de las poleas:

Relación de transmisión i:

$$i = \frac{1800}{627}$$

$$i = 2.9$$

Consideramos el diámetro de la polea menor:

$$d = 6''$$

El diámetro de la polea mayor:

$$D = d \times i$$

$$D = 6 \times 2.9$$

$$D = 17.4 \approx 17''$$

### Longitud de la banda

Primero determinamos la distancia entre centros ecuación 2.139:

Valores referenciales:

$$C = \frac{D + 3d}{2}$$

$$C = \frac{17 + 3 \times 6}{2}$$

$$C = 17.5 \approx 18''$$

$$C = D = 17''$$

Consideramos:

$$C = 18''$$

Luego determinamos la longitud de la banda según la ecuación 2.138:

$$L = 2C + \pi \frac{D + d}{2} + \frac{(D - d)^2}{4C}$$

$$L = 2 \times 18 + \pi \frac{17 + 6}{2} + \frac{(17 - 6)^2}{4 \times 18}$$

$$L = 73.8''$$

De la tabla 2.26 se obtiene que para las bandas estandarizadas más cercanas:

$$B68 = 69.8in$$

$$B75 = 76.8in$$

Consideramos:

$$B75 = 76.8in$$

La distancia entre centros será:

$$C = 18 + \frac{(76.8 - 73.8)}{2}$$
$$C = 19.5" \approx 20"$$

### Numero de bandas

Velocidad Tangencial

$$V = \frac{\pi \times D \times n}{1000}$$
$$V = \frac{\pi \times (17 \times 25.4) \times 1800}{1000}$$
$$V = 2441.8 \frac{m}{min}$$

Determinamos la relación:

$$\frac{D}{d} = 2.8"$$

Del Anexo VII se obtiene para la sección "B" los valores de las constantes para potencia nominal:

$$a = 4.737$$

$$c = 13.962$$

$$e = 0.0234$$

Determinamos la potencia nominal según la ecuación 2.140:

$$P_{nom} = \left[ 2.19 \times a \times \left( \frac{10^3}{V} \right)^{0.09} - \frac{6.2 \times c}{K_d \times d} - 26.26 \times e \times \frac{V^2}{10^6} \right] \times \frac{V}{1000}$$

Del Anexo VIII obtenemos que:

$$K_d = 1.13$$

Remplazando valores tenemos que la potencia nominal es:

$$P_{nom} = \left[ 2.19 \times 4.737 \times \left( \frac{10^3}{2441.8} \right)^{0.09} - \frac{6.2 \times 13.962}{1.13 \times (6 \times 25.4)} - 26.26 \times 0.0234 \times \frac{2441.8^2}{10^6} \right]$$

$$\times \frac{2441.8}{1000}$$

$$P_{nom} = 13.2 \frac{kW}{Banda}$$

Determinamos la potencia nominal ajustada:

$$P_{nom-ajustada} = P_{nom} \times K_{\theta} \times K_L$$

Del Anexo IX tenemos que:

$$K_{\theta} = 0.91$$

$$\frac{D-d}{C} = \frac{17-6}{20}$$

$$\frac{D-d}{C} = 0.55$$

Del Anexo X para una Banda "B" tenemos:

$$K_L = 1.04$$

Remplazando valores se tiene:

$$P_{nom-ajustada} = 13.2 \times 0.91 \times 1.04$$

$$P_{nom-ajustada} = 12.5 \frac{kW}{Banda}$$

El número de bandas se determina mediante la ecuación 2.142:

$$\text{Numero de Bandas} = \frac{P_{dis}}{P_{nom-ajustada}}$$

$$\text{Numero de Bandas} = \frac{44.2}{12.5}$$

$$\text{Numero de Bandas} = 3.5$$

**Redondeando tenemos 4 bandas B-75**

### 3.6 SISTEMA ELÉCTRICO

En el diseño del proyecto del parque de MCH consta de 4 subestaciones como se mencionó anteriormente, cada una de estas generara una potencia de 40 kW aproximadamente, la suma de todas de estas potencia se lo realiza en la casa de máquinas de la segunda subestación por lo cual es necesario la selección adecuada de los cables. Es importante mencionar que las distancias entre las subestaciones son cortas por lo que no es necesario elevar la tensión.

Para determinar el cable calculamos la corriente que pasara por este mediante la siguiente ecuación:

$$I = \frac{P_o}{V \times \sqrt{3}}$$

La potencia aparente se determina mediante:

$$P_o = \frac{P}{\cos \varphi}$$

$$P_o = \frac{40}{0.9}$$

$$P_o = 44.44kVA$$

Sabiendo que el voltaje del generador es de:

$$V = 380V$$

Entonces remplazando valores tenemos que:

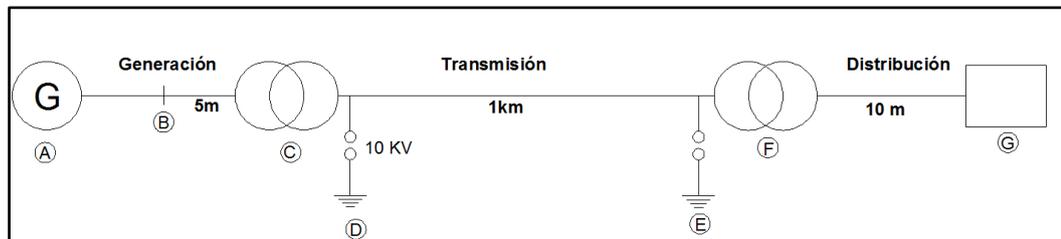
$$I_1 = \frac{44.44 \times 10^3}{380 \times \sqrt{3}}$$

$$I_1 = 67.51A$$

Con la corriente calculada mediante el Anexo XVIII del fabricante ELECTROCABLES C.A. de determinamos el tipo de cable. Para cada una de las fases incluido el neutro escogeremos un cable calibre AWG 6 del tipo TW. Debido que las pérdidas de tensión no son considerables, el tipo de cable seleccionado servirá para cada una de una de las subestaciones.

Para la transmisión y distribución de la energía generada es necesario calcular los cables y conductores para ello se elabora un diagrama del sistema eléctrico como se muestra en la figura 3.29 y según el Anexo XXI.

**Figura 3.29. Sistema Eléctrico**



*Fuente: Autores*

**Donde:**

**A:** Grupo de generación síncrona

**B:** Panel de control

**C:** Transformador trifásico de elevación 200 kVA, (0.22/10kV)

**D, E:** Pararrayos 10 KV

**F:** Transformador trifásico de reducción 200 kVA, (10/0.22 kV)

**E:** Tablero de distribución

**Generación**

Una vez obtenido la potencia total del parque al sumar cada una de la potencias de la subestaciones que es de 160 kW aproximadamente procedemos a seleccionar el cable que va desde tablero de control hasta el transformador trifásico de elevación que tiene un longitud de 5m.

La potencia aparente será:

$$P_o = \frac{P}{\cos \varphi}$$

$$P_o = \frac{160}{0.9}$$

$$P_o = 177.8kVA$$

Sabiendo que el voltaje del generador es de:

$$V = 380V$$

Entonces reemplazando valores tenemos que:

$$I_2 = \frac{177.8 \times 10^3}{380 \times \sqrt{3}}$$
$$I_2 = 270.2A$$

Con la corriente calculada mediante el Anexo XVIII del fabricante ELECTROCABLES C.A. de determinamos el tipo de cable. Escogemos el cable tipo TW calibre AWG 2, dos cables por cada fase. Para el neutro escogeremos un cable del tipo AWG 2 del tipo TW

### **Transmisión**

La segunda etapa que tiene una longitud de 1 km que va desde el transformador de elevación hasta el transformador de reducción, la transmisión constara de tres cables para cada fase, además de un cable para el neutro.

### **Datos de diseño**

Tramo:  $SE_C - SE_F$

*Potencia = 160kW*

*Longitud = 1km*

### **Hipótesis**

Factor de potencia:  $\cos\phi = 0.9$

Sistema: Trifásico de 3 Conductores

Disposición de conductores: triangular

Conductor: Aluminio reforzado con acero

Máxima temperatura de operación: 50 °C

### **Calculo de la caída de Tensión de la línea**

Según la tabla 2.15 seleccionamos la tensión:

$$V = 10kV$$

De la tabla 2.17 selección del conductor

$$S = 10mm^2$$

La caída de tensión se determina mediante la ecuación 2.143:

$$\Delta V\%_{0-1} = P_{0-1} \times L_{0-1} \times FCT$$

El factor de caída de tensión se obtiene de la tabla 2.18:

$$FCT = 2.231 \times 10^{-3}$$

Remplazando los valores tenemos que la caída de tensión es:

$$\Delta V\%_{C-F} = 160 \times 1 \times 2.231 \times 10^{-3}$$

$$\Delta V\%_{C-F} = 0.36$$

$$\Delta V\% = 0.36 < 0.6$$

El valor calculado de caída de tensión es menor al establecido por el Código Nacional de Electricidad por lo que podemos seleccionar de Tablas de Fabricantes el conductor según el Anexo XXIX. El conductor es TURKEY calibre AWG 6 de 105 Amperios.

### **Selección de los transformadores**

La potencia activa del sistema de la SE es de 160 kW, la potencia nominal aparente se determina mediante la ecuación:

$$P_o (kVA) = \frac{P(kW)}{\cos \varphi}$$

$$P_o (kVA) = \frac{160}{0.9}$$

$$P_o (kVA) = 177.8 kVA$$

De la tabla 2.22 y 2.23 seleccionamos un transformador de una potencia nominal de 200 kVA. La tensión nominal en el primario será de 10 kVA. Se asume que la tensión de distribución secundaria es de 220 V, por lo tanto los datos nominales del transformador será:

Tipo: Trifásico

Potencia: 200 kVA

Relación de transformación: 10 / 0.22 kV

En consecuencia utilizaremos un transformador de elevación de 200 kVA 0.22/10kV, y uno de reducción de 200 kVA 10/0.22 kV. La cotización de este se puede observar en el Anexo XX de marca EREMU (TRANSFORMADOR III ACEITE 200 kVA 10/0.22 kV, 60 Hz).

### Distribución

La tercera etapa hace referencia desde el transformador de reducción hasta un tablero de distribución general con una longitud de 5 m.

La potencia aparente será:

$$P_o = \frac{P}{\cos \varphi}$$

$$P_o = \frac{160}{0.9}$$

$$P_o = 177.8kVA$$

Sabiendo que el voltaje del generador es de:

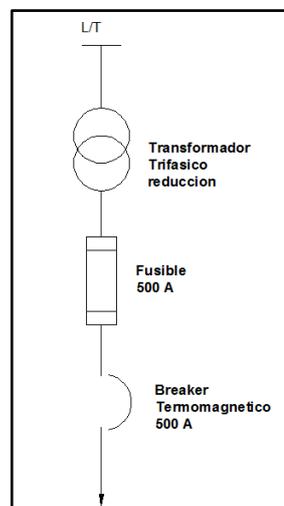
$$V = 220V$$

Entonces remplazando valores tenemos que:

$$I_3 = \frac{177.8 \times 10^3}{220 \times \sqrt{3}}$$

$$I_3 = 466.6A$$

**Figura 3.30. Sistema de Distribución**



*Fuente: Autores*

Con la corriente calculada mediante el Anexo XVIII del fabricante ELECTROCABLES C.A. de determinamos el tipo de cable. Escogemos el cable tipo TW calibre AWG1, tres cables por cada fase. Para el neutro escogeremos un cable del tipo AWG1 del tipo TW.

### 3.7 GUÍA PRÁCTICA PARA EL USO DE SOFTWARE DE DIMENSIONAMIENTO DE MICROCENTRALES

En este apartado presentaremos una guía sencilla para la utilización del software de dimensionamiento de una Microcentral Hidroeléctrica, el cual fue diseñado en función a los criterios establecidos por la OLADE y cuyos conceptos se presentan en el capítulo 2 del presente proyecto investigativo.

#### Características Generales

Empezaremos explicando el funcionamiento de los iconos del Menú derecho del software:



**Calcular:** Permite realizar el cálculo de toda una pantalla activa sin la necesidad de realizar el procedimiento por bloques, el cual lo explicaremos más adelante.

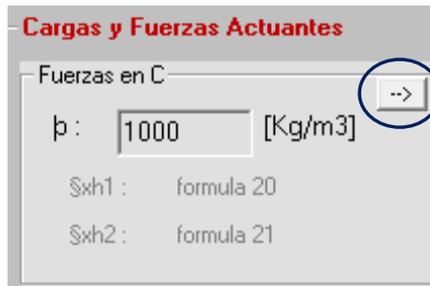
**Símbolos:** Contiene la simbología de las variables usadas en cada una de las hojas de cálculo.

**Gráfico:** Permite visualizar los gráficos de los elementos que se están dimensionando.

**Excel:** Aplicativo que permite contar con un resumen a modo de informe de los resultados obtenidos en las hojas de cálculo, los cuales podrán ser archivados en caso de ser requerido un historial de cálculo.

**Ayuda:** Brinda el apoyo necesario para resolver problemas que pudieran llegar a presentarse durante la utilización del software.

**Salir:** Permite salir del programa de manera segura.



**Calculo por bloques:** Realiza el cálculo paso a paso, esto se refiere a que cada bloque podría ser considerado como un elemento dependiente del anterior lo cual nos ayuda a guardar un orden en el procedimiento de cálculo evitando de esta manera el omitir algún resultado necesario.

### Iniciando en el programa

En el arranque del programa aparece una ventana en el que se solicita ingresar un nombre de usuario y contraseña figura 3.3, donde deberá ser ingresada la palabra “CENTRAL” en los dos casilleros y posteriormente “Aceptar”.

**Figura 3.31. Pantalla de arranque del Software**



*Fuente: Autores*

Posteriormente el programa solicita el ingreso de los datos disponibles de caudal y altura figura 3.32, los cuales estarán en función de las características de la cuenca en donde se realice el estudio Hidroenergetico, este proceso se realiza para comprobar si los datos ingresados corresponden a los de la Turbina Michell Banki.

**Figura 3.32. Ventana para el ingreso de datos aprovechables**

INGRESO DE DATOS MINIMOS

---

Altura Neta      Hn:  m      Aceptar

---

Caudal Aprovechable      Qt:  m<sup>3</sup>/s      Cancelar

Atención

\*Los Rangos para la Altura den estar dentro de      1 - 50 m      Y el  
 Caudal dentro de      0,025 5 m<sup>3</sup>/s

*Fuente: Autores*

Cada una de las hojas de cálculo presenta la opción para ingresar los datos que se requieren para dimensionar cada uno de los elementos que conforman una MCH, luego procedemos a seleccionar “CALCULAR” y obtendremos los valores de cálculo más importantes.

**Figura 3.33. Cuadro para el ingreso de los datos de diseño**

Datos	Resultados
Qmax : <input style="width: 50px;" type="text" value="30,87"/> [m <sup>3</sup> /s]	Carga Sobre la cresta de Vertedero 1,342 m
Qt: <input style="width: 50px;" type="text" value="0,24"/> [m <sup>3</sup> /s]	Espesor de la vertiente al pie del Azud 0,773 m
b : <input style="width: 50px;" type="text" value="9"/> [m]	Altura del Agua Sobre Cresta 0,92598 m
M : <input style="width: 50px;" type="text" value="2,21"/> <input checked="" type="checkbox"/> lock	Altura total del Agua sobre el lecho del rio 2,123 m
hazud : <input style="width: 50px;" type="text" value="0,5"/> [m]	Area del agua al pasar por el azud 8,33382 m
deltra h : <input style="width: 50px;" type="text" value="1"/> [m]	Profundidad de cuenca o colchon 0,35 m
	Velocidad del agua al pasar por la cresta de azud 3,704 m
	Profund. aguas abajo - Merriam 1,756 m
	Carga Energetica 1,623 m
	Velocidad de caída de agua 4,438 m/s
	Profundidad Aguas Abajo 0,5 m
	Caudal Sobre el Azud x metro Lineal 3,43 (m <sup>3</sup> /s)/m
	Profund. aguas abajo - Experimental 0,85 m
	Condición >>
	Calculo del Diente al final del Zampeado e : formula 16
	Calculo de la Longitud de la cuenca L : formula 17

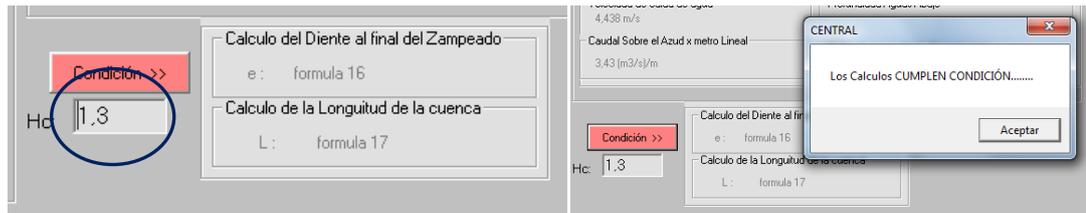
  

Coordenadas del perfil Creager	
X	Y
-0,362	-0,16355616540
-0,302	-0,03118748690
-0,182	0,087529540599
-0,002	0,179764946374
0,238	0,213278705989
0,538	0,149655018738
0,898	-0,05530072449
1,318	-0,45138274446
1,798	-1,09364481910
2,338	-2,04252484484
2,938	-3,36338524190
3,598	-5,12651870273

*Fuente: Autores*

El procedimiento de cálculo exige el cumplimiento de criterios técnicos que han sido establecidos por la OLADE, mismos que pueden ser controlados en base a las ventanas interactivas que han sido desarrolladas en el software, que contienen la información y sugerencias en caso de ser requerida una modificación en los datos ingresados en las hojas de cálculo. Esto puede ser observado en la figura 3.34.

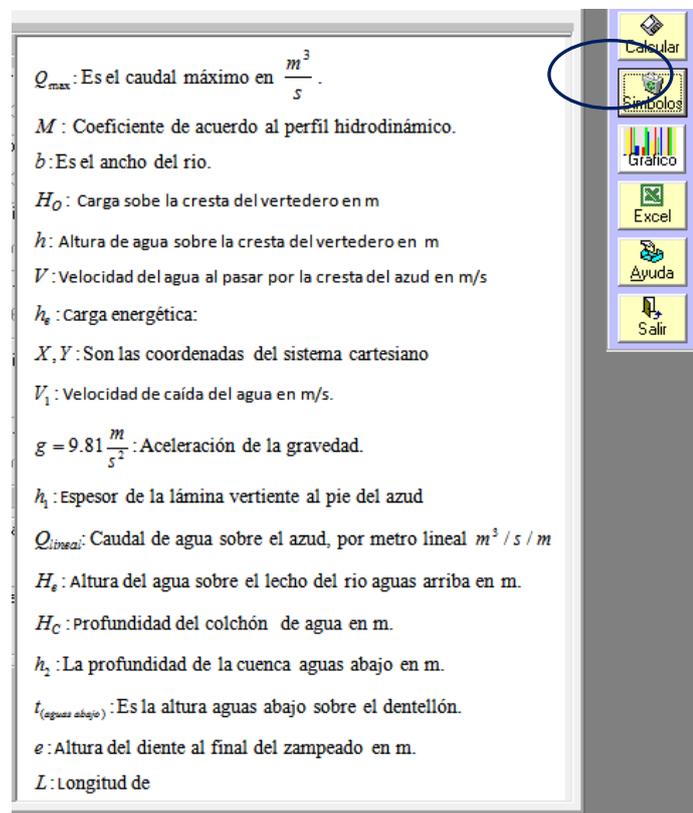
**Figura 3.34. Cuadro para el cumplimiento de criterios de diseño**



*Fuente: Autores*

Cada ventana contiene la información acerca de los significados de la simbología que ha sido usada en el cálculo, para acceder a esta información se debe pulsar en el icono símbolos y para salir se deberá pulsar una vez más, esto se observa en la figura 3.35.

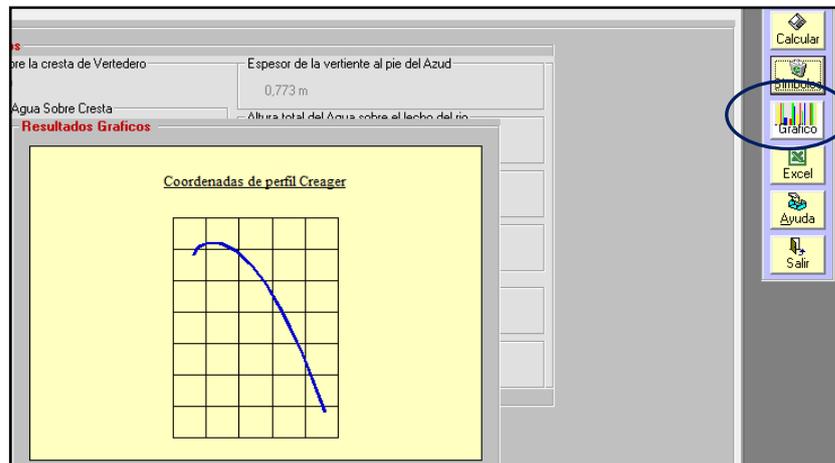
**Figura 3.35. Ventana de Simbología**



*Fuente: Autores*

Cada ventana contiene gráficos en los cuales se indica las dimensiones generales de los elementos que se están dimensionando para acceder a esta información se debe pulsar sobre el icono “GRAFICO” y para salir del mismo se deberá pulsar una vez más sobre este como se puede apreciar en la figura 3.36.

Figura 3.36. Ventana de graficas



Fuente: Autores

Existen datos que han sido cargados por defecto en el programa los cuales dependen exclusivamente del tipo de elementos que se utilicen para el dimensionamiento de la Microcentral, en caso de ser requerida la modificación de los mismos se deberá desactivar “lock” y se podrá ingresar un nuevo valor como se muestra en la figura 3.37.

Figura 3.37. Ingreso de valores por defecto

Datos		
Qmax :	30,87	[m3/s]
Qt :	0,24	[m3/s]
b :	9	[m]
M :	2,21	<input checked="" type="checkbox"/> lock
hazud :	0,5	[m]
delta h :	1	[m]

Fuente: Autores

El programa cuenta con tablas de cálculo, para ingresar datos en las mismas se deberá seleccionar la celda correspondiente a cada variable y posteriormente “Enter” de esta manera el valor ingresado quedara cargado en la celda, el cálculo de estas

tablas se lo realiza de la misma manera que un cálculo por bloques como se aprecia en la figura 3.38.

