



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Evaluación Financiera de las pérdidas energéticas en las tuberías de conducción de pequeñas centrales hidroeléctricas**

**Daniel Antonio Toro Martínez**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Minas, Departamento de Ciencias de la Computación y la Decisión  
Medellín, Colombia  
2016



# **Evaluación Financiera de las pérdidas energéticas en las tuberías de conducción de pequeñas centrales hidroeléctricas**

**Daniel Antonio Toro Martínez**

Trabajo Final de Maestría presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ingeniería – Sistemas Energéticos**

Director:

PhD. Carlos Jaime Franco Cardona

Línea de Investigación:

Sistemas Energéticos

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Ciencias de la Computación y la Decisión

Medellín, Colombia

2016



*A mi familia y amigos.*

*“La madurez del hombre es haber vuelto a encontrar la seriedad con la que se jugaba cuando se era niño.”*

*Friedrich Nietzsche*



## Resumen

Este trabajo tiene por objeto la evaluación financiera de las pérdidas energéticas que se ocasionan en los procesos de generación en pequeñas centrales hidroeléctricas ocasionadas por la fricción generada por el flujo de agua a través de las tuberías de conducción a presión. La principal fuente de ingresos de las pequeñas centrales hidroeléctricas (plantas menores a 20 megavatios) depende de la venta de su energía en el mercado eléctrico mayorista o ventas directas a terceros.

Las pérdidas energéticas en la tubería de conducción están determinadas principalmente por la rugosidad de la superficie de la pared interna del material. Partiendo de unas características específicas de una pequeña central hidroeléctrica genérica utilizada como modelo de estudio, se calcularon las pérdidas energéticas por fricción para tuberías de acero y tuberías de poliéster reforzado en poliéster reforzado con fibra de vidrio o GRP por sus siglas en inglés (Glass Reinforced Pipe).

Se concluye que el valor presente de la pérdida de energía ocasionada por fricción para un periodo de 30 años, equivale a un 3,5% del valor presente de la energía bruta que puede generar la central utilizando tuberías de poliéster reforzadas con poliéster reforzado con fibra de vidrio, y aproximadamente un 4,4% para las tuberías de acero. Estas pérdidas porcentuales aparentemente bajas pueden cambiar las decisiones de inversión en un proyecto de este tipo.

**Palabras clave:** Pequeña Central Hidroeléctrica, pérdidas friccionales, tuberías de conducción.

## Abstract

The objective of this work is to make a financial valuation of the energy losses that occur in the generation processes in small hydropower plants, mainly caused by the friction generated in the flow through the material of the pipelines under pressure. The main source of income for small hydropower plants (plants smaller than 20 megawatts) depends on the sale of their energy in the wholesale electricity market or direct sales to third parties.

The energy losses in the pipeline are mainly due to the roughness of the surface of the material. The valuation is based on specific characteristics of a small generic hydropower plant used as a model for a study case; friction energy losses are calculated for steel pipes and glass reinforced pipes (GRP).

It is concluded that the present value of the loss of energy caused by the friction for a period of 30 years, is equivalent to 3.5% of the present value of the gross energy that the hydropower plant can generate using fiberglass pipes, and approximately 4,4% for steel pipes. These apparently small percentage losses can change investment decisions in this kind of projects.

**Keywords:** Small Hydropower Plants, frictional losses, pressure pipes.

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen</b> .....	<b>VII</b>
<b>Lista de Ilustraciones</b> .....	<b>XI</b>
<b>Lista de tablas</b> .....	<b>XII</b>
<b>Lista de Símbolos y abreviaturas</b> .....	<b>XIII</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>1. Capítulo 1 Antecedentes</b> .....	<b>3</b>
1.1 Planteamiento y justificación del problema .....	10
<b>2. Capítulo 2 Marco Teórico</b> .....	<b>13</b>
2.1 Revisión de la literatura .....	23
<b>3. Capítulo 3 Objetivos</b> .....	<b>25</b>
3.1 OBJETIVO GENERAL .....	25
3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	25
<b>4. Capítulo 4 Herramienta de Modelado</b> .....	<b>27</b>
4.1 Selección de la herramienta de modelado .....	27
4.2 Descripción del modelo .....	28
4.2.1 Descripción de la estructura del modelo .....	28
4.2.2 Descripción de la implementación del modelo .....	29
4.2.2.1 Características de la pequeña central hidroeléctrica .....	30
4.2.2.2 Variables de mercado .....	31
4.2.2.3 Variables de la tubería .....	31
<b>5. Capítulo 5 Validación del modelo</b> .....	<b>32</b>
<b>6. Capítulo 6 Análisis de Resultados</b> .....	<b>36</b>
6.1 Valor económico de la generación de energía de la pequeña central hidroeléctrica .....	36
6.2 Valor económico de las pérdidas energéticas en la tubería de conducción de acero .....	39
6.3 Valor económico de las pérdidas energéticas en la tubería de conducción de poliéster reforzado con poliéster reforzado con fibra de vidrio .....	43
6.4 Análisis de Sensibilidad .....	46
6.4.1 Sensibilidad Tubería de Acero .....	46

6.4.2	Sensibilidad Tubería de poliéster reforzada con fibra de vidrio .....	48
<b>7.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>51</b>
7.1	Conclusiones.....	51
7.2	Recomendaciones.....	54
<b>Bibliografía .....</b>		<b>55</b>

## Lista de Ilustraciones

	<b>Pág.</b>
Figura 1-1 Estructura institucional del Mercado Eléctrico Mayorista .....	5
Figura 1-2 Estructura del sector eléctrico colombiano .....	5
Figura 1-3 Participación de los diferentes generadores en la generación de energía en Colombia .....	6
Figura 1-4 Principales elementos de una pequeña central hidroeléctrica .....	9
Figura 2-1 Aprovechamiento de la energía hidroeléctrica en pequeñas centrales .....	14
Figura 2-2 Rugosidad absoluta por material de la tubería .....	21
Figura 4-1 Diseño del modelo.....	29
Figura 5-1 Precio de la energía en Bolsa en Colombia.....	33
Figura 6-1 Sensibilidad valor presente de pérdidas energéticas en tuberías de acero ..	47
Figura 6-2 Sensibilidad valor presente de pérdidas energéticas en tuberías de poliéster reforzadas con poliéster reforzado con fibra de vidrio.....	48

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 2-1. Tipos de tubería para pequeñas centrales hidroeléctricas.....	16
Tabla 5-1. Variables de entrada diseño de la PCH.....	32
Tabla 5-2. Variables de mercado .....	33
Tabla 5-3. Características de la tubería de poliéster reforzada con poliéster reforzado con fibra de vidrio.....	34
Tabla 5-4. Características de la tubería de acero.....	35
Tabla 6-1. Variables para el cálculo de la potencia .....	37
Tabla 6-2. Variables de mercado .....	38
Tabla 6-3 Diámetro y longitud tubería de acero.....	39
Tabla 6-4 Velocidades medias de fluido para tubería de acero .....	40
Tabla 6-5 Número de Reynolds tubería de acero.....	41
Tabla 6-6 Coeficiente de Fricción tubería de acero .....	42
Tabla 6-7 Pérdidas friccionales tubería de acero .....	42
Tabla 6-8. Resumen pérdidas energéticas con tuberías de acero.....	42
Tabla 6-9 Diámetro y longitud tubería de fibra de vidrio .....	43
Tabla 6-10 Velocidades medias de fluido para tuberías de fibra de vidrio .....	44
Tabla 6-11 Número de Reynolds tubería de fibra de vidrio .....	44
Tabla 6-12 Coeficiente de fricción tubería de fibra de vidrio .....	45
Tabla 6-13 Pérdidas friccionales tubería de fibra de vidrio .....	45
Tabla 6-14. Resumen pérdidas energéticas en tuberías de poliéster reforzado con poliéster reforzado con fibra de vidrio .....	46
Tabla 6-15. Sensibilidad valor presente de pérdidas energéticas en tuberías de acero .	47
Tabla 6-16. Sensibilidad valor presente de pérdidas energéticas en tuberías de poliéster reforzadas con poliéster reforzado con fibra de vidrio .....	48
Tabla 7-1. Resumen resultados tubería de acero.....	52
Tabla 7-2. Resumen resultados tubería de acero.....	53

## Lista de Símbolos y abreviaturas

### Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI
$A$	Área	$m^2$
$D$	Diámetro	m
$E_{bruta}$	Energía Bruta	Ws
$f$	Factor de fricción de Darcy	adimensional
$g$	Aceleración de la gravedad	$m/seg^2$
$h_{bruto}$	Salto bruto	m
$h_{neto}$	Salto neto	m
$L$	Longitud	m
$mca$	Metros columna de agua	mca
$P_{bruta}$	Potencia bruta	$W$
$Q$	Caudal	$m^3/seg$
$Re$	Número de Reynolds	adimensional
$u$	Viscosidad Cinemática	$m^2/seg$
$V$	Velocidad	$m/seg$

### Abreviaturas

Abreviatura	Término
CREG	Comisión de Regulación de Energía y Gas
GRP	Glass Reinforced Pipe
PCH	Pequeña Central Hidroeléctrica
UPME	Unidad de Planeación Minero Energética



# Introducción

El presente trabajo tiene como objetivo hacer una valoración económica de las pérdidas energéticas de una pequeña central hidroeléctrica genérica. Las pequeñas centrales hidroeléctricas justifican su inversión por medio de la venta y comercialización de su energía generada.

En Colombia, se consideran pequeñas centrales hidroeléctricas a aquellas cuya capacidad instalada sea inferior a 20 MW (CREG, 1996). Estas a su vez dependiendo del tamaño pueden participar o no en el mercado eléctrico mayorista para vender su energía. Si la pequeña central hidroeléctrica tiene una capacidad instalada superior a 10 MW puede participar en el despacho central del mercado eléctrico mayorista, en caso contrario debe vender directamente su energía a terceros que por regulación este permitido.

En el primer capítulo se hace una breve descripción de la estructura y el funcionamiento del mercado eléctrico colombiano, mencionando los agentes reguladores y los participantes del mercado. En este capítulo se hace también una caracterización de los generadores que participan en el mercado eléctrico colombiano según el tipo de fuente de la energía, con especial énfasis en la generación de electricidad mediante pequeñas centrales hidroeléctricas. En este último punto se amplía el concepto de pequeña central hidroeléctrica y se mencionan los componentes principales de este tipo de aprovechamientos eléctricos.

La generación de energía de las pequeñas centrales hidroeléctricas depende principalmente de las condiciones hidrológicas y geográficas de la central, que finalmente determinarán el flujo de agua y el salto para aprovechar la energía potencial y cinética del agua para su conversión en electricidad (Rodríguez & Torres, 2006).

Sin embargo factores como el material seleccionado para la tubería de conducción tienen un efecto importante en cuanto a la generación final de energía, ya que durante el proceso de conducción del agua por la tubería a presión se presentan pérdidas energéticas denominadas pérdidas de carga, que afectan la eficiencia total del proceso de generación.

En el capítulo 2 se explica el proceso de generación de energía de las pequeñas centrales hidroeléctricas así como la fundamentación teórica de las pérdidas energéticas en las tuberías de conducción a presión. En este capítulo se revisan los diferentes materiales utilizados para las tuberías de conducción, algunas de sus propiedades mecánicas (principalmente los coeficientes de rugosidad) y sus aplicaciones según las condiciones del proyecto. Los capítulos 3 y 4 hacen referencia a los objetivos que se desarrollan en este documento y la herramienta de modelado que se utilizó para el desarrollo de estos.

En los capítulos 5 y 6 se detalla la modelación para la estimación de la generación de energía y las pérdidas energéticas por fricción de una pequeña central hidroeléctrica genérica utilizada como caso de estudio. Se hacen los cálculos tanto para las tuberías de acero como tuberías en políéster reforzado con fibra de vidrio y se presentan los resultados

Finalmente se comparan los resultados obtenidos del valor de las pérdidas energéticas por fricción en las tuberías y se presentan las conclusiones.

