

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ALTERNATIVAS DE MATERIALES DE TUBERÍAS FORZADAS PARA LA
PEQUEÑA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MANTARO**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR:

Juan Alvaro Delgado Mansilla

ASESOR:

Miluska Anthuannet Rosas Barturen

Lima, septiembre, 2023

Informe de Similitud

Yo, *Miluska Anthuannet Rosas Barturén*,

docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia

Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado

ALTERNATIVAS DE MATERIALES DE TUBERÍAS FORZADAS PARA LA


PEQUEÑA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MANTARO,

del autor *Juan Alvaro Delgado Mansilla*,

dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de **12%**. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el **04/19/2023**.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lima, 28 de septiembre del 2023

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: <u>ROSAS BARTURÉN, MILUSKA ANTHUANNET</u>	
DNI: 45420446	Firma: 
ORCID: 0000-0002-3717-0172	

Resumen

En la zona andina del Perú se viene incentivando la construcción de pequeñas centrales hidroeléctricas como medida ante la falta de redes de conexión eléctrica convencionales, aprovechando el gran potencial de generación energética de una región rica en recursos naturales renovables. A pesar del apoyo del gobierno para el financiamiento de este tipo de proyectos, la limitada información con la que se cuenta orientada a maximizar los beneficios de la inversión es actualmente un problema que acarrea la industria eléctrica nacional.

En esta investigación se busca identificar el material de construcción para tuberías forzadas en pequeñas centrales hidroeléctricas que optimice los procesos de construcción y producción de energía, mediante un enfoque económico. El caso de estudio propuesto para el análisis corresponde a la pequeña central hidroeléctrica Mantaro, en el departamento de Huancavelica.

La metodología expuesta a continuación se basa en la determinación del diseño óptimo de las tuberías forzadas para cada uno de los materiales propuestos (acero, refuerzo con fibra de vidrio y polietileno de alta densidad) y los costos relacionados a la construcción de las tuberías y energía producida en la planta.

Los resultados de la investigación sentarán un precedente sobre el desempeño de distintos materiales de tuberías forzadas en centrales hidroeléctricas de características similares, facilitando la toma de decisiones al momento de elegir una alternativa que permita el aprovechamiento de la central de manera eficaz y se traduzca en un mayor ahorro de capital.

Agradecimiento

A mi madre, mi mayor consejera y soporte emocional, que me apoyó en cada una de las desveladas y amanecidas durante todo este largo proceso. Mi motivación para continuar en los momentos más críticos. El ímpetu que necesitaba en tiempos de flaqueza mental y el combustible que, provisto en forma de soporte incondicional y amor desmedido, me permite seguir avanzando en la carrera hacia mis objetivos de vida.

A mi padre, mi principal inspiración para estudiar esta carrera. Ejemplo de superación personal y estandarte de lo que significar ser un profesional de primera. La marca que me he propuesto a superar desde el inicio.

A mi hermano por los consejos y el impulso necesario para que no me estanque en el camino. Mi punto de comparación, que me motiva a exigirme cada vez más y superarme constantemente.

Finalmente quiero agradecer a mis compañeros de carrera, por el tiempo compartido durante toda la etapa universitaria y las experiencias vividas en todos estos años que nos han permitido estrechar lazos. Además, agradecer a mi asesora Miluska, por la confianza brinda desde nuestra primera aproximación, la buena disposición y el entusiasmo de querer sacar adelante este trabajo de tesis.

Dedicatoria

A mi abuela Keka y tía Luz, que recordaré por siempre como un par de mujeres fuera de serie. Sabias, serenas, generosas, empáticas. Gracias por tanto amor.



Tabla de contenido

1	CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Introducción	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Justificación.....	2
2	CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	4
2.1	Panorama global.....	4
2.2	Relevancia de energía hidroeléctrica.....	5
2.3	Situación en el Perú.....	6
2.4	Centrales Hidroeléctricas	7
2.4.1	Clasificación según la regulación del flujo	10
2.5	Generación de Potencia.....	12
2.6	Tuberías Forzadas	14
2.6.1	Materiales de fabricación de tuberías forzadas	14
2.7	Diseño hidráulico de tuberías forzadas	18
2.7.1	Elección del Diámetros preliminares.....	18
2.7.2	Cálculo de la velocidad	19
2.7.3	Número de Reynolds	20
2.7.4	Pérdida de carga	20
2.7.5	Espesor de tuberías	28
2.7.6	Costo Constructivo de tuberías.....	29
2.7.7	Costo de Energía Perdida	33
2.7.8	Diámetro Óptimo Económico.....	34
3	CAPÍTULO 3: DATOS Y MÉTODOS	36
3.1	Descripción del aprovechamiento de la cuenca Mantaro.....	36
3.2	Datos de la central hidroeléctrica y metodología.....	36
4	CAPÍTULO 4: CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	39
4.1	Diámetros preliminares	39
4.2	Pérdida de carga y Potencia perdida	40
4.3	Costo Energía Perdida.....	44

4.4	Cálculo del golpe de ariete y determinación de clase de tubería	44
4.5	Cálculo del espesor de tubería.....	46
4.6	Costo Constructivo Tubería Forzada.....	48
4.6.1	Costo de tubería.....	48
4.6.2	Costo de excavación.....	50
4.6.3	Costo del concreto	51
4.6.4	Costo de mantenimiento.....	52
4.7	Cálculo del Diámetro Económico	55
5	CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES.....	60
7	CAPÍTULO 6: RECOMENDACIONES	63
8	REFERENCIAS.....	64
	ANEXOS	70



Índice de figuras

Figura 2-1 Parque de generación eléctrico de Sudamérica	4
Figura 2-2 Costo por kilowatt instalado de proyectos hidroeléctricos de distinta capacidad instalada.....	6
Figura 2-3 Esquema de Central Hidroeléctrica de Agua Fluyente	8
Figura 2-4 Central Hidroeléctrica de Agua Fluyente.....	10
Figura 2-5 Central Hidroeléctrica de Embalse	11
Figura 2-6 Central hidroeléctrica de bombeo.....	12
Figura 2-7 Altura de agua en centrales hidroeléctricas	12
Figura 2-8 Tubería forzada de acero en central hidroeléctrica Kanidera	15
Figura 2-9 Tubería forzada de GRP en la comuna Alto Biobío.....	16
Figura 2-10 Tubería forzada de HDPE.....	17
Figura 2-11 Coeficiente Ke para diferentes tipos de entrada.....	24
Figura 2-12 Perfil de un codo.....	24
Figura 2-13 Tuberías rotas por golpe de ariete	27
Figura 3-1 Ubicación Central Hidroeléctrica Mantaro.....	36
Figura 3-2 Localización de la central hidroeléctrica	37
Figura 3-3 Perfil Longitudinal Central Hidroeléctrica	38
Figura 4-1 Sección típica de corte y de relleno.....	50
Figura 4-2 Curva de diámetro óptimo de tuberías de acero de 6mm y 9.5mm	55
Figura 4-3 Curva de diámetro óptimo de tuberías de acero uniforme de 9.5mm	56
Figura 4-4 Curva de diámetro óptimo de tuberías de fibra de vidrio.....	57
Figura 4-5 Gráfico comparativo de costos de tuberías forzadas en su diámetro económico.....	58

Índice de tablas

Tabla 2-1 Porcentaje de costos por componentes de centrales hidroeléctricas	9
Tabla 2-2 Rugosidad absoluta para distintos materiales de tuberías	22
Tabla 2-3 Rugosidad absoluta para distintos materiales.....	22
Tabla 2-4 Pérdida por contracción repentina K_c	23
Tabla 2-5 Pérdida en codos K_b	25
Tabla 2-6 Pérdida en válvulas K_v	25
Tabla 2-7 Coeficiente K_r para distintos caudales.....	26
Tabla 3-1 Longitud de tramos tuberías forzadas	38
Tabla 4-1 Velocidad y Número de Reynolds para diámetros de diseño.....	41
Tabla 4-2 Rugosidad absoluta para materiales de tubería	41
Tabla 4-3 Coeficiente K_b para cada codo	42
Tabla 4-4 Resumen Pérdida de carga y potencia perdida	43
Tabla 4-5 Energía perdida anual y costo de energía perdida anual	44
Tabla 4-6 Cálculo del golpe de ariete.....	46
Tabla 4-7 Presión hidrostática y presión máxima por tramos para diámetro de 3000 mm	46
Tabla 4-8 Espesores mínimos y comerciales para tuberías de acero	47
Tabla 4-9 Comparación Precio en US\$ por metro lineal.....	49
Tabla 4-10 Costo de excavación tuberías de acero $d = 3.00$ m	51
Tabla 4-11 Costo de concreto tuberías de acero $d = 3.00$ m.....	52
Tabla 4-12 Resumen de costos para alternativas de tuberías forzadas por diámetros	54
Tabla 4-13 Costo de tuberías forzadas para diámetros económicos	58
Tabla 4-14 Costo constructivo de tuberías forzadas	59
Tabla 5-1 Porcentaje de participación de tuberías forzadas para diámetros económicos	60
Tabla 5-2 Importaciones de la industria de plástico por producto en el Perú, en millones US\$ CIF	62

1 CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

La constante búsqueda de nuevas tecnologías que permitan abastecer de energía a aquellas regiones ubicadas en lugares remotos desprovistos de suministro eléctrico, ha impulsado a los gobiernos a establecer políticas que incentiven la construcción de plantas generadoras de energía renovable. Dichas plantas están basadas en la utilización de recursos naturales a los que se puede recurrir de manera indefinida y cuya operación se traduce en un bajo impacto ambiental. Entre las plantas comúnmente instaladas en zonas con gran potencial energético, se encuentra las generadoras de energía hidroeléctrica, energía solar, energía eólica, energía geotérmica y biomasa.