**Figura 3.38. Ingreso de datos en tablas de cálculo**

Elemento	Xn	Dimension X	Yn	Dimension Y	Peso Especifico	Peso	Brazo(B)	Momento
1	X1		Y1					
2	X2		Y2					
3	X3		Y3					

CALCULAR TOTAL :

*Fuente: Autores*

Con el fin de dar una solución práctica al dimensionamiento de una Microcentral han sido cargadas en el programa las principales tablas figura 3.39, para seleccionar de manera rápida las variables necesarias para el cálculo, ara acceder a estas tablas se debe pulsar sobre los nombres correspondientes a cada tabla y que están resaltados en azul junto con la variable a ser ingresada para salir de esta información se deberá pulsar nuevamente sobre este enlace.

**Figura 3.39. Ventana de Tablas para selección rápida de las variables de cálculo**

Tabla: Perdidas por turbulencia		Valores de rugosidad absoluta (K) en mm		
Material	Estado	Bueno	Normal	Malo
Tuberías lisas PVC			0.003	
Polietileno			0.003	
Resina de Poliéster con fibra de vidrio			0.003	
Concreto		0.6	0.15	0.6
Acero Comercial				
• No pintadas		0.015	0.03	0.06
• Pintadas		0.03	0.06	0.15
• Galvanizadas		0.06	0.15	0.3
Hierro fundido				
• Nuevas		0.015	0.3	0.6
• Viejas:				
Corrosión leve		0.6	1.5	3.0
Corrosión moderada		1.5	3.0	6.0
Corrosión severa		6	15	30

*Fuente.: Autores*

Luego de haber realizado todo el procedimiento de cálculo, el programa nos brinda la posibilidad de obtener un informe de resultados en formato Excel para lo cual se debe pulsar sobre el icono “Excel” y automáticamente este será generado. Para abandonar esta herramienta informática bastara con pulsar “SALIR” en cualquier momento y el programa automáticamente cerrara y estará disponible para futuras aplicaciones.

## **Conclusiones:**

En este capítulo se realizó el dimensionamiento de los componentes que forman parte de una Microcentral Hidroeléctrica, para el desarrollo del mismo se tomaron en cuenta todos los criterios de cálculo que se proponen por la OLADE mismos que se presentaron en el capítulo anterior y que están dirigidos específicamente a la Microgeneración hidroeléctrica.

Es así como hemos llegado a determinar que para la captación de agua la bocatoma seleccionada es de tipo tirolesa debido a su sencillez de construcción y sobre todo porque asegura una captación continua sin la necesidad de la derivación de la cuenca, puesto que está ubicado en el cauce del río.

La tubería tanto de conducción como la de presión ha sido seleccionada en función de las características de la zona en la que realizamos el presente estudio, concluyendo en que la fabricada de PVC sería la más óptima a implementar debido a las múltiples ventajas que nos brinda en lo que se refiere a funcionalidad, facilidad de instalación, duración y bajo costo.

Como se había mencionado anteriormente el tipo de turbina más común a usar en los proyectos de Microgeneración Hidroeléctrica es la Michell Banki debido a las características de funcionalidad y eficiencia que poseen, en este capítulo se profundiza en el dimensionamiento de los componentes principales que la conforman logrando de esta manera determinar la potencia máxima que se generara con la implementación de la misma en cada una de las cuatro subestaciones que son necesarias para abastecer la demanda necesaria de energía eléctrica en la Parroquia Luis Cordero del Cantón Gualaceo, se concluye este análisis determinando que para este proyecto se utilizara la Turbina estandarizada TM34C por estar esta dentro de los rangos de caudal y altura disponibles en la zona.

Para la generación eléctrica se propone la implementación de generadores trifásicos del tipo síncrono por la gran ventaja que nos ofrecen estos de poder ser conectados en paralelo permitiéndonos de esta manera sumar la potencia energética generada en cada una de las subestaciones, misma que para este proyecto será de 176.8 kW. Se debe prestar principal atención en que la potencia generada debe ser igual en cada

subestación, 44.2 kW para este proyecto, ya que de lo contrario se produciría inestabilidad en el sistema, otro punto importante a tener en cuenta es la frecuencia pues una variación en la misma impediría la sincronización de los generadores en la puesta en paralelo.

Para la transmisión de movimiento entre el generador y la turbina se empleara banda B-75, la razón que se escogió este sistema es debido a su facilidad tanto de construcción de las poleas como de adquisición de las bandas ya que son muy comunes en el mercado.

## CAPITULO IV: ANÁLISIS ECONÓMICO FINANCIERO

### Introducción

Para un proyecto de Micro generación Hidroeléctrica es muy importante conocer los costos de obras que conforman el parque de MCH, de este análisis dependerá si es factible o no ejecutar el proyecto. Debido que la energía es muy importante para el desarrollo y un vivir de las personas.

### 4.1. PRESUPUESTO DEL PARQUE DE MCH

Para el análisis de los costos de los elementos que conforman el Parque de MCH nos basaremos en la lista de precios referenciales para Enero del 2012.

#### 4.1.1 Costo de Obras Civiles

Para los costos de la obra civil analizaremos solo de una subestación, para las tres restantes se tomara el valor de este análisis debido a que las otras subestaciones restantes tienen mucha similitud con esta.

<b>Tabla 4.1. Costo de la Casa de Maquinas</b>				
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio Unitario</b>	<b>Precio Total</b>
Cimientos de Hormigón Cilopeo $F_c = 180kg/cm^2$	$m^3$	2	81.61	163.22
Hormigón simple en columnas 0.2x0.2 $F_c = 250kg/cm^2$	$m^3$	0.32	204.94	65.58
Piso Hormigón Premezclado $F_c = 350kg/cm^2$	$m^3$	1.8	116.10	208.98
Mampostería de Ladrillo	$m^2$	24	14.63	351.12
Puerta Embutida Metálica	U	1	103.74	146.70
Ventana Metálica con Protección	U	1	58	58
Cubierta Eternit (Con estructura)	$m^2$	12	27.34	328.08
			<b>Total</b>	<b>US\$1321.68</b>

Fuente: Autores

<b>Tabla 4.2. Costo de la Bocatoma</b>				
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio Unitario</b>	<b>Precio Total</b>
<b>Azud</b>				
Hormigón premezclado $F_C = 210kg/cm^2$	$m^3$	3.42	97.80	334.48
<b>Dentellón de Salida</b>				
Hormigón premezclado $F_C = 210kg/cm^2$	$m^3$	3.9	97.80	381.42
<b>Dentellón de Entrada</b>				
Hormigón premezclado $F_C = 210kg/cm^2$	$m^3$	1.7	97.80	166.26
<b>Paredes</b>				
Hormigón premezclado $F_C = 210kg/cm^2$	$m^3$	1.5	97.80	146.70
<b>Rejilla</b>				
Barra Cuadrada 1/2" in	U	2	1.6	3.2
			<b>Total</b>	<b>US\$1032.06</b>

*Fuente: Autores*

<b>Tabla 4.3. Costo de la Tubería de Conducción</b>				
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio Unitario</b>	<b>Precio Total</b>
Plastigama PVC 315 91 Psi	U	1	171.36	171.36
			<b>Total</b>	<b>US\$171.36</b>

*Fuente: Autores*

<b>Tabla 4.4. Costo del Desarenador y Tanque de Presión</b>				
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio Unitario</b>	<b>Precio Total</b>
Mampostería de ladrillo	$m^2$	60	18.90	1134
Enlucido vertical	$m^2$	120	3.20	384
Hormigón simple $F_C = 210kg/cm^2$	$m^3$	1.7	115.49	196.33
Barra Cuadrada 1/2" in	U	16	1.6	25.6
Compuerta Tanque de Presión	U	1	420	420
Malla Electrosoldada	U	1	19.99	19.99
			<b>Total</b>	<b>US\$ 2179.92</b>

Fuente: Autores

<b>Tabla 4.5. Costo de los Apoyos y Anclajes</b>				
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio Unitario</b>	<b>Precio Total</b>
<b>Apoyos</b>				
Hormigón premezclado $F_C = 210kg/cm^2$	$m^3$	30	97.80	2934
<b>Anclajes</b>				
Hormigón premezclado $F_C = 210kg/cm^2$	$m^3$	2.47	97.80	241.57
			<b>Total</b>	<b>US\$ 3175.57</b>

Fuente: Autores

#### 4.1.2 Tubería de Presión

Como se mencionó anteriormente se utilizara tubería de PVC por las características que brindan estas y más que nada por su facilidad de transporte e instalación, al igual que los costos de obra civil se analizara solo para una subestación debido a que para las restantes es similar.

<b>Tabla 4.6. Costo de la Tubería de Presión</b>				
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio Unitario</b>	<b>Precio Total</b>
Tubería 400 mm181 Psi	<i>m</i>	30	312	9360
			<b>Total</b>	<b>US\$ 9360</b>

*Fuente: Autores*

#### **4.1.3 Costos equipos Electromecánicos**

Para el costo de todo el grupo electromecánico nos basamos de una cotización recibida por parte de 3RC del Perú, en el cual constan todos los componentes Electromecánicos como se puede observar en el Anexo XXII.

<b>Tabla 4.7. Costo del Equipo Electromecánico</b>				
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Precio total</b>
Válvula tipo mariposa 10" diámetro	U	1		
Junta de Montaje 10" diámetro	U	1		
Turbina Michell Banki 48 kW en el eje	U	1		
Acoplamiento Turbina –Generador 2 poleas y 4 bandas	U	1		
Generador eléctrico 40 kW, 1800 rpm	U	1		
Tablero de medición y control	U	1		
Gobernador automático de Velocidad tipo electrónico	U	1		
Material complementario para montaje	U	1		
			<b>Total</b>	<b>35.000</b>

*Fuente: Autores*

#### 4.1.4 Costo Sistema Eléctrico

Para el sistema eléctrico se analizó para la conexión de las cuatro subestaciones, además de la transmisión y distribución del sistema.

<b>Tabla 4.8. Costo del Sistema Eléctrico</b>				
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio Unitario</b>	<b>Precio Total</b>
<b>Subestaciones</b>				
Cable Fase	m	2340	\$2.10	\$4914
Cable Neutro	m	780	\$2.10	\$1638
Postes	U	2	\$142.25	\$284.5
<b>Generación Total</b>				
Cable Fase	m	15	\$5.4	\$81
Cable Neutro	m	5	\$5.4	\$27
Transformador	m	1	\$8741.63	\$8741.63
<b>Transmisión</b>				
Pararrayos	U	2	\$52.14	\$104.28
Postes	U	10	\$142.25	\$1422.5
Cable Fase	m	3000	\$0.73	\$2190
Cable Neutro	3	1000	\$0.73	\$730
<b>Distribución</b>				
Transformador	U	1	\$8741.63	\$8741.63
Cable Fase	m	15	\$8.69	\$130.35
Cable Neutro	m	5	\$8.69	\$43.45
Fusible 500 A	U	1	\$53.54	\$53.54
Breaker Caja Mod.	U	1	\$1320	\$1320
Tablero de distribución	U	1	\$69.63	\$69.63
			<b>Total</b>	<b>US\$30221.51</b>

*Fuente: Autores*

## 4.2 EVALUACIÓN ECONÓMICA TOTAL DEL PROYECTO

En la tabla 4.9 se resume el costo total del proyecto para las 4 subestaciones para la generación de 160 kW, con una vida útil proyectada para 30 años del Parque de MCH.

#### 4.2.1 Cuadro de Flujo de Caja Interno

<b>Tabla 4.9. Inversiones en el Parque de MCH de 160 kW</b>			
<b>Inversiones</b>	<b>Total US\$</b>	<b>Año 1 US\$</b>	<b>Año 2 US\$</b>
Obras Civiles	31522.36	31522.36	
Tubería de Presión	37440		37440
Equipo Electromecánico	140000		140000
Sistema Eléctrico	30221.51		30221.51
<b>TOTALES</b>	<b>239183.87</b>	<b>31522.36</b>	<b>207661.51</b>

*Fuente: Autores*

#### Costo anual

Para los costos de mantenimiento se tomaran en cuenta a partir del año 3 de funcionamiento y se estima un valor de 6000 dólares anuales.

#### Previsión de venta de Energía

Para el análisis de venta de energía se debe realizar a partir del año de funcionamiento del Parque, es decir a partir del tercer año, el Parque Diseñado producirá 160 kWh, los valores que se estiman vender se resumen en la tabla 4.10.

<b>Tabla 4.10. Venta Anual de Energía Proyectada</b>	
<b>Años</b>	<b>kWh</b>
3-5	1400000
6-10	1400000
11-15	1400000
16-20	1400000
21-25	1400000
25-30	1400000

*Fuente: Autores*

#### Determinación de los costos

Este análisis se puede observar en la tabla 4.12, para ello debemos determinar los siguientes valores:

### **Costo de Inversión (Columna E)**

Se analizara que la inversión se lo realizara en dos años, el primer año se invertirá todo lo que es obras civiles, quedando para el segundo año la inversión de los demás componentes del Parque.

Inversión:    Año 1: 31522.36  
                  Año 2: 207661.51

### **Costos de operación y funcionamiento**

El inicio de operaciones del Parque será a partir del tercer año hasta el final del proyecto, año 30 que asciende a \$6000.

### **Costo Total (Columna G)**

Resulta de la suma de año por año de los costos de inversión más los costos de operación y mantenimiento (E+F).

### **Determinación de los beneficios**

#### **Ingreso por venta de Energía (Columna B)**

Se determina con la energía que se planea vender por cada año del proyecto, en nuestro caso desde el tercer año. Para determinar el monto de los ingresos se asume un valor del kWh, para nuestro caso asumiremos un valor de 4 centavos de dólar tabla 4.11.

<b>Tabla 4.11. Ingreso por venta de Energía a 4¢ el kWh</b>		
<b>Años</b>	<b>kWh</b>	<b>Ingreso de venta de Energía US\$</b>
3-5	1400000	56000
6-10	1400000	56000
11-15	1400000	56000
16-20	1400000	56000
21-25	1400000	56000
25-30	1400000	56000

*Fuente: Autores*

### **Valor residual de rescate (Columna C)**

Teniendo en cuenta que la proyección de uso del Parque es de 30 años:

### Valor Residual de Obras Civiles

**Valor inicial:**  $VI^C = 31522.36US\$$

**Vida Útil:**  $N = 50 \text{ años}$

**Tiempo de uso del Proyecto:**  $n = 30 \text{ años}$

Entonces el valor residual será:

$$V'R_{30} = 31522.36 \times 1 - \frac{30}{50}$$

$$V'R_{30} = 12608.95$$

### Valor residual de la Maquinaria y Equipo Electromecánico

**Valor inicial:**  $VI_m = 207661.51US\$$

**Vida Útil:**  $N = 30 \text{ años}$

**Tiempo de uso del Proyecto:**  $n = 28 \text{ años}$

Entonces el valor residual será:

$$V''R_{30} = 207661.51 \times 1 - \frac{28}{30}$$

$$V''R_{30} = 13844.8$$

### Otros valores residuales

Para esto solo consideraremos la recuperación del capital de trabajo, que asciende a 3 meses el valor de los costos operativos.

$$V'''R_{30} = 6000 \times \frac{3}{12}$$

$$V'''R_{30} = 1500$$

El Valor Residual Total (Columna C):

$$VR_{30} = V'R_{30} + V''R_{30} + V'''R_{30}$$

$$VR_{30} = 12608.95 + 13844.8 + 1500$$

$$VR_{30} = 27953.75$$

### Beneficios totales (columna D)

El beneficio principal del proyecto es el económico ya que al producir su propia energía y con ellos estarían exentos de pagos a la empresa Eléctrica. Además y no menos importante es el uso de energía renovable limpia con lo que se ayudaría al ecosistema ya que este proyecto no utiliza ningún tipo de combustible fósil. Este beneficio se obtiene sumando año a año la venta de energía y el valor residual.

### Flujo de Caja Interno (columna H)

Se obtiene restando los gastos totales de los beneficios totales (D-G).

**Tabla 4.12. Flujo de caja interno proyectada para cada año de funcionamiento del Parque de MCH**

Año	Beneficios			Costos			Flujo de Caja
	Valor Energía	Valor Residual	Benef. total	Invers.	Opera. Y Mant.	Costo Total	
A	B	C	D	E	F	G	H
1	0		0	31.53	0	31.53	-31.53
2	0		0	207.66	0	207.66	-207.66
3	56		56		6	6	50
4	56		56		6	6	50
5	56		56		6	6	50
6	56		56		6	6	50
7	56		56		6	6	50
8	56		56		6	6	50
9	56		56		6	6	50
10	56		56		6	6	50
11	56		56		6	6	50
12	56		56		6	6	50
13	56		56		6	6	50
14	56		56		6	6	50
15	56		56		6	6	50
16	56		56		6	6	50
17	56		56		6	6	50
18	56		56		6	6	50
19	56		56		6	6	50
20	56		56		6	6	50
21	56		56		6	6	50
22	56		56		6	6	50
23	56		56		6	6	50
24	56		56		6	6	50
25	56		56		6	6	50
26	56		56		6	6	50
27	56		56		6	6	50
28	56		56		6	6	50
29	56		56		6	6	50
30	56	27.96	83.96		6	6	77.96

Fuente: Autores

## 4.2.2 Cálculo de los indicadores del análisis Beneficio-Costo

### Cálculo del Valor Actual Neto (VAN)

Se calcula actualizando el flujo de caja de la tabla 10.12 a diversas tasas de descuentos y sumando estos valores. Este análisis se puede observar en la tabla 4.13.

<b>Tabla 4.13. Procedimiento de cálculo del VAN a diversas Tasas de Interés</b>					
Año	Flujo de Caja	Tasa 5%		Tasa 1%	
		Factor del Valor Actual	VANE 5%	Factor del Valor Actual	VANE 1%
A	B	C	D	E	F
1	-31.53	0.9524	-30.03	0.9901	-31.22
2	-207.66	0.907	-188.35	0.9803	-203.57
3	50	0.8638	43.19	0.9706	48.53
4	50	0.8227	41.14	0.961	48.05
5	50	0.7835	39.18	0.9515	47.58
6	50	0.7462	37.31	0.9421	47.11
7	50	0.7267	36.34	0.9327	46.64
8	50	0.6768	33.84	0.9235	46.18
9	50	0.6446	32.23	0.9143	45.72
10	50	0.6139	30.70	0.9053	45.27
11	50	0.5847	29.24	0.8963	44.82
12	50	0.5568	27.84	0.8875	44.38
13	50	0.5303	26.52	0.8787	43.94
14	50	0.5051	25.26	0.87	43.50
15	50	0.481	24.05	0.8614	43.07
16	50	0.4581	22.91	0.8528	42.64
17	50	0.4363	21.82	0.8444	42.22
18	50	0.4155	20.78	0.836	41.80
19	50	0.3957	19.79	0.8277	41.39
20	50	0.3769	18.85	0.8196	40.98
21	50	0.359	17.95	0.8114	40.57
22	50	0.3419	17.10	0.8034	40.17
23	50	0.3256	16.28	0.7955	39.78
24	50	0.3101	15.51	0.7876	39.38
25	50	0.2953	14.77	0.7798	38.99
26	50	0.2813	14.07	0.7721	38.61
27	50	0.2679	13.40	0.7644	38.22
28	50	0.2551	12.76	0.7368	36.84
29	50	0.243	12.15	0.7484	37.42
30	77.96	0.2314	18.04	0.7419	57.84
		464.55		976.79	

Fuente: Autores

### Flujo de caja (columna B)

Es valor calculado de la tabla 10.6 (columna H). Se elige una tasa de descuento. Generalmente se recomienda iniciar con una tasa 5% o 10%.

### Factor del valor actual: Tasa 5% (columna C)

Son los valores del factor de valor actual con una tasa del 5% para todo el periodo de vida útil del proyecto. Estos valores son tomados del Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas, Federico Coz.

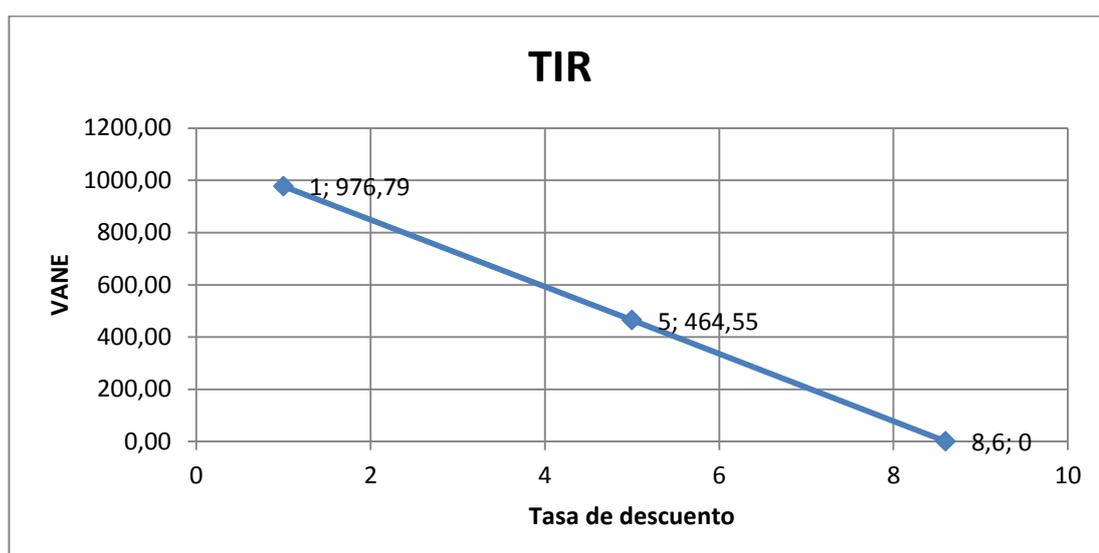
### Valor actualizado actual (columna D)

Se obtiene multiplicando el flujo de caja anual (columna B) por el factor del valor actual (Columna C). El valor actual neto económico (VANE) se obtiene sumando los valores de la columna D. En la columna E y F son los cálculos para una tasa de 1% de descuento.

### Calculo de la Tasa Interna de Retorno (TIR)

El TIR es la tasa de descuento que hace el VAN igual a cero. Se determina en forma iterativa con la ayuda de la figura 4.1. Obteniendo un TIR de 8.6%.