# 1. Antecedentes

EL objetivo del estado colombiano en cuanto al servicio de electricidad según la ley 143 de 1994 consiste en “abastecer la demanda de electricidad de la comunidad bajo criterios económicos y de viabilidad financiera, asegurando su cubrimiento en un marco de uso racional y eficiente de los diferentes recursos energéticos del país...” (Secretaría Nacional del Senado, 1994)

En aras de cumplir dicho objetivo, el estado colombiano a través de su historia se ha encargado de definir las instituciones y la regulación que permita el adecuado funcionamiento de un mercado eléctrico nacional que garantice la prestación del servicio de energía en el corto plazo y permita el cubrimiento en el largo plazo.

La prestación del servicio de energía en Colombia es considerado un servicio público domiciliario y se encuentra reglamentado en el marco de la Ley 142, también llamada ley de servicios públicos domiciliarios. Esta ley introdujo el modelo de mercados de competencia para la prestación de servicios públicos domiciliarios, entre ellos el servicio de electricidad, sometidos a regulación, vigilancia y control por parte del estado. (Secretaría Nacional del Senado, 1994)

Bajo este nuevo modelo de competencia, el sector eléctrico en Colombia funciona bajo el esquema definido por la Ley 143 de 1994, la cuál establece el régimen para las actividades de generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional.

La participación institucional del estado en la prestación del servicio de electricidad se da en tres diferentes frentes: política energética, regulación, y vigilancia y control. Cada una de estas instancias son responsabilidad del Ministerio de Minas y Energía, la Comisión de

Regulación de Energía y Gas (CREG) y la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios respectivamente.

- **Política Energética:** Esta función está a cargo del Ministerio de Minas y Energía, el cual tiene adscrito la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). La UPME es una unidad administrativa encargada de establecer los requerimientos energéticos del país, elaborar el Plan Energético Nacional y el Plan de Expansión del sector eléctrico.
- **Regulación:** Esta función corresponde a la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). La CREG es una unidad eminentemente técnica que tiene como objeto “lograr que los servicios de energía eléctrica, gas natural, gas licuado de petróleo (GLP) y combustibles líquidos se presten al mayor número posible de personas, al menor costo posible para los usuarios y con una remuneración adecuada para las empresas que permita garantizar calidad, cobertura y expansión.” (CREG, 2016).

A su vez la CREG está integrada por el Ministro de Minas y Energía quien la preside, el Ministro de Hacienda y Crédito Público, el Director del Departamento Nacional de Planeación y cinco expertos en asuntos energéticos elegidos por el presidente de la república. (CREG - Comisión de Regulación de Energía y Gas)

- **Vigilancia y control:** Esta labor es realizada por la Superintendencia de Servicios Públicos domiciliarios.

En la figura 1-1 se resume la estructura institucional que compone al mercado eléctrico mayorista en Colombia.

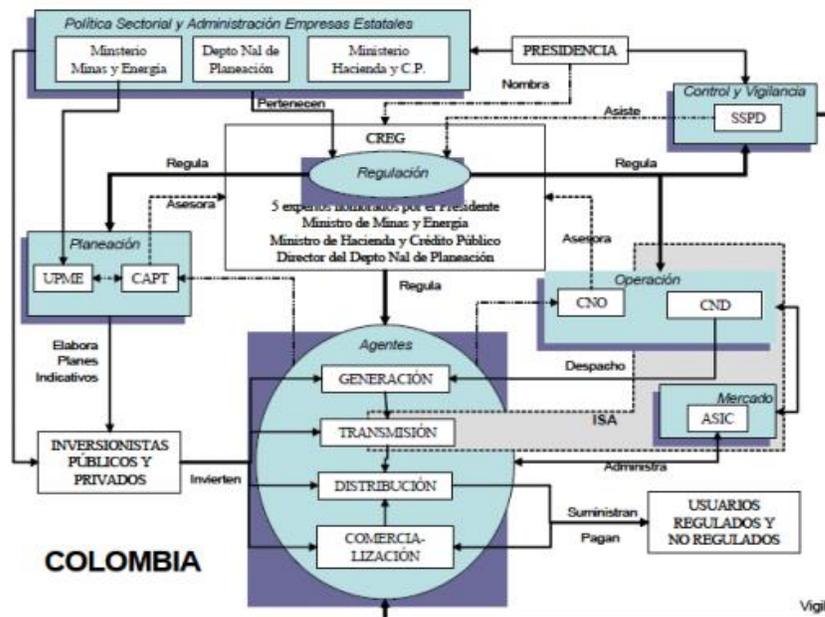
**Figura 1-1** Estructura institucional del Mercado Eléctrico Mayorista

Política	Ministerio de Minas y Energía	
Planeación	Unidad de Planeación Minero-Energética	
Regulación	Comisión de Regulación de Energía y Gas	
Control y Vigilancia	Superintendencia de Servicios Públicos	
Operación del Sistema	CND	
Administración del Mercado	ASIC	

Fuente: (CREG - Comisión de Regulación de Energía y Gas)

Adicional a las instituciones encargadas de las funciones de definición de política energética, regulación, vigilancia y control, existen otra serie de participantes que interactúan en el mercado eléctrico mayorista y tienen transacciones entre si para llevar a cabo las diferentes funciones propias de un mercado eléctrico. En la ilustración 1-2 se observan los diferentes participantes que intervienen en el mercado eléctrico colombiano.

**Figura 1-2** Estructura del sector eléctrico colombiano



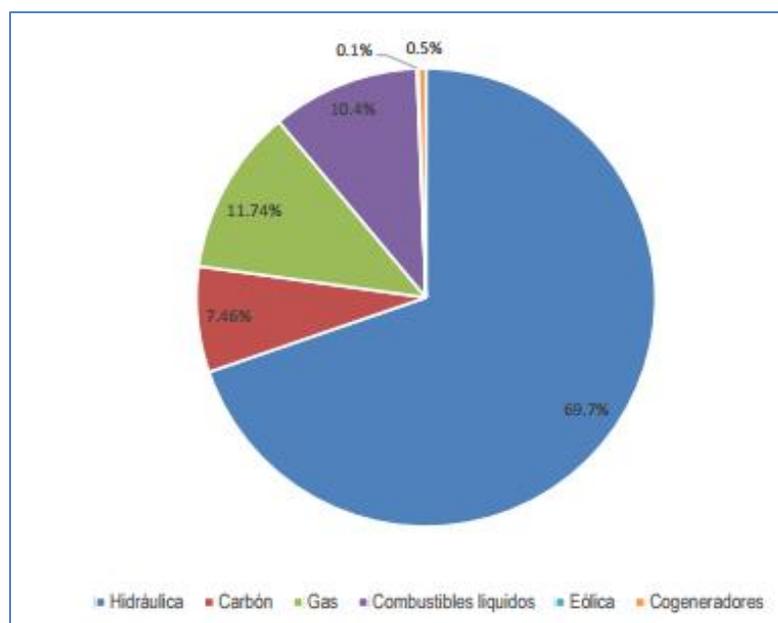
Fuente: (Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), 2004)

Entre los agentes que participan en el mercado se encuentran generadores, transportadores, distribuidores y comercializadores. Estos agentes participan en el mercado mayorista y en conjunto prestan el servicio de electricidad al usuario final. Según el marco regulatorio de la CREG, en Colombia las actividades de generación son actividades de libre competencia, mientras que la transmisión y la distribución y comercialización se tratan como monopolios regulados. (CREG, 2014)

Para el año 2014, la capacidad efectiva neta del Sistema Interconectado Nacional colombiano fue de 15.481 MW. Esta capacidad instalada del sistema está compuesta aproximadamente en un 69,7% por plantas de generación hidráulica (incluyendo plantas menores), un 29,6% por plantas térmicas y otras tecnologías representan apenas un 0,6% de participación. (UPME, 2015)

En la figura 1-3 se puede ver la participación de los diferentes agentes generadores en el total de generación de energía a finales del año 2014.

**Figura 1-3** Participación de los diferentes generadores en la generación de energía en Colombia



Fuente: (UPME, 2015)

La generación hidráulica es sin duda la fuente principal de generación en el mercado eléctrico colombiano. En este segmento participan generadores de diferentes tamaños, desde plantas que hacen pequeños aprovechamientos hidroeléctricos hasta grandes centrales hidroeléctricas.

Según la resolución 086 de 1996 de la CREG, se consideran plantas de generación menores aquellas que tienen una “capacidad efectiva menor a 20 MW que son operadas por empresas generadoras, productores marginales o productores independientes de electricidad y que comercializan esta energía con terceros...” (CREG, 1996)

Las plantas de generación menores pueden comercializar su energía dependiendo de su tamaño. (CREG, 1996)

- **Plantas menores de 10 MW:** Estas plantas no participan en el despacho central, por tanto no participan en el mercado mayorista. Para vender su energía generada pueden hacerlo mediante alguno de los siguientes esquemas:
  - Ventas a precio de bolsa a comercializadoras que atiendan el mercado regulado sin convocatoria pública
  - Ventas por mérito de precio en convocatorias públicas de empresas comercializadores que atiendan el mercado regulado
  - Ventas a precios pactados libremente hacia usuarios no regulados, generadores o comercializadores que destinen dicha energía a la atención exclusiva de usuarios no regulados.
  
- **Plantas entre 10MW y 20MW:** Estas plantas pueden tomar la decisión de participar en el despacho central participando en el mercado mayorista o no participar en el mercado mayorista y vender su energía bajo las mismas condiciones de las plantas menores a 10MW.

Es preciso mencionar, que la principal fuente de ingresos de las pequeñas centrales hidroeléctricas está determinada por la comercialización de su energía, ya sea a través de la participación en el mercado mayorista o fuera de este.

Las pequeñas centrales hidroeléctricas basan su operación en el aprovechamiento del agua para la generación de electricidad, la cual depende de una combinación de salto (energía potencial) y flujo (energía cinética) (Gatte & Kadhim, 2012).

Las pequeñas centrales hidroeléctricas en general son de tipo filo de agua, es decir que no cuentan con embalses para almacenar el agua, sino que el caudal del agua es tomado directamente del afluente hídrico. Su impacto ambiental por tanto es mínimo comparado con proyectos que utilizan presas para almacenar agua. (Hurtado, 2004)

Para el aprovechamiento de esta energía, las pequeñas centrales hidroeléctricas requieren una infraestructura constituida principalmente por los elementos o partes que se mencionan a continuación. (INEA, 1997)

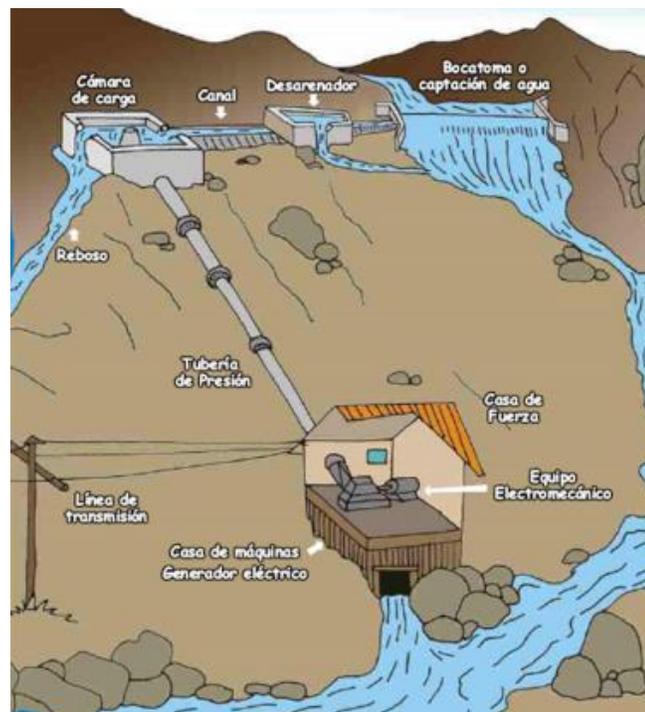
- Obra de toma o bocatoma
- Conducción
- Cámara o tanque de presión
- Desarenador
- Compuertas
- Rejillas (mallas)
- **Tubería de presión**
- Salto
- Válvula principal
- Turbina
- Transmisión turbina – generador
- Generador
- Tablero de control
- Transformador
- Líneas de transmisión
- Redes de distribución

Adicional a estos elementos, deben considerarse cierta información básica para el diseño de las pequeñas centrales, principalmente en temas de estudios hidrológicos de las

cuencas, topografía del sitio y estudios de geología y geotecnia, ya que estas variables son determinantes no solo en los equipos a utilizar para hacer el aprovechamiento eléctrico, sino también en la construcción de la obra civil necesaria para tal propósito. (INEA, 1997)

La ilustración 1-4 muestra los componentes más comunes que pueden identificarse en una pequeña central hidroeléctrica.