La industria hidroeléctrica ha estado en aumento en la última década en el continente sudamericano (IHA, 2018). En el Perú, dicha industria produce más del 50% de la energía eléctrica que es suministrada tanto a la zona urbana como rural. En la zona rural se ha optado por la construcción de pequeñas centrales hidroeléctricas, estas se caracterizan por tener una potencia instalada desde 1MW hasta 10-30 MW y una altura de caída promedio de 150 m. (IFC, 2015).

En las regiones andinas, los altos niveles de precipitación y la accidentada configuración geográfica, conformada principalmente por cordilleras, valles, quebradas y mesetas, acrecientan significativamente el potencial hidroeléctrico local. Como consecuencia de esto, el Ministerio de Energía y Minas viene impulsando la inversión privada en este tipo de proyectos (MINEM, 2011). Los factores que determinan su factibilidad, en términos de aprovechamiento de recursos y costo-beneficio, se deben a los altos costos constructivos, principalmente el de las tuberías forzadas y los niveles de eficiencia que dichas plantas deben alcanzar.

Mediante esta investigación, se busca realizar un análisis comparativo de diferentes materiales para la construcción de tuberías forzadas, con la finalidad de identificar aquel que resulte óptimo en términos económicos y de diseño hidráulico. Nuestro caso de estudio será en la pequeña Central Hidroeléctrica Mantaro, perteneciente a la región media de la cuenca de Mantaro, en el departamento de Huancavelica. Los factores que serán considerados para la evaluación son: presiones admisibles en tuberías, pérdida de carga por fricción, pérdidas locales, eficiencia y valor económico. Como resultado de este estudio, se identificará el material que represente un mayor costo-beneficio para una pequeña central hidroeléctrica ubicada en la zona oeste andina del país. Además, servirá de base para una investigación posterior con mayor énfasis en materiales no convencionales y evaluar las propiedades, limitaciones y ventajas existentes.

1.2 Objetivos

Objetivo general:

- Determinar la alternativa de material que cumple con los requerimientos hidráulicos y asegure el mejor costo-beneficio para la pequeña Central Hidroeléctrica Mantaro

Objetivos específicos:

- Calcular las presiones admisibles y la pérdida de carga en las tuberías forzadas de la pequeña Central Hidroeléctrica Mantaro
- Analizar el desempeño y viabilidad de distintos materiales para las tuberías forzadas de la pequeña Central Hidroeléctrica Mantaro
- Determinar el material que cumple con los requerimientos y reduce los costos en las tuberías forzadas de la pequeña Central Hidroeléctrica Mantaro

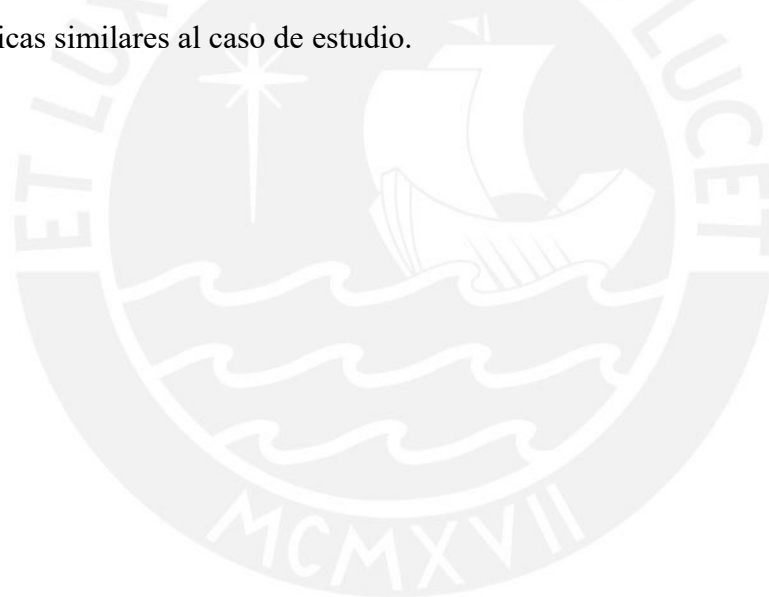
1.3 Justificación

Este proyecto permitirá conocer el desempeño de distintos materiales en tuberías forzadas de pequeñas centrales hidroeléctricas, comparando alternativas comunes con otras poco convencionales. Además, evidencia las ventajas y limitaciones de cada uno de estos, de modo que se presenten soluciones efectivas que cumplan con las solicitudes y requerimientos sujetos a la naturaleza del proyecto (potencia producida, costo, eficiencia,

etc.). Esta versatilidad en cuanto a alternativas habilita opciones que garanticen el mayor aprovechamiento de la central hidroeléctrica.

Mientras mayor sea la generación de potencia, se reduzcan las pérdidas por fricción y locales, y los costos de producción no sean tan elevados, se podría afirmar que se obtuvo el mejor costo-beneficio de la inversión, cumpliendo así con las expectativas del proyecto. De manera análoga, optimizar el proceso de generación de energía implica grandes beneficios para las poblaciones aledañas, al aumentar la oferta de energía generada y, en consecuencia, lograr el abastecimiento de la demanda energética local.

En base al análisis realizado, que contempla diferentes alternativas de materiales, ventajas e inconvenientes de estos, disponibilidad en el mercado y demás; se podrán sacar conclusiones sobre cada uno de los materiales en cuanto a su viabilidad para proyectos de características similares al caso de estudio.



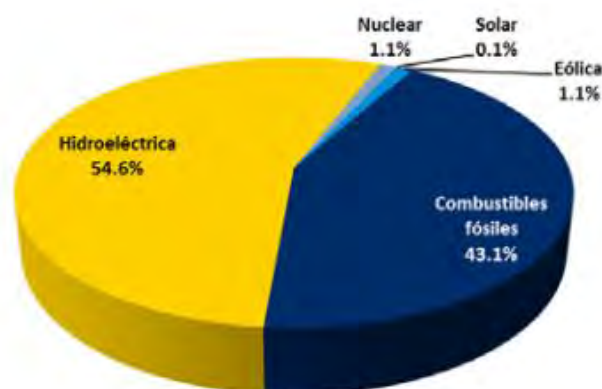
2 CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Panorama global

Durante los últimos años, se ha presentado un aumento de la demanda energética a nivel mundial, así como la búsqueda de alternativas de bajo impacto ambiental. Esto implica un desafío para las empresas, pues los gobiernos exigen el abastecimiento de energía de un gran sector poblacional y por un bajo costo para el consumidor. La producción de energía renovable surge como solución para satisfacer aquella necesidad, por su naturaleza ecológica y costos competitivos con otros procedimientos de generación de energía (REN21, 2015).

En Sudamérica, las tecnologías con mayor aporte a la generación de electricidad son de origen hidroeléctrico y térmico (combustibles fósiles), siendo la región con mayor participación de energía renovable a nivel mundial. La distribución de la generación eléctrica en la región se presenta en la Figura 2-1. Además, el limitado acceso al suministro eléctrico impulsa la utilización de estas fuentes de energía, al servir de provisión en las zonas con bajo nivel de electrificación. Así, se proporciona energía de manera continua y segura, que les permita llevar una mejor calidad de vida (Osinermin, 2015).

Figura 2-1 Parque de generación eléctrico de Sudamérica



Fuente: ONU. Elaboración: OEE – Osinermin, 2015.