**Figura 4.1. Tasa Interna de Retorno para análisis normal**



*Fuente: Autores*

### 4.2.3 Cálculo del costo del kWh

Se obtiene dividiendo el valor actual de todos los costos entre el valor actual de los kWh que se espera vender, a una misma tasa de descuento tabla 4.14.

#### Costo Total

#### Columna B

Son los costos totales del Parque de MCH, tomado de la tabla 4.12 del flujo de caja interno (Columna G), en miles de dólares. En el último año se debe restar el valor residual

#### Columna C

Son los factores del valor actual de pago único a la tasa de descuento o interés que se haya seleccionado. El factor se calcula tomado los valores de la tabla 10.3:

Tasa de interés 9%:

Año del último pago de la serie:

$n = 29$  ; Factor: 10.1983

Año anterior al primer pago de la serie:

$n = 2$  ; Factor: 1.7579

$$\text{Factor acumulado} = 10.1983 - 1.7579 = 8.4404$$

#### Valor actual de los costos (columna D)

Son la multiplicación de los costos totales anuales de la columna B por los factores de la columna C. En la última fila se colocan la suma algebraica.

Según los datos de la tabla 4.14 tenemos que el costo del kWh se determina mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Costo por kWh} = \frac{\text{Valor actual total costos}}{\text{Valor actual total energía}}$$

$$\text{Costo por kWh} = \frac{438.33}{21568.54}$$

$$\text{Costo por kWh} = 0.0203\text{US\$}$$

<b>Tabla 4.14. Calculo del costo del kWh (Miles de US\$ corrientes)</b>							
Año	Costos			Energía			Costo del kWh US\$
	Costo Total Anual	Factor del Valor Actual	Valor Actual Costos	Miles de kWh vendidos	Factor del Valor actual	Valor actual energía miles kWh	
A	B	C	D	E	F	G	H
1	31.53	0.9174	28.93				
2	207.66	1.7591	365.29				
3	6		0.00	1400	0.889	1244.6	
4	6		0.00	1400	0.8548	1196.72	
5	6		0.00	1400	0.8219	1150.66	
6	6		0.00	1400	0.7903	1106.42	
7	6		0.00	1400	0.7599	1063.86	
8	6		0.00	1400	0.7307	1022.98	
9	6		0.00	1400	0.7026	983.64	
10	6		0.00	1400	0.6756	945.84	
11	6		0.00	1400	0.6496	909.44	
12	6		0.00	1400	0.6246	874.44	
13	6		0.00	1400	0.6006	840.84	
14	6		0.00	1400	0.5775	808.5	
15	6	8.4404	50.64	1400	0.5553	777.42	
16	6		0.00	1400	0.5339	747.46	
17	6		0.00	1400	0.5134	718.76	
18	6		0.00	1400	0.4936	691.04	
19	6		0.00	1400	0.4747	664.58	
20	6		0.00	1400	0.4564	638.96	
21	6		0.00	1400	0.4388	614.32	
22	6		0.00	1400	0.422	590.8	
23	6		0.00	1400	0.4057	567.98	
24	6		0.00	1400	0.3901	546.14	
25	6		0.00	1400	0.3751	525.14	
26	6		0.00	1400	0.3607	504.98	
27	6		0.00	1400	0.3468	485.52	
28	6		0.00	1400	0.3335	466.9	
29	6		0.00	1400	0.3207	448.98	
30	-21.96	0.3083	-6.77	1400	0.3083	431.62	
I			438.09			21568.54	0.020

Fuente: Autores

#### 4.2.4 Análisis de sensibilidad

El propósito de este análisis es de investigar los efectos sobre el proyecto tendrían algunos cambios en las premisas establecidas sobre costos e ingresos.

Analizaremos un nuevo cálculo si todos los gastos de obras civiles se incrementan en un 10% y otro suponiendo que los ingresos se reducen un 10%.

##### 4.2.4.1 Análisis aumentando el 10% de costos de la Obra Civil

Los valores del costo de la obra civil aumentado en un 10 % se pueden observar en la tabla 4.15.

<b>Tabla4.15. Inversiones en el Parque de MCH de 160 kW con un aumento del 10% del costo de la Obras Civil.</b>			
Inversiones	Total US\$	Año 1 US\$	Año 2 US\$
Obra Civil	34674.60	34674.60	
Tubería de Presión	37440		37440
Equipo Electromecánico	140000		140000
Sistema Eléctrico	30221.51		30221.51
<b>TOTALES</b>	<b>242336.11</b>	<b>34674.60</b>	<b>207661.51</b>

*Fuente: Autores*

#### Costo de Inversión:

Inversión: Año 1: 34674.60

Año 2: 207661.51

#### Valor Residual de Obras Civiles

**Valor inicial:**  $VI^C = 34674.60US\$$

**Vida Útil:**  $N = 50 años$

**Tiempo de uso del Proyecto:**  $n = 30 años$

Entonces el valor residual será:

$$V'R_{30} = 34674.60 \times \left(1 - \frac{30}{50}\right)$$

$$V'R_{30} = 13869.84$$

### Valor residual de la maquinaria y equipo Electromecánico

**Valor inicial:**  $VI_m = 207661.51US\$$

**Vida Útil:**  $N = 30 \text{ años}$

**Tiempo de uso del Proyecto:**  $n = 28 \text{ años}$

Entonces el valor residual será:

$$V''R_{30} = 207661.51 \times 1 - \frac{28}{30}$$

$$V''R_{30} = 13844.8$$

### Otros valores residuales

Para esto solo consideraremos la recuperación del capital de trabajo, que asciende a 3 meses el valor de los costos operativos.

$$V'''R_{30} = 6000 \times \frac{3}{12}$$

$$V'''R_{30} = 1500$$

El Valor Residual Total (Columna C):

$$VR_{30} = V'R_{30} + V''R_{30} + V'''R_{30}$$

$$VR_{30} = 13869.54 + 13844.8 + 1500$$

$$VR_{30} = 29214.64$$

### Flujo de Caja Interno para un aumento del 10% de costo de la Obra Civil

Se obtiene restando los gastos totales de los beneficios totales este análisis se puede observar en la tabla 4.16.

**Tabla 4.16. Flujo de caja interno para un aumento del 10% del costo de la Obra Civil**

Año	Beneficios			Costos			Flujo de Caja
	Valor Energía	Valor Residual	Benef. total	Invers.	Opera. Y Mant.	Costo Total	
A	B	C	D	E	F	G	H
1	0		0	34.68	0	34.68	-34.68
2	0		0	207.66	0	207.66	-207.66
3	56		56		6	6	50
4	56		56		6	6	50
5	56		56		6	6	50
6	56		56		6	6	50
7	56		56		6	6	50
8	56		56		6	6	50
9	56		56		6	6	50
10	56		56		6	6	50
11	56		56		6	6	50
12	56		56		6	6	50
13	56		56		6	6	50
14	56		56		6	6	50
15	56		56		6	6	50
16	56		56		6	6	50
17	56		56		6	6	50
18	56		56		6	6	50
19	56		56		6	6	50
20	56		56		6	6	50
21	56		56		6	6	50
22	56		56		6	6	50
23	56		56		6	6	50
24	56		56		6	6	50
25	56		56		6	6	50
26	56		56		6	6	50
27	56		56		6	6	50
28	56		56		6	6	50
29	56		56		6	6	50
30	56	29.3	85.3		6	6	79.3

Fuente: Autores

**Cálculo de los indicadores del análisis beneficio-costos para un aumento del 10% del costo de las Obras Civiles**

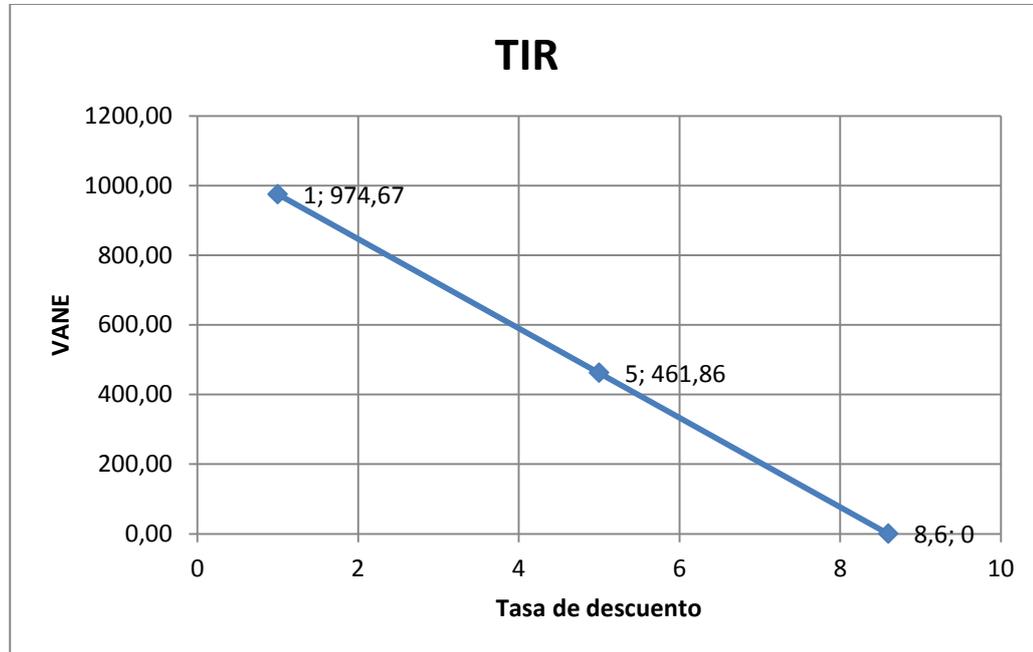
**Cálculo del Valor Actual Neto (VAN)**

<b>Tabla 4.17. Procedimiento de cálculo del VAN a diversas Tasas de Interés para un aumento del 10% del costo de las Obras Civiles</b>					
Año	Flujo de Caja	Tasa 5%		Tasa 1%	
		Factor del Valor Actual	VANE 5%	Factor del Valor Actual	VANE 1%
A	B	C	D	E	F
1	-34.68	0.9524	-33.03	0.9901	-34.34
2	-207.66	0.907	-188.35	0.9803	-203.57
3	50	0.8638	43.19	0.9706	48.53
4	50	0.8227	41.14	0.961	48.05
5	50	0.7835	39.18	0.9515	47.58
6	50	0.7462	37.31	0.9421	47.11
7	50	0.7267	36.34	0.9327	46.64
8	50	0.6768	33.84	0.9235	46.18
9	50	0.6446	32.23	0.9143	45.72
10	50	0.6139	30.70	0.9053	45.27
11	50	0.5847	29.24	0.8963	44.82
12	50	0.5568	27.84	0.8875	44.38
13	50	0.5303	26.52	0.8787	43.94
14	50	0.5051	25.26	0.87	43.50
15	50	0.481	24.05	0.8614	43.07
16	50	0.4581	22.91	0.8528	42.64
17	50	0.4363	21.82	0.8444	42.22
18	50	0.4155	20.78	0.836	41.80
19	50	0.3957	19.79	0.8277	41.39
20	50	0.3769	18.85	0.8196	40.98
21	50	0.359	17.95	0.8114	40.57
22	50	0.3419	17.10	0.8034	40.17
23	50	0.3256	16.28	0.7955	39.78
24	50	0.3101	15.51	0.7876	39.38
25	50	0.2953	14.77	0.7798	38.99
26	50	0.2813	14.07	0.7721	38.61
27	50	0.2679	13.40	0.7644	38.22
28	50	0.2551	12.76	0.7368	36.84
29	50	0.243	12.15	0.7484	37.42
30	79.3	0.2314	18.35	0.7419	58.83
		461.86		974.67	

Fuente: Autores

**Calculo de la Tasa Interna de Retorno (TIR) para un aumento del 10% del costo de la Obra civil**

**Figura 4.2. TIR para un aumento del 10% del costo de las Obras Civiles**



*Fuente: Autores*

Según la figura 4.2 la tasa Interna de retorno es:

$$TIR = 8.6$$

**Calculo del costo del kWh para un aumento del 10% del costo de la Obra Civil.**

El costo del kWh para un aumento del 10% del costo de la obra civil será:

$$\text{Costo por kWh} = \frac{\text{Valor actual total costos}}{\text{Valor actual total energia}}$$

$$\text{Costo por kWh} = \frac{440.57}{21568.54}$$

$$\text{Costo por kWh} = 0.0204US\$$$

El desarrollo para determinar el costo del kWh si aumentamos el 10% del costo de Obras Civiles se puede observar en la tabla 4.18.

**Tabla 4.18. Calculo del costo del kWh (Miles de US\$ corrientes)para un aumento del 10% del costo de la Obra Civiles**

Año	Costos			Energía			Costo del kWh US\$
	Costo Total Anual	Factor del Valor Actual	Valor Actual Costos	Miles de kWh vendidos	Factor del Valor actual	Valor actual energía miles kWh	
A	B	C	D	E	F	G	H
1	34.68	0.9174	31.82				
2	207.66	1.7591	365.29				
3	6		0.00	1400	0.889	1244.6	
4	6		0.00	1400	0.8548	1196.72	
5	6		0.00	1400	0.8219	1150.66	
6	6		0.00	1400	0.7903	1106.42	
7	6		0.00	1400	0.7599	1063.86	
8	6		0.00	1400	0.7307	1022.98	
9	6		0.00	1400	0.7026	983.64	
10	6		0.00	1400	0.6756	945.84	
11	6		0.00	1400	0.6496	909.44	
12	6		0.00	1400	0.6246	874.44	
13	6		0.00	1400	0.6006	840.84	
14	6		0.00	1400	0.5775	808.5	
15	6	8.4404	50.64	1400	0.5553	777.42	
16	6		0.00	1400	0.5339	747.46	
17	6		0.00	1400	0.5134	718.76	
18	6		0.00	1400	0.4936	691.04	
19	6		0.00	1400	0.4747	664.58	
20	6		0.00	1400	0.4564	638.96	
21	6		0.00	1400	0.4388	614.32	
22	6		0.00	1400	0.422	590.8	
23	6		0.00	1400	0.4057	567.98	
24	6		0.00	1400	0.3901	546.14	
25	6		0.00	1400	0.3751	525.14	
26	6		0.00	1400	0.3607	504.98	
27	6		0.00	1400	0.3468	485.52	
28	6		0.00	1400	0.3335	466.9	
29	6		0.00	1400	0.3207	448.98	
30	-23.3	0.3083	-7.18	1400	0.3083	431.62	
<b>I</b>			<b>440.57</b>			<b>21568.54</b>	<b>0.020</b>

Fuente: Autores

#### 4.2.4.2 Análisis con un disminución del 10% de los ingresos anuales

##### Previsión de venta de Energía

Se analizara con una disminución del 10% de la venta de energía anual como se puede observar en la tabla 4.19.

<b>Tabla 4.19. Venta Anual de Energía con una disminución del 10%</b>	
<b>Años</b>	<b>kWh</b>
3-5	1260000
6-10	1260000
11-15	1260000
16-20	1260000
21-25	1260000
25-30	1260000

*Fuente: Autores*

En la tabla 4.20 se puede observar los valores que se pretenden vender con una disminución anual del 10%

<b>Tabla 4.20. Ingreso por venta de Energía a 4¢ el kWh con una disminución de 10%</b>		
<b>Años</b>	<b>kWh</b>	<b>Ingreso de venta de Energía US\$</b>
3-5	1260000	50400
6-10	1260000	50400
11-15	1260000	50400
16-20	1260000	50400
21-25	1260000	50400
25-30	1260000	50400

*Fuente: Autores*

## Flujo de Caja Interno para una disminución del 10% de los ingresos anuales

Tabla 4.21. Flujo de caja interno para una disminución del 10% de los ingresos anuales							
Año	Beneficios			Costos			Flujo de Caja
	Valor Energía	Valor Residual	Benef. total	Invers.	Opera. Y Mant.	Costo Total	
A	B	C	D	E	F	G	H
1	0		0	31.53	0	31.53	-31.53
2	0		0	207.66	0	207.66	-207.66
3	50.4		50.4		6	6	44.4
4	50.4		50.4		6	6	44.4
5	50.4		50.4		6	6	44.4
6	50.4		50.4		6	6	44.4
7	50.4		50.4		6	6	44.4
8	50.4		50.4		6	6	44.4
9	50.4		50.4		6	6	44.4
10	50.4		50.4		6	6	44.4
11	50.4		50.4		6	6	44.4
12	50.4		50.4		6	6	44.4
13	50.4		50.4		6	6	44.4
14	50.4		50.4		6	6	44.4
15	50.4		50.4		6	6	44.4
16	50.4		50.4		6	6	44.4
17	50.4		50.4		6	6	44.4
18	50.4		50.4		6	6	44.4
19	50.4		50.4		6	6	44.4
20	50.4		50.4		6	6	44.4
21	50.4		50.4		6	6	44.4
22	50.4		50.4		6	6	44.4
23	50.4		50.4		6	6	44.4
24	50.4		50.4		6	6	44.4
25	50.4		50.4		6	6	44.4
26	50.4		50.4		6	6	44.4
27	50.4		50.4		6	6	44.4
28	50.4		50.4		6	6	44.4
29	50.4		50.4		6	6	44.4
30	50.4	27.96	78.36		6	6	72.36

Fuente: Autores

**Calculo de los indicadores del análisis beneficio-costo para una disminución del 10% de los ingresos anuales**

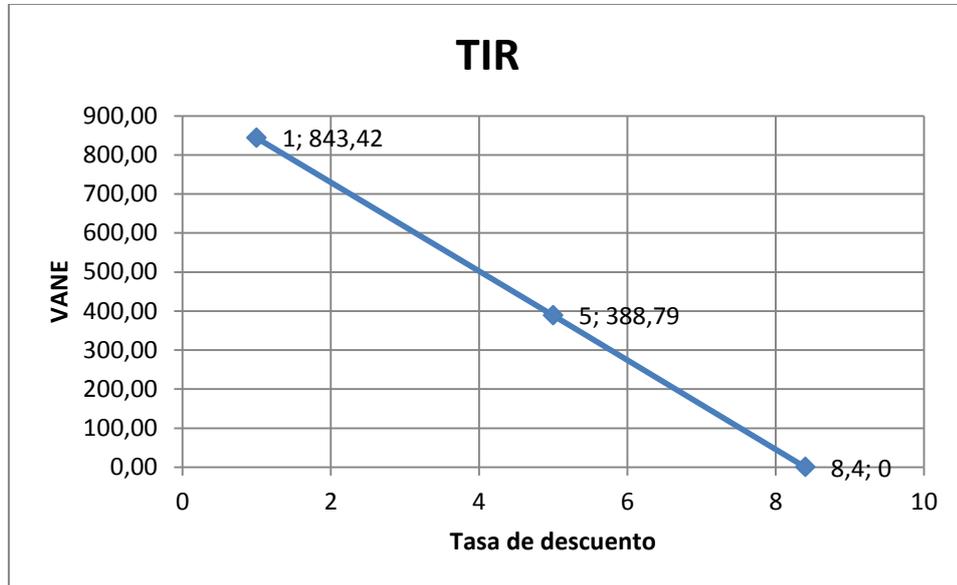
**Tabla 4.22. Procedimiento de cálculo del VAN a diversas Tasas de Interés para una disminución del 10% de los ingresos anuales**

Año	Flujo de Caja	Tasa 5%		Tasa 1%	
		Factor del Valor Actual	VANE 5%	Factor del Valor Actual	VANE 1%
A	B	C	D	E	F
1	-31.53	0.9524	-30.03	0.9901	-31.22
2	-207.66	0.907	-188.35	0.9803	-203.57
3	44.4	0.8638	38.35	0.9706	43.09
4	44.4	0.8227	36.53	0.961	42.67
5	44.4	0.7835	34.79	0.9515	42.25
6	44.4	0.7462	33.13	0.9421	41.83
7	44.4	0.7267	32.27	0.9327	41.41
8	44.4	0.6768	30.05	0.9235	41.00
9	44.4	0.6446	28.62	0.9143	40.59
10	44.4	0.6139	27.26	0.9053	40.20
11	44.4	0.5847	25.96	0.8963	39.80
12	44.4	0.5568	24.72	0.8875	39.41
13	44.4	0.5303	23.55	0.8787	39.01
14	44.4	0.5051	22.43	0.87	38.63
15	44.4	0.481	21.36	0.8614	38.25
16	44.4	0.4581	20.34	0.8528	37.86
17	44.4	0.4363	19.37	0.8444	37.49
18	44.4	0.4155	18.45	0.836	37.12
19	44.4	0.3957	17.57	0.8277	36.75
20	44.4	0.3769	16.73	0.8196	36.39
21	44.4	0.359	15.94	0.8114	36.03
22	44.4	0.3419	15.18	0.8034	35.67
23	44.4	0.3256	14.46	0.7955	35.32
24	44.4	0.3101	13.77	0.7876	34.97
25	44.4	0.2953	13.11	0.7798	34.62
26	44.4	0.2813	12.49	0.7721	34.28
27	44.4	0.2679	11.89	0.7644	33.94
28	44.4	0.2551	11.33	0.7368	32.71
29	44.4	0.243	10.79	0.7484	33.23
30	72.36	0.2314	16.74	0.7419	53.68
		388.79		843.42	

Fuente: Autores

### Calculo de la Tasa Interna de Retorno (TIR) para una disminución del 10% de los ingresos anuales

Figura 4.3. TIR para una disminución del 10% de los ingresos anuales



Fuente: Autores

Según la figura 4.3 la tasa Interna de retorno es:

$$TIR = 8.4$$

### Calculo del costo del kWh para una disminución del 10% de los ingresos anuales

Tasa de interés 8%:

Año del último pago de la serie:

$$n = 29 ; \text{Factor: } 11.1584$$

Año anterior al primer pago de la serie:

$$n = 2 ; \text{Factor: } 1.7833$$

Entonces el factor acumulado será:

$$\text{Factor acumulado} = 11.1584 - 1.7833 = 9.3751$$

En la tabla 4.23 se puede observar el costo del kWh para el caso de una disminución del 10% en el ingreso anual por venta de energía.