**Figura 1-4** Principales elementos de una pequeña central hidroeléctrica



Fuente: (UCA, 2011)

Actualmente se tiene registro de 108 pequeñas centrales en Colombia (capacidad inferior a 20MW) que en conjunto aportan una capacidad instalada de 753,89 MW. De estas pequeñas centrales, 98 no son despachadas centralmente, lo que equivale a 620,72 MW de potencia, es decir que aproximadamente el 82% de la capacidad instalada de pequeñas centrales no participa en el mercado mayorista. (XM, 2016)

## 1.1 Planteamiento y justificación del problema

Las pequeñas centrales hidroeléctricas buscan aprovechar de la forma más eficiente la energía potencial de un aprovechamiento hidráulico, a través del diseño de unas instalaciones óptimas que permitan su máxima utilización y la mayor generación de energía eléctrica. (Rodríguez & Torres, 2006)

Las pequeñas centrales hidroeléctricas utilizan recursos hidráulicos para generar electricidad por medio de uno o varios grupos de turbinas. Sus instalaciones están constituidas por obras civiles y equipos que permiten hacer el aprovechamiento de la energía potencial y cinética del agua. (Rodríguez & Torres, 2006)

El objeto de estudio del presente trabajo se centrará en la relevancia de la tubería utilizada para la conducción del agua. La tubería de presión tiene como función principal conducir el caudal del agua desde la central hasta la casa de máquinas, específicamente a las turbinas (Mora & Hurtado, 2004). En el proceso de generación, las tuberías de presión son las encargadas de conducir el agua desde el punto donde se tiene la energía potencial de este recurso hasta las turbinas ubicadas en la casa de máquina donde se transforma en energía eléctrica. (Suescún Monsalve)

En este proceso de conducción, la relación entre las propiedades físicas del agua y el material utilizado en la construcción de la tubería tienen una incidencia en la eficiencia del proceso. Por tanto, deben tenerse consideraciones especiales en cuanto a los materiales de la tubería, los diámetros y la presión. (Rodríguez & Torres, 2006)

Durante el proceso de conducción a presión del agua a través de la tubería existen pérdidas de energía ocasionadas por la fricción generada entre el material de la pared interna de la tubería y el agua que fluye a través de ella. (Rodríguez & Torres, 2006)

Estas pérdidas de energía por fricción consisten en una disipación de la energía del flujo debido a resistencias que se generan por acción de la viscosidad de los materiales de la tubería y del agua (Mendez, 2007). El material seleccionado influirá de manera significativa según sus propiedades de rugosidad, siendo este un factor fundamental

relacionado directamente con las pérdidas energéticas durante la conducción a presión del agua.

En este trabajo se evaluará el valor económico de las pérdidas energéticas para un proyecto genérico que se utilizara como modelo de estudio, basado en características de un proyecto real cuyo nombre no será revelado por temas de confidencialidad.

Con base en las características del modelo base, se estimará el valor económico de las pérdidas energéticas bajo ciertos supuestos que se explicarán en el capítulo del diseño de la herramienta de modelado, y se realizarán sensibilidades frente a algunas variables críticas del modelo.

El objetivo es tener una estimación del valor económico de las pérdidas y su significancia frente al valor de la producción energética de la pequeña central hidroeléctrica.

En este capítulo se revisó el esquema general de funcionamiento del sistema eléctrico colombiano y cómo está compuesta la generación de energía en el país, evidenciando la representativa participación de la generación hidráulica en su mezcla energética. Las pequeñas centrales hidroeléctricas hacen parte de esta parte de la mezcla y obtienen sus ingresos principalmente por la venta de la energía que generan a partir de pequeños aprovechamientos hidráulicos.

Se resalta la importancia de la optimización de las componentes de las pequeñas centrales hidroeléctricas, principalmente la selección de la tubería de presión, ya que esta tiene relación directa con las pérdidas que se producen durante la conducción del agua hasta las turbinas de generación.

En el siguiente capítulo se estudiarán los fundamentos teóricos que permiten estimar las pérdidas de energía que se presentan en las tuberías de conducción ocasionados por la fricción entre el agua y el material de la pared interna de la tubería.



## 2. Marco Teórico

Las tuberías de conducción o tuberías de presión son conductos cerrados encargados de transportar el agua a presión hasta la turbina, estas se encuentran unidas en su extremo superior a la presa o cámara de carga, la cual alimenta la cantidad de agua necesaria para evitar las fluctuaciones de carga en el sistema. (Ardüser & Karcheter, 2009)

La energía generada por pequeñas centrales hidroeléctricas está determinada principalmente por el aprovechamiento de la energía potencial del agua que se encuentra a determinado nivel de altura en relación con el cuarto de máquinas y las turbinas, esta altura es básicamente la diferencia entre el nivel del tanque de carga y el nivel del eje de las turbinas. La energía cinética se genera al liberar el cuerpo de agua a través de las tuberías de presión y dejarlo correr hasta las turbinas. (Ardüser & Karcheter, 2009)

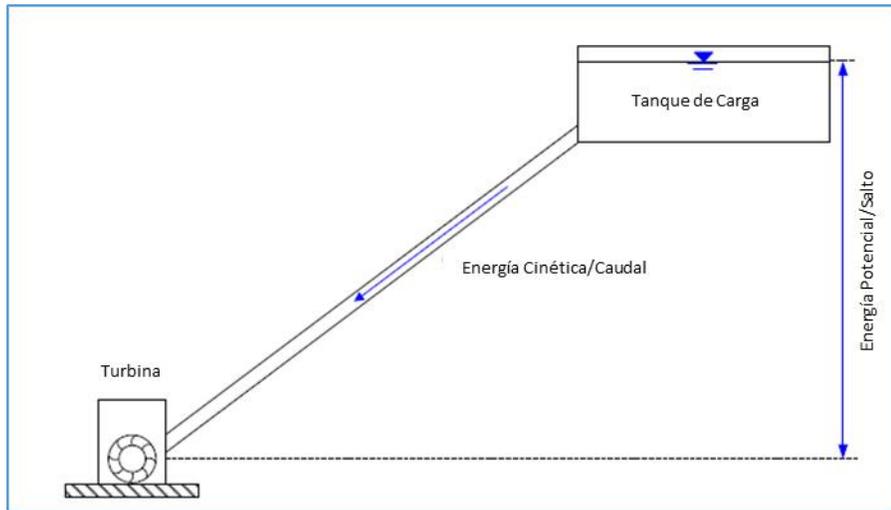
Los principales factores requeridos para la generación de energía en centrales hidroeléctricas son entonces:

$Q = \text{Caudal [m}^3/\text{seg]}$

$h = \text{Salto Bruto [m]}$

En la ilustración 2-1 se puede observar el esquema de aprovechamiento de centrales hidroeléctricas para la generación de energía.

**Figura 2-1** Aprovechamiento de la energía hidroeléctrica en pequeñas centrales



Fuente: (Ardüser & Karcheter, 2009)

La energía generada está determinada por la masa del fluido  $M$ , la aceleración de la gravedad  $g$  y la diferencia de nivel o salto bruto  $h_{bruto}$ . De esta manera puede calcularse la generación bruta de energía mediante la ecuación 2.1:

$$E_{bruta} = M * g * h_{bruto} [Ws] \quad (\text{Ecuación 2-1})$$

La masa del agua es función del volumen  $V$  y de la densidad  $\rho$ . Sustituyendo esto en la anterior ecuación tenemos la siguiente fórmula para el cálculo de la generación bruta de energía.

$$E_{bruta} = V * \rho * g * h_{bruto} [Ws] \quad (\text{Ecuación 2-2})$$

Cómo la cantidad de agua que llega a las turbinas es medida en unidades de volumen por tiempo, es decir por el caudal  $Q$ , y la generación de energía por unidad de tiempo es equivalente a la capacidad o potencia en Watts, podemos reescribir la anterior fórmula de la siguiente manera:

$$P_{bruta} = Q * \rho * g * h_{bruto} [W] \quad (\text{Ecuación 2-3})$$

Asumiendo que la densidad del agua en condiciones ambientales normales es aproximadamente de  $1000 \text{ kg/m}^3$ , podemos reescribir la ecuación anterior en unidades de potencia [Kw].

$$P_{bruta} = Q * g * h_{bruto} \text{ [KW]} \quad (\text{Ecuación 2-4})$$

Esta ecuación permite calcular la potencia de la pequeña central hidroeléctrica, sin embargo en la realidad la potencia y la generación de energía son menores debido a las pérdidas de carga que se generan en el proceso, tanto en la tubería de conducción como en las turbinas. Algunos autores agregan un coeficiente de eficiencia  $\eta$  en la ecuación que estiman aproximadamente entre un 0.5 y 0.7 con el fin de tener una mejor aproximación a la potencia y generación netas de la central (Ardüser & Karcheter, 2009). Incluyendo este factor tenemos la siguiente ecuación:

$$P_{Neta} = \eta * Q * g * h_{neto} \text{ [KW]} \quad (\text{Ecuación 2-5})$$

La selección de las tuberías de conducción en la construcción de la central hidroeléctrica tiene entonces una relevancia significativa ya que en el proceso de conducción se generan las mayores pérdidas energéticas del proceso. Se debe tener especial cuidado en el diseño de las tuberías analizando detalladamente el efecto de las especificaciones de la tubería y la relación entre salto bruto y salto neto ( $h_{bruto}/h_{neto}$ ) como medida de eficiencia.

A mayores velocidades del agua se generan mayores pérdidas por fricción, y como la velocidad del agua es función del diametro de la tubería, se debe optimizar la selección adecuada del diametro bajo restricciones de costo/beneficio de la tubería. La relación entre el caudal y el diametro de la tubería viene determinada por la siguiente ecuación (Ardüser & Karcheter, 2009):

$$Q = A * V = \frac{D^2}{4} * \pi * V \left[ \frac{m^3}{seg} \right] \quad (\text{Ecuación 2-6})$$

Donde,

Q = Caudal [m<sup>3</sup>/seg]

A = Área de la tubería [m<sup>2</sup>]

V = Velocidad del fluido [m/seg]

D = Diametro de la tubería [m]

Como la rugosidad del material tiene influencia sobre la conducción del agua a lo largo de toda la longitud de la tubería, las pérdidas energéticas por fricción forman la mayor parte de las pérdidas en la generación de pequeñas centrales hidroeléctricas. (Ardüser & Karcheter, 2009)

La rugosidad de la tubería esta determinada por el tipo de material que se utilice para su construcción, a continuación se presenta un cuadro con algunos de los materiales utilizados para las tuberías de conducción:

**Tabla 2-1.** Tipos de tubería para pequeñas centrales hidroeléctricas

	<b>Tubos de acero</b>	<b>Tubos de hierro dúctil</b>	<b>Tubos de poliéster reforzado con fibra de vidrio (tubos GRP)</b>	<b>Tubos de madera</b>	<b>Tubos de plástico (tubos PE)</b>
<b>Sitio de uso</b>	Los tubos de acero son los más comunes, y se utilizan para todas las presiones de agua, pero sobre todo para altas presiones de agua.	Los tubos de hierro dúctiles a menudo son una alternativa para los tubos de acero	Los tubos de poliéster reforzado con fibra de vidrio pueden ser una alternativa para los tubos de acero, y se utilizan para presiones de hasta 250 mca.	Los tubos de madera se utilizan para diámetros grandes y presiones de agua de hasta aprox. 60 mca.	Se utilizan para pequeñas dimensiones en instalaciones con baja cantidad de agua