La disposición de los recursos de los que se obtiene energía se encuentra sujeta en gran parte a las variaciones del clima, por lo que un gran bloque de países sudamericanos

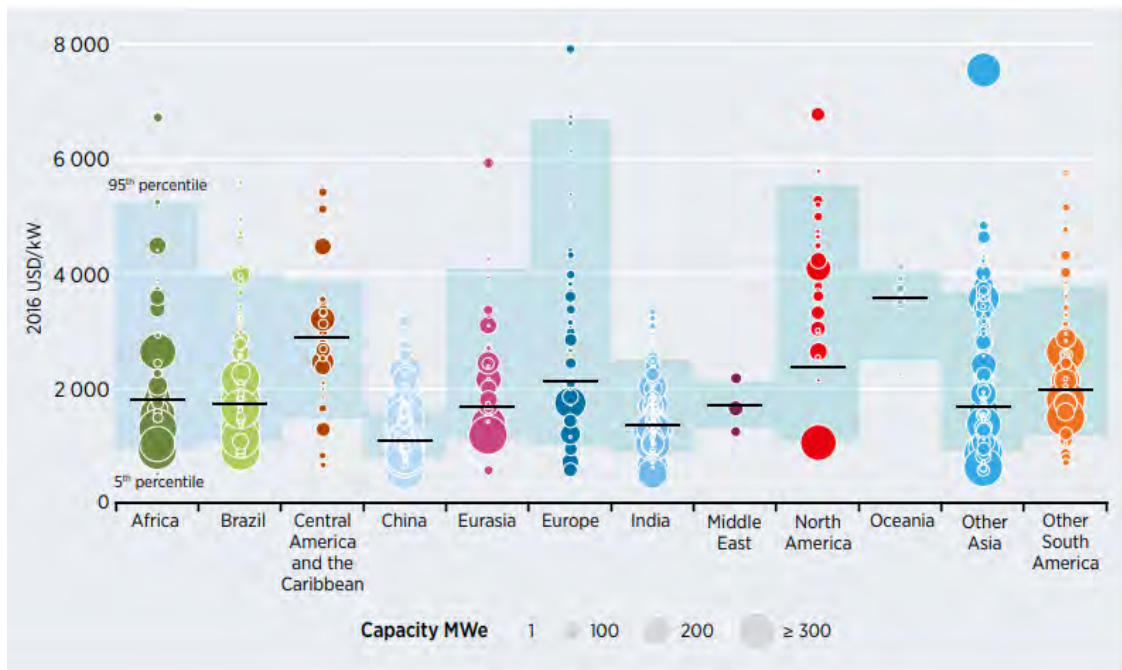
orienta su producción energética a la diversificación de sistemas renovables, de modo que el impacto de eventos climáticos severos, como sequías e inundaciones, no acarree consigo drásticas consecuencias relacionadas al déficit energético en los pueblos directamente afectados. (IHA, 2019)

2.2 Relevancia de energía hidroeléctrica

Las centrales hidroeléctricas proveen el 20% del total global de energía producida, siendo un método de obtención de energía bastante eficiente, pues existen turbinas integradas en el sistema que logran una eficiencia igual o superior al 95%. La ventaja de este tipo de energía es su consistencia en la producción promedio, Los niveles de precipitación promedio son bastante predecibles y, por consiguiente, el caudal de entrada también lo es, a comparación de otros tipos de energías renovables como la eólica, que dependen de la fluctuación de la velocidad del viento (Valiulis, 2014).

En países en desarrollo, el costo por kilowatt instalado en pequeñas centrales hidroeléctricas es mayor en comparación al generado en grandes centrales hidroeléctricas, resultando en promedio entre 20% y 80% más costosas, como se detalla en la Figura 2-2. Además, el promedio ponderado global del costo instalado de este tipo de plantas aumentó de USD 1171/kW en el 2010 hasta 1780/kW en el 2016. Esta tendencia al crecimiento posiblemente se deba a la construcción de centrales en lugares remotos, donde el costo de transporte, interconexión y distribución se elevan significativamente por la ubicación y accidentada geografía (IRENA, 2018).

Figura 2-2 Costo por kilowatt instalado de proyectos hidroeléctricos de distinta capacidad instalada



Fuente: IRENA, 2017, pág. 118.

Las centrales hidroeléctricas suelen clasificarse según la potencia que generan, aunque no existe un acuerdo ampliamente aceptado sobre los límites que definen cada uno de los tipos de centrales, pues cada región o país adoptan distintos valores de acuerdo con la demanda de su sector energético. En Estados Unidos y Europa se define como pequeña central hidroeléctrica aquellas que generan menos de 10 MW (DOE, 2016). En Latinoamérica, se ha propuesto la siguiente clasificación:

- a) Grandes Centrales Hidroeléctricas, generan potencia mayor a 100 MW
- b) Medianas Centrales Hidroeléctricas, de 10-30 MW a 100 MW
- c) Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, de 1 MW a 10-30 MW
- d) Minicentrales Hidroeléctricas, con potencia menor a 1MW

2.3 Situación en el Perú

En Perú, aproximadamente el 6% de la población carece de energía eléctrica, siendo en su mayoría habitantes de las zonas rurales alejadas en la sierra y selva. (Schmerler, 2018)

En estos pueblos la red de sistema eléctrico es inexistente, debido principalmente a la complejidad de la geografía, que dificulta el acceso a estos territorios aislados. La generación de energía renovable surge como una opción viable, pues el aprovechamiento de los recursos naturales es una posible solución a las limitaciones económicas en dichas zonas. (Marcos, 2007). Perú cuenta con un gran potencial de energía renovable, el cual puede ser aprovechado mediante la implementación de centrales hidroeléctricas. Este método de generación de energía se caracteriza por sus bajos costos de producción en la etapa de operación, pero tiene como desventaja el alto costo de inversión durante la etapa de construcción, en comparación con otros tipos de tecnologías. (Gamio, 2016)

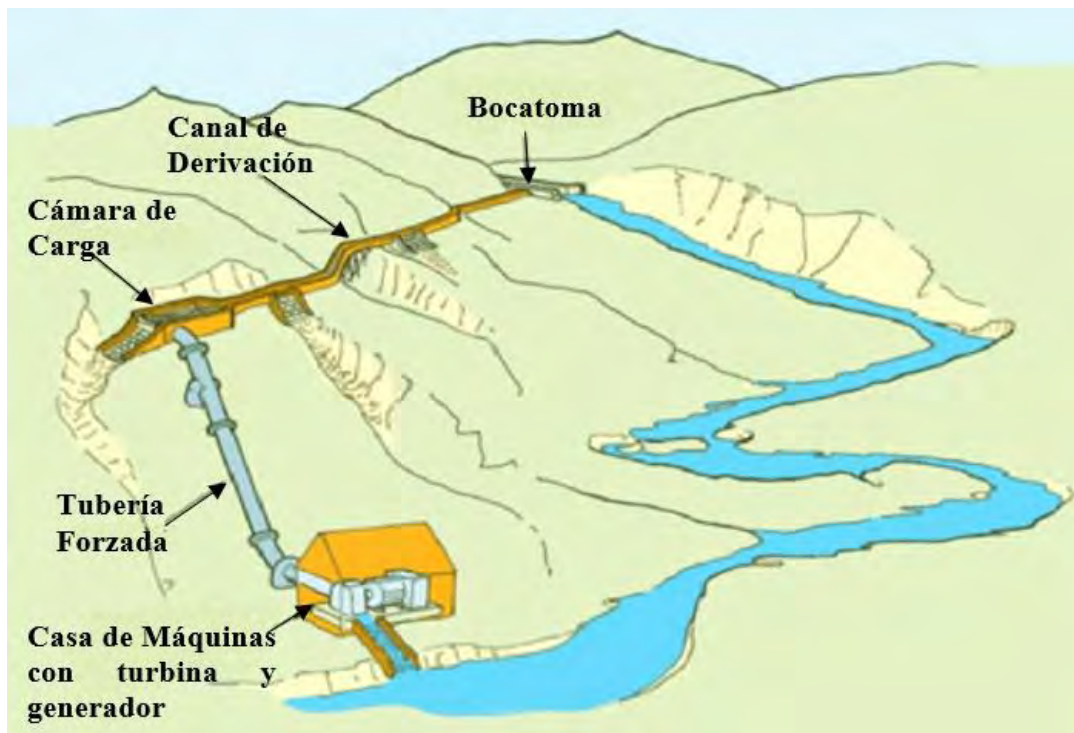
Uno de los elementos de mayor costo e importancia en el sistema hidroeléctrico es la tubería forzada. Si bien desde hace 50 años se viene utilizando el acero como material predilecto para la construcción de tuberías forzadas en centrales hidroeléctricas, debido a su fácil obtención, maleabilidad e instalación rápida (Singhal & Arun, 2015), existen otras alternativas de materiales. Como posibles alternativas que permitan reducir los costos generados se tienen el plástico reforzado con fibra de vidrio, PVC, polietileno, entre otros; estos materiales serán descritos con detalle en la sección siguiente.