**Tabla 4.23. Calculo del costo del kWh (Miles de US\$ corrientes) para una disminución del 10% de los ingresos anuales**

Año	Costos			Energía			Costo del kWh US\$
	Costo Total Anual	Factor del Valor Actual	Valor Actual Costos	Miles de kWh vendidos	Factor del Valor actual	Valor actual energía miles kWh	
A	B	C	D	E	F	G	H
1	31.53	0.9174	28.93				
2	207.66	1.7591	365.29				
3	6		0.00	1400	0.889	1244.6	
4	6		0.00	1400	0.8548	1196.72	
5	6		0.00	1400	0.8219	1150.66	
6	6		0.00	1400	0.7903	1106.42	
7	6		0.00	1400	0.7599	1063.86	
8	6		0.00	1400	0.7307	1022.98	
9	6		0.00	1400	0.7026	983.64	
10	6		0.00	1400	0.6756	945.84	
11	6		0.00	1400	0.6496	909.44	
12	6		0.00	1400	0.6246	874.44	
13	6		0.00	1400	0.6006	840.84	
14	6		0.00	1400	0.5775	808.5	
15	6	9.3751	56.25	1400	0.5553	777.42	
16	6		0.00	1400	0.5339	747.46	
17	6		0.00	1400	0.5134	718.76	
18	6		0.00	1400	0.4936	691.04	
19	6		0.00	1400	0.4747	664.58	
20	6		0.00	1400	0.4564	638.96	
21	6		0.00	1400	0.4388	614.32	
22	6		0.00	1400	0.422	590.8	
23	6		0.00	1400	0.4057	567.98	
24	6		0.00	1400	0.3901	546.14	
25	6		0.00	1400	0.3751	525.14	
26	6		0.00	1400	0.3607	504.98	
27	6		0.00	1400	0.3468	485.52	
28	6		0.00	1400	0.3335	466.9	
29	6		0.00	1400	0.3207	448.98	
30	-21.96	0.3083	-6.77	1400	0.3083	431.62	
I			443.70			21568.54	0.021

Fuente: Autores

El costo del kWh será:

$$\text{Costo por kWh} = \frac{\text{Valor actual total costos}}{\text{Valor actual total energia}}$$

$$\text{Costo por kWh} = \frac{443.70}{21568.54}$$

$$\text{Costo por kWh} = 0.0205\text{US\$}$$

#### **4.2.5 Conclusiones del Análisis Económico**

Los resultados más significativos del análisis económico son:

$$\text{VANE (5\%)} = 464.55$$

$$\text{VANE (1\%)} = 976.79$$

$$\text{TIR} = 8.6\%$$

$$\text{Costo del kWh} = \text{US\$ } \phi 2.0$$

Según los resultados muestran que el proyecto si tendría funcionamiento en el mercado, debido a que el costo del kWh es de 4 centavos de dólar para la tarifa de la dignidad proporcionado por el gobierno el cual llega a las personas de la clase media baja, luego del análisis de nuestro proyecto determinamos que el costo del kWh es de 0.02 centavos de dólar, con lo que se demuestra que el kWh producido es más barato respecto al proporcionado por el gobierno.

### **4.3 EVALUACIÓN FINANCIERA**

Tiene la misma metodología que la evaluación económica, teniendo en cuenta que se debe considerar tanto los préstamos como el pago de la deuda ocasionada por dichos préstamos.

#### **4.3.1 Flujo Neto Financiero del Proyecto**

El flujo neto del proyecto se calcula con un préstamo a una Tasa de interés Activa del 8.17% (dato tomado del Banco Central del Ecuador para marzo del 2012), utilizable en dos desembolsos anuales de US\$32000 y US\$208000 pagado a 15 anualidades con dos de gracia y 13 para amortizar.

El cálculo para la amortización se realiza con la ayuda de un Software, en la tabla 4.24 se puede observar el flujo neto financiero.

Tabla 4.24. Flujo de Caja Financiero del Proyecto										
Año	Fuentes				Usos					Flujo de Caja
	Valor Energía	Valor Resi.	Prestamos	Total Fuentes	Inv.	Opera. Y Mante.	Interés	Amorti.	Total Usos	
A	B	C	D	E	E	F	G	H	I	J
1	0		32	32	31.53	0	19.608		51.138	-19.138
2	0		208	208	207.66	0	18.300		225.96	-17.96
3	56			56		6	16.993	18.462	41.455	14.545
4	56			56		6	15.686	18.462	40.148	15.852
5	56			56		6	14.379	18.462	38.841	17.159
6	56			56		6	13.072	18.462	37.534	18.466
7	56			56		6	11.764	18.462	36.226	19.774
8	56			56		6	10.457	18.462	34.919	21.081
9	56			56		6	9.150	18.462	33.612	22.388
10	56			56		6	7.843	18.462	32.305	23.695
11	56			56		6	6.536	18.462	30.998	25.002
12	56			56		6	5.228	18.462	29.69	26.31
13	56			56		6	3.921	18.462	28.383	27.617
14	56			56		6	2.614	18.462	27.076	28.924
15	56			56		6	1.320	18.462	25.782	30.218
16	56			56		6			6	50
17	56			56		6			6	50
18	56			56		6			6	50
19	56			56		6			6	50
20	56			56		6			6	50
21	56			56		6			6	50
22	56			56		6			6	50
23	56			56		6			6	50
24	56			56		6			6	50
25	56			56		6			6	50
26	56			56		6			6	50
27	56			56		6			6	50
28	56			56		6			6	50
29	56			56		6			6	50
30	56	27.96		83.96		6			6	77.96

Fuente: Autores

### 4.3.2 Parámetros de Evaluación

#### 4.3.2.1 Valor Actual Neto (VAN)

El detalle del cálculo del VAN a diversas tasas de interés tabla 4.25.

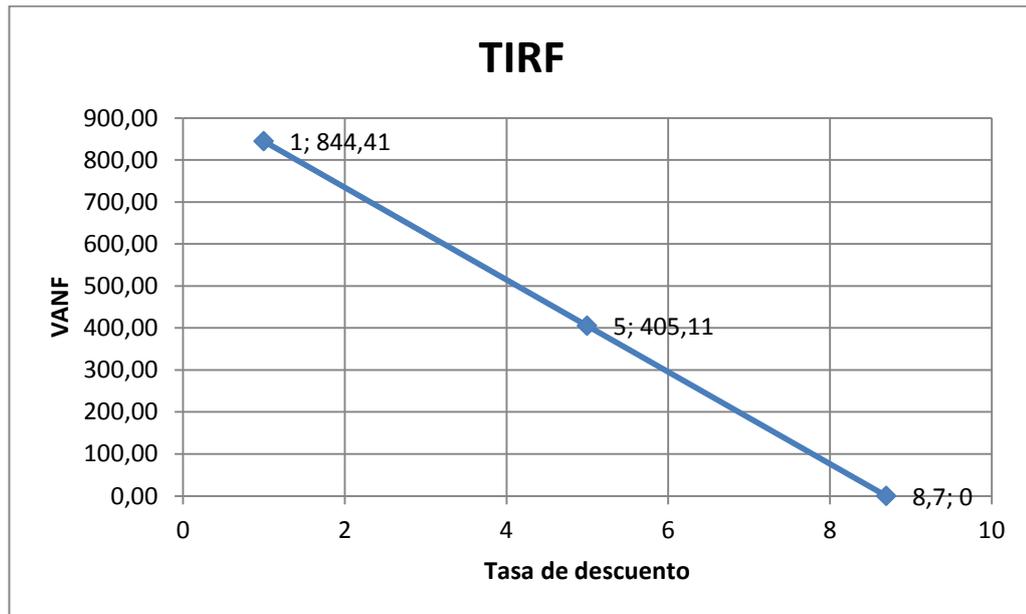
<b>Tabla 4.25. Procedimiento de cálculo del VAN a diversas Tasas de Interés</b>					
Año	Flujo de Caja	Tasa 5%		Tasa 1%	
		Factor del Valor Actual	VANE 5%	Factor del Valor Actual	VANE 1%
A	B	C	D	E	F
1	-19.138	0.9524	-18.23	0.9901	-18.95
2	-17.96	0.907	-16.29	0.9803	-17.61
3	14.545	0.8638	12.56	0.9706	14.12
4	15.852	0.8227	13.04	0.961	15.23
5	17.159	0.7835	13.44	0.9515	16.33
6	18.466	0.7462	13.78	0.9421	17.40
7	19.774	0.7267	14.37	0.9327	18.44
8	21.081	0.6768	14.27	0.9235	19.47
9	22.388	0.6446	14.43	0.9143	20.47
10	23.695	0.6139	14.55	0.9053	21.45
11	25.002	0.5847	14.62	0.8963	22.41
12	26.31	0.5568	14.65	0.8875	23.35
13	27.617	0.5303	14.65	0.8787	24.27
14	28.924	0.5051	14.61	0.87	25.16
15	30.218	0.481	14.53	0.8614	26.03
16	50	0.4581	22.91	0.8528	42.64
17	50	0.4363	21.82	0.8444	42.22
18	50	0.4155	20.78	0.836	41.80
19	50	0.3957	19.79	0.8277	41.39
20	50	0.3769	18.85	0.8196	40.98
21	50	0.359	17.95	0.8114	40.57
22	50	0.3419	17.10	0.8034	40.17
23	50	0.3256	16.28	0.7955	39.78
24	50	0.3101	15.51	0.7876	39.38
25	50	0.2953	14.77	0.7798	38.99
26	50	0.2813	14.07	0.7721	38.61
27	50	0.2679	13.40	0.7644	38.22
28	50	0.2551	12.76	0.7368	36.84
29	50	0.243	12.15	0.7484	37.42
30	77.96	0.2314	18.04	0.7419	57.84
			405.11	844.41	

Fuente: Autores

### 4.3.2.2 Tasa Interna de Retorno (TIR)

El TIR es la tasa de interés que hace el VAN igual a cero, en la figura 4.4 se puede observar los VANF para las tasas de descuento del 1% y 5%, obteniendo un TIR = 8.7%, que es el valor donde se cruza la recta con el eje donde el valor del VAN es cero.

Figura 4.4. Tasa interna de retorno financiero



Fuente: Autores

### 4.3.3 Cálculo del Costo del kWh

El cálculo del kWh se lo realiza en base a la tabla 4.26, y con ayuda de la siguiente ecuación:

$$\text{Costo por kWh} = \frac{\text{Valor actual total costos}}{\text{Valor actual total energía}}$$

$$\text{Costo por kWh} = \frac{687.6}{21568.54}$$

$$\text{Costo por kWh} = 0.032\text{US\$}$$

<b>Tabla 4.26. Calculo del costo del kWh (Miles de US\$ corrientes)</b>							
Año	Costos			Energía			Costo del kWh US\$
	Costo Total Anual	Factor del Valor Actual	Valor Actual Costos	Miles de kWh vendidos	Factor del Valor actual	Valor actual energía miles kWh	
A	B	C	D	E	F	G	H
1	51.138	0.9174	46.91				
2	225.96	1.7591	397.49				
3	41.455		0.00	1400	0.889	1244.6	
4	40.148		0.00	1400	0.8548	1196.72	
5	38.841		0.00	1400	0.8219	1150.66	
6	37.534		0.00	1400	0.7903	1106.42	
7	36.226		0.00	1400	0.7599	1063.86	
8	34.919		0.00	1400	0.7307	1022.98	
9	33.612		0.00	1400	0.7026	983.64	
10	32.305		0.00	1400	0.6756	945.84	
11	30.998		0.00	1400	0.6496	909.44	
12	29.69		0.00	1400	0.6246	874.44	
13	28.383		0.00	1400	0.6006	840.84	
14	27.076		0.00	1400	0.5775	808.5	
15	25.782	9.3751	241.71	1400	0.5553	777.42	
16	6		0.00	1400	0.5339	747.46	
17	6		0.00	1400	0.5134	718.76	
18	6		0.00	1400	0.4936	691.04	
19	6		0.00	1400	0.4747	664.58	
20	6		0.00	1400	0.4564	638.96	
21	6		0.00	1400	0.4388	614.32	
22	6		0.00	1400	0.422	590.8	
23	6		0.00	1400	0.4057	567.98	
24	6		0.00	1400	0.3901	546.14	
25	6		0.00	1400	0.3751	525.14	
26	6		0.00	1400	0.3607	504.98	
27	6		0.00	1400	0.3468	485.52	
28	6		0.00	1400	0.3335	466.9	
29	6		0.00	1400	0.3207	448.98	
30	6	0.3083	1.85	1400	0.3083	431.62	
I			687.96			21568.54	0.032

Fuente: Autores

#### **4.3.4 Conclusiones de la Evaluación Financiera**

Los resultados más significativos obtenidos en la evaluación financiera son:

VANE (5%)	= 405.11
VANE (1%)	= 844.41
TIR	= 8.7%
Costo del kWh	=US\$ ¢3.2

Según los resultados podemos decir que el proyecto si funcionaria en el mercado debido a que nosotros nos planteamos un valor de 4 centavos de dólar el kWh y según el análisis financiero este tiene un valor de 3.2 centavos inferior al planteado para el análisis.

#### **Conclusiones:**

En base a los datos obtenidos en el análisis económico podemos concluir que el proyecto es rentable debido a que el TIR del 8.6% es mayor que la Tasa de Interés Activa del 8.17% según el Banco Central del Ecuador para el mes de marzo del 2012, debido a que la recuperación del capital será más rápida y se asegura ganancia para la inversión realizada.

En base al estudio Financiero se refleja que el proyecto es rentable, obteniendo un TIR del 8.7% mayor que la Tasa de Interés Activa del Mercado, la inversión se la realizaría con un préstamo que consiste en dos desembolsos anuales, el primero de US\$32000 y un segundo desembolso de US\$208000 pagados a 15 anualidades con dos de gracia y 13 para amortizar.

## **CONCLUSIONES:**

El desarrollo de proyectos de Microcentrales Hidroeléctricas es una buena alternativa para países en vías de desarrollo que poseen un gran potencial energético en este campo y que no son explotados a plenitud. La determinación del caudal aprovechable del Rio San Francisco del cantón Gualaceo de la provincia del Azuay se lo realizo en base a un análisis estadístico de los registro histórico de aforos, datos que fueron proporcionados por PROMAS de la Universidad de Cuenca, obteniendo un caudal aprovechable de  $0.24m^3 / s$ . Mientras que para la altura se utilizó el método del GPS obteniendo una altura bruta de 28 m.

Con los datos de altura y caudal aprovechables y en base a los criterios para la implementación de un Parque Hidroeléctrico de Microcentrales determinamos el número de subestaciones, llegando a la conclusión que el Parque deberá tener 4 subestaciones que generaran una potencia de 40 kW cada una, obteniendo un total de 160 kW suficientes para abastecer la demanda de energía de 130 kW de la Parroquia Luis Cordero Vega del cantón Gualaceo para una densidad poblacional de 2030 habitantes.

La captación del agua fue diseñado con una Bocatoma de Fondo por ser este es el más idóneo y empleado en proyectos de MCH, debido a su sencillez de construcción y porque garantiza una captación constante del caudal aprovechable, además porque no es necesaria la construcción de una represa que afectaría seriamente al ecosistema del sector.

Tanto para la tubería de conducción como para la de presión, el material más adecuado es el PVC debido a su facilidad de montaje, costo reducido y por las condiciones topográficas del sitio, para la tubería de conducción se determinó un diámetro comercial de 315 mm, mientras que para la tubería de presión se obtuvo un diámetro comercial de 400 mm.

Según el salto y el caudal aprovechable se seleccionó la turbina resultando la Michell Banki la más apropiada para las condiciones de nuestro sistema. Por lo que se diseñó y dimensiono sus componentes más importantes obteniendo una eficiencia del 77%, valor que está dentro de los rangos aceptables de los fabricantes de este tipo de

turbina, además se determinó la turbina estandarizada siendo la TM34C la que está dentro del rango de aplicación para nuestro salto y caudal aprovechable.

El generador más empleado son los de tipo síncrono porque su configuración nos permite la conexión en paralelo de varios generadores con el propósito de cubrir y aumentar la demanda de energía. Se seleccionó un generador síncrono Marca Magnaplust trifásico 4 polos el cual dispone de un sistema de AVR que facilita la sincronización con otro generador de las mismas características.

Una vez generada la electricidad en cada subestación es necesaria su sincronización para luego ser transportada y distribuida para lo cual es fundamental la selección más económica y factible de todos los equipos como son conductores, transformadores, postes.

El proyecto tendrá una vida útil de 30 años con un costo total de \$239183.87 con una inversión a 15 años plazo, el costo del kWh será de 2 centavos de dólar el cual es menor al costo del kWh proporcionado por el gobierno, con lo cual se demuestra que el proyecto es rentable a largo plazo además porque la tasa de retorno es mayor que la tasa de interés Activa.

#### **RECOMENDACIONES:**

Se recomienda realizar una comprobación del caudal de la cuenca siendo el método del flotador más adecuado para este tipo de proyectos debido a su sencillez y facilidad y además porque no exige el uso de equipos sofisticados.

Se recomienda que las paredes de la bocatoma, desarenador y cámara de carga sean lo más lisas posibles con el propósito de evitar el rozamiento de piedras y del agua con las mismas.

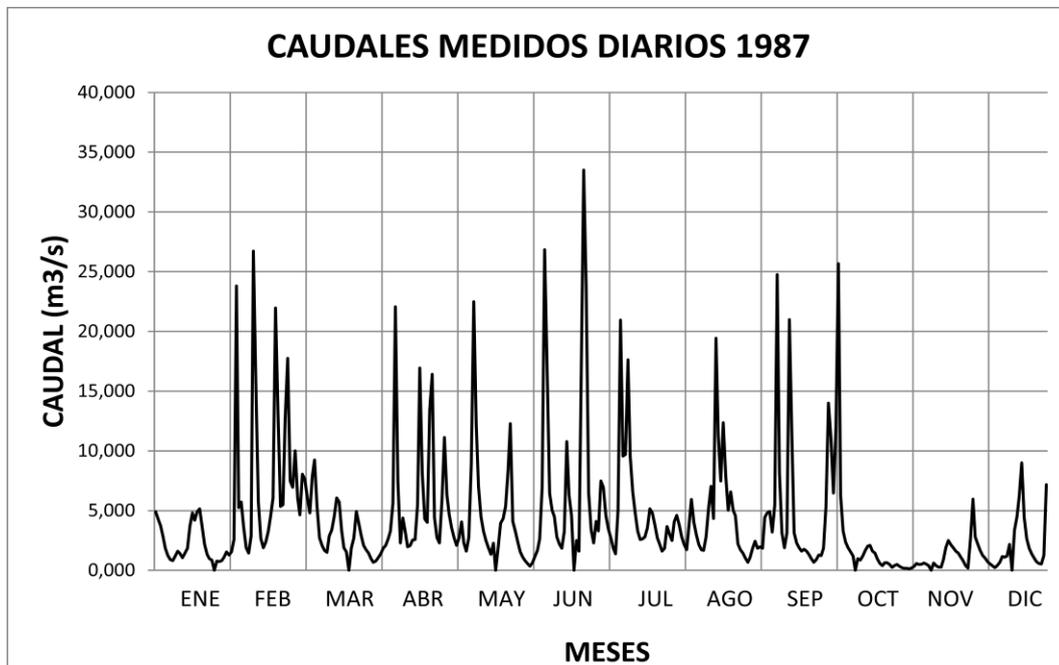
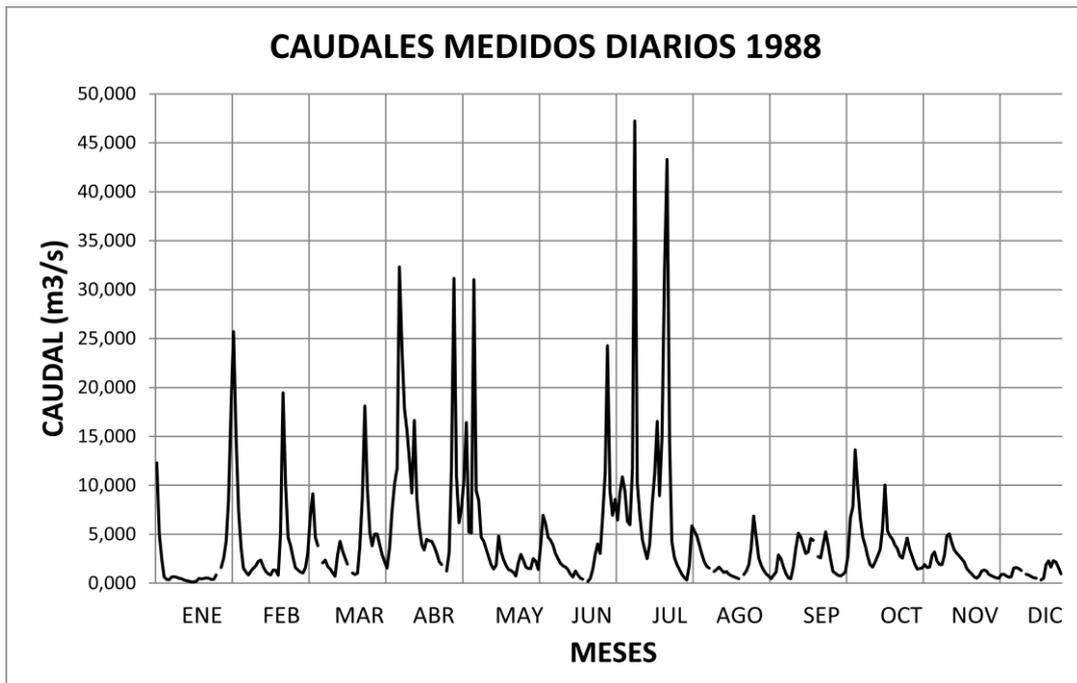
Se recomienda que las tuberías de PVC no estén en contacto con los rayos ultravioletas, ya que afectan su resistencia, esto se puede evitar pintándola, enterrándola o cubriéndola con vegetación.