<p><b>Fabricación</b></p>	<p>Los tubos de acero se entregan en el punto de partida en todas las longitudes, pero a menudo se entregan de 6 o 12 m. Como alternativa para la soldadura de los tubos de las instalaciones, en algunos casos se utilizan acoples extensibles o no extensibles. Se realizan con cajas expansibles y bloques de anclaje, para eliminar los movimientos axiales debidos a variaciones de temperatura y presión. Los tubos enterrados se suelen adaptar con medios de inspección a intervalos regulares a lo largo del tubo.</p>	<p>Los tubos se proveen en clases de presión estándar y longitudes estándar, que se acoplan mediante acoples en manguito extensibles. Las longitudes estándar son de 6 y 7 m, según el proveedor. Debido a los acoples extensibles, las tuberías al aire libre requieren cimientos firmes en cada longitud de tubo.</p>	<p>Se proveen en longitudes y clases de presión estándar, que se acoplan mediante acoples en manguito extensibles. Las longitudes estándar son de 6 y 21 m, respectivamente, según el proveedor. Los tubos de poliéster reforzado con fibra de vidrio se deben entregar con seguridad de no contener quebraduras. Debido a los acoples extensibles, las tuberías al aire libre requieren cimientos firmes en cada longitud de tubo.</p>	<p>Los tubos de madera aguantan escasa presión, antes de colapsar. En consecuencia, se debe elegir el trazado de los tubos y el órgano de ingreso de aire de manera que no se produzcan presiones en alguna parte del trazado.</p>	<p>Se proveen en rollos para los diámetros más pequeños, o como longitudes fijas que se sueldan en la instalación. Los tubos se proveen en clases estándar de presión. Los tubos de plástico se deben entregar con seguridad de no contener quebraduras.</p>
<p><b>Cimientos</b></p>	<p>Al aire libre con cimientos y enterrados en trincheras. Si las condiciones son las correctas, tienen menor costo los tubos enterrados. Se pueden elegir distancias entre los cimientos de hasta 12 m, si las condiciones lo permiten.</p>	<p>Al aire libre, sobre cimientos y enterrado en trinchera. A menudo se utilizan como tubos enterrados. Distancia entre cimientos para tubos al aire libre de 6 o 7 m, según la longitud de los tubos.</p>	<p>Al aire libre, sobre cimientos y enterrado. Si las condiciones son las correctas, tienen menor costo los tubos enterrados. Distancia entre cimientos para tubos al aire libre de 6 o 9 m, según la longitud de los tubos.</p>	<p>Los tubos de madera se colocan en forma continua y al aire libre sobre cimientos. Los tubos de madera requieren cimientos relativamente  cercanos, con distancias de 3-4 m. La distancia entre los cimientos se calcula en cada caso.</p>	<p>Los tubos de plástico son más adecuados para ser colocados en trinchera.</p>

<b>Mantenimiento</b>	Todos los tipos de tubos no deben requerir mantenimiento, en principio, durante los primeros 20 a 30 años de operación.			
	Requieren arenado y pintura interior y exterior. En los tubos enterrados se requiere tratamiento anticorrosivo adicional exterior, p.ej., tratamiento con polietileno o similares.	Los tubos de hierro se suelen reemplazar cuando están listos para el tratamiento de mantenimiento.	Los acoples y cimientos requieren cierto mantenimiento, según el caso.	Los tubos de plástico se suelen reemplazar cuando están listos para el tratamiento de mantenimiento.

Fuente: (Norconsult AS/NVE, 2003)

Del cuadro anterior se puede observar que para los proyectos de pequeñas centrales hidroeléctricas las tuberías más apropiadas son las construidas en acero o en poliéster reforzado con fibra de vidrio, ya que estos dos materiales son los que presentan mayores condiciones de resistencia a la presión del agua generada por los caudales y el salto bruto de este tipo de aprovechamientos energéticos.

Sin embargo, adicional a la resistencia de los materiales se deben evaluar los costos de los diferentes materiales y las propiedades mecánicas que tienen influencia en la eficiencia de la generación de energía de la planta, principalmente la rugosidad del material debido a su relación directa con las pérdidas derivadas de la fricción a lo largo de la tubería de conducción.

Como se ha mencionado en el presente documento, las pérdidas de energía por fricción en la conducción del agua en las tuberías son consideradas las principales pérdidas de energía en los procesos de generación de energía en pequeñas centrales hidroeléctricas. Es importante entonces incluir en los cálculos una estimación de estas pérdidas. Los principales factores que determinan las pérdidas por fricción son la longitud de la tubería, el diametro del tubo y la rugosidad de la pared del tubo (Norconsult AS/NVE, 2003)

Las pérdidas de carga o pérdidas friccionales en el proceso de conducción del agua en las tuberías se pueden estimar basados en las ecuaciones de Darcy-Weisbach y Colebrook-White. (Yoo & Singh, 2010) La primera ecuación estima la pérdida de carga

debida a la fricción en función del coeficiente de fricción, longitud y diámetro de la tubería y la velocidad del fluido. La ecuación viene expresada de la siguiente manera:

$$h_f = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g} \quad (\text{Ecuación 2-7})$$

$h_f$  = Pérdida de Carga debida a la fricción [m]

$f$  = factor de fricción de Darcy [adimensional]

$L$  = Longitud de la tubería [m]

$D$  = Diámetro de la tubería [m]

$V$  = Velocidad media del fluido [m/seg]

$g$  = aceleración de la gravedad [m/seg<sup>2</sup>]

Según la ecuación de Darcy-Weisbach se puede apreciar que a mayor longitud de la tubería, caudal y rugosidad del material, mayores serán las pérdidas energéticas de la planta. Entendiendo que la longitud de la tubería parte del diseño de la pequeña central hidroeléctrica y el caudal está determinado por las condiciones hidrológicas del proyecto, estas dos variables son independientes del material seleccionado para la construcción de las tuberías, por tanto la variable clave de estudio en este caso es la rugosidad del material de la tubería utilizada, ya que esta produce las principales variaciones en las pérdidas, entendiéndose que la longitud y el caudal se mantienen constantes.

Dependiendo de las características de velocidad del fluido dentro de la tubería este puede clasificarse de dos formas (European Small Hydropower Association, 2004):

- **Flujo laminar:** Flujo de agua a baja velocidad en el cual si se introduce una fina cantidad de agua coloreada al inicio del tubo, el agua coloreada aparecera como una fina línea recta a lo largo del tubo.
- **Flujo turbulento:** Cuando la velocidad del fluido supera el umbral del flujo laminar.

Se requiere entonces estimar una medida de rugosidad de la tubería y para ello la ecuación de Colebrook-White permite tener una estimación del factor de fricción de Darcy en función de la rugosidad relativa del material y de la característica del flujo (laminar o turbulento); su fórmula viene dada por la siguiente expresión:

Para flujo laminar se tiene la siguiente expresión:

$$f = \left( \frac{64}{Re} \right) \quad \text{(Ecuación 2-8)}$$

$f$  = factor de fricción

$Re$  = Número de Reynolds

Para flujos turbulentos se tiene la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left( \frac{k/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad \text{(Ecuación 2-9)}$$

$f$  = factor de fricción

$\frac{k}{D}$  = Rugosidad Relativa

$Re$  = Número de Reynolds

El factor de fricción depende de la rugosidad relativa del material y el coeficiente de Reynolds. La rugosidad relativa es función de un parámetro  $k$  [mm] de rugosidad absoluta y el diametro  $D$  [m] de la tubería. A continuación se presenta un cuadro con coeficientes de rugosidad absoluta para diferentes materiales de tuberías.

**Figura 2-2** Rugosidad absoluta por material de la tubería

<b>Material</b>	<b>k(mm)</b>
Concreto grueso	0,25
Concreto nuevo liso	0,025
Tubería pintada	0,0025
Plexiglás, vidrio, plástico	0,0025
Hierro fundido	0,15
Alcantarillado viejo	3,0
Acero revestido de mortero	0,1
Acero oxidado	0,5
Acero estructural o forjado	0,025
Tuberías viejas de agua	1,0

Fuente: (Ardüser & Karcheter, 2009)

Se observa que para las tuberías en poliéster reforzado con fibra de vidrio y acero que son las más apropiadas para la construcción de pequeñas centrales hidroeléctricas, el coeficiente de rugosidad absoluto es de 0,0025 mm y 0.1 respectivamente.

En esta característica del material, la tubería de poliéster reforzada con poliéster reforzado con fibra de vidrio tiene una ventaja en relación con el acero. Esta variable es clave en la determinación de las pérdidas energéticas de uno y otro material, más adelante se realizará una evaluación en un caso específico de la significancia de esta diferencia.

El coeficiente de Reynolds es una medida adimensional que relaciona la velocidad del fluido y el diametro de la tubería con la viscosidad del líquido que pasa a través de ella (European Small Hydropower Association, 2004). Esta relación se puede determinar a través de la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{D*V}{u} \quad \text{(Ecuación 2-10)}$$

$D = \text{Diametro tubería [m]}$

$V = \text{velocidad del fluido } \left[\frac{m}{s}\right]$

$u = \text{viscosidad cinemática} \left[\frac{m^2}{s}\right]$

La viscosidad cinemática del agua a una temperatura ambiente de 20°C es igual a  $1 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/seg. (European Small Hydropower Association, 2004)

Por experimentación, se puede determinar el tipo de flujo del agua según el número de Reynolds de la siguiente manera (European Small Hydropower Association, 2004)

- Flujo Laminar:  $Re < 2000$
- Flujo Turbulento:  $Re > 2000$

La utilización conjunta de estas ecuaciones permite estimar las pérdidas por fricción que se dan en la conducción del agua en las tuberías de presión en las pequeñas centrales hidroeléctricas. Luego de estimar la magnitud de las pérdidas por fricción se puede tener una aproximación de su valor económico y su impacto en los ingresos del proyecto.

Teniendo en cuenta que los ingresos de los proyectos de pequeñas centrales hidroeléctricas están determinados por su generación y venta de energía, es fundamental que desde la parte técnica y de ingeniería del proyecto se optimice el diseño y las especificaciones de la central, incluyendo el análisis integral de los costos y beneficios de las diferentes opciones para la tubería de presión a utilizar, de modo que se minimicen las pérdidas de energía y los costos y se maximice la generación y los ingresos del proyecto.

En este capítulo estudiamos las principales consideraciones que deben tenerse en cuanto a la selección del tipo de material para la construcción de las tuberías de conducción de pequeñas centrales hidroeléctricas de acuerdo a las características de diseño de la planta. Adicionalmente se describieron las ecuaciones necesarias para obtener una estimación de las pérdidas energéticas derivadas de la fricción del agua con la tubería.

En los siguientes capítulos se aplicarán estos conceptos en la evaluación de las pérdidas energéticas por fricción en la tubería de conducción de un proyecto genérico con unas características específicas que se mencionaran más adelante.

## 2.1 Revisión de la literatura

En el proceso de diseño de las pequeñas centrales hidroeléctricas existe literatura que menciona los criterios que deben tenerse en cuenta para la selección de las condiciones óptimas de tubería, tanto en relación con el diámetro como la selección del material adecuado de acuerdo a las condiciones de funcionamiento en la pequeña central.

La literatura en relación con las pérdidas energéticas en las tuberías de conducción por fricción es amplia y los estudios desarrollados hasta el día de hoy utilizados como guías para el diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas dedican un espacio en sus líneas para hacer mención al respecto.

Se encuentran trabajos aplicados como el de De Eugenio Posa (de Eugenio Posa, 2008) que hace referencia al diseño hidráulico y mecánico para el diseño de una central mini hidroeléctrica en España. En este estudio el autor tiene una sección dedicada a las tuberías forzadas o tuberías de presión como componente esencial entre las partes de una central. En el estudio se hacen comparaciones entre diferentes materiales utilizados para su construcción, entre ellos el acero y poliéster reforzado en fibra de vidrio. El autor presente también las ecuaciones utilizadas para estimar las pérdidas ocasionadas por la fricción.