2.4 Centrales Hidroeléctricas

El mecanismo de acción principal en una central hidroeléctrica se basa en el aprovechamiento de un desnivel para transportar un caudal de agua, haciéndolo pasar por una turbina ubicada aguas abajo. La energía mecánica generada por el movimiento de las hojas de la turbina se transforma en energía eléctrica, mediante un generador eléctrico en la casa de máquinas.

Mientras mayor sea el salto geodésico, mayor será la energía potencial de la masa de agua en la parte más alta del sistema, que rápidamente se transformará en energía cinética conforme va descendiendo por la tubería forzada. Los factores que definen el alcance de la obra deben ceñirse al contexto del lugar de construcción, pues el proyecto se debe adaptar a la topografía de la zona, condiciones meteorológicas que determinan el caudal de entrada, exposición a intemperie de elementos estructurales, entre otros. Un esquema básico para una central hidroeléctrica se presenta en la Figura 2-3.

Figura 2-3 Esquema de Central Hidroeléctrica de Agua Fluyente



Fuente: British Hydro Association (2012).

Bocatoma: Estructura hidráulica de captación de agua, que permite desviar parte del caudal del cauce de un río, para su aprovechamiento posterior en la generación energética (Gayatrhi, 2013).

Canal de derivación: Canal secundario que conduce el agua captada, generalmente con una compuerta o válvula para la regulación del caudal entrante. Cuenta con un desarenador, para poder eliminar todo sedimento que se esté transportando y evitar obstrucciones, pérdidas de energía o posibles daños en los elementos del sistema (Gayatrhi, 2013).

Cámara de carga: Depósito ubicado al final del canal de derivación. Se encarga de suministrar el caudal de entrada a la tubería forzada. El agua pasará a un régimen presurizado, por lo que la cámara cuenta con mecanismos para aliviar la presión generada en la tubería forzadas según sea necesario. Cuenta con rejillas para retener algunos detritos que aún se encuentren en el volumen de agua de paso (Gayatrhi, 2013).

Tubería Forzada: Es la tubería de fuerza que conduce el caudal desde la cámara de carga hasta la turbina en la casa de máquinas. Junto al resto de obras civiles, el costo de este elemento representa un gran porcentaje de la totalidad del costo de inversión del proyecto, representando hasta el 50% de la inversión total en centrales hidroeléctricas con potencia mayor a 10 MW, como se puede apreciar en la Tabla 2-1. Por lo mismo, es de principal interés el buscar la optimización de la misma mediante el cálculo del diámetro y espesor de las tuberías y la elección del material de fabricación que cumpla con las exigencias locales, de modo que se obtengan los niveles de desempeño deseados que representen un mayor costo-beneficio para la obra (Gayathri, 2013).

Tabla 2-1 Porcentaje de costos por componentes de centrales hidroeléctricas

Sub-sistema	25 proyectos de dimensión desconocida	Grandes centrales hidroeléctricas (>10 MW)	Pequeñas centrales hidroeléctricas (<10 MW)	Micro centrales hidroeléctricas (<100 kW) en Nepal
Obras civiles	45%	50%	30%	20%
Equipo electromecánico	33%	30%	40%	53%
Conexión a red	6%	5%	10%	-
Otros	19%	15%	20%	27%

Fuente: Butchers et al. (2022).

El tipo de material para la fabricación de las tuberías forzadas influyen significativamente en el rendimiento de la central. Se deberá analizar los coeficientes de fricción correspondientes a cada material de análisis, que determinan las pérdidas de carga en el sistema, las presiones admisibles que estos son capaces de soportar bajo las solicitaciones impuestas (caudal de entrada, salto geodésico, etc.), la durabilidad de estos para la vida útil de la planta y el mantenimiento que cada uno de estos demandan, entre otros aspectos (Gayathri, 2013).

Turbina: Máquina hidráulica encargada de la generación de energía mecánica, al generar un movimiento de rotación motivado por el paso del fluido a través de ella. Esta energía mecánica será transformada en eléctrica mediante un generador en la casa de máquinas. La elección de la turbina debe adecuarse a los requerimientos de la planta, existiendo algunas turbinas capaces de generar hasta 95% de eficiencia y más (Gayathri, 2013).

2.4.1 Clasificación según la regulación del flujo

Según el régimen utilizado para la regulación del flujo de agua en las centrales hidroeléctricas, éstas pueden clasificarse principalmente en tres tipos: centrales de agua fluyente, centrales de embalse y centrales de bombeo (EERE, 2022).

2.4.1.1 Centrales de agua fluyente

Aquellas centrales que no cuentan con reservorio de agua, donde el caudal es desviado directamente del río y utilizado para la generación de energía en la planta. Por lo mismo, no existe un control del flujo de agua de ingreso, pues la variación del caudal de río se ve afectado por los niveles de precipitación, humedad relativa en el aire, vegetación y uso de tierra, entre otros factores, que varían con el cambio de estaciones durante el año (EERE, 2022).

En épocas de avenida en ríos, un exceso en el caudal de entrada puede significar que cierto volumen de agua sea desaprovechado en la generación de energía, mientras que, en épocas de estiaje, los bajos niveles de agua se traducen en una baja capacidad de potencia en la planta. Los costos de la construcción de este tipo de plantas son relativamente bajos, pero la producción energética está sujeta a la fluctuación del caudal periódicamente. En la Figura 2-4 se presenta un ejemplo de central hidroeléctrica de agua fluyente.

Figura 2-4 Central Hidroeléctrica de Agua Fluyente



Fuente: Aboitiz Power Corporation (2019).

2.4.1.2 Centrales de embalse

La construcción de una represa permite la acumulación de un volumen de agua en el embalse, de manera que se pueda regular el caudal de entrada hacia la tubería forzada, generando energía a lo largo del año de manera consistente. El reservorio de agua asegura los niveles de eficiencia de la central, independientemente de la temporada (EERE, 2022).

Este tipo de centrales son las más comunes, sobre todo utilizadas en pequeñas y grandes centrales hidroeléctricas; La potencia generada es significativamente mayor, con costos de inversión un poco más elevados y donde se debe satisfacer la demanda local de manera regular y estable. Se muestra una central de embalse en la Figura 2-5.

Figura 2-5 Central Hidroeléctrica de Embalse



Fuente: Inforegión (2016).

2.4.1.3 Centrales de bombeo

También denominadas centrales reversibles, al hacer uso de una bomba para generar un flujo ascendente del agua hacia un reservorio. Se utilizan principalmente con la finalidad de almacenar el excedente del caudal para su uso posterior. Por lo general, este sistema turbina-bomba cuenta con una eficiencia del 75%, lo que significa que únicamente tres cuartas partes de la energía usada para bombear agua al reservorio en la parte superior puede ser recuperada (Geth et. al, 2015). Se presenta la Figura 2-6 como ejemplo de central hidroeléctrica de bombeo.

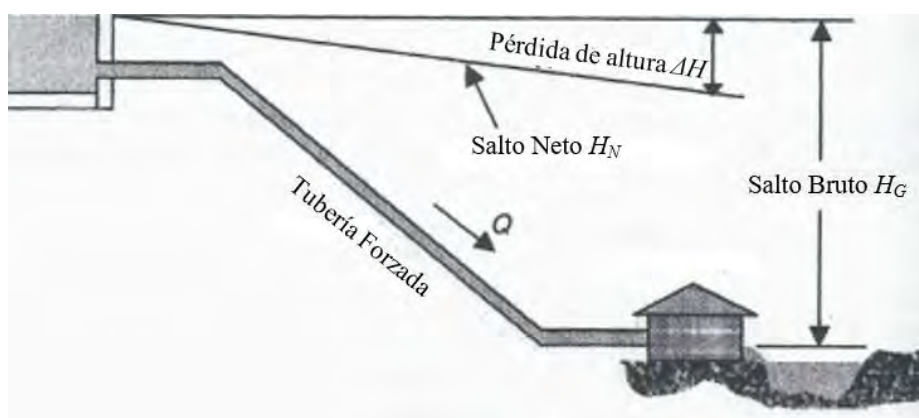
Figura 2-6 Central hidroeléctrica de bombeo

Fuente: Pini Group (2008).