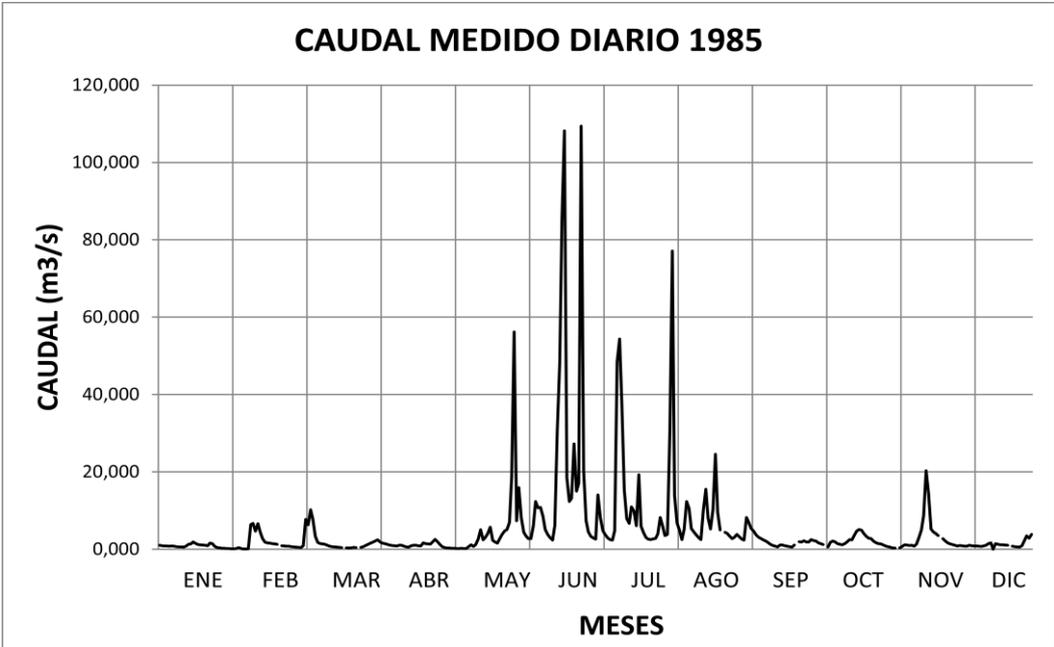
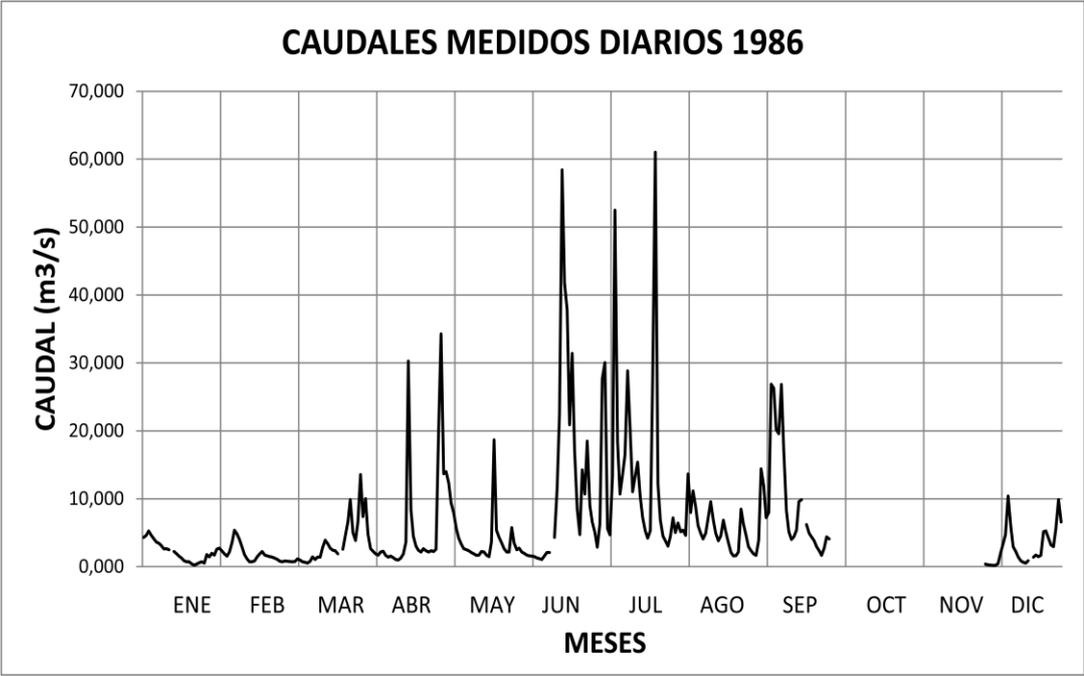
Para proyectos de mayor escala es recomendable un análisis más profundo de prefactibilidad.

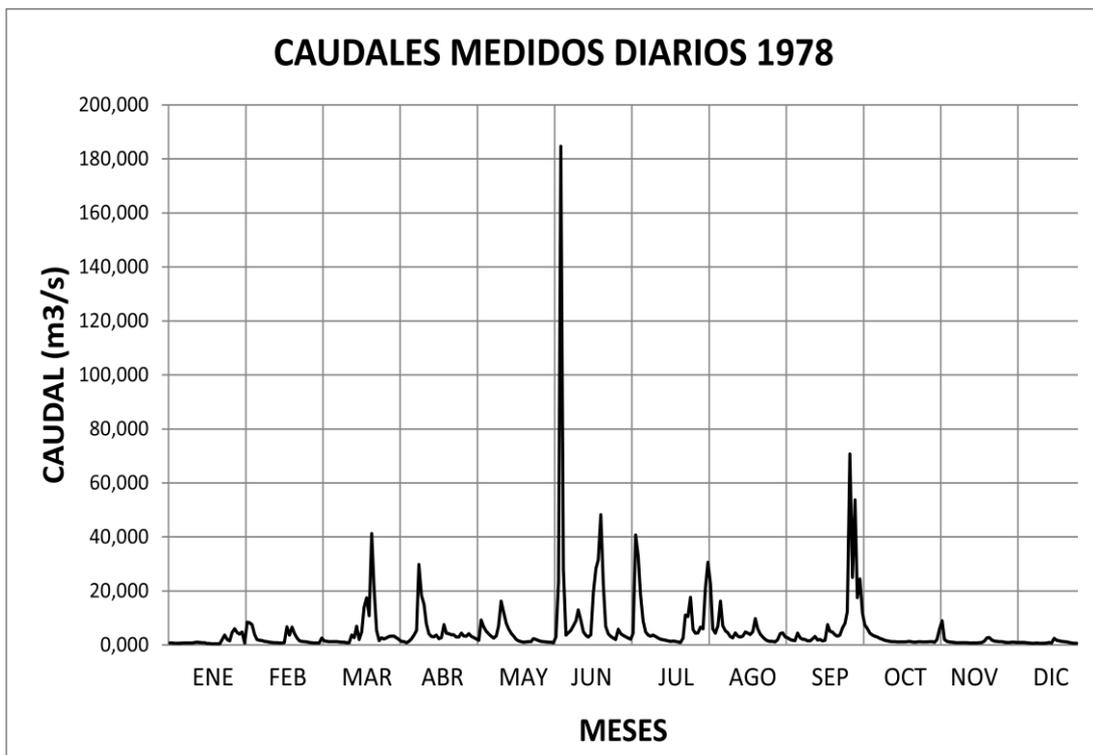
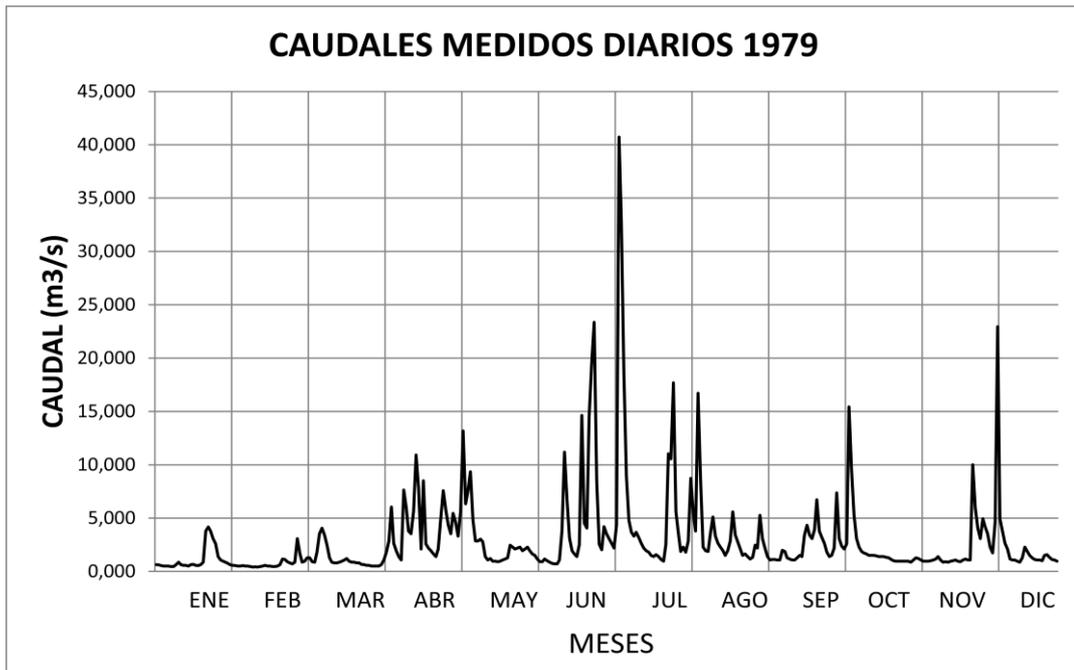
El uso de energías renovables a pequeña escala no son muy valoradas y explotadas en nuestro país, por tal razón esperamos que este presente proyecto sirva para la implementación de este tipo de sistemas de generación hidráulica.

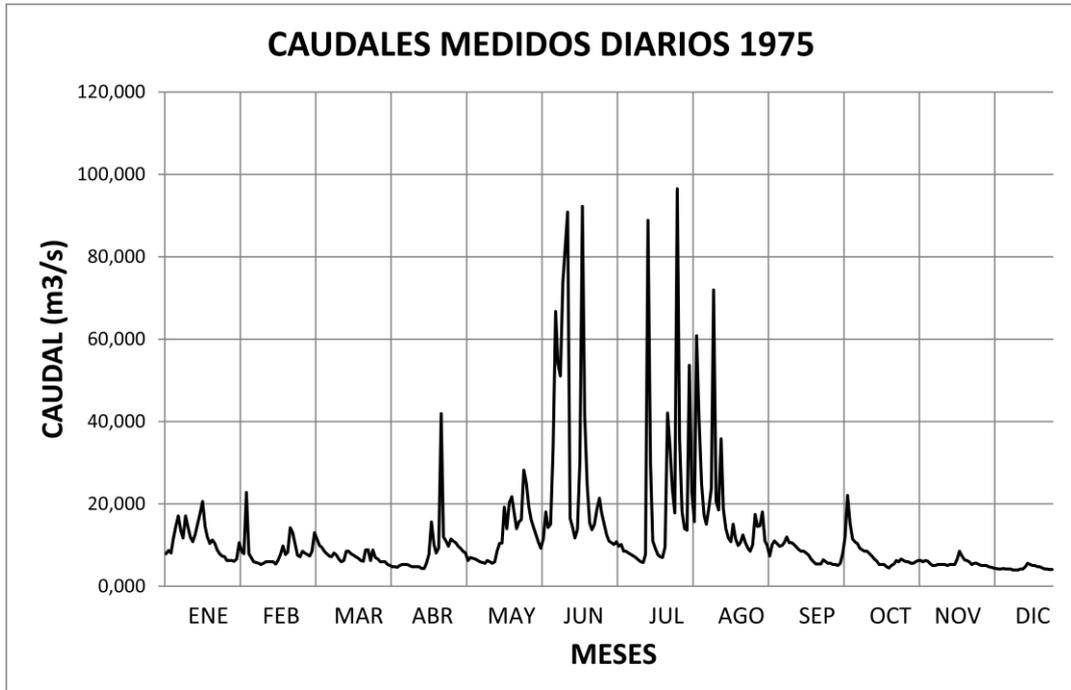
# ANEXOS

## ANEXO I. Hidrógramas para diferentes años del Rio San Francisco





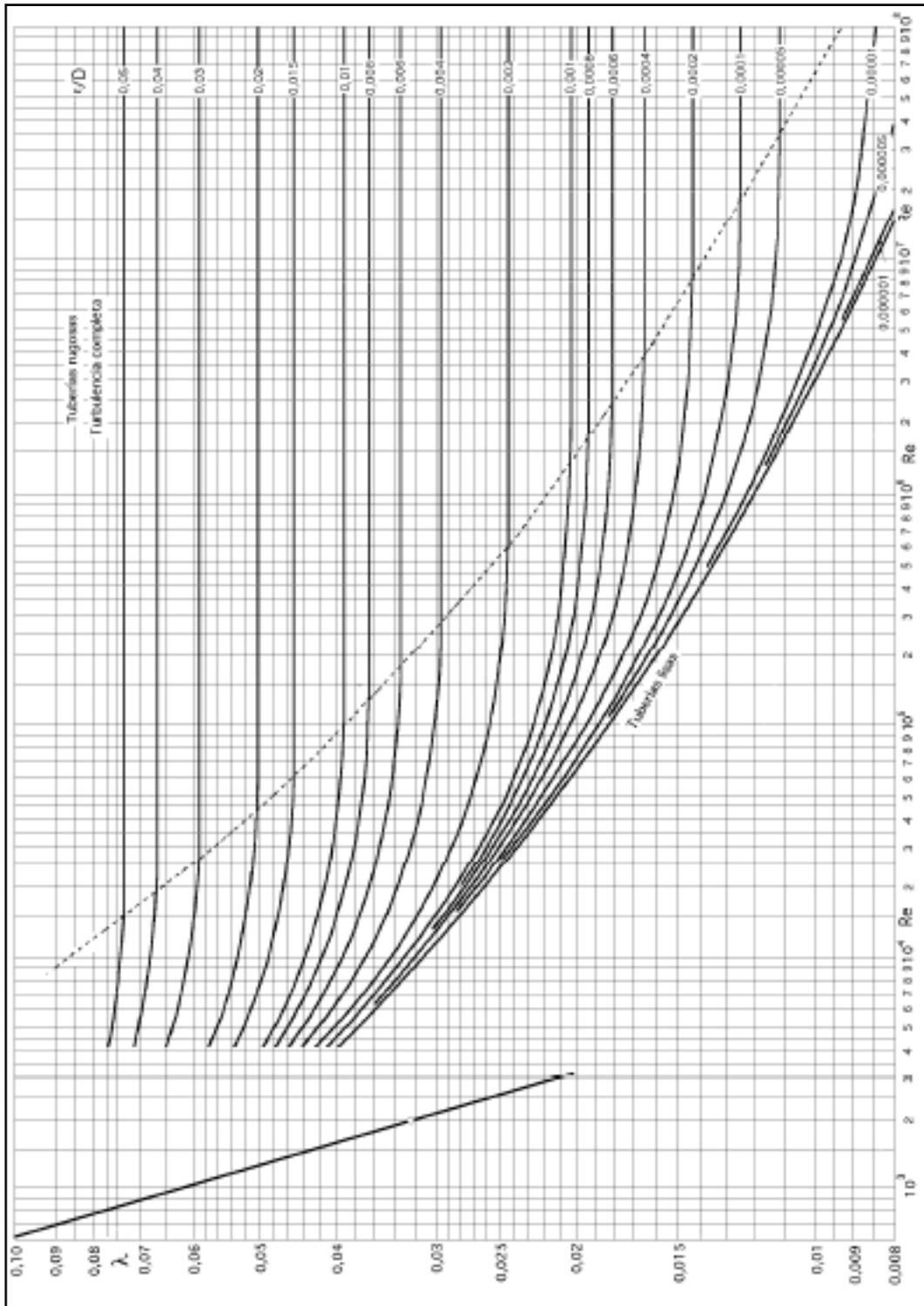




**ANEXO II. Valores de rugosidad absoluta**

Valores de rugosidad absoluta (k) en mm			
Material	Estado		
	Bueno	Normal	Malo
Tuberías lisas PVC		0.003	
Poliétileno		0.003	
Resina de Poliéster con fibra de vidrio		0.003	
Concreto	0.6	0.15	0.6
Acero Comercial			
• No pintadas	0.015	0.03	0.06
• Pintadas	0.03	0.06	0.15
• Galvanizadas	0.06	0.15	0.3
Hierro fundido			
• Nuevas	0.015	0.3	0.6
• Viejas:			
Corrosión leve	0.6	1.5	3.0
Corrosión moderada	1.5	3.0	6.0
Corrosión severa	6	15	30

### ANEXO III. Diagrama de Moody



**ANEXO IV: Composición de las aleaciones usadas corrientemente en Turbinas Hidráulicas**

<b>Composición de las aleaciones usadas corrientemente en Turbinas Hidráulicas</b>					
Material	%C	%Mn	%Si	%Cr	%NI
Acero al 13% Cr	0.1	0.5	0.4	12.5	0.9
Acero al 18% Cr, 8% Ni	0.07	0.5	1.0	18.0	9.0
Acero al 2% Ni	0.24	0.7	0.3	0.2	0.2
Acero al 1.5% Mn	0.24	1.6	0.3	0.2	0.4
Bronce al Aluminio	Al	Fe	Mn	Ni	Cu
	10.0	8.0	5.0	2.0	Diferencia

**ANEXO V: Propiedades de las aleaciones usadas en Turbinas Hidráulicas**

<b>Propiedades de las aleaciones usadas en Turbinas Hidráulicas</b>						
Material	Esfuerzo de Fluencias <i>kg / mm<sup>2</sup></i>	Esfuerzos de Tensión <i>kg / mm<sup>2</sup></i>	Mínima Elong <i>L = 5d%</i>	Mínima Resist de Impacto <i>kg / cm<sup>2</sup></i>	Dureza Brinell <i>kg / mm<sup>2</sup></i>	Límite de Fatiga <i>kg / mm<sup>2</sup></i>
Acero al 13% Cr	45	65-75	15	4	190-30	30
Acero al 18% Cr, 8% Ni	15	40-50	30	18	130-170	13
Acero al 2% Ni	35	55-65	18	6	155-195	22
Acero al 1.5% Mn	34	50-60	22	6	140-180	18
Bronce al Aluminio	30	60-70	7	1	190-230	15

**ANEXO VI: Centro de Gravedad y Momentos de Inercia del Alabe del Rodete**

<b>Centro de Gravedad y Momentos de Inercia del Alabe del Rodete</b>					
$D_e$ (mm)	$e$ (mm)	$A$ (cm <sup>2</sup> )	$C_g$ (mm)	$I_{g_x}$ (cm <sup>4</sup> )	$C$ (cm)
300	2	1.27	4.66	0.1134	0.43
300	3	1.93	4.70	0.1822	0.48
300	4	2.59	4.75	0.2633	0.53
300	6	3.96	4.85	0.4751	0.64
400	2	1.68	6.18	0.2610	0.54
400	3	2.55	2.22	0.4098	0.59
400	4	3.42	6.27	0.5760	0.64
400	6	6.21	6.37	0.9779	0.75
500	2	2.10	7.70	0.5018	0.65
500	3	3.17	7.75	0.7780	0.70
500	4	4.25	7.79	1.0778	0.75
500	6	6.46	7.89	1.7686	0.86
600	2	2.52	9.23	0.8587	0.65
600	3	3.79	9.27	1.3215	0.70
600	4	5.08	9.32	1.8146	0.75
600	6	7.70	9.41	2.9159	0.86

**ANEXO VII: Longitudes normalizadas de bandas trapezoidales.**

Longitudes normalizadas de bandas trapezoidales. Constantes de potencia							
SECCION A		SECCION B		SECCION C		SECCION D	
$D_{\min} = 3''$ (7.62cm)		$D_{\min} = 5.4''$ (13.71cm)		$D_{\min} = 9''$ (22.86cm)		$D_{\min} = 13''$ (33cm)	
Banda núm.	Long. Primitiva pulg (cm)	Band a núm.	Long. Primitiva pulg (cm)	Banda núm.	Long. Primitiva pulg (cm)	Banda núm.	Long. Primitiva pulg (cm)
A26	27.3 (69.3)	B35	36.8 (93.4)	C51	53.9 (136.9)	D120	123.3 (313.1)
A31	32.3 (82.0)	B38	39.8 (101.1)	C60	62.9 (159)	D128	131.3 (333.5)
A35	36.3 (92.2)	B42	43.8 (111.2)	C68	70.9 (180)	D144	147.3 (374.1)
A38	39.3 (99.8)	B46	47.8 (121.4)	C75	77.9 (197.8)	D158	161.3 (409.7)
A42	43.3 (109.9)	B51	52.8 (131.1)	C81	83.9 (213.1)	D173	176.3 (447.8)
A46	47.3 (120.1)	B55	56.8 (144.2)	C85	87.9 (223.2)	D180	183.3 (465.5)
A51	52.3 (132.8)	B60	61.8 (156.9)	C90	92.9 (235.9)	D195	198.3 (503.6)
A55	56.3 (143.0)	B68	69.8 (177.2)	C96	98.9 (251.2)	D210	213.3 (541.7)
A60	61.3 (155.7)	B75	76.8 (195.0)	C105	107.9 (274.0)	D240	240.8 (611.6)
A68	69.3 (176.0)	B81	82.8 (210.3)	C112	114.9 (291)	D270	270.8 (687.8)
A75	76.3 (193.0)	B85	86.8 (220.4)	C120	122.9 (312.1)	D300	300.8 (764.0)
A80	81.3 (206.5)	B90	91.8 (233.1)	C128	130.9 (332.4)	D330	330.8 (840.2)
A85	86.3 (219.2)	B97	98.8 (250.9)	C144	146.9 (373.1)	D360	360.8 (916.4)
A90	91.3 (231.9)	B105	106.8 (271.2)	C158	160.9 (408.6)	D390	390.8 (992.6)
A96	97.3 (247.1)	B112	113.8 (289.0)	C172	175.9 (446.7)	D420	420.8 (1068.8)

A105	106.3 (270.0)	B120	121.8 (308.3)	C180	182.9 (464.5)	D480	480.8 (1221.2)
A112	113.3 (287.7)	B128	129.8 (329.6)	C195	197.9 (502.6)	D540	540.8 (1373.6)
A120	121.3 (308.1)	B144	145.8 (370.3)	C210	212.9 (540.7)	D600	600.8 (1526.0)
A128	129.3 (328.4)	B158	159.8 (405.8)	C240	240.9 (611.8)	D660	660.8 (1672.4)
		B173	174.8 (444.0)	C270	270.9 (688.0)		
		B180	181.8 (461.7)	C300	300.9 (764.2)		
		B195	196.8 (499.8)	C330	330.9 (840.4)		
		B210	211.8 (537.9)	C360	360.9 (916.6)		
		B240	240.3 (610.3)	C390	390.9 (992.8)		
		B270	270.3 (688.0)	C420.9	(1069.0)		
		B300	300.3 (762.7)				
Constantes para potencia nominal		Constantes para potencia nominal		Constantes para potencia nominal		Constantes para potencia nominal	
$a = 2.864$		$a = 4.737$		$a = 8.792$		$a = 18.788$	
$c = 5.236$		$c = 13.962$		$c = 38.819$		$c = 137.7$	
$e = 0.0136$		$e = 0.0234$		$e = 0.0416$		$e = 0.0848$	