En este mismo campo, se encuentran trabajos como el emitido por la Dirección Noruega de Agua y Energía (Norconsult AS/NVE, 2003) donde se presenta un instructivo para la planificación, construcción y operación de pequeñas centrales hidroeléctricas. En la guía se comparan diferentes materiales utilizados para la construcción de las tuberías y el efecto de cada uno en cuanto a pérdidas energéticas por fricción.

El foco de estudio en general de la literatura se centra en la estimación de la pérdida de salto en las pequeñas centrales hidroeléctricas, varios autores (ver (Ardüser & Karcheter, 2009); (Gatte & Kadhim, 2012) (Hurtado, 2004) (Mendez, 2007) (Yoo & Singh, 2010)) consideran en sus estudios la importancia del cálculo de las pérdidas energéticas en las tuberías de presión y la relevancia de la selección del material adecuado relacionado con las necesidades específicas de las pequeñas centrales hidroeléctricas.

La debilidad en la literatura está relacionada con la estimación del valor económico de las pérdidas energéticas ocasionadas por la fricción en las tuberías de conducción, en este punto particular se puede encontrar literatura que detalla claramente la metodología para la estimación de los ingresos de las pequeñas centrales en función de su generación de energía, sin embargo el análisis puntual del valor económico que representan las pérdidas por fricción no es muy explícito en la literatura.

Este documento tiene por objeto estudiar detalladamente el valor económico que significa para una pequeña central hidroeléctrica derivado de las pérdidas energéticas por fricción en las tuberías de conducción.

## **3. Objetivos**

En este capítulo se describe el objetivo general de este trabajo y los objetivos específicos a desarrollar para cumplir con el propósito general del estudio de trabajo final de Maestría en Ingeniería – Sistemas Energéticos.

### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

- Evaluar el valor económico de las pérdidas energéticas que se originan en las tuberías de conducción en pequeñas centrales hidroeléctricas.

### **3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Identificar las diferentes opciones de diseño y materiales de tuberías para la construcción de pequeñas centrales hidroeléctricas
- Analizar las características y propiedades físicas de los diferentes materiales de tuberías para pequeñas centrales hidroeléctricas
- Estimar las pérdidas de energía para cada tipo de tubería en un proyecto modelo
- Estimar el valor económico de las pérdidas energéticas para un horizonte de tiempo definido para el proyecto modelo.



## **4.Herramienta de Modelado**

### **4.1 Selección de la herramienta de modelado**

Para desarrollar los objetivos planteados anteriormente se realizó una modelación de las pérdidas energéticas de un proyecto genérico en una hoja de cálculo de Excel.

En la hoja de cálculo se modelan las ecuaciones de Darcy-Weisbach y Colebrook-White para estimar las pérdidas energéticas del proyecto, basado en el coeficiente de fricción del material, las características del flujo y las propiedades de diseño de la central (salto bruto, dimensiones de la tubería, eficiencia de las turbinas, entre otros).

Estas variables permiten modelar el cálculo de la potencia instalada de la central, tanto la potencia bruta (sin considerar las pérdidas energéticas) como la potencia neta luego de calcular las pérdidas energéticas por fricción en las tuberías.

Una vez estimada la potencia media instalada, se estima la generación de energía bajo el supuesto de una producción tiempo completo durante el año con el caudal de diseño. Con base en la generación media anual de energía, se estima el valor de la energía para tener una referencia de la anualidad por venta de energía de la pequeña central.

Luego de estimar las ventas medias por energía anual, se calcula el valor presente de dicha anualidad para el periodo de evaluación del proyecto. Igualmente se calculará el valor de las pérdidas energéticas anuales y se estimará el valor presente de dichas pérdidas para el mismo periodo de referencia. Esta evaluación se hará para los materiales de la tubería a evaluar en el proyecto genérico.

El propósito es estimar la significancia del valor de las pérdidas energéticas originadas por la fricción del material de la tubería y el valor de los ingresos del proyecto por la venta de energía a lo largo del ciclo de vida del proyecto.

En la siguiente sección del documento se explicaran las características principales del modelo y los supuestos utilizados para la modelación.

## **4.2 Descripción del modelo**

### **4.2.1 Descripción de la estructura del modelo**

El modelo elaborado para la estimación del valor económico de las pérdidas energéticas ocasionadas por la fricción en las tuberías de conducción en pequeñas centrales hidroeléctricas se desarrolló en una hoja de cálculo de Excel.

El modelo recoge la información de los supuestos de entrada relacionados con los siguientes aspectos:

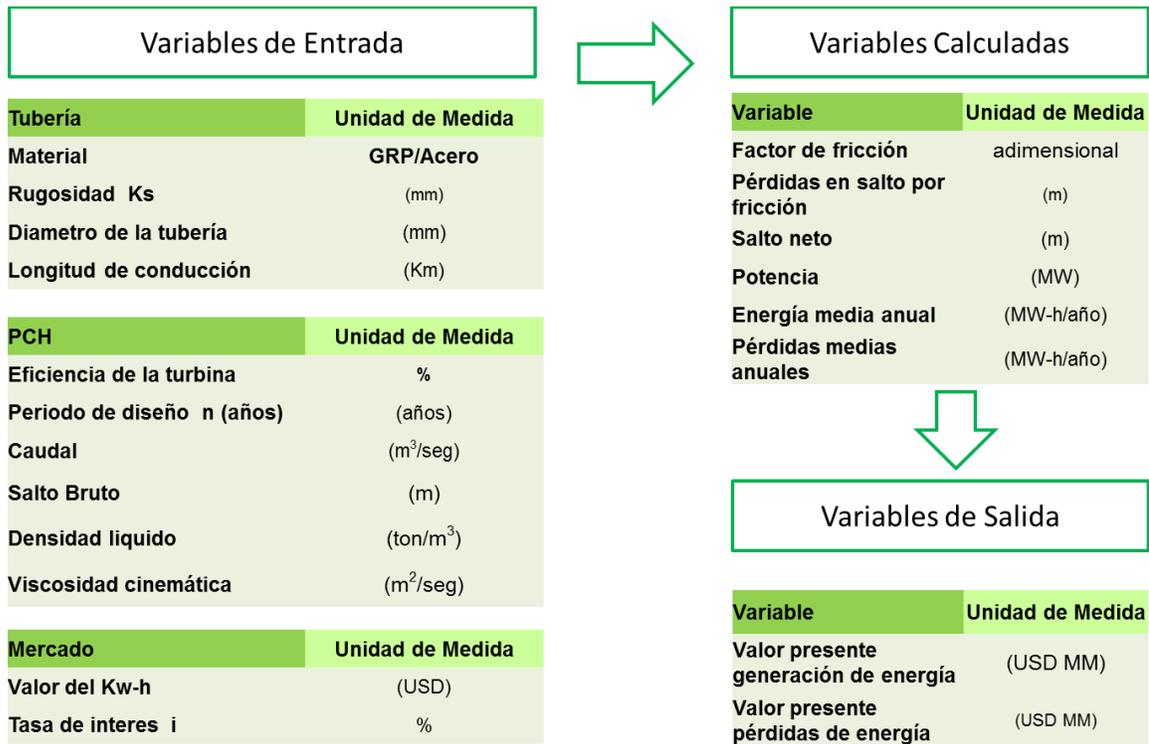
- Características de la tubería
- Parámetros de diseño de la central
- Variables de mercado

Adicionalmente se encuentran modeladas las ecuaciones de Darcy-Weisbach y Colebrook-White para estimar los el coeficiente de fricción de cada tipo de tubería y así poder estimar las pérdidas de salto ocasionadas por las fricción en la tubería de conducción. Una vez estimado el salto neto de diseño de la pequeña central hidroeléctrica luego de las pérdidas por fricción se calcula la potencia neta, la energía media generada por la central anualmente y las pérdidas de energía anuales.

Finalmente, se estima el valor presente tanto de la energía generada por la pequeña central durante el periodo de tiempo de evaluación, así como el valor presente de las pérdidas durante este mismo periodo.

En la ilustración 4-1 se puede observar esquemáticamente el diseño del modelo desarrollado:

**Figura 4-1** Diseño del modelo



Fuente: Elaboración propia

En la siguiente sección se explicará la implementación del modelo bajo las características específicas del proyecto genérico tomado como referencia para el ejercicio.

### 4.2.2 Descripción de la implementación del modelo

Como se mencionó anteriormente, el modelo planteado fue desarrollado en una hoja de cálculo de Excel con supuestos de variables determinísticas, el modelo no realiza ningún proceso de simulación pero cuenta con un análisis de sensibilidad de los resultados frente a algunas de las variables principales.

El modelo se encuentra parametrizado de tal manera que pueda ser replicado para las condiciones específicas de cualquier proyecto de pequeña central hidroeléctrica que utilice tuberías de conducción para el transporte del agua hasta las turbinas.

Sin embargo, para la implementación del modelo, este parte de unos supuestos de un proyecto genérico para el análisis de resultados. El proyecto genérico de referencia está basado en un proyecto real pero por cuestiones de privacidad no se mencionará su nombre.

Se asume que las variables de diseño de la pequeña central hidroeléctrica relacionadas con la eficiencia de la turbina, el periodo de diseño, caudal, salto bruto y la densidad y viscosidad del fluido son variables propias del proyecto y son independientes del material que se utilice para la construcción de la tubería de conducción.

Adicionalmente, las variables de mercado relacionadas con el precio de la energía y la tasa de interés para calcular el valor presente son a su vez independientes del material seleccionado en la tubería. A continuación se presentan las principales variables de entrada y supuestos para la modelación, iniciando por las características generales del proyecto y luego las características particulares de la tubería.

#### **4.2.2.1 Características de la pequeña central hidroeléctrica**

Las principales variables de entrada para la modelación relacionadas con el diseño de la central hidroeléctrica son las siguientes:

- Salto Bruto
- Periodo de diseño
- Caudal
- Eficiencia de la turbina
- Densidad del líquido
- Viscosidad cinemática del fluido.

#### **4.2.2.2 Variables de mercado**

Las principales variables de entrada para la modelación relacionadas con variables de mercado son las siguientes:

- Precio de la energía
- Tasa de interés

#### **4.2.2.3 Variables de la tubería**

Las principales variables de entrada para la modelación relacionadas con el diseño de la tubería son las siguientes:

- Material
- Rugosidad
- Diámetro
- Longitud

Estas últimas dos variables de diámetro y longitud hacen parte del diseño de la central y se asumen iguales independiente del material seleccionado para la tubería.

## 5. Validación del modelo

A continuación se presentan los valores de las variables de entrada del proyecto a modelar con las cuales se hará el análisis de resultados para la estimación del valor económico de las pérdidas energéticas.

**Tabla 5-1.** Variables de entrada diseño de la PCH.

PCH	Inputs
Eficiencia de la turbina/generador	90 %
Periodo de diseño	30 años
Caudal	2 m <sup>3</sup> /s
Salto Bruto	274,4 m
Densidad liquido	1 ton/m <sup>3</sup>
Viscosidad cinemática	1 x 10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s

Fuente: Elaboración propia.

La eficiencia de la turbina puede variar según las especificaciones y el tipo de turbina seleccionado, se tomará un valor de eficiencia del 90% para la modelación.

El periodo de diseño utilizado para la modelación está relacionado con el intervalo de tiempo con el cual se diseñan las tuberías y se espera que durante ese tiempo no requieran mantenimiento, este periodo puede estar entre 20 y 30 años (Norconsult AS/NVE, 2003), para la modelación se tomará un periodo de referencia de 30 años.

El salto bruto y el caudal son características intrínsecas del proyecto y las características de densidad y viscosidad son propias del agua a una temperatura de 20°C (European Small Hydropower Association, 2004).