2.5 Generación de Potencia

Para el correcto funcionamiento de las plantas hidráulicas, estas deben ser concebidas de manera que se aproveche la diferencia de cotas entre el reservorio o canal que surte de agua a la tubería forzada, y la ubicación de la turbina aguas abajo, en la casa de máquinas. La energía mecánica producida por la rotación de la turbina será transformada en energía eléctrica por un generador eléctrico, para luego ser distribuida a los consumidores.

Durante todo el proceso del flujo del agua, una cantidad significativa de carga se pierde, debido en su mayoría a las pérdidas por fricción y pérdidas locales. Las pérdidas por fricción se atribuyen a la rugosidad de las tuberías forzadas que transportan el caudal, mientras que las pérdidas locales se presentan principalmente por los cambios de sección que generan una perturbación del flujo. Las cargas involucradas en un sistema mencionado se presentan en el esquema de la Figura 2-7.

Figura 2-7 Altura de agua en centrales hidroeléctricas

Fuente: Chegg Study (2019).

El salto bruto (H_G) representa la diferencia de cotas entre el tirante de agua del reservorio o canal aguas arriba, y la ubicación de la turbina al final de la tubería forzada. La pérdida de altura ($\Delta H = H_f$) es la carga perdida a lo largo de todo el transporte del agua hasta llegar a su destino, por pérdidas de fricción y locales. El salto neto (H_N) es la carga realmente aprovechada por la planta, al restar del salto bruto las pérdidas en la tubería, mostrado en la Ecuación 2.1.

$$H_N = H_G - H_f \quad (2.1)$$

Donde:

H_G = Salto Bruto (m)

H_N = Salto Neto (m)

H_f = Pérdida de carga (m)

Para la generación de potencia en una central hidroeléctrica se cuenta con la siguiente expresión, presentada en la Ecuación 2.2.

$$P = \rho_{agua} \cdot g \cdot Q \cdot H_N \cdot n_T \quad (2.2)$$

Con:

P = Potencia generada (W)

ρ_{agua} = Densidad del agua (kg/m^3)

g = Aceleración de la gravedad (m/s^2)

Q = Caudal de entrada (m^3/s)

H_N = Salto Neto (m)

n_t = Eficiencia de la turbina - generador

Si consideramos que el producto de la densidad del agua (ρ_{agua}) y la aceleración de la gravedad (g) es equivalente al peso específico del agua ($\gamma_{agua} = \rho_{agua} \cdot g$, en N/m^3). Además, la potencia en centrales suele expresarse en KW ($1 \text{ KW} = 10^3 \text{ W}$). Se obtiene la Ecuación 2.3 al reemplazar en la Ecuación 2.2.

$$P = 10^{-3} \cdot \gamma_{\text{agua}} \cdot Q \cdot H_n \cdot n_t \quad (2.3)$$

Donde:

P = Potencia generada (KW)

γ_{agua} = Peso específico del agua (N/m³)

Q = Caudal de entrada (m³/s)

HN = Salto Neto (m)

n_t = Eficiencia de la turbina

2.6 Tuberías Forzadas

Las tuberías forzadas se utilizan para transportar el agua desde la cámara de carga en la parte alta del sistema, hasta la turbina generadora de energía en la casa de máquinas, al pie de la central. Dependiendo de las condiciones de exposición, temperatura ambiental y el material de fabricación, estas pueden instalarse sobre la superficie del suelo o enterradas.

El material de fabricación de este elemento influye directamente en la elección del diámetro interno óptimo, que permita maximizar la eficiencia de la central por el menor costo posible. Además, el espesor a elegir en las tuberías deberá cumplir con los requerimientos sujetos a la tensión interna generada para cada material por el transporte de agua, bajo los diferentes niveles de presión impuestos por la naturaleza constructiva de la planta.

2.6.1 Materiales de fabricación de tuberías forzadas

Para la elección del material de fabricación de las tuberías forzadas se tiene muchas consideraciones. La altura de salto de la central, la presión internada generada por el caudal de sollicitación en la tubería, la velocidad y régimen del flujo, la longitud y pendiente de los tramos, sumados a efectos hidrodinámicos capaces de crear sobrepresiones, como la cavitación y el golpe de ariete; todos estos factores se ven afectados por la naturaleza del tipo de material a través del cual se conduce el flujo.

Además, los costos que involucra el movimiento de tierras que es necesario en algunas tuberías y el mantenimiento que exige cada una de estas, deberá ser tomado en cuenta en el análisis económico.

2.6.1.1 Tuberías de Acero

El acero es principalmente una aleación de hierro y carbono, cuya composición química puede variar dependiendo de los requerimientos específicos suscitados en el proyecto, desde la fabricación de un acero dulce bastante tenaz y dúctil, hasta un acero duro de gran resistencia.

Son las más usadas en centrales hidroeléctricas, debido a su maleabilidad, fácil transporte e instalación rápida. Estas características han permitido la inserción de una amplia variedad de diámetros comerciales al mercado. Estas tuberías pueden instalarse a la intemperie, utilizando un recubrimiento para su conservación. Se colocan pilares como apoyos cada ciertos tramos y anclajes de concreto en los cambios de pendiente.

Las uniones mediante soldadura son las más comunes, por causa de la simplicidad del proceso y su eficacia, aunque también se pueden utilizar uniones mecánicas. En la Figura 2-8 se presenta la tubería forzada de una central hidroeléctrica en la ciudad de Kanidera, Japón.

Figura 2-8 Tubería forzada de acero en central hidroeléctrica Kanidera



Fuente: Qurren (2012).

2.6.1.2 Tuberías de Fibra de Vidrio Reforzada

También conocido como GRP (Glass Reinforced Plastic), es un compuesto de resina (poliéster) reforzada con fibra de vidrio. El producto es un material caracterizado por ser bastante liviano, lo que facilita su instalación, y con una resistencia moderada. Su superficie no es muy rugosa, por lo que las pérdidas por fricción en centrales hidroeléctricas se ven reducidas.

Este tipo de tuberías pueden ir tanto a la intemperie como enterradas. En el último caso, la ventaja es que no se necesita de un recubrimiento especial para evitar la corrosión de los agentes presentes en el medio. En el mercado, el GRP se encuentra en un gran rango de diámetros comerciales y con precios competitivos con los del acero, lo que lo convierte en una alternativa viable en algunas ocasiones. Se presenta la imagen de una tubería de GRP en la Figura 2-9 construida en la comuna Alto Biobío, Chile.

Figura 2-9 Tubería forzada de GRP en la comuna Alto Biobío



Fuente: HOBAS (2012).

2.6.1.3 Tuberías de Policloruro de Vinilo (PVC)

El policloruro de vinilo o PVC es un polímero termoplástico usado con frecuencia en tuberías. Se utiliza principalmente en centrales hidroeléctricas pequeñas, usualmente con altura de salto menor a 150 metros. Es un material bastante liviano y económico, cuyo montaje es bastante sencillo, aunque su capacidad para soportar altas presiones es limitada.

Debido a la fotosensibilidad del material, la práctica más común es enterrar por completo la tubería forzada, para así evitar la exposición directa al sol, lo que implica un gasto adicional a considerar, correspondiente al movimiento de tierras.

2.6.1.4 Tuberías de Polietileno de Alta Densidad (HDPE)

El polietileno es un material termoplástico de alta durabilidad, cuya estructura química cristalina permite la producción de un variado rango de densidades para cada nivel de resistencia requerido, al modificar sus características básicas con el objetivo de desempeñarse adecuadamente bajo solicitaciones específicas.

En el caso de centrales hidroeléctricas, el polietileno de alta densidad es una alternativa viable en conducciones forzadas, por ser un material ligero, libre de corrosión y de gran resistencia química contra agentes externos, además de su flexibilidad y fácil instalación.

A pesar de que solo requiere un mantenimiento mínimo y su tiempo de vida útil es bastante elevado, este material es más caro que el PVC. La Figura 2-10 muestra una tubería forzada construida de HDPE para una central hidroeléctrica ubicada en la isla Jura, Escocia.

Figura 2-10 Tubería forzada de HDPE



Fuente: GPS PE Pipe Systems (2014).

2.7 Diseño hidráulico de tuberías forzadas

Para el dimensionamiento de las tuberías forzadas, se realizará un análisis económico para la determinación del diámetro interno, utilizando como base un caudal de diseño calculado mediante un estudio del potencial hidrológico de la zona de análisis.

Mientras más grande sea el diámetro de la tubería mayor será el costo de inversión; en compensación, mayores valores de diámetro implican una reducción en las pérdidas de carga y, consecuentemente, disminuye la energía eléctrica que se deja de producir. Este método busca armonizar el costo constructivo de la tubería forzada con la producción energética, de modo que se obtenga un diámetro óptimo que minimice el costo total de la planta durante su tiempo de vida útil.