### ANEXO VIII. Coeficientes de diámetro pequeño

Coeficientes de diámetro pequeño $K_d$	
$D_2 / D_1$	$K_d$
1.000-1.019	1.00
1.020-1.032	1.01
1.033-1.055	1.02
1.056-1.081	1.03
1.082-1.109	1.04
1.100-1.142	1.05
1.143-1.178	1.06
1.179-1.222	1.07
1.223-1.274	1.08
1.275-1.340	1.09
1.341-1.429	1.10
1.430-1.562	1.11
1.563-1.814	1.12
1.518-2.948	1.13
2.249 y mas	1.14

**ANEXO IX. Coeficiente de arco de contacto**

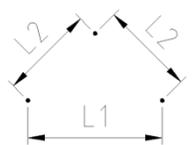
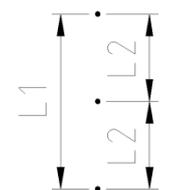
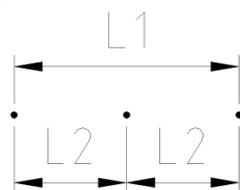
<b>Coeficiente de arco de contacto <math>K_\theta</math></b>		
$\frac{D_2 - D_1}{C}$	$K_\theta$	
	<b>VV</b>	<b>V-plana</b>
0.00	1.00	0.75
0.10	0.99	0.76
0.20	0.97	0.78
0.30	0.96	0.79
0.40	0.94	0.80
0.50	0.93	0.81
0.60	0.91	0.83
0.70	0.89	0.84
0.80	0.87	0.85
0.90	0.85	0.85
1.00	0.82	0.82
1.10	0.80	0.80
1.20	0.77	0.77
1.30	0.73	0.73
1.40	0.70	0.70
1.50	0.65	0.65

## ANEXO X. Factores de corrección de longitud

Factores de corrección de longitud $K_L$						
Designación de la longitud normalizada		Sección transversal de la banda				
cm	pulg	A	B	C	D	E
	26	0.81	----	----	----	----
66.0	31	0.84	----	----	----	----
78.7	35	0.87	0.81	----	----	----
88.9	38	0.88	0.83	----	----	----
96.5	42	0.90	0.85	----	----	----
106.6						
	46	0.92	0.87	----	----	----
116.8	51	0.94	0.89	----	----	----
129.5	55	0.96	0.90	----	----	----
139.7	60	0.98	0.92	0.82	----	----
152.4	68	1.00	0.95	0.85	----	----
172.7						
	75	1.02	0.97	0.87	----	----
190.5	80	1.04	----	----	----	----
203.2	81	----	0.98	0.89	----	----
205.7	85	1.05	0.99	0.90	----	----
215.9	90	1.06	1.00	0.91	----	----
228.6						
	96	1.08	----	0.92	----	----
243.8	97	----	1.02	----	----	----
246.3	105	1.10	1.04	0.94	----	----
266.7	112	1.11	1.05	0.95	----	----
284.5	120	1.13	1.07	0.97	0.86	----
304.8						
	128	1.14	1.08	0.98	0.87	----
325.1						

365.8	144	----	1.11	1.00	0.90	----
401.3	152	----	1.13	1.02	0.92	----
439.4	173	----	1.15	1.04	----	----
457.2	180	----	1.16	1.05	0.94	0.91
495.3	195	----	1.18	1.07	0.96	0.92
533.4	210	----	1.19	1.08	0.96	0.94
609.6	240	----	1.22	1.11	1.00	0.96
685.8	270	----	1.25	1.14	1.03	0.99
762.0	300	----	1.27	1.16	1.05	1.01
838.2	330	----	----	1.19	1.07	1.03
914.4	360	----	----	1.21	1.09	1.05
990.6	390	----	----	1.23	1.11	1.07
1066.8	420	----	----	1.24	1.12	1.09
1219.2	480	----	----	----	1.16	1.12
1371.6	540	----	----		1.18	1.14
1524.0	600	----	----		1.20	1.17
1676.4	660	----	----		1.23	1.19

## ANEXO XI. Distancias mínimas por nivel de tensión

Distancias mínimas (en mm) por nivel de tensión.						
Tipo	Disposición Geométrica	Separación	Tensión nominal de la línea			
			6 kV	10 kV	15 kV	20 Kv
TT		(mm) $L_1$	1340	1340	2400	2400
		(mm) $L_2$	756	756	1250	1250
TV		(mm) $L_1$	1000	1000	2400	2400
		(mm) $L_2$	500	500	1200	1200
TH		(mm) $L_1$	2400	2400	2400	2400
		(mm) $L_2$	1200	1200	1200	1200

## ANEXO XII. Características de algunos conductores

Alambres de cobre desnudo						
Temple duro y blando						
Características			Temple blando		Temple duro	
Calibre del conductor $mm^2$	Diámetro Nominal $mm$	Peso $kg / km$	Carga de rotura $Kgf$	Resistencia nominal C.C. a 20° C $\Omega / km$	Carga de rotura $Kgf$	Resistencia nominal C.C. a 20° C $\Omega / km$
0.5	0.80	4.47	13.6	34.3	23.0	35.7
0.75	0.97	6.57	20.0	23.3	33.8	24.3
1	1.13	8.92	27.1	17.2	45.9	17.9
1.5	1.38	13.3	40.4	11.5	67.8	12.0
2.5	1.78	22.1	67.2	6.93	112.7	7.21
4	2.25	35.4	107.4	4.34	178.1	4.51
6	2.76	53.2	155.6	2.88	262.0	3.00
10	3.57	89.0	260.3	1.72	433.4	1.79
10	4.5	141.0	413.5	1.08	664.8	1.13

Los alambres considerados en esta tabla corresponden a la clase de la Norma IEC-228.

Conductores de cobre forrado							
Calibre del conductor <i>AWG – MCM</i>	Sección Transversal	Nº de hilos <i>mm<sup>2</sup></i>	Diámetro nominal de los hilos <i>mm</i>	Diámetro del conductor <i>mm</i>	Espesor de aislamiento <i>mm</i>	Diámetro exterior <i>mm</i>	Peso <i>kg/km</i>
14	2.08	1	1.628	1.63	0.8	3.3	25
12	3.31	1	2.052	2.05	0.8	3.7	36
10	5.26	1	2.588	2.59	0.8	4.2	55
8	8.37	1	3.264	3.26	0.8	4.9	84
8	8.37	7	1.234	3.70	0.8	5.3	88
6	13.30	7	1.555	4.67	0.8	6.3	135
4	21.15	7	1.961	5.88	0.8	7.5	210
2	33.63	7	2.474	7.42	1.2	9.9	340
1	42.41	7	2.776	8.33	1.2	10.8	423
1/0	53.31	19	1.892	9.46	1.6	12.7	540
2/0	67.44	19	2.126	10.63	1.6	13.9	674
3/0	85.02	19	2.388	11.94	1.6	15.2	841
4/0	107.2	19	2.680	13.40	1.6	16.6	1051
250	126.7	37	2.088	14.62	1.6	17.8	1236
300	125.0	37	2.288	16.00	1.6	19.2	1473

Los alambres considerados en esta tabla corresponden a la clase de la Norma IEC-228.

### ANEXO XIII. Dimensiones normalizadas de postes de madera para uso en redes de distribución aérea

Dimensiones normalizadas de postes de madera para uso en redes de distribución aérea											
Clase	Grupo	Diámetro en la punta (mm)	Longitud total (m)	8*	9*	10*	11*	12	13	14	15
			Longitud de tratamiento (m)	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1
1	A	175	D	235	268	277	286	296	305	312	322
	B	184	I	264	277	286	299	308	318	324	334
	C	194	A	274	283	302	315	324	334	344	350
	D	203	M	296	312	321	334	344	356	366	372
2040	E	216	T	319	334	347	359	372	382	394	404
	A	168	R	239	248	255	267	277	268	235	299
	B	175	O	248	261	270	280	289	296	303	312

2	C	181	M	261	274	283	293	302	312	321	326	
	D	191		277	290	302	312	324	334	340	350	
1680	E	200	I	299	312	324	357	350	359	389	379	
3	A	159	N	223	233	243	251	258	267	273	280	
	B	165	I	239	242	251	261	267	277	283	293	
	C	171	M	245	235	264	273	285	293	299	305	
	D	176	O	258	271	283	293	302	312	318	326	
1360	E	191		250	293	302	315	324	334	344	333	
4	A	143	D	207	217	256	232	2385	248	254	261	
	B	149	E	213	226	232	242	349	258	264	271	
	C	156		226	236	245	254	264	270	277	288	
	D	162	S	242	252	261	270	280	289	296	302	
1090	E	171	E	261	271	283	293	302	312	318	323	
5	A	130	C	191	201	207	216	223	229	235	239	
	B	136	C	197	207	216	223	229	239	245	251	
	C	143	I	210	220	226	235	242	251	259	264	
	D	149	O	223	233	242	251	258	267	273	280	
860	E	159	N	238	252	261	270	280	286	298	302	
*	A	108		175	185	191	197	203	210	216	223	
	B	114	D	185	191	200	207	213	219	226	232	
	C*	121	E	194	204	210	216	226	232	238	243	
	D*	127		207	217	223	232	238	245	251	250	
680	E	136	E	223	233	242	251	250	264	273	280	
*	A	101	M	166	172	178	184	191	187	200	210	
	B	108	P	172	176	184	191	197	203	210	218	
	C*	114	O	181	188	197	203	210	216	223	226	
	D*	121	T	191	201	207	216	223	229	235	242	
550	E	127	R	207	217	226	232	242	248	254	261	
8	A	92	A	152	159	168	172	170				
	B	98	M	159	169	175	181	184				
	C	108	I	169	175	164	191	197				
	D	114	E	178	133	194	200	207				
450	E	121	N	194	201	210	216	226				
9	A	86	T	140	147							
	B	89	O	145	135							
	C	95		152	139							
	D	105	(mm)	162	172							
340	E	114		175	188							
	A	> 800	* CLASES, GRUPOS Y ALTURAS DE POSTES QUE SE ENCUENTRAN NORMALMENTE EN EL MERCADO									
	B	701-600										
	C	601-700										
	D	501-600										
	E	400-500										

## ANEXO XIV. Característica de Tubería para la Conducción marca Plastigama

Diámetro Nominal (mm)		Diámetro Interior mm	Espesor Nominal mm	Presión de Trabajo		
UNIÓN U/Z	UNIÓN E/C			MPa	PSI (lb/pulg <sup>2</sup> )	Kgf/cm <sup>2</sup>
200		192.2	3.9	0.50 ■	73	5.10
		190.2	4.9	0.63	91	6.43
		187.6	6.2	0.80	116	8.16
		184.6	7.7	1.00	145	10.20
		181.0	9.5	1.25	181	12.75
225		216.2	4.4	0.50 ■	73	5.10
		214.0	5.5	0.63	91	6.43
		211.0	7.0	0.80	116	8.16
		207.6	8.7	1.00	145	10.20
		203.6	10.7	1.25	181	12.75
250		240.2	4.9	0.50 ■	73	5.10
		237.8	6.1	0.63	91	6.43
		234.4	7.8	0.80	116	8.16
		230.8	9.6	1.00	145	10.20
		226.2	11.9	1.25	181	12.75
315		302.6	6.2	0.50 ■	73	5.10
		299.6	7.7	0.63	91	6.43
		295.4	9.8	0.80	116	8.16
		290.8	12.1	1.00	145	10.20
		285.0	15.0	1.25	181	12.75
355		341.0	7.0	0.50 ■	73	5.10
		337.6	8.7	0.63	91	6.43
		333.0	11.0	0.80	116	8.16
		327.6	13.7	1.00	145	10.20
		321.2	16.9	1.25	181	12.75
400		384.2	7.9	0.50 ■	73	5.10
		380.4	9.8	0.63	91	6.43
		375.2	12.4	0.80	116	8.16
		369.2	15.4	1.00	145	10.20
		362.0	19.0	1.25	181	12.75
500		384.2	9.8	0.50 ■	73	5.10
		474.0	12.3	0.63	91	6.43
		467.2	15.5	0.80	116	8.16
		459.4	19.2	1.00	145	10.20
		449.8	23.8	1.25	181	12.75
630		597.2	15.5	0.63	91	6.43
		588.8	19.5	0.80	116	8.16
		579.0	24.2	1.00	145	10.20

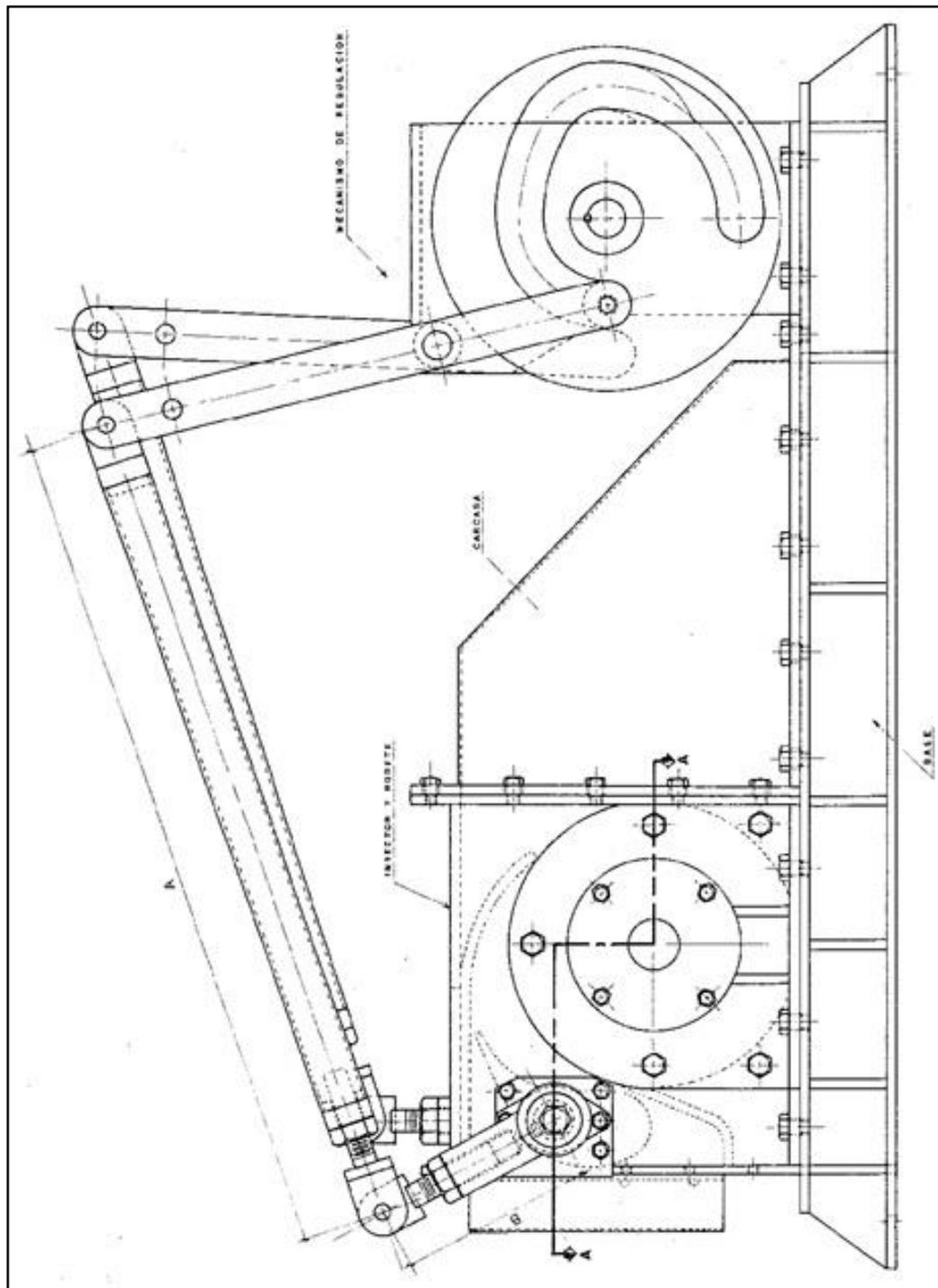
■ Producto de fabricación bajo pedido (según norma [NEN 1369], sujeto a lote mínimo de producción de acuerdo mutuo, cliente-fábrica, en tiempo de entrega.

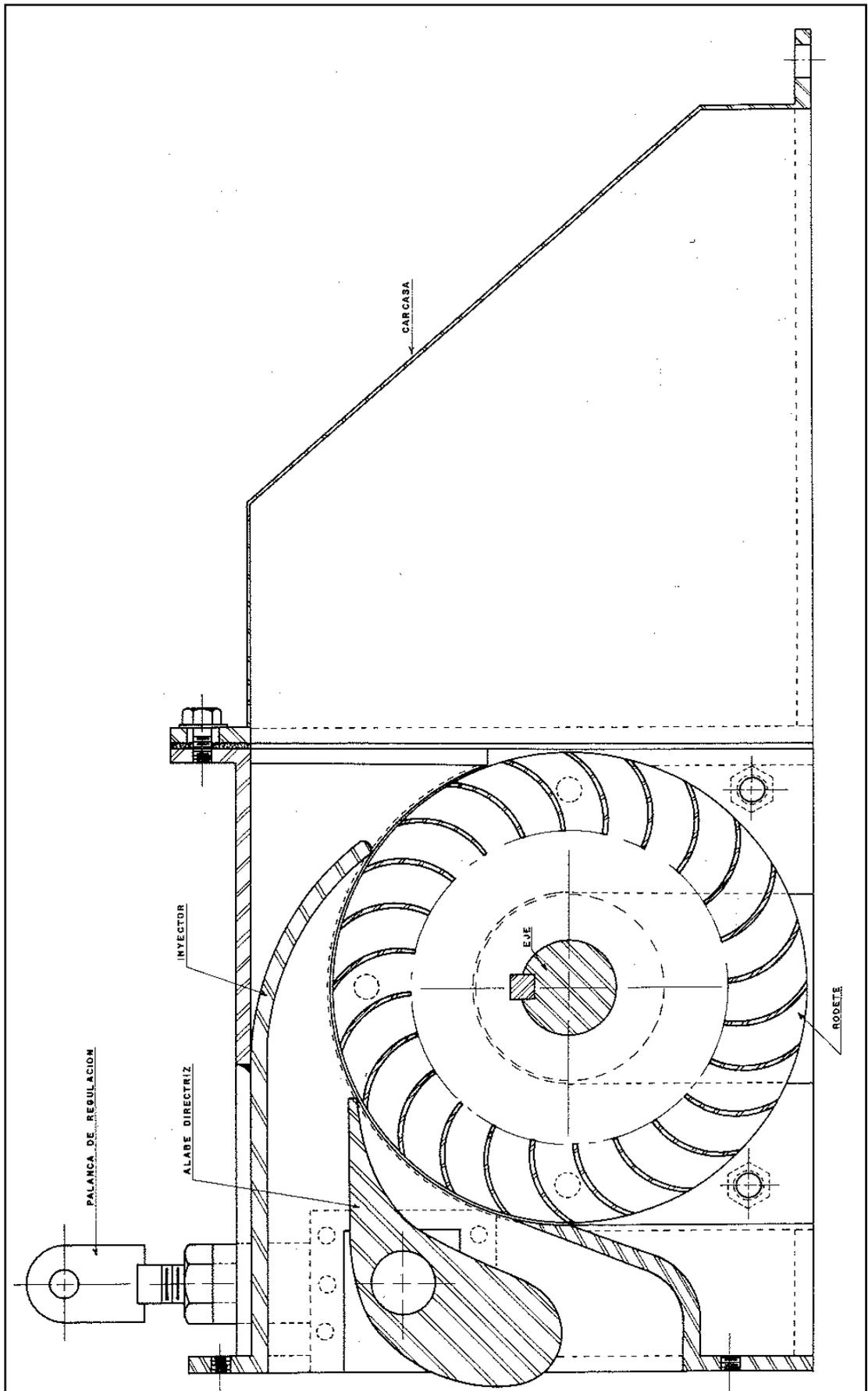
## ANEXO XV. Característica de Tubería de Presión