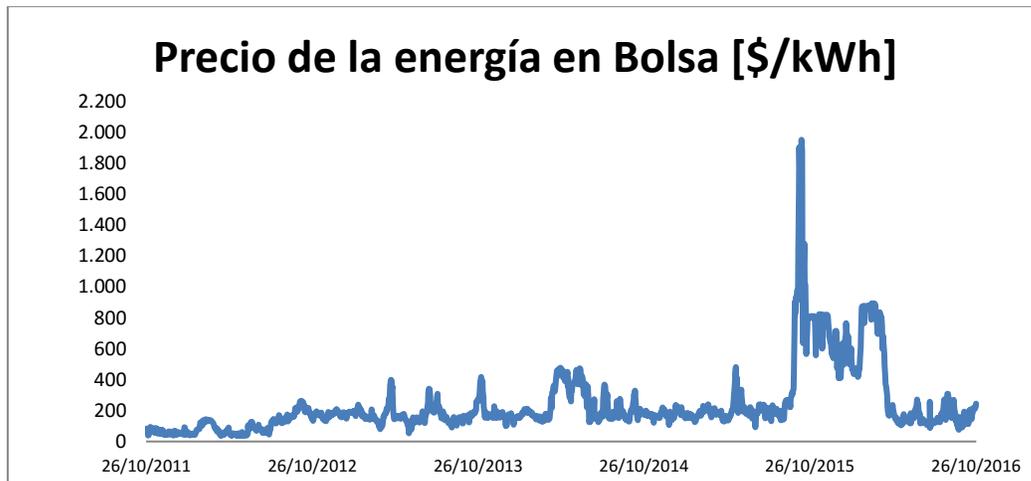
**Tabla 5-2.** Variables de mercado

Variables de Mercado	Inputs
Valor del KWh	0,08 USD/kWh
Tasa de interes i	12%

Fuente: Elaboración propia

El valor del KWh corresponde al promedio aritmético del precio en bolsa de la energía en Colombia de los últimos 5 años. En ilustración 5-1 se puede observar el comportamiento del precio de la energía en bolsa en el mercado eléctrico colombiano.

**Figura 5-1** Precio de la energía en Bolsa en Colombia



Fuente: Elaboración propia basado en datos de Derivex (Derivex, 2016)

Con base en el precio histórico de los últimos 5 años, tomando como referencia el periodo comprendido entre el 26 de octubre de 2011 y el 26 de octubre de 2016, el promedio aritmético del precio de bolsa para este periodo es aproximadamente de 236,01 \$/kWh. Asumiendo una tasa de cambio puntual para la fecha de elaboración del estudio de \$3.000 COP/USD, el precio de referencia para el modelo en USD es de 0,08 USD/KWh. Esta variable se sensibilizará para estudiar su impacto en los resultados.

La tasa de interés hace referencia al costo de oportunidad con el cuál se estimará el valor presente de la energía generado por el proyecto durante el periodo de evaluación; igualmente se utilizará para la estimación del valor presente de las pérdidas energéticas. Se parte de un valor del 12% y luego se sensibilizará para analizar los resultados bajo diferentes escenarios de tasa de descuento.

En relación con el material para la tubería del proyecto, dadas las condiciones específicas de salto bruto, se requiere utilizar tuberías que soporten altas presiones. Como se vio en la tabla 2.1, las tuberías de madera y de plástico se utilizan para proyectos con bajos caudales y presiones bajas, en el caso de la madera se puede utilizar para proyectos con salto bruto inferior a 50 metros. (Norconsult AS/NVE, 2003)

Se requiere entonces la utilización de tuberías que soporten mayores presiones, en este caso las tuberías de poliéster reforzadas con poliéster reforzado con fibra de vidrio y acero son las opciones más propicias para el desarrollo del proyecto. El análisis de pérdidas se realizará entonces evaluando estos dos materiales. A continuación, se presentan las características principales de cada uno.

**Tabla 5-3.** Características de la tubería de poliéster reforzada con poliéster reforzado con fibra de vidrio

Tubería	Inputs
Material	GRP
Rugosidad Ks	0,0025 mm
Diámetro de la tubería	1000 – 1100 mm
Longitud de conducción	3,52 Km

Fuente: Elaboración propia

Para la tubería en poliéster reforzado con poliéster reforzado con fibra de vidrio o GRP por sus siglas en inglés (*Glass Reinforced Pipe*), se tiene un factor de rugosidad de 0,0025 mm (Ver figura 2-2).

**Tabla 5-4.** Características de la tubería de acero

Tubería	Inputs
Material	Acero
Rugosidad Ks	0,100 mm
Diametro de la tubería	1000 – 1100 mm
Longitud de conducción	3,52 Km

Fuente: Elaboración propia

Para la tubería en acero se tiene un factor de rugosidad de 0,1000 mm (Ver ilustración 2-2).

El diámetro y la longitud son propios del diseño de la pequeña central hidroeléctrica y son independientes del material seleccionado.

En este capítulo se hizo una descripción general del funcionamiento del modelo utilizado para estimar el valor de las pérdidas económicas y las principales variables y supuestos que lo componen. En el siguiente capítulo se analizarán los resultados de la modelación bajo estos parámetros y bajo cierta sensibilidad frente a cambios en el precio de la energía y la tasa de interés.

## 6. Análisis de Resultados

En este capítulo se analizarán los resultados obtenidos en la modelación con base en los supuestos mencionados en el capítulo anterior. Para hacer adecuadamente el análisis se revisarán inicialmente los resultados estimados de potencia y generación bruta de energía del proyecto sin considerar las pérdidas energéticas por la fricción en la tubería de conducción.

Luego se estimarán las pérdidas energéticas para cada tipo de material seleccionado para la tubería de conducción y se realizará una valoración de la generación de energía neta del proyecto y el valor de las pérdidas para cada caso.

### 6.1 Valor económico de la generación de energía de la pequeña central hidroeléctrica

Se calcula inicialmente la potencia bruta en MW de la pequeña central hidroeléctrica con base en los parámetros de salto bruto, caudal, eficiencia de la turbina y densidad del fluido. El cálculo de la potencia instalada viene dado por la siguiente ecuación:

$$Potencia\ bruta\ [MW] = (g * h_{bruto} * Q * eficiencia\ turbina[\%])/1000$$

(Ecuación 6-1)

Donde,

$$g = \text{aceleración de la gravedad} \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

$$h_{bruto} = \text{salto bruto} [m]$$

$$Q = \text{Caudal} \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

Para el proyecto de estudio los valores de estas variables son los que se muestran a continuación:

**Tabla 6-1.** Variables para el cálculo de la potencia

Potencia (MW)	Inputs
Eficiencia de la turbina	90 %
Caudal	2 m <sup>3</sup> /s
Salto Bruto	274,4 m
Densidad liquido	1 ton/m <sup>3</sup>
Aceleración gravedad	9,8 m/ s <sup>2</sup>

Fuente: Elaboración propia

Haciendo los cálculos obtenemos que la potencia bruta de la pequeña central hidroeléctrica bajo estas condiciones es la siguiente:

$$\text{Potencia bruta} = 4,84 \text{ MW}$$

Para estimar la generación de energía anual, se asume que el caudal medio de diseño se mantiene el 100% durante los 365 días del año. De esta forma tenemos entonces que la generación de energía media al año de la central es la siguiente:

$$\text{Generación de energía anual} = 42.402,04 \text{ MWh/año}$$

Con un precio de venta del KWh de 0,08 USD/KWh, tenemos que el valor anual de la energía media es el siguiente:

$$\text{Valor energía anual} = 3,39 \text{ USD Millones/año}$$

Para estimar el valor presente de la generación de energía se utiliza la siguiente ecuación de valor presente dada una anualidad para un periodo de tiempo definido:

$$\text{Valor Presente} = \text{Valor anual} * \left[ \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] \quad (\text{Ecuación 6-2})$$

Donde,

$n$  = horizonte de tiempo

$i$  = tasa de interés

Para este ejercicio tenemos los siguientes valores para estos parámetros:

**Tabla 6-2.** Variables de mercado

Valor presente energía	Inputs
Periodo de diseño n (años)	30 años
Tasa de interés i	12%

Fuente: Elaboración propia.

Con estos valores tenemos el siguiente resultado para el valor presente de la generación de energía de la pequeña central durante el periodo de evaluación:

$$\text{Valor Presente Generación} = 27,32 \text{ USD Millones}$$

Este es el valor presente equivalente a la venta de la energía de esta pequeña central hidroeléctrica bajo las condiciones de generación y de mercado definidas para el ejercicio.

## 6.2 Valor económico de las pérdidas energéticas en la tubería de conducción de acero

En esta sección se estimarán las pérdidas energéticas por fricción calculando la pérdida en salto para la tubería en acero. Recordemos que el cálculo de la pérdida en salto viene dada por la ecuación de Darcy-Weisbach (ver ecuación 2-7)

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

$h_f$  = Pérdida de Carga debida a la fricción [m]

$f$  = factor de fricción de Darcy [adimensional]

$L$  = Longitud de la tubería [m]

$D$  = Diámetro de la tubería [m]

$V$  = Velocidad media del fluido [m/s]

$g$  = aceleración de la gravedad [m/s<sup>2</sup>]

El proyecto genérico que se está analizando tiene dos secciones de tubería con las siguientes características:

**Tabla 6-3** Diámetro y longitud tubería de acero

Tubería (Diámetro)	Longitud
1 m	1815,15 m
1,1 m	1707,95 m
Total Tubería	3523,1 m

Fuente: Elaboración propia

Para cada sección estimamos la velocidad media del fluido con base en la siguiente ecuación que relaciona el caudal con el área de la tubería:

$$V = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad \text{(Ecuación 6-3)}$$

Se obtienen los siguientes valores para la velocidad media del fluido en cada sección de la tubería:

**Tabla 6-4** Velocidades medias de fluido para tubería de acero

Tubería (Diámetro)	Velocidad media [m/s]
1 m	2,1 m/s
1,1 m	2,5 m/s

Fuente: Elaboración propia

Ahora, para la estimación de coeficiente de fricción de Darcy, se debe hacer una caracterización del tipo de flujo, es decir, determinar si el flujo es laminar o es turbulento, para luego utilizar la fórmula adecuada para la estimación del parámetro de fricción.

Se puede caracterizar el tipo de flujo en función del número de Reynolds (ver ecuación 2-10)

$$Re = \frac{D * V}{u}$$

$D =$  *Diámetro tubería* [m]

$V =$  *velocidad del fluido* [ $\frac{m}{s}$ ]

$u =$  *viscosidad cinemática* [ $\frac{m^2}{s}$ ]

La viscosidad cinemática del agua a una temperatura ambiente de 20°C es igual a  $1 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s. (European Small Hydropower Association, 2004)

Por experimentación, se puede determinar el tipo de flujo del agua según el número de Reynolds de la siguiente manera (European Small Hydropower Association, 2004)

- Flujo Laminar:  $Re < 2000$
- Flujo Turbulento:  $Re > 2000$

Se tienen los siguientes resultados para el número de Reynolds para cada sección de tuberías:

**Tabla 6-5** Número de Reynolds tubería de acero

Tubería (Diámetro)	Número de Reynolds
1 m	2.314.976
1,1 m	2.546.473

Fuente: Elaboración propia

Según los resultados, el flujo para ambas secciones de tubería es considerado turbulento, por tanto la ecuación de Colebrook-White que se debe utilizar para estimar el factor de fricción de Darcy viene dada por la siguiente expresión (ver ecuación 2-9):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left( \frac{k/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$$

$f$  = factor de fricción

$\frac{k}{D}$  = Rugosidad Relativa

$Re$  = Número de Reynolds

Para la tubería de acero tenemos un coeficiente  $k$  de rugosidad relativa de 0,100 mm. (ver ilustración 2-2)

La ecuación anterior no tiene solución lineal, por tanto se requiere de la implementación de un proceso iterativo para su solución, partiendo de un valor inicial del factor y resolviendo la ecuación para obtener un nuevo valor del coeficiente, este procedimiento se repite hasta obtener variaciones muy pequeñas (de Eugenio Posa, 2008). Con ayuda de la función buscar objetivo de Excel se obtienen los siguientes resultados para el coeficiente de fricción para cada sección de la tubería:

**Tabla 6-6** Coeficiente de Fricción tubería de acero

Tubería (Diámetro)	Coeficiente de Fricción
1 m	0,0125
1,1 m	0,0126

Fuente: Elaboración propia

Resolviendo la ecuación de Darcy-Weisbach para estimar las pérdidas energéticas por fricción tenemos los siguientes resultados para la tubería de acero:

**Tabla 6-7** Pérdidas friccionales tubería de acero

Tubería (Diámetro)	Pérdidas ( $h_f$ )
1 m	4,4 m
1,1 m	7,59 m
<b>Total Pérdidas</b>	<b>11,99 m</b>

Fuente: Elaboración propia

Se tiene entonces que para la tubería de acero existen unas pérdidas equivalentes a 11,99 metros de salto.