2.7.1 Elección del Diámetros preliminares

El inicio del diseño comienza con la elección de un diámetro preliminar. Se han desarrollado fórmulas empíricas para la estimación de un diámetro económico, que servirá como base para la elección de un intervalo de diámetros a evaluar. Se cuenta con expresiones que consideran únicamente el caudal de diseño, el salto bruto y la potencia instalada de la central. Así, las relaciones de Sarkaria (1979), Ludin-Bundschu y Fahlbusch (1987) permiten obtener valores bastante razonables para comenzar el análisis. Estas expresiones se presentan a continuación en las Ecuaciones 2.4, 2.5 y 2.6 respectivamente.

Relación de Sarkaria (1979)

$$D = 0.71 \frac{P^{0.43}}{H_G^{0.63}} \quad (2.4)$$

Relación de Ludin-Bundschu (Atil, 2000)

$$D = \sqrt[7]{\frac{5.2Q^3}{H_G}} \quad (2.5)$$

Relación de Fahlbusch (1987)

$$D = 1.12 \frac{Q^{0.45}}{H_G^{0.12}} \quad (2.6)$$

Donde:

D = Diámetro interno (m)

Q = Caudal de diseño (m³/s)

P = Potencia Instalada (KW)

H_G = Salto bruto (m)

Además, se debe considerar que para los distintos materiales existe un límite permisible de velocidad máxima del flujo en la tubería, principalmente para evitar el desgaste por erosión en las paredes del ducto. La velocidad máxima permisible es de 5 m/s en el caso de tuberías de PVC (UAM, 2011), mientras que un máximo de 6m/s se recomienda para tuberías de fibra de vidrio (Flowtite, 2011) y acero (Atil, 2000). Para tuberías de HDPE, velocidades menores a 7.5 m/s son aceptables (PPI, 2009).

2.7.2 Cálculo de la velocidad

Contando con el caudal de diseño y el área correspondiente a los diámetros de las tuberías, se usará la Ecuación 2.7 sobre el Principio de Continuidad para calcular la velocidad media del flujo que circula en estas.

$$V = \frac{Q}{A} \quad (2.7)$$

Con:

V = Velocidad media del flujo (m/s)

A = Área interna de la tubería (m²)

Sabiendo que las tuberías son de sección circular, conviene reemplazar el valor del área para obtener la Ecuación 2.8 en términos del caudal y diámetro.

$$V = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (2.8)$$

2.7.3 Número de Reynolds

El número de Reynolds es un valor adimensional que caracteriza el régimen de flujo, categorizando el movimiento del fluido como laminar o turbulento, dependiendo de su magnitud. La expresión correspondiente a un flujo sobre una tubería circular recta relaciona la viscosidad cinemática del fluido, velocidad media y diámetro interno de la tubería. Se presenta esta relación en la Ecuación 2.9.

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (2.9)$$

Con:

Re = Número de Reynolds

D = Diámetro interno de tubería (m)

V = Velocidad media (m/s)

ν = Viscosidad Cinemática (m²/s)

2.7.4 Pérdida de carga

Durante el recorrido del fluido a través de una tubería, parte de la energía se disipa debido a la fricción con la pared interior que opone resistencia al movimiento, mientras que otra parte de la carga se pierde en cada cambio de sección o elementos que generan fenómenos de turbulencia en ciertos puntos de la tubería. Entonces, la pérdida de carga total se define como la suma de estos dos aportes en la Ecuación 2.10.

$$H_f = h_{fricción} + h_{locales} \quad (2.10)$$

Donde:

H_f = Pérdida de carga total (m)

$h_{fricción}$ = Pérdida de carga por fricción (m)

$h_{locales}$ = Pérdida de carga locales (m)

2.7.4.1 Pérdida de carga por fricción

La pérdida de carga por fricción representa un gran porcentaje de las pérdidas totales, por lo que tiene una influencia importante en la potencia que se deja de producir por pérdidas en la central. Para el cálculo de este valor hay una variedad de relaciones disponibles. Se muestra en la Ecuación 2.11 la expresión de Darcy – Weisbach, que permite hallar las pérdidas por fricción en función del coeficiente de fricción, velocidad media del flujo, longitud y diámetro interno.

$$h_{fricción} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (2.11)$$

Donde:

f = factor de fricción

L = Longitud de tubería (m)

D = Diámetro interno de tubería (m)

V = Velocidad media del fluido (m/s)

g = aceleración de la gravedad (m/s²)

El valor del coeficiente de fricción (f) se puede hallar mediante la relación propuesta por Colebrook-White, tras haber llevado a cabo experimentos en tuberías forzadas comerciales considerando efectos de altura y rugosidad en tuberías (Singhal & Kumar, 2015). Las Ecuaciones 2.12 y 2.13 presenta los casos para un flujo laminar y flujo turbulento.

Para flujo laminar (Re < 2000)

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2.12)$$

Para flujo turbulento (Re > 4000)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{k}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (2.13)$$

Donde:

k = rugosidad absoluta (m)

R_e = Número de Reynolds

La rugosidad absoluta (k), también descrita como (ϵ), es una característica propia del material del elemento en análisis. Si bien se cuenta con información perteneciente a ensayos realizados sobre tuberías artificiales por Nikuradse (1933) y mejorada por otros autores, en la práctica las tuberías forzadas comerciales no poseen una rugosidad uniforme ni bien definida (Kudela, 2010). Aun así, existen varias tablas con estimaciones sobre la rugosidad absoluta de materiales que permiten hallar un valor aproximado del factor de fricción (f) con una precisión aceptable. Se presentan las Tablas 2-2 y 2-3.

Tabla 2-2 Rugosidad absoluta para distintos materiales de tuberías

Material de tubería	Rugosidad ϵ (mm)
Hierro Fundido	0.26
Acero Comercial	0.045
Concreto	0.3-3
Acero Galvanizado	0.15
Plástico (y vidrio)	0.0 (liso)
Acero Remachado	0.9-9.0

Fuente: Kudela, H. (2010).

Tabla 2-3 Rugosidad absoluta para distintos materiales

Rugosidad Absoluta de materiales			
Material	ϵ o k (mm)	Material	ϵ o k (mm)
Plástico (PE, PVC)	0.0015	Fundición asfaltada	0.06-0.18
Poliéster reforzado con fibra de vidrio	0.01	Fundición asfaltada	0.12-0.60
Tubos estirados de acero	0.0024	Acero comercial y soldado	0.03-0.09
Tubos de latón o cobre	0.0015	Hierro forjado	0.03-0.09
Fundición revestida de cemento	0.0024	Hierro galvanizado	0.06-0.24
Fundición con revestimiento bituminoso	0.0024	Madera	0.18-0.90
Fundición centrifugada	0.003	Hormigón	0.3-3.0

Fuente: Universidad de Cádiz (2018).

2.7.4.2 Pérdida de carga locales

Las pérdidas locales son causadas por singularidades en la tubería que producen turbulencia en el flujo. Estos componentes pueden ser abstracciones, codos, válvulas, etc. Suelen representar una porción pequeña de la pérdida de carga total, pero despreciar su aporte influye en la precisión de la determinación de la potencia producida en una planta. Por lo general, se representan como una fracción de la carga de velocidad, mostrada en la Ecuación 2.14.

$$h_{locales} = (K_c + K_e + K_b + K_v + K_r) \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (2.14)$$

Donde:

K_c = Pérdidas por contracción repentina (m)

K_e = Pérdidas en la entrada (m)

K_b = Pérdidas en codos (m)

K_v = Pérdidas por válvulas (m)

K_r = Pérdida por ramificación (m)

i) Pérdidas por contracción repentina (K_c)

Debido a cambios de sección bruscos por los cuales tiene que pasar el fluido, se pierde un poco de carga por favorecer la turbulencia y formación de pequeños remolinos en el cambio de sección (Balsiger et al., 2014). El valor de K_c se puede rescatar de la Tabla 2-4.

Tabla 2-4 Pérdida por contracción repentina K_c

d1/d2	1.0	1.5	2.0	2.5	5.0
Kcontracción (K_c)	0	0.25	0.35	0.40	0.50

Fuente: Chinyere et al. (2017).

Donde el factor d1/d2 perteneciente a la relación del diámetro grande y el diámetro pequeño en la contracción, determinará el valor que se le asignará al factor K_c

ii) Pérdidas en la entrada (K_e)

Este tipo de pérdida podría considerarse como un caso particular de pérdida por contracción repentina, correspondiente a la alimentación de la tubería forzada por la cámara de carga aguas arriba (Chinyere et al., 2017). Para los diferentes tipos de entrada de la tubería, la Figura 2-11 para la asignación K_e .