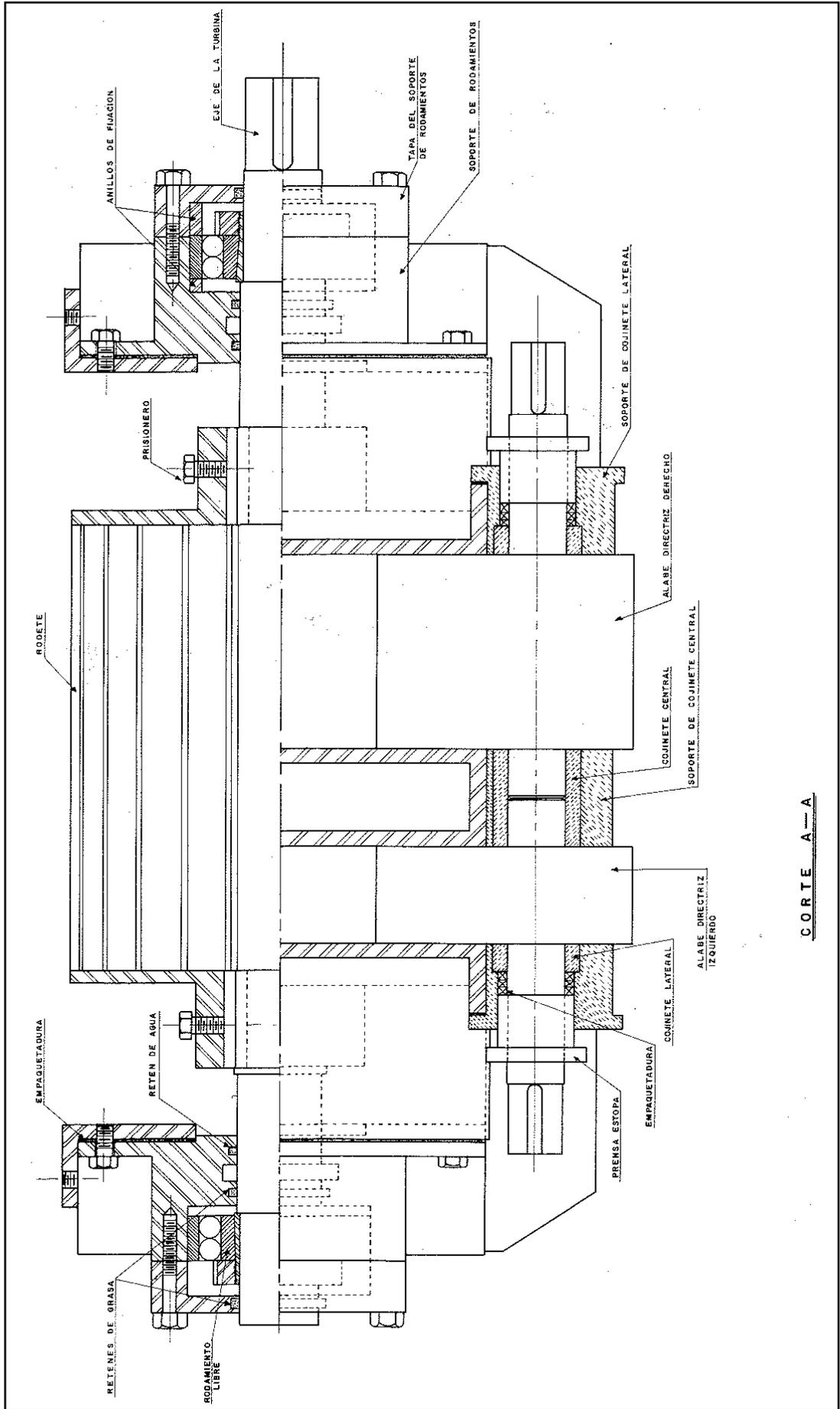
Diámetro Nominal	CÓD.	Serie	Espesor de Pared	Diámetro Interior	Presión de Trabajo		
					MPa	Kgf/cm <sup>2</sup>	Lb/plg <sup>2</sup>
mm		s	mm	mm			
20	925983	6.3	1.5	17.0	2.00	20.40	290
25	925994	8.0	1.5	22.0	1.60	16.32	232
32	926004	10.00	1.5	29.0	1.25	12.75	181
40	926020	12.5	1.5	37.0	1.00	10.20	145
	926018	10.0	1.9	36.2	1.25	12.75	181
50	926023	16.0	1.5	47.0	0.80	8.16	116
	926026	12.5	1.9	46.2	1.00	10.20	145
	926024	10.0	2.4	45.2	1.25	12.75	181
63	926029	20.0	1.5	60.0	0.63	6.43	91
	926031	16.0	2.0	59.0	0.80	8.16	116
	926033	12.5	2.4	58.2	1.00	10.20	145
	926032	10.0	3.0	57.0	1.25	12.75	181
75	926036	20.0	1.8	71.4	0.63	6.43	91
	926040	16.0	2.3	70.4	0.80	8.16	116
90	926042	20.0	2.2	85.6	0.63	6.43	91
	926043	16.0	2.8	84.4	0.80	8.16	116
	926046	12.5	3.5	83.0	1.00	10.20	145
	926044*	10.0	4.3	81.4	1.25	12.75	181
110	925952	20.0	2.7	104.6	0.63	6.43	91
	925953	16.0	3.4	103.2	0.80	8.16	116
	925956	12.5	4.2	101.6	1.00	10.20	145
	925954	10.0	5.2	99.6	1.25	12.75	181
125	925959*	20.0	3.1	118.8	0.63	6.43	91
	925960*	16.0	3.9	117.2	0.80	8.16	116
	925962*	12.5	4.8	115.4	1.00	10.20	145
	925961*	10.0	6.0	113.0	1.25	12.75	181
140	925964	20.0	3.4	133.2	0.63	6.43	91
	925965*	16.0	4.3	131.4	0.80	8.16	116
	925966*	12.5	5.4	129.2	1.00	10.20	145
160	925968	20.0	3.9	152.2	0.63	6.43	91
	925969	16.0	5.0	150.0	0.80	8.16	116
	925972	12.5	6.2	147.6	1.00	10.20	145
	925970	10.0	7.6	144.8	1.25	12.75	181
200	925976	20.0	4.9	190.2	0.63	6.43	91
	925977	16.0	6.2	187.6	0.80	8.16	116
	925979	12.5	7.7	184.6	1.00	10.20	145
	925981*	10.0	9.5	181.0	1.25	12.75	181
225	925985*	20.0	5.5	214.0	0.63	5.10	91
	925986*	16.0	7.0	211.0	0.80	8.16	116
250	925987	25.0	4.9	240.2	0.50	6.43	73
	925988	20.0	6.1	237.8	0.63	6.43	91
	925989	16.0	7.8	234.4	0.80	8.16	116
	925991	12.5	9.6	230.8	1.00	10.20	145
	925990	10.0	11.9	226.2	1.25	12.75	181
315	925998	25.0	6.2	302.6	0.50	5.10	73
	926002	20.0	7.7	299.6	0.63	6.43	91
	925999	16.0	9.8	295.4	0.80	8.16	116
	926001	12.5	12.1	290.8	1.00	10.20	145
355	926000	10.0	15.0	285.0	1.25	12.75	181
	926007	16.0	11.0	333.0	0.80	8.16	116
	926009	12.5	13.7	327.6	1.00	10.20	145
	926008	10.0	16.9	321.2	1.25	12.75	181
400	926011	25.0	7.9	384.2	0.50	5.10	73
	926013	20.0	9.8	380.4	0.63	6.43	91
	926014	16.0	12.4	375.2	0.80	8.16	116
	926017	12.5	15.4	369.2	1.00	10.20	145
	926015	10.0	19.0	362.0	1.25	12.75	181
	926016	8.0	24.1	351.8	1.60	16.32	232

**ANEXO XVI: Dimensiones generales de las Turbinas Michell Banki Estandarizadas**

Símbolo	TURBINA ESTANDARIZADA (mm)							
	31 A	32 A	33 B	34 C	35 B	41 B	42 B	43 B
A			45	55	60	70	72	75
B			78	78	78	105	105	105



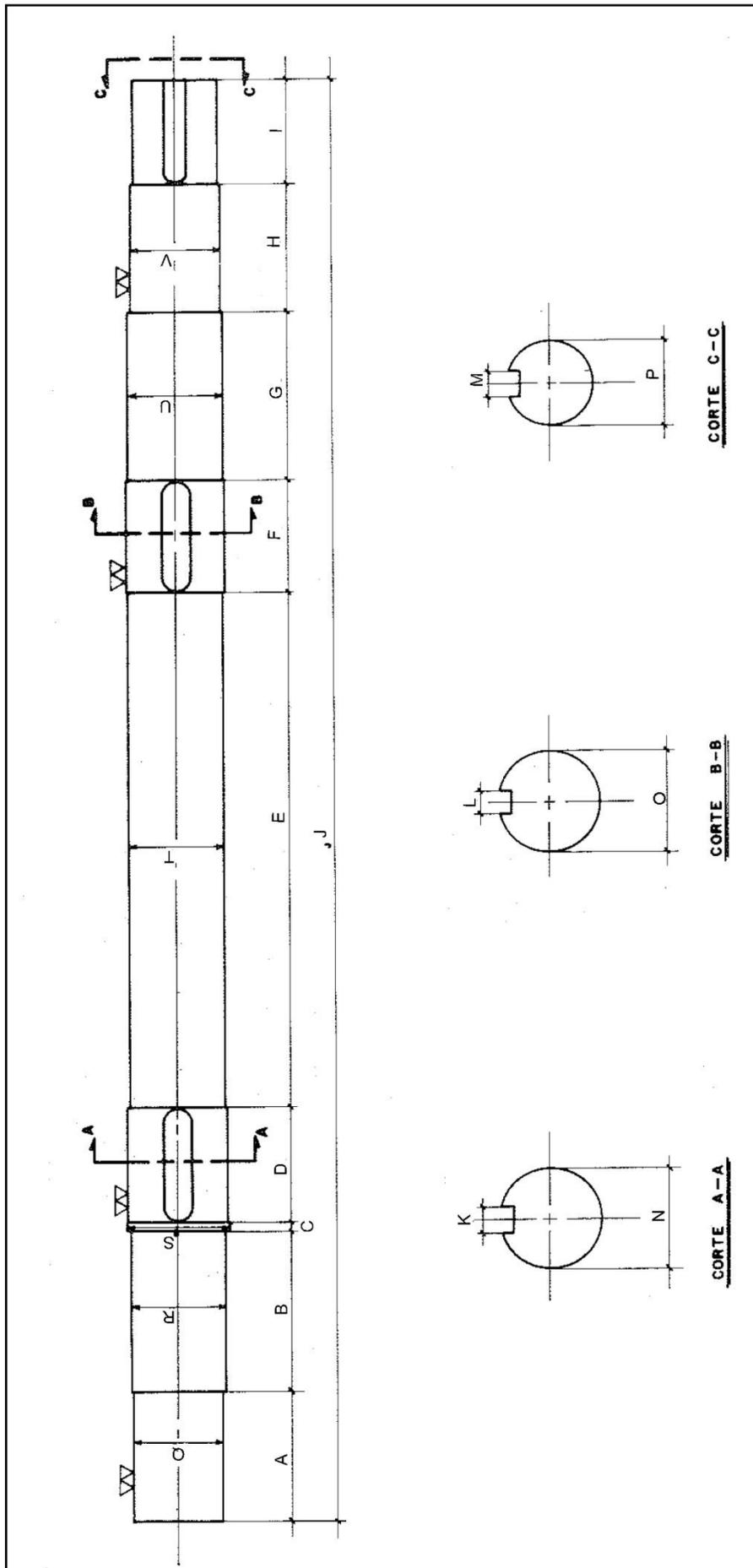




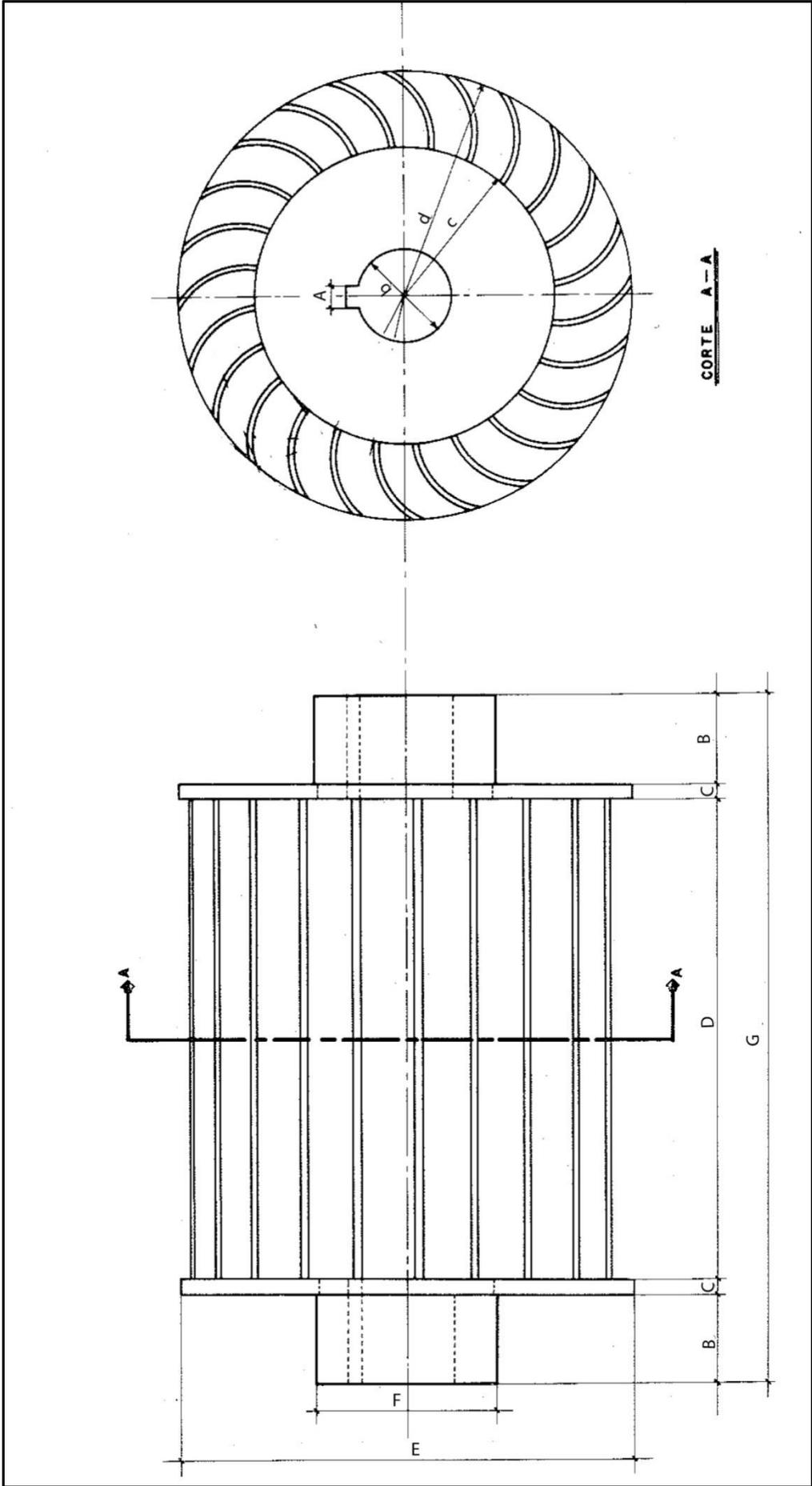
**CORTE A-A**

Símbolo	TURBINA ESTANDARIZADA- EJE PRINCIPAL (mm)							
	31 A	32 A	33 B	34 C	35 B	41 B	42 B	43 B
A	430	490	630	740	840	900	1110	1310
B	10	10	10	10	10	12	12	12
C	330	390	530	640	740	800	1010	1210
D	40	40	40	40	40	55	55	55
E	10	10	10	10	10	10	10	10
F	10	10	10	10	10	12	12	12
G	40	40	40	40	40	60	60	60
H	135	150	160	180	185	186	211	211
I	50	50	50	50	50	65	65	65
J	-	-	70	70	150	170	250	350
K	-	-	70	70	70	90	90	90
L	60	90	70	140	150	170	250	350
M	50	50	50	50	50	65	65	65
N	40	40	40	40	40	65	65	65
O	90	90	90	90	90	120	120	120
P	160	190	310	380	470	550	710	910
Q	64	64	64	64	64	80	80	80
R	15	15	15	15	15	25	25	25
S	196	196	196	196	196	394	394	394
T	10	10	10	10	10	12	12	12
U	102	102	102	102	102	133	133	133
V	30	30	30	30	30	40	40	40



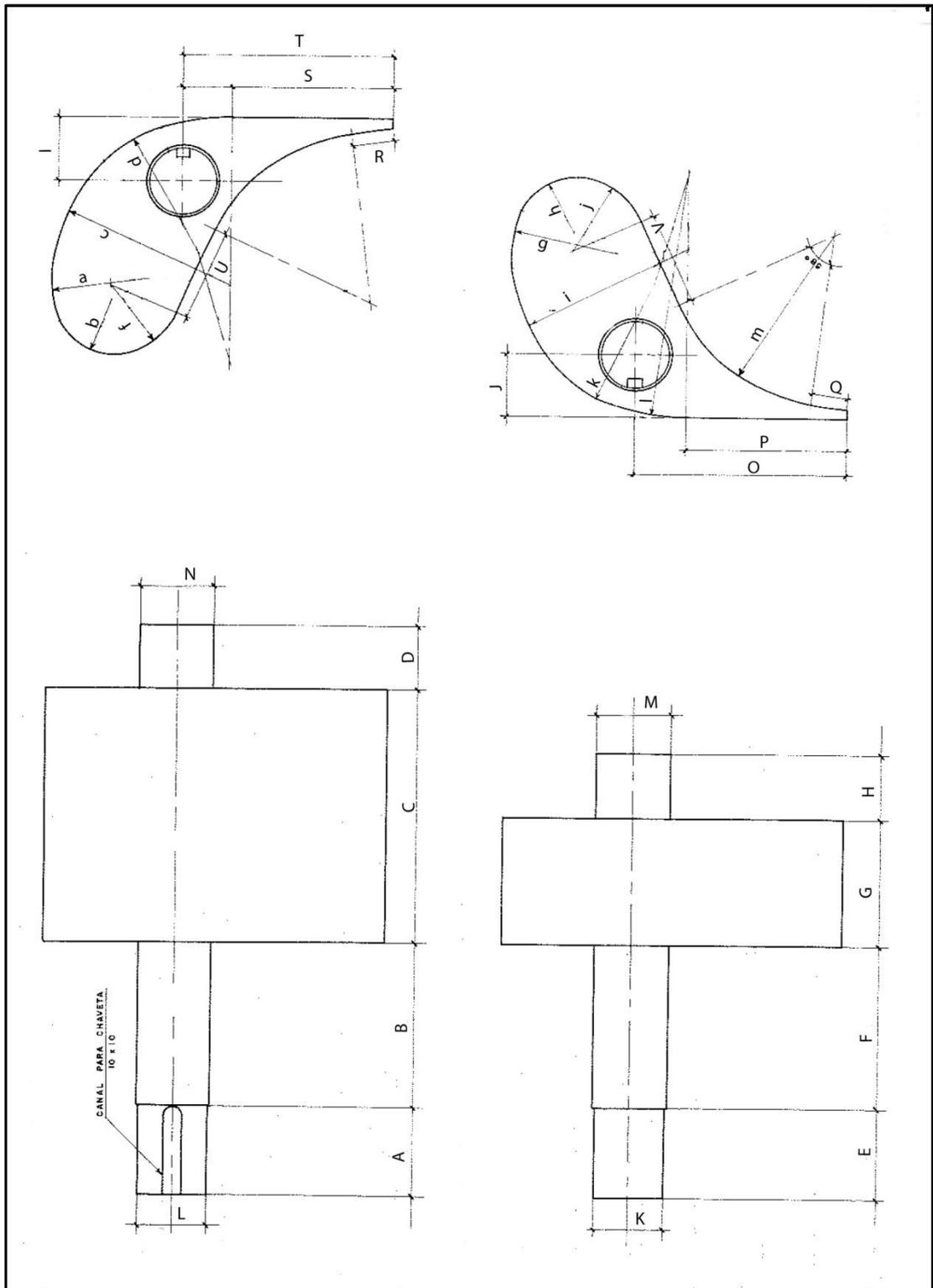






Símbolo	TURBINA ESTANDARIZADA-ALABE DIRECTRIZ DEL INYECTOR (mm)							
	31 A	32 A	33 B	34 C	35 B	41 B	42 B	43 B
A	50	50	50	50	50	65	65	65
B	100	100	100	100	100	130	130	130
C	60	90	70	140	150	170	250	350
D	35	35	35	35	35	45	45	45
E	-		50	50	50	65	65	65
F			100	100	100	130	130	130
G			70	70	150	170	250	350
H			35	35	35	45	45	45
I	35	35	35	35	35	47	47	47
J	35	35	35	35	35	47	47	47
K	38	38	38	38	38	48	48	48
L	38	38	38	38	38	48	48	48
M	40	40	40	40	40	50	50	50
N	40	40	40	40	40	50	50	50
O	116	116	116	116	116	155	155	155
P	98	98	98	98	98	131	131	131
Q	20	20	20	20	20	27	27	27
R	20	20	20	20	20	27	27	27
S	98	98	98	98	98	131	131	131
T	116	116	116	116	116	155	155	155
U	51	51	51	51	51	68	68	68
V	51	51	51	51	51	68	68	68
a	60	60	60	60	60	80	80	80
b	31	31	31	31	31	41	41	41
c	100	100	100	100	100	133	133	133
d	70	70	70	70	70	93	93	93
e	94	94	94	94	94	125	125	125
f	39	39	39	39	39	52	52	52
g	60	60	60	60	60	80	80	80
h	31	31	31	31	31	41	41	41
i	100	100	100	100	100	133	133	133
j	39	39	39	39	39	52	52	52
k	70	70	70	70	70	93	93	93
l	133	133	133	133	133	177	177	177
m	94	94	94	94	94	125	125	125

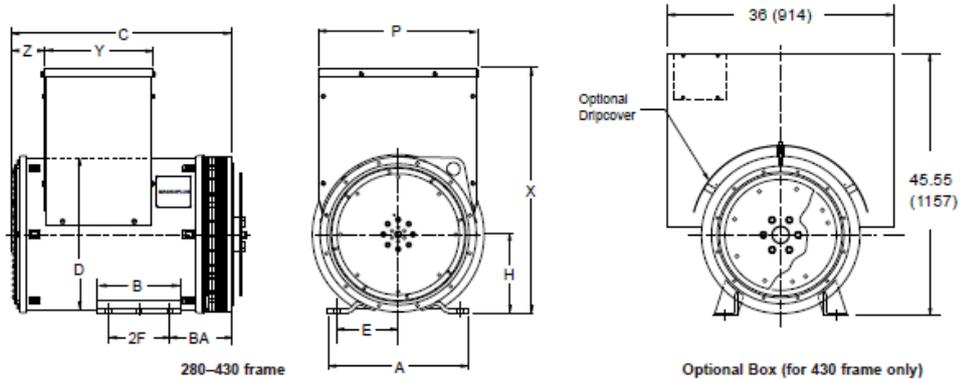




## ANEXO XVII. Características del Generador Síncrono marca MAGNAPLUS

Model Number	kW Continuous Duty				kW Standby Duty			
	Class F 105°C		Class H 125°C		Class F 130°C		Class H 150°C	
	480Y/240Y	416Y/208Y	480Y/240Y	416Y/208Y	480Y/240Y	416Y/208Y	480Y/240Y	416Y/208Y
281PSL1500	6.0	6.4	6.5	6.9	6.6	7.0	7.0	7.4
281PSL1501	7.5	8.0	8.1	8.6	8.2	8.7	8.7	9.2
281PSL1502	10.5	10.0	11.0	10.5	11.0	10.5	12.0	11.0
282PSL1503	13.5	12.5	14.5	13.0	15.0	13.5	15.5	14.0
282PSL1504	15.0	14.5	16.0	15.5	16.5	15.5	17.0	16.5
282PSL1505	20.0	19.0	21.0	20.0	22.0	20.0	23.0	21.0
283PSL1506	23	23	25	25	25	25	27	26
283PSL1507	28	28	30	30	30	30	33	31
284PSL1508	32	32	35	35	35	35	38	37
<b>284CSL1542</b>	<b>40</b>	<b>36</b>	<b>43</b>	<b>40</b>	<b>43</b>	<b>40</b>	<b>46</b>	<b>41</b>
361PSL1600	45	40	48	42	48	42	50	45
361PSL1601	55	50	60	55	60	55	65	58
361PSL1602	65	60	70	65	70	65	76	68
362PSL1604	84	72	90	80	90	80	95	85
362PSL1606	96	90	105	100	105	100	113	105
363PSL1607	125	110	135	125	135	125	150	135
431PSL6202	142	140	151	147	155	151	160	155
431PSL6204	170	165	180	175	181	176	190	182
431PSL6206	200	191	211	202	215	210	225	217
431PSL6208	211	203	226	216	230	225	240	227
432PSL6210	260	260	275	275	280	280	291	287
432PSL6212	275	260	300	276	300	280	310	300
433PSL6216	342	343	375	366	380	375	400	387
433PSL6220	375	362	403	385	411	400	430	417

- 1800 RPM
- 0.8 Power Factor
- 40°C Ambient



### Dimensions in inches and (millimeters)

All dimensions are approximate.  
Refer to dimension section of the Generator Catalog for full dimensional data.