En el siguiente cuadro se resumen las pérdidas de potencia y generación de energía equivalentes a la pérdida en salto por las pérdidas friccionales de la tubería de acero.

**Tabla 6-8.** Resumen pérdidas energéticas con tuberías de acero

Pérdida en Salto (m)	Pérdidas en Potencia (MW)	Pérdidas en Generación anual (MWh/año)	Valor Pérdidas anuales (Mill US\$/año)	Valor presente de las pérdidas (Mill US\$)	% Pérdidas/ Generación
11,99	0,21	1.853,39	0,15	1,19	4,37%

Fuente: Elaboración propia

La estimación de las pérdidas y su valoración se realizó con el mismo procedimiento para la estimación la potencia y la generación brutas de energía del proyecto, basado en el equivalente de pérdida en salto por las pérdidas friccionales en la tubería de conducción. Es decir, se calcula la potencia y la generación equivalentes a un salto de 11,99 metros y este es equivalente a las pérdidas por fricción de la tubería.

El valor presente de las pérdidas para este proyecto si se utiliza tubería de acero es aproximadamente de \$1,19 USD millones, lo que representa un 4,37% del valor presente de la energía bruta del proyecto.

### 6.3 Valor económico de las pérdidas energéticas en la tubería de conducción de poliéster reforzado con fibra de vidrio

Igual como se estimaron las pérdidas en la sección anterior para la tubería en acero es el procedimiento para estimar las pérdidas para la tubería de poliéster reforzada con poliéster reforzado con fibra de vidrio. En esta sección se estimarán las pérdidas energéticas por fricción calculando la pérdida en salto para la tubería en poliéster reforzado con fibra de vidrio con base en la ecuación de Darcy-Weisbach (ver ecuación 2-7)

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

$h_f$  = Pérdida de Carga debida a la fricción [m]

$f$  = factor de fricción de Darcy [adimensional]

$L$  = Longitud de la tubería [m]

$D$  = Diámetro de la tubería [m]

$V$  = Velocidad media del fluido [m/s]

$g$  = aceleración de la gravedad [m/s<sup>2</sup>]

Las secciones de la tubería tienen las mismas características de la tubería de acero para la tubería de poliéster reforzada con poliéster reforzado con fibra de vidrio.

**Tabla 6-9** Diámetro y longitud tubería de fibra de vidrio

Tubería (Diámetro)	Longitud
1 m	1815,15 m
1,1 m	1707,95 m
<b>Total Tubería</b>	<b>3523,1 m</b>

Fuente: Elaboración propia

Para cada sección estimamos la velocidad media del fluido con base en la siguiente ecuación que relaciona el caudal con el área de la tubería (ver ecuación 6-3)

$$V = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

Se obtienen los siguientes valores para la velocidad media del fluido en cada sección de la tubería:

**Tabla 6-10** Velocidades medias de fluido para tuberías de fibra de vidrio

Tubería (Diámetro)	Velocidad media [m/s]
1 m	2,1 m/s
1,1 m	2,5 m/s

Fuente: Elaboración propia

La caracterización del tipo de flujo (laminar o turbulento) es independiente del material seleccionado, por tanto se tienen los mismos resultados para el número de Reynolds en cada sección de tubería:

**Tabla 6-11** Número de Reynolds tubería de fibra de vidrio

Tubería (Diámetro)	Número de Reynolds
1 m	2.314.976
1,1 m	2.546.473

Fuente: Elaboración propia

Según los resultados, el flujo para ambas secciones de tubería es considerado turbulento, por tanto la ecuación de Colebrook-White que se debe utilizar para estimar el factor de fricción de Darcy viene dada por la siguiente expresión:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left( \frac{k/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$$

$f$  = factor de fricción

$\frac{k}{D}$  = Rugosidad Relativa

$Re$  = Número de Reynolds

Para la tubería de poliéster reforzada con poliéster reforzado con fibra de vidrio tenemos un coeficiente  $k$  de rugosidad relativa de 0,0025 mm. (ver ilustración 2-2)

Se repite el procedimiento de cálculo iterativo con ayuda de la función buscar objetivo de Excel y se obtienen los siguientes resultados para el coeficiente de fricción para cada sección de la tubería:

**Tabla 6-12** Coeficiente de fricción tubería de fibra de vidrio

Tubería (Diámetro)	Coeficiente de Fricción
1 m	0,0102
1,1 m	0,0101

Fuente: Elaboración propia

Resolviendo la ecuación de Darcy-Weisbach para estimar las pérdidas energéticas por fricción tenemos los siguientes resultados para la tubería de acero:

**Tabla 6-13** Pérdidas friccionales tubería de fibra de vidrio

Tubería (Diámetro)	Pérdidas ( $h_f$ )
1 m	3,59 m
1,1 m	6,06 m
Total Pérdidas	9,64 m

Fuente: Elaboración propia

Se tiene entonces que para la tubería de poliéster reforzada con poliéster reforzado con fibra de vidrio existen unas pérdidas equivalentes a 9,64 metros de salto.

En el siguiente cuadro se resumen las pérdidas de potencia y generación de energía equivalentes a la pérdida en salto por las pérdidas friccionales de la tubería de acero.

**Tabla 6-14.** Resumen pérdidas energéticas en tuberías de poliéster reforzado con poliéster reforzado con fibra de vidrio

Pérdida en Salto (m)	Pérdidas en Potencia (MW)	Pérdidas en Generación anual (MWh/año)	Valor Pérdidas anuales (Mill US\$/año)	Valor presente de las pérdidas (Mill US\$)	% Pérdidas/ Generación
9,64	0,17	1.490,18	0,12	0,96	3,51%

La estimación de las pérdidas y su valoración se realizó con el mismo procedimiento para la estimación la potencia y la generación brutas de energía del proyecto, basado en el equivalente de pérdida en salto por las pérdidas friccionales en la tubería de conducción.

El valor presente de las pérdidas para este proyecto si se utiliza tubería de acero es aproximadamente de \$0,96 USD millones, lo que equivale a un 3,51% del valor presente de la energía bruta del proyecto.

## 6.4 Análisis de Sensibilidad

En esta sección se estudia el impacto en el valor presente de las pérdidas energéticas frente a variaciones en el precio de la energía y en la tasa de interés. No se consideran variaciones en las demás variables del modelo ya que estos son parámetros específicos del proyecto genérico utilizado para el análisis.

A continuación se presentan las variaciones en el valor presente de las pérdidas energéticas para diferentes escenarios de precio de energía (USD/KWh) y tasa de interés, tanto para tuberías en acero como en poliéster reforzado con fibra de vidrio.

### 6.4.1 Sensibilidad Tubería de Acero

El siguiente cuadro muestra las variaciones en el valor presente de las pérdidas energéticas ocasionadas por fricción en las tuberías de acero.

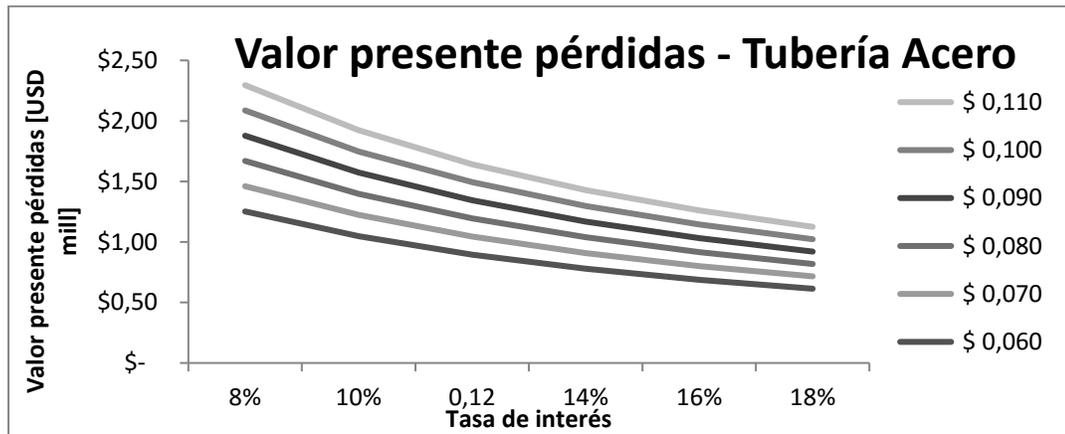
**Tabla 6-15.** Sensibilidad valor presente de pérdidas energéticas en tuberías de acero

		Tasa de interés					
		8%	10%	0,12	14%	16%	18%
Precio (USD/KWh)	\$ 0,060	\$ 1,25	\$ 1,05	\$ 0,90	\$ 0,78	\$ 0,69	\$ 0,61
	\$ 0,070	\$ 1,46	\$ 1,22	\$ 1,05	\$ 0,91	\$ 0,80	\$ 0,72
	\$ 0,080	\$ 1,67	\$ 1,40	\$ 1,19	\$ 1,04	\$ 0,92	\$ 0,82
	\$ 0,090	\$ 1,88	\$ 1,57	\$ 1,34	\$ 1,17	\$ 1,03	\$ 0,92
	\$ 0,100	\$ 2,09	\$ 1,75	\$ 1,49	\$ 1,30	\$ 1,14	\$ 1,02
	\$ 0,110	\$ 2,30	\$ 1,92	\$ 1,64	\$ 1,43	\$ 1,26	\$ 1,12

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente gráfica se muestra el comportamiento de las pérdidas frente a cambios en precios de energía y tasa de interés.

**Figura 6-1** Sensibilidad valor presente de pérdidas energéticas en tuberías de acero



Fuente: Elaboración propia

Del anterior cuadro y la gráfica se observa que a medida que aumenta el precio de energía en bolsa, el valor presente de las pérdidas energéticas es mayor. Con respecto a la tasa de interés, el efecto es contrario, entre mayor sea la tasa de descuento utilizada para calcular el valor presente de las pérdidas, menor es el valor absoluto en dinero.

### 6.4.2 Sensibilidad Tubería de poliéster reforzada con poliéster reforzado con fibra de vidrio

El siguiente cuadro muestra las variaciones en el valor presente de las pérdidas energéticas ocasionadas por fricción en las tuberías de acero.