Figura 2-11 Coeficiente K_e para diferentes tipos de entrada

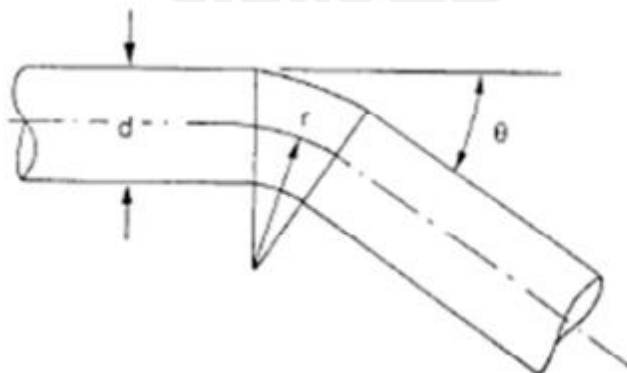
Type	hooded inlet	inward projecting pipe	sharp-cornered	slightly rounded	bell mouth
K_e	1.00	0.8	0.5	0.2	0.04

Fuente: Chinyere et al. (2017).

iii) Pérdidas en codos (K_b)

Los codos se colocan en cambios de dirección del flujo, como se muestra en la Figura 2-12. La tubería experimenta un incremento en la presión en la pared externa de la curva, mientras que decrece la presión en la pared interna a esta. Esto genera un desbalance que se traduce como pérdida de carga (Chinyere et al, 2017).

Figura 2-12 Perfil de un codo



Fuente: Chinyere et al. (2017).

En función del ángulo de deflexión y de la relación del radio interno de giro (r) y el diámetro (d), se puede estimar la pérdida con la Tabla 2-5.

Tabla 2-5 Pérdida en codos K_b

r/d	1	2	3	5
$K_{\text{codo}} (\theta = 20^\circ)$	0.36	0.25	0.20	0.15
$K_{\text{codo}} (\theta = 45^\circ)$	0.45	0.38	0.30	0.23
$K_{\text{codo}} (\theta = 90^\circ)$	0.60	0.50	0.40	0.30

Fuente: Chinyere et al. (2017).

iv) Pérdidas en válvulas (K_v)

Cuando el agua fluye a través de una válvula o compuerta abierta, se genera una pérdida de carga. Esta dependerá del tipo de válvula de la que se trate, como se puede ver en la Tabla 2-6.

Tabla 2-6 Pérdida en válvulas K_v

Tipo de Válvula	K_v
Esférica	0.00
Compuerta	0.10
Mariposa	0.30

Fuente: Chinyere et al. (2017).

v) Pérdidas por ramificación (K_r)

Usualmente en la entrada a la casa de máquinas se planea una ramificación de la tubería, de modo que se distribuye el caudal a una serie de turbinas en cada uno de los ramales. Se acostumbra a realizar bifurcaciones (dos ramales) o trifurcaciones (tres ramales) para reducir los costos de ensamblaje, aunque puede generar una mayor pérdida de carga (Aguirre & Ramírez, 2014) La Tabla 2-7 presenta una serie de valores para distintas condiciones en la ramificación y para caudales variables.

Tabla 2-7 Coeficiente K_r para distintos caudales

Volumetric flow rate Q [m ³ /s]	Coefficient of head losses k								
	Left branch			Center branch			Right branch		
	Mesh			Mesh			Mesh		
	Hexa	Tetra	Core	Hexa	Tetra	Core	Hexa	Tetra	Core
20	0.513	0.442	0.444	0.329	0.268	0.265	0.515	0.429	0.431
25	0.456	0.424	0.423	0.279	0.252	0.252	0.457	0.415	0.412
30	0.448	0.415	0.409	0.258	0.238	0.237	0.443	0.403	0.403
35	0.446	0.406	0.404	0.252	0.228	0.228	0.442	0.397	0.399
40	0.426	0.400	0.405	0.245	0.220	0.214	0.423	0.386	0.389
45	0.430	0.396	0.397	0.242	0.213	0.215	0.442	0.377	0.391
50	0.424	0.389	0.400	0.234	0.208	0.206	0.446	0.374	0.373
55	0.423	0.394	0.403	0.231	0.201	0.204	0.429	0.373	0.373
60	0.426	0.383	0.397	0.223	0.198	0.200	0.402	0.362	0.372
65	0.435	0.388	0.392	0.220	0.194	0.198	0.433	0.368	0.372

Fuente: Aguirre & Ramírez (2014).

Además, para el caso de trifurcaciones en la entrada a la casa de máquinas se recomienda utilizar un valor para el coeficiente K_r de 0.3 (Mays et al, 1997).

2.7.4.3 Golpe de Ariete

El golpe de ariete es un fenómeno hidráulico producido por la variación repentina de la velocidad del fluido en una tubería, como cuando una válvula se cierra súbitamente. Las partículas de agua cercanas a la válvula se detendrán de inmediato, mientras que aquellas que se encuentran aguas arriba tardan en percibir el efecto. La velocidad de estas últimas un instante antes del cierre de la válvula, las forzarán a empujar las partículas detenidas, comprimiendo ligeramente el agua y generando una onda de sobrepresión (Rodríguez, 2016).

La magnitud de esta puede ser de orden importante, por lo que debe considerarse en el diseño de la tubería a presión, pues podría ocasionar daños severos e incluso hacer estallar la conducción. En la Figura 2-13 se muestran fallas en tuberías ocasionadas por golpe de ariete.

Figura 2-13 Tuberías rotas por golpe de ariete

Fuente: Cheng Fluid Systems (2017).

Para calcular la magnitud de la sobrepresión se deberá analizar el tiempo que demora cerrar la válvula completamente. En función de la velocidad de la onda de presión y la longitud total de la tubería, se hace distinción entre 2 tipos de cierre, delimitadas por las Ecuaciones 2.15 y 2.16.

$$0 < T_L < \frac{2L}{C} \quad \text{Cierre rápido} \quad (2.15)$$

$$T_L > \frac{2L}{C} \quad \text{Cierre lento} \quad (2.16)$$

Donde:

T_L = Tiempo de cierre (s)

L = Longitud de tubería (m)

C = Velocidad de la onda de presión (m/s)

Aplicando una serie de simplificaciones, con el fin de facilitar los cálculos, se llega a la siguiente fórmula para determinar la altura de presión del golpe de ariete para un cierre rápido de válvula, cuyo valor resultante es independiente de la longitud de la tubería forzada. Se presenta la Ecuación 2.17.

$$\Delta H = \frac{C \cdot V}{g} \quad (2.17)$$

Con:

ΔH = Sobrepresión por golpe de ariete (m)

g = aceleración de la gravedad (m/s^2)

El valor de la velocidad de la onda de presión (C) se calcula mediante una relación derivada de la fórmula de Allievi, mostrada como la Ecuación 2.18. Este valor suele ser presentado dentro de las especificaciones técnicas que proporcionan los proveedores para cada tubería.

$$C = \frac{1400}{\sqrt{1 + \left(\frac{2.1 \cdot 10^9 \cdot D}{E \cdot t}\right)}} \quad (2.18)$$

Donde:

D = Diámetro interno de tubería (m)

E = Módulo de elasticidad del material (N/m^2)

t = Espesor de la tubería (m)

En el caso de un cierre lento de válvula, se utiliza la Ecuación 2.19 de Michaud para el cálculo de la sobrepresión generada por el golpe de ariete.

$$\Delta H = \frac{2 \cdot L \cdot V}{g \cdot T_L} \quad (2.19)$$

2.7.5 Espesor de tuberías

Existen dos fórmulas bien conocidas, vigente por 40 años, para la determinación de un espesor mínimo de tuberías de acero (AISI, 1998). Se presentan las Ecuaciones 2.20 y 2.21.

Según U.S. Bureau of Reclamation

$$t = \frac{D + 20}{400} \quad (2.20)$$

Según Pacific Gas & Electric:

$$t = \frac{D}{288} \quad (2.21)$$

Los esfuerzos que se generan debido a la presión interna de la tubería deben ser evaluados, a fin de evitar que ocurran fallas que las dañen o las destruyan. El espesor de tubería se puede estimar basado en los esfuerzos circunferenciales, los esfuerzos longitudinales o una combinación entre esfuerzos circunferenciales y esfuerzos de carga estática (ASCE, 1993). Sin embargo, el caso más crítico suele ser el último mencionado. Se presenta la Ecuación 2.22 para el cálculo del espesor:

$$t = \frac{P_{max} \cdot D_i}{2\sigma_u e} FS + t_{corr} \quad (2.22)$$

Donde:

P_{max} = Presión interna máxima (kg/cm²)

D = Diámetro interno (mm)

σ_u = Esfuerzo de rotura del material (kg/cm²)

FS = Factor de Seguridad

e = eficiencia de la junta

t_{corr} = espesor por corrosión (mm)

La presión interna máxima corresponde al efecto conjunto de la presión estática y la sobrepresión ocasionada por el golpe de ariete. Además, un factor de seguridad (FS) de 3 debe ser usado en tuberías a presión para la estimación del espesor final (ASCE, 1993). El espesor por corrosión (t_{corr}) es únicamente considerado para tuberías de acero.