Frame Size	A	B	BA	C	D	E	2F	H	P	X	Y	Z
281	14.00 (356)	7.00 (178)	6.58 (167)	15.95 (405)	13.75 (349)	6.25 (159)	5.00 (127)	8.00 (203)	13.42 (341)	18.58 (471)	6.86 (174)	3.50 (89)
282	14.00 (356)	7.00 (178)	6.58 (167)	17.94 (456)	13.75 (349)	6.25 (159)	5.00 (127)	8.00 (203)	13.42 (341)	18.58 (471)	6.86 (174)	3.50 (89)
283	14.00 (356)	7.00 (178)	6.58 (167)	20.44 (519)	13.75 (349)	6.25 (159)	5.00 (127)	8.00 (203)	13.42 (341)	18.58 (471)	6.86 (174)	3.50 (89)
<b>284</b>	<b>14.00 (356)</b>	<b>7.00 (178)</b>	<b>6.58 (167)</b>	<b>22.44 (570)</b>	<b>13.75 (349)</b>	<b>6.25 (159)</b>	<b>5.00 (127)</b>	<b>8.00 (203)</b>	<b>13.42 (341)</b>	<b>18.58 (471)</b>	<b>6.86 (174)</b>	<b>3.50 (89)</b>
361	16.00 (406)	9.50 (241)	7.00 (178)	24.88 (632)	17.35 (441)	7.00 (178)	7.00 (178)	9.00 (229)	18.19 (462)	27.85 (707)	12.44 (316)	3.52 (89)
362	16.00 (406)	9.50 (241)	7.00 (178)	28.50 (724)	17.35 (441)	7.00 (178)	7.00 (178)	9.00 (229)	18.19 (462)	27.85 (707)	12.44 (316)	3.52 (89)
363	16.00 (406)	9.50 (241)	10.50 (267)	31.62 (803)	17.35 (441)	7.00 (178)	7.00 (178)	9.00 (229)	18.19 (462)	27.85 (707)	12.44 (316)	3.52 (89)
431	21.46 (545)	15.00 (381)	10.00 (254)	34.19 (868)	22.64 (575)	9.00 (229)	11.00 (279)	13.00 (330)	24.36 (619)	36.10 (917)	16.00 (408)	2.66 (68)
432	21.46 (545)	15.00 (381)	10.00 (254)	37.69 (957)	22.64 (575)	9.00 (229)	11.00 (279)	13.00 (330)	24.36 (619)	36.10 (917)	16.00 (408)	2.66 (68)
433	21.46 (545)	15.00 (381)	10.00 (254)	42.69 (1084)	22.64 (575)	9.00 (229)	11.00 (279)	13.00 (330)	24.36 (619)	36.10 (917)	16.00 (408)	2.66 (68)

Please Note: Connection boxes shown are furnished as standard product. Consult factory for optional connection boxes.

**ANEXO XVIII. Especificaciones técnicas de conductores de Cobre tipo TW-600  
V 60 °C, marca ELECTROCABLES C.A.**

**ESPECIFICACIONES TECNICAS**

Todos los conductores fabricados por ELECTROCABLES C.A. cumplen con holgura las especificaciones establecidas en las normas de fabricación existentes para cada tipo y que son las siguientes:

Aislante de Material Termoplástico, PVC 600 V - 60 °C

Calibre AWG ó MCM	Sección mm <sup>2</sup>	FORMACION		DIAMETRO EXTERIOR mm	PESO TOTAL Kg/Km	Capacidad de corriente		TIPO CABLE	Altern. de embal.
		No. de Hilos por diámetro en mm.	ESP ESOR AISLAMIENTO mm			Para 1 cond. al aire libre Amp.	Para 3 cond. en conduit Amp.		
20	0.52	1 x 0.813	0.76	2.33	9.81	6	7	TF	A,E
18	0.82	1 x 1,02	0.76	2.54	13.16	6	7	TF	A,E
16	1.31	1 x 1,29	0.76	2.81	18.10	10	8	TF	A,B
14	2.08	1 x 1,63	0.76	3.15	26.10	20	15	TW	A,B
12	3.31	1 x 2,05	0.76	3.57	38.30	25	20	TW	A,C
10	5.26	1 x 2,59	0.76	4.11	57.40	40	30	TW	A,D
8	8.34	1 x 3,26	1.14	5.54	95.20	60	40	TW	A,B
14	2.08	7 x 0,62	0.76	3.38	27.80	20	15	TW	A,B
12	3.31	7 x 0,78	0.76	3.86	40.10	25	20	TW	A,C
10	5.26	7 x 0,98	0.76	4.46	59.90	40	30	TW	A,D
8	8.37	7 x 1,23	1.14	5.97	105.20	60	40	TW	A,B,E
6	13.30	7 x 1,55	1.52	7.69	170.40	80	55	TW	A,E
4	21.15	7 x 1,96	1.52	8.92	255.50	105	70	TW	A,E
2	33.62	7 x 2,47	1.52	10.45	388.90	140	95	TW	A,E
1	42.36	7 x 2,78	2.03	12.40	482.90	165	110	TW	A,D,E
1/0	53.49	19 x 1,89	2.03	13.51	621.00	195	125	TW	D,E,Z
2/0	67.43	19 x 2,12	2.03	14.66	778.00	225	145	TW	D,E,Z
3/0	85.01	19 x 2,39	2.03	16.01	934.00	260	165	TW	D,E,Z
4/0	107.20	19 x 2,68	2.03	17.46	1159.00	300	195	TW	D,E,Z
250	127.00	37 x 2,09	2.41	19.45	1368.00	340	215	TW	Z
300	152.00	37 x 2,29	2.41	20.85	1623.00	375	240	TW	Z
350	177.00	37 x 2,47	2.41	22.11	1876.00	420	260	TW	Z
400	203.00	37 x 2,64	2.41	23.30	2128.00	455	280	TW	Z
500	253.00	37 x 2,95	2.41	25.47	2631.00	515	320	TW	Z
600	304.00	37 x 3,23	2.79	28.19	3174.00	575	355	TW	Z
650	329.00	37 x 3,37	2.79	29.17	3345.00	600	370	TW	Z
700	355.00	37 x 3,49	2.79	30.01	3609.00	630	385	TW	Z

Conductor elaborado bajo normas:

NEMA WC -5, ICEA S -61-402, ASTM B3, B8, UL STANDARD 62, 83, INEN

## ANEXO XIX. Especificaciones técnicas de Conductores de Aluminio reforzados con Acero A.C.S.R. marca ELECTROCABLES C.A.

### ESPECIFICACIONES TECNICAS

Todos los conductores fabricados por ELECTROCABLES C.A. cumplen con holgura las especificaciones establecidas en las normas de fabricación existentes para cada tipo y que son las siguientes:

Conductor de Aluminio 1350 - H19  
Alambre o Corda de Acero Galvanizado

NOMBRE CLAVE	Calibre AWG ó MCM	Sección		FORMACION		DIAM. EXTER. mm	PESO			TENSION DE RUPTURA Kg.	RESISTENCIA C. C. a 20 °C OHMS/Km.	Capacidad de Corriente Amp.
		AL mm <sup>2</sup>	TOTAL mm <sup>2</sup>	No. de Hilos por diámetro (mm)	AL St		AL Kg/Km	ACERO Kg/Km	TOTAL Kg/Km			
Turkey	6	13.30	15.46	6x1,68 + 1x1,68	5,04	36.39	17.22	53.61	530.00	2.154	105	
Swan	4	21.15	24.71	6x2,12 + 1x2,12	6.36	57.89	27.42	85.31	830.00	1.353	140	
Sparrow	2	33.62	29.22	6x2,67 + 1x2,67	8.01	92.02	43.63	135.65	1265.00	0.8507	184	
Raven	1/0	53.49	62.38	6x3,37 + 1x3,37	10.11	146.50	69.40	215.90	1940.00	0.5351	242	
Quail	2/0	67.43	78.64	6x3,78 + 1x3,78	11.34	184.60	87.50	272.10	2425.00	0.4245	276	
Pigeon	3/0	85.01	99.23	6x4,25 + 1x4,25	12.75	232.70	110.20	342.90	3030.00	0.3367	315	
Penguin	4/0	107.20	125.10	6x4,77 + 1x4,77	14.31	293.50	139.00	432.50	3820.00	0.2671	357	
Waxwing	266.80	135.20	157.20	18x3,09 + 1x3,09	15.47	371.50	58.30	429.80	3210.00	0.2126	449	
Partridge	266.80	135.20	142.60	26x2,57 + 7x2,00	16.28	373.50	171.90	545.40	5100.00	0.2137	457	
Ostrich	300.00	152.00	176.70	26x2,73 + 7x2,12	17.28	419.70	193.00	612.70	5730.00	0.1900	492	
Piper	300.00	152.00	187.50	30x2,54 + 7x2,54	17.78	420.20	276.80	697.00	7000.00	0.1902	490	
Mertlin	336.40	170.50	179.90	18x3,47 + 1x3,47	17.37	468.40	73.60	542.00	4060.00	0.1686	519	
Linnet	336.40	170.50	198.30	26x2,89 + 7x2,25	18.31	470.70	216.70	687.40	6375.00	0.1671	529	
Oriole	336.40	170.50	210.30	30x2,69 + 7x2,69	18.83	471.30	310.30	781.60	7735.00	0.1666	535	
Chickadee	397.50	201.42	212.50	18x3,77 + 1x3,77	18.87	554.40	87.10	641.50	4717.00	0.1427	576	
Brant	397.50	201.42	227.55	24x3,27 + 7x2,18	19.61	557.90	203.90	761.80	6622.00	0.1418	584	
Ibis	397.50	201.42	234.20	26x3,14 + 7x2,44	19.88	556.10	255.60	811.70	7340.00	0.1414	587	
Lark	397.50	201.42	248.40	30x2,92 + 7x2,92	20.44	556.60	366.70	923.30	9060.00	0.1405	594	
Pelikan	477.00	241.70	255.10	18x4,14 + 1x4,14	20.68	666.30	104.60	770.90	5579.00	0.1189	646	
Flicker	477.00	241.70	273.10	24x3,58 + 7x2,39	21.48	669.70	244.40	914.10	7802.00	0.1175	655	
Hawk	477.00	241.70	281.10	26x3,44 + 7x2,68	21.80	667.40	307.50	974.90	8820.00	0.1175	659	
Hen	477.00	241.70	298.10	30x3,20 + 7x3,20	22.40	668.00	440.00	1108.00	10590.00	0.1170	666	
Heron	500.00	253.30	312.40	30x3,28 + 7x3,28	22.96	701.00	461.00	1162.00	11090.00	0.1141	694	
Osprey	556.50	282.00	298.20	18x4,47 + 1x4,47	23.22	784.50	125.60	910.10	6215.00	0.1015	711	
Parakeet	556.50	282.00	318.52	24x3,87 + 7x2,58	23.22	781.30	285.50	1066.80	9004.00	0.1010	721	
Dove	556.50	282.00	327.90	26x3,72 + 7x2,89	23.55	779.00	358.00	1137.00	10140.00	0.1007	726	
Eagle	556.50	282.00	347.80	30x3,46 + 7x3,46	24.22	779.00	514.00	1293.00	12360.00	0.1001	734	
Poacook	605	306.60	346.39	24x4,03 + 7x2,69	24.21	849.80	309.50	1159.30	9798.00	0.09420	760	
Squab	605	306.60	356.45	26x3,87 + 7x3,01	24.54	850.40	389.80	1240.20	10954.00	0.09410	765	
Teal	605	306.60	376.45	30x3,61 + 19x2,16	25.25	851.20	546.20	1397.40	13630.00	0.09402	773	
Rook	636	322.30	364.00	24x4,14 + 7x2,76	24.82	892.90	325.80	1218.70	10274.00	0.08966	784	
Grosbeak	636	322.30	374.70	26x3,97 + 7x3,09	25.15	890.00	409.00	1299.00	11340.00	0.08953	789	
Egret	636	322.30	395.60	30x3,70 + 19x2,22	25.90	891.00	575.00	1466.00	14330.00	0.08948	798	
Flamingo	666.6	337.74	381.55	24x4,23 + 7x2,82	25.40	939.00	341.00	1277.00	10773.00	0.08550	807	
Starling	715.50	362.50	421.60	26x4,21 + 7x3.28	26.68	1001.00	461.00	1462.00	12750.00	0.07966	849	
Redwing	715.50	362.50	445.10	30x3,92 + 19x2,35	27.43	1002.00	646.00	1648.00	15690.00	0.07958	859	
Drake	795.00	402.80	468.00	26x4,44 + 7x3,45	28.11	1116.20	511.20	1627.40	14290.00	0.07051	907	
Hallard	795.00	402.80	494.70	30x4,14 + 19x2,48	28.96	1114.00	719.00	1833.00	17440.00	0.06977	918	

Conductor elaborado bajo normas:  
ASTM B232, INEN

## ANEXO XX. Características Transformador EREMU.

**eremu**<sup>sa</sup>



Donostia Ibilbidea, 70 - Parc. 5,6  
20115 ASTIGARRAGA ( Gipuzkoa )

Telef 943 33 33 11  
Fax 943 33 71 25  
E-mail ventas@eremu.es  
Web www.eremu.es

C.I.F. ES A-20087441



**TRANSFORMADORES STÜRTZE**  
**FUENTES DE ALIMENTACION**  
**CARGADORES DE BATERIAS**  
**CONVERTIDORES ESTATICOS**

**Cliente** : INDURAMA

**Customer**

**A la atención de** : SR. PAUL NARANJO

**Contact person**

**S/Referencia** : EMAIL PAUL 10/05/2012

**Your ref.**

**Nº Fax** :

**Fax**

**Fecha** : 15/05/2012

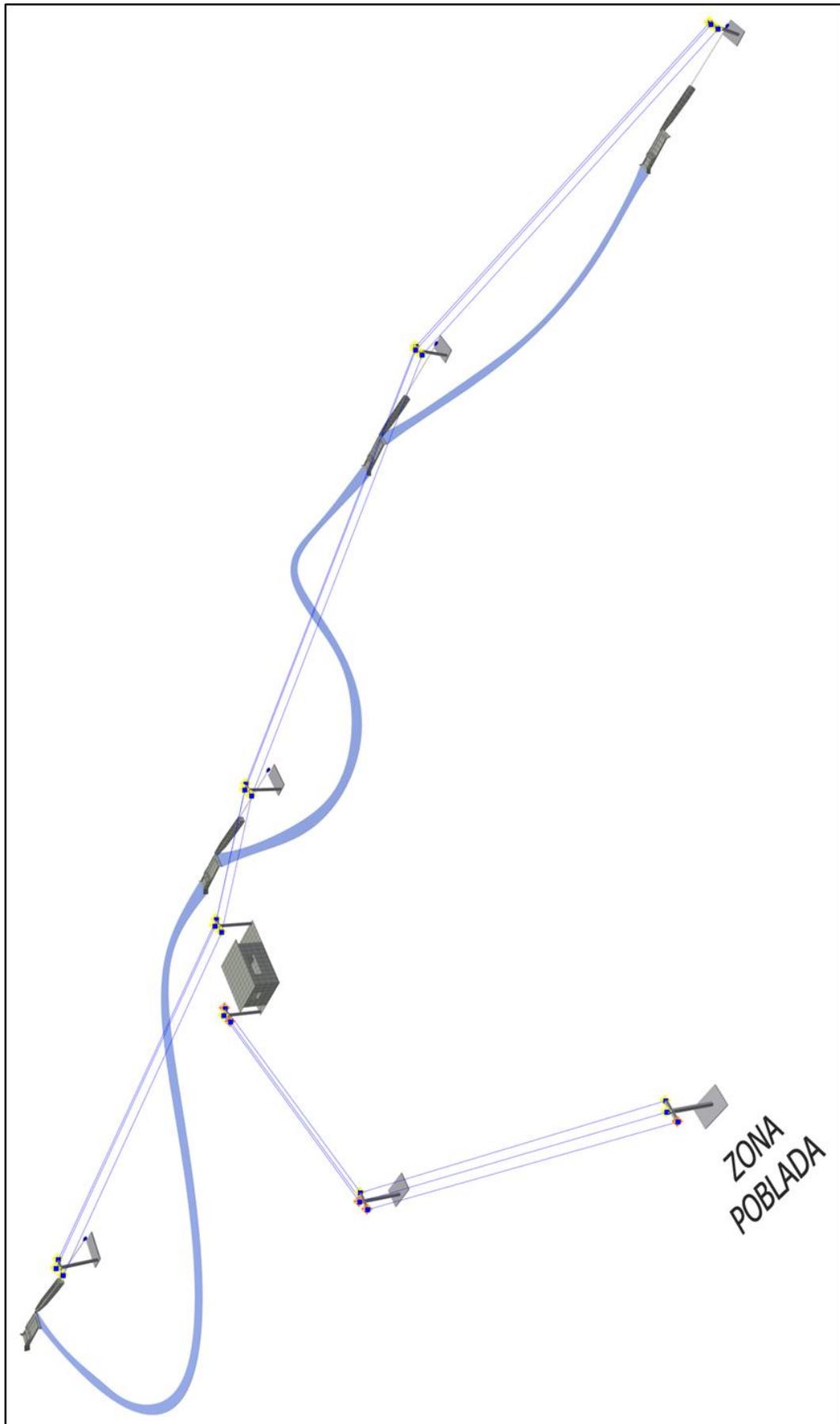
**Date**

**OFERTA Nº 20120943**  
**QUOTE**

CTD	N/COD	ARTICULO	PRECIO UNIT.€ (sin Iva)	DTO	PLAZO
QUANTITY	Product code	Description	UNIT/PRICE €	DSCT	EDD
1,00	00	TRANSFORMADOR III RESINA 200 KVA 10/0,22KV, 60Hz. IP-00.	4.470,00		7 SEMANAS
1,00	00	TRANSFORMADOR III ACEITE 200 KVA 10/0,22KV, 60Hz. IP-00.	4.350,00		7 SEMANAS

*" Les invitamos a realizar sus consultas a través de nuestra página web : [www.eremu.es](http://www.eremu.es) "*  
*"Please visit our website for further information [www.eremu.es](http://www.eremu.es)"*

**ANEXO XXI. Esquema de las redes de transmisión**



**ANEXO XXII. Cotización del grupo Electromecánico marca 3RC del Perú.**

**COTIZACIÓN: GRUPO HIDROELÉCTRICO**

Lima, 04de Abril del 2012

Sr. Roberto Moreno  
Cuenca – Azuay  
Teléfono: 087358968  
ECUADOR

De nuestra consideración:

En atención a su amable solicitud, presentamos nuestra mejor oferta por el siguiente suministro:

<b>Descripción</b>		<b>EQUIPO</b>
1.1	Una Válvula principal tipo Mariposa	10" diámetro
1.2	Una Junta de montaje	10" diámetro
1.3	Una Turbina Hidráulica Tipo Michell-Banki	48 KW en el eje
1.4	Sistema de Acoplamiento Turbina-generador	02 Poleas y 04 fajas
1.5	Generador eléctrico	40 KW, 1800 RPM, 220/380 v, 60 Hz.
1.6	Tablero de Medición y control	40 KW
1.7	Gobernador automático de Velocidad tipo electrónico.	40 kW
1.8	Material complementario para montaje (pernos anclaje, empaquetaduras, cables de conexión generador –tablero- regulador). Plano de cimentación.	
	<b>PRECIO FOB : US\$</b>	<b>35,000.00</b>

**Son: Treinta y cinco mil 00/100 Dólares Americanos**

## 2. CONDICIONES GENERALES DE VENTA

**Los equipos son exclusivamente para las condiciones indicadas.**

**Precio** : El precio es FOB, en Aduanas de Lima - Perú

**Forma de pago** : 50% de inicial a la orden de fabricación, con transferencia bancaria

: 50 % restante contra entrega

**Plazo de entrega** : 90 días luego de la orden de fabricación y realizado el primer pago.

**Garantía** : Un año contra falla de fabricación.

**Validez de la oferta** : 30 días siguientes a partir de la fecha.

Esperando sus noticias nos despedimos,

Atentamente,

Ing. Eusebio Castromonte Salinas

Director-Gerente



## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

COZ Federico y otros, *Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas*, ITDG-Perú 1995.

MATAIX Claudio, *Mecánica de fluidos y Máquinas Hidráulicas*, Editorial Harla, México, 1987.

ORTIZ Ramiro, *Pequeñas Centrales Hidroeléctricas*: Editorial McGraw Hill, Colombia 2001.

STREETER Víctor, *Mecánica de Fluidos*, Editorial Harla, México, 1985

ITDG, *Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas*, Perú, 1995.

ITDG, *Manual para la evaluación de la demanda, recursos hídricos, diseño e instalación de Microcentrales Hidroeléctricas*, Soluciones Prácticas, Perú 2010.

OLADE, *Manual de Diseño Estandarización y Fabricación de Equipos para Pequeñas Centrales Hidroeléctricas*, Volumen 1, Perú 1983.

ITDG, *Manual de Minicentrales y Microcentrales Hidráulicas. Una guía para el desarrollo de proyectos*. ITDG-Perú.

BUN-CA, *Manuales sobre Energía Renovable: Hidráulica a Pequeña Escala*, San José Costa Rica 2002.