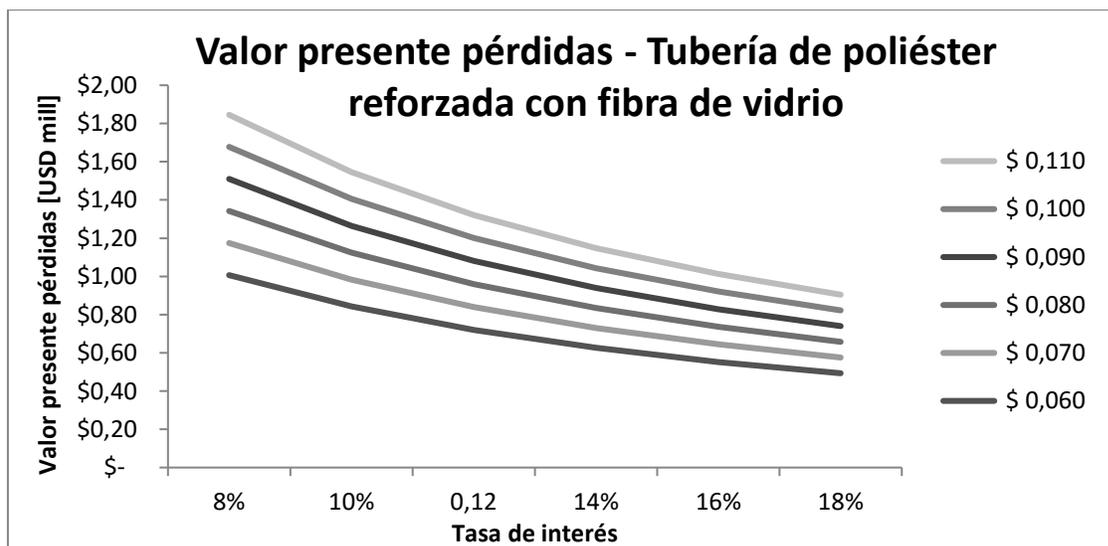
**Tabla 6-16.** Sensibilidad valor presente de pérdidas energéticas en tuberías de poliéster reforzadas con poliéster reforzado con fibra de vidrio

		Tasa de interés					
		8%	10%	0,12	14%	16%	18%
Precio (USD/KWh)	\$ 0,060	\$ 1,01	\$ 0,84	\$ 0,72	\$ 0,63	\$ 0,55	\$ 0,49
	\$ 0,070	\$ 1,17	\$ 0,98	\$ 0,84	\$ 0,73	\$ 0,64	\$ 0,58
	\$ 0,080	\$ 1,34	\$ 1,12	\$ 0,96	\$ 0,83	\$ 0,74	\$ 0,66
	\$ 0,090	\$ 1,51	\$ 1,26	\$ 1,08	\$ 0,94	\$ 0,83	\$ 0,74
	\$ 0,100	\$ 1,68	\$ 1,40	\$ 1,20	\$ 1,04	\$ 0,92	\$ 0,82
	\$ 0,110	\$ 1,85	\$ 1,55	\$ 1,32	\$ 1,15	\$ 1,01	\$ 0,90

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente gráfica se muestra el comportamiento de las pérdidas frente a cambios en precios de energía y tasa de interés.

**Figura 6-2** Sensibilidad valor presente de pérdidas energéticas en tuberías de poliéster reforzadas con poliéster reforzado con fibra de vidrio



Fuente: Elaboración propia

El efecto del precio y la tasa de interés es independiente del material de la tubería, a medida que el precio sea más alto mayor es el valor presente de las pérdidas.



# 7. Conclusiones y recomendaciones

## 7.1 Conclusiones

El diseño de una pequeña central hidroeléctrica implica una gran cantidad de consideraciones sobre diferentes variables que tienen influencia en los resultados finales de la operación y el buen funcionamiento de las mismas.

El objetivo básico de cualquier negocio debe estar enfocado en la generación de valor y en la optimización de la utilización de los recursos para alcanzarlo. En este punto se hace totalmente relevante la evaluación económica de este tipo de proyectos.

La evaluación económica de proyectos de pequeñas centrales hidroeléctricas busca determinar si la energía que se espera generar y comercializar en el mercado eléctrico compensa la inversión y el nivel de riesgo de los inversionistas que pretenden asignar sus recursos en este tipo de proyectos.

Siendo la generación de energía la variable determinante en los ingresos de las pequeñas centrales hidroeléctricas, se debe estudiar con especial cuidado cada una de las variables que afectan este resultado. Las principales variables estudiadas deben incluir tanto las condiciones hidrológicas de los proyectos, la eficiencia los equipos utilizados (entre ellos la tubería) y las condiciones macroeconómicas del mercado en general.

Cómo se estudió en el documento, las principales pérdidas de energía que ocurren en este tipo de proyectos están relacionadas con las pérdidas por fricción en las tuberías, por ende el objeto de estudio del presente trabajo se enfocó en la evaluación financiera de dichas pérdidas.

Es entonces fundamental analizar el tipo de material para la construcción de las pequeñas centrales hidroeléctricas, entre las cuales se encuentran diferentes opciones como las que se estudiaron en el Capítulo 2 (ver tabla 2-1). Sin embargo dadas las condiciones de presión y resistencia que requieren las tuberías para este tipo de proyectos, los materiales más propicios para su construcción en cuanto a sus propiedades físicas son el acero y los materiales compuestos como poliéster reforzado con fibra de vidrio reforzada (GRP).

A continuación se presenta un resumen de los resultados obtenidos para el proyecto prototipo que se utilizó como referencia de estudio en este trabajo.

Para la tubería de acero se tienen los siguientes resultados:

**Tabla 7-1.** Resumen resultados tubería de acero

	Salto (m)	Pérdidas en Potencia (MW)	Pérdidas en Generación anual (MWh/año)	Valor Pérdidas anuales (Mill US\$/año)	Valor presente de las pérdidas (Mill US\$)	% Pérdidas/Generación
<b>Generación Bruta</b>	274,40	4,84	42.402,04	3,39	27,32	
<b>Pérdidas Friccionales</b>	11,99	0,21	1.853,39	0,15	1,19	4,37%
<b>Generación Neta</b>	262,41	4,63	40.548,66	3,24	26,13	

Fuente: Elaboración propia

Para la tubería de acero tenemos que las pérdidas por fricción tienen un valor presente de \$1,19 millones de dólares aproximadamente, esto representa cerca de un 4,37% del valor presente de la generación bruta del proyecto.

**Tabla 7-2.** Resumen resultados tubería de acero

	Salto (m)	Pérdidas en Potencia (MW)	Pérdidas en Generación anual (MWh/año)	Valor Pérdidas anuales (Mill US\$/año)	Valor presente de las pérdidas (Mill US\$)	% Pérdidas/Generación
<b>Generación Bruta</b>	274,40	4,84	42.402,04	3,39	27,32	
<b>Pérdidas Friccionales</b>	9,64	0,17	1.490,18	0,12	0,96	3,51%
<b>Generación Neta</b>	264,76	4,67	40.911,87	3,27	26,36	

Fuente: Elaboración propia

Para la tubería de acero tenemos que las pérdidas por fricción tienen un valor presente de \$0,96 millones de dólares aproximadamente, esto representa cerca de un 3,51% del valor presente de la generación bruta del proyecto.

Comparando los resultados de ambas tuberías en cuanto a la valoración financiera de las pérdidas energéticas, se observa que las tuberías de poliéster reforzadas con poliéster reforzado con fibra de vidrio tienen menores pérdidas en relación con la generación bruta de energía de la pequeña central hidroeléctrica si se compara con las pérdidas generadas en las tuberías de acero. La diferencia porcentual en comparación con el valor de la energía bruta es del 0,86%. Esto parece tener un peso aparentemente bajo, pero esta pequeña diferencia puede cambiar las decisiones de inversión en un proyecto.

La principal justificación de este resultado está relacionada con el menor coeficiente de rugosidad absoluta del material, el cual es más bajo para la tubería de poliéster reforzada con poliéster reforzado con fibra de vidrio que para la tubería de acero.

En conclusión, las tuberías de poliéster reforzadas con poliéster reforzado con fibra de vidrio gracias a sus propiedades físicas y mecánicas pueden tener ventajas en términos de generación de energía en la aplicación en pequeñas centrales hidroeléctricas.

## 7.2 Recomendaciones

El impacto económico que pueden tener las pérdidas energéticas de acuerdo al material de la tubería de conducción, aunque aparentemente es bajo en términos porcentuales, puede cambiar la decisión de inversión en un proyecto. Es totalmente relevante el estudio del valor económico de las pérdidas energéticas para tomar la decisión adecuada en cuanto a la selección del material de la tubería con el objetivo de maximizar la rentabilidad obtenida por el inversionista en este tipo de proyectos.

Aunque no es del alcance del presente trabajo, la comparación de las pérdidas energéticas ocasionadas por la fricción en las tuberías de conducción entre los materiales de poliéster reforzado con fibra de vidrio y acero debe complementarse con un análisis económico más amplio que incluya los costos de inversión de cada tubería, los costos de transporte e instalación, el mantenimiento, la conservación de las propiedades físicas y mecánicas en el tiempo, y otras variables que puedan tener un impacto significativo en la inversión y gastos de administración y operación de las pequeñas centrales hidroeléctricas.

## Referencias

- Ardüser, C., & Karcheter, L. (2009). *Civil works for micro hydro power units*. Muttenz.
- Congreso de Colombia. (3 de Octubre de 2001). Ley 697 de 2001. Colombia.
- CREG - Comisión de Regulación de Energía y Gas. (s.f.). *Estructura del Mercado Mayorista*. Recuperado el Mayo de 2016, de [http://www.creg.gov.co/cxc/secciones/mercado\\_mayorista/estructura.htm](http://www.creg.gov.co/cxc/secciones/mercado_mayorista/estructura.htm)
- CREG. (15 de Octubre de 1996). Resolución 086 de 1996. Consultado en Octubre de 2016
- CREG. (Mayo de 2014). Marco Regulatorio Sector Eléctrico en Colombia. Obtenido de [http://www.creg.gov.co/phocadownload/presentaciones/marco\\_regulatorio\\_sector\\_energia.pdf](http://www.creg.gov.co/phocadownload/presentaciones/marco_regulatorio_sector_energia.pdf)
- CREG. (2016). *Comisión de Regulación de Energía y Gas*. Obtenido de <http://www.creg.gov.co/index.php/es/creg/quienes-somos/historia>
- de Eugenio Posa, J. M. (Junio de 2008). Diseño hidráulico y mecánico de la central minihidroeléctrica del embalse de Valmayor. Madrid, España.
- Derivex. (2016). *Derivex*. Recuperado el 30 de Octubre de 2016, de <http://www.derivex.com.co/NegociacionesdelDia/Paginas/InformaciondelMercado.aspx>
- European Small Hydropower Association. (2004). *Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant*. Bélgica.
- Gatte, M., & Kadhim, R. (2012). Hydro Power. En A. Ahmed, *Energy Conservation* (pág. 250). Hilla, Iraq: InTech.
- Hurtado, J. (2004). Guía para estudios de prefactibilidad de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas como parte de sistemas híbridos. Bogotá.
- INEA. (1997). Guía de diseño para Pequeñas Centrales Hidroeléctricas. Bogotá, Colombia.

- Mendez, M. V. (2007). *Tuberías a presión en los sistemas de abastecimiento de agua*. Caracas: Editorial Texto.
- Norconsult AS/NVE. (2003). *Instructivo para la planificación, construcción y operación de pequeñas centrales de energía*. OSLO: Imprenta de NVE.
- Rodriguez, M., & Torres, F. (2006). Dimensionamiento de una microcentral hidroeléctrica. Bucaramanga, Colombia.
- Secretaría Nacional del Senado. (11 de Julio de 1994). Ley 142 de 1994. Bogotá, Colombia.
- Secretería Nacional del Senado. (12 de Julio de 1994). Ley 143 de 1994. Bogotá, Colombia.
- Suescún Monsalve, I. (s.f.). <http://jaibana.udea.edu.co/grupos/centrales/>. Recuperado el Mayo de 2016, de <http://jaibana.udea.edu.co/grupos/centrales/files/capitulo%203.pdf>
- UCA. (2011). *Universidad Centro Americana José Simón Cañas*. Recuperado el Mayo de 2016, de [http://cef.uca.edu.sv/descargables/2011\\_12\\_cursoMAGMA/pequenas\\_centrales\\_hidroelectricas.pdf](http://cef.uca.edu.sv/descargables/2011_12_cursoMAGMA/pequenas_centrales_hidroelectricas.pdf)
- Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). (2004).
- UPME. (2015). Plan de Expansión de Referencia Generación - Transmisión 2015-2029.
- Wang, U. (Junio de 2009). *Greentech Media*. Recuperado el 2016, de <http://www.greentechmedia.com/articles/read/when-first-solar-wasnt-so-hot>
- XM. (2016). Recuperado el Mayo de 2016, de <http://paratec.xm.com.co/paratec/SitePages/generacion.aspx?q=lista>
- Yoo, D., & Singh, V. P. (2010). Explicit design of commercial pipes with secondary losses. *Journal of Hydro-environment Research*, 37-45.