2.7.6 Costo Constructivo de tuberías

Engloba la totalidad del costo constructivo de las tuberías forzadas. Para cada uno de los materiales de análisis, deberán tomarse las consideraciones que representen de mejor manera los métodos y procedimientos utilizados durante la construcción. Por ejemplo, el tipo de uniones, tramos expuestos o enterrados, montaje y demás, varían dependiendo del

material, cuyo cálculo de costo permiten un estimado realista del costo total de cada alternativa.

La clase de tubería para cada material se debe escoger basado en la máxima presión estática en el tramo de análisis. Además, la presión máxima, considerada como la suma entre la presión estática y la sobrepresión por golpe de ariete, se utiliza para la determinación del espesor mínimo de tubería. La elección del tipo de tubería debe satisfacer estas condiciones, considerando la disponibilidad de diámetros y espesores en el mercado.

Se estimarán los costos unitarios de las tuberías, costo de excavación, costo del concreto en anclajes, costo de accesorios, costo de transporte y costo de mantenimiento serán distintos según sea el caso. Se resume el costo total en la Ecuación 2.23.

$$C_{total} = C_{tub} + C_{exc} + C_{con} + C_{mant} \quad (2.23)$$

Donde:

C_{total} = Costo constructivo total de tuberías forzadas (\$)

C_{tub} = Costo de tuberías (\$)

C_{exc} = Costo de movimientos de tierras o excavación (\$)

C_{con} = Costo de Obras de concreto (\$)

C_{mant} = Costo de Mantenimiento (\$)

Además, el costo total durante la vida útil del proyecto deberá traerse hacia el presente, aplicando conceptos de matemáticas financieras, mediante una tasa de amortización anual, como se observa la relación de la Ecuación 2.24. De esta forma, resulta posible comparar el costo de amortización anual y el costo de energía perdida anual bajo los mismos parámetros de tiempo.

$$A_m = \frac{C_{total} \cdot (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} i \quad (2.24)$$

Donde:

A_m = Amortización Anual (\$)

i = Tasa de amortización anual

a) Costo de tuberías

Existe una gran variedad de tuberías forzadas bajo distintas especificaciones técnicas disponibles en el mercado para cada material. Los factores que definen su costo dependen de las características requeridas determinadas en el diseño realizado previamente y el estudio de prefactibilidad, tales como el diámetro nominal, presión admisible, espesores disponibles, velocidad permisible, entre otros.

Los costos pueden ser cotizados directamente con el proveedor del tipo de tubería que se busca, aunque usualmente la cotización solo incluye el costo de material puesto en fábrica y, en el caso de tratarse de tuberías fabricadas en el extranjero, también puede incluir el costo de seguros, embalaje y transporte al puerto de destino más cercano.

Por lo mismo, es importante realizar un Análisis de Precios Unitarios (APU) que considere los demás componentes de gasto que implican la mano de obra, costo del flete, materiales y equipos necesarios para el montaje de estos. Idealmente, el análisis se debe realizar de modo que se calcule el costo del metro lineal de tubería instalada, incluyendo los gastos mencionados.

b) Costo de excavación

Para las tuberías forzadas que vayan enterradas, se puede considerar la excavación de una zanja de 1.33 veces el diámetro de la tubería (Singhal & Arun, 2015). El costo de excavación puede ser estimado como se presenta en la Ecuación 2.25.

$$C_{ex} = \frac{\pi}{4} (D + 0.33D)^2 C_e \cdot L \quad (2.25)$$

C_{ex} = Costo total de excavación (\$)

C_e = Costo de excavación por volumen de tierra (\$/m³)

Alternativamente, mediante la asistencia de algún software de ingeniería y diseño como AutoCAD Civil 3D, se puede realizar un alineamiento de la central hidroeléctrica, el cual puede ser utilizado como base para generar una perfil longitudinal y secciones transversales que permitan estimar los volúmenes de corte y relleno por ejecutar a hora de realizar el movimiento de tierra. También se debe considerar la eliminación de excedentes al botadero más cercano.

c) Costo de obras de concreto

Las obras de concreto en tuberías forzadas se conforman por los anclajes y el recubrimiento de aquellas tuberías que lo requieran. Las Ecuaciones 2.26 y 2.27 permiten estimar el costo del anclaje y del recubrimiento de concreto como parte de la construcción de las tuberías forzadas (Singhal & Arun, 2015).

$$C_{anclaje} = 12D^3 \cdot N \cdot C_c \quad (2.26)$$

$$C_{recubrimiento} = 0.6D^2 \cdot C_c \cdot L \quad (2.27)$$

Donde:

N = Número de anclajes

C_c = Precio unitario del concreto (\$/m³)

La suma de estos dos aportes comprenderá el costo total de concreto en la tubería de generación, como se muestra en la Ecuación 2.28.

$$C_{con} = C_{anclaje} + C_{recubrimiento} \quad (2.28)$$

C_{con} = Costo total de concreto (\$)

d) Costo de mantenimiento

Durante el tiempo de vida útil de la central, es importante realizar labores de mantenimiento periódico para asegurar el correcto funcionamiento de la misma. Materiales como el acero son más propensos a deteriorarse, principalmente por la exposición a agentes que puedan generar corrosión. Cualquier desgaste o mal funcionamiento de rejillas, válvulas, compuertas, revestimiento y demás, debe ser reparado inmediatamente.

El costo de mantenimiento del equipo hidromecánico en una planta hidroeléctrica es difícil de estimar, pues la cantidad de factores involucrados en cada proyecto en particular suelen ser muy diferentes. Una medida general del porcentaje que representa el mantenimiento en este tipo de proyectos es entre el 8% y 13% del costo del equipo hidromecánico (Mosonyi, 1965). La Ecuación 2.29 muestra este cálculo.

$$C_{mant} = C_{tub} * k_{mant} \quad (2.29)$$

k_{mant} = Porcentaje de mantenimiento

2.7.7 Costo de Energía Perdida

Conocer el costo de la potencia que se dejó de producir debido a las pérdidas de carga tiene una gran implicancia en la elección del diámetro económico óptimo. De manera similar a la Ecuación 2.3, el cálculo de la potencia perdida se halla mediante la Ecuación 2.30.

$$P_l = 10^{-3} \cdot \gamma_{agua} \cdot Q \cdot H_f \cdot n_t \quad (2.30)$$

Donde:

H_f = Pérdida de Carga

Para obtener la energía anual, se multiplica la potencia perdida por las horas de producción de energía al año y el factor de planta, cuyo valor significa la relación entre la energía realmente producida y la energía proyectada para una producción ininterrumpida. Se presenta la Ecuación 2.31.

$$E_p = P_l \cdot T_a F_c \quad (2.31)$$

Con:

E_p = Energía perdida al año (kWh)

T_a = Horas de producción de energía anual (hr)

F_c = Factor de planta

El costo total de energía perdida anual se define como el producto entre la energía perdida anual y el costo de la energía (C_e), como se muestra en la Ecuación 2.32.

$$C_{EP} = E_p \cdot C_e \quad (2.32)$$

C_e = Costo de energía perdida (\$/kWh)

2.7.8 Diámetro Óptimo Económico

Una vez se tiene expresado el costo de amortización anual y el costo de energía perdida en la misma unidad de tiempo, la suma de ambos representará el costo total anual de la inversión en el presente, como se resume en la Ecuación 2.33.

$$C_T = A_m + C_{EP} \quad (2.33)$$

Donde:

C_T = Costo total anual (\$)

Obteniendo el costo total anual de la tubería forzada para los distintos diámetros del intervalo escogido, se puede tabular una curva que representa la variación del costo total con el diámetro de diseño.

Mediante una regresión se puede hallar la función correspondiente a dicha curva. Para obtener el diámetro económico óptimo, basta con derivar la ecuación en función del diámetro, e igualarla a 0. Se obtiene la Ecuación 2.34.

$$\frac{\delta C_T}{\delta D} = 0 \quad (2.34)$$

De igual manera, a simple inspección visual de la gráfica se puede determinar cuál es el diámetro para el cual el valor del costo total de la tubería es el mínimo. Este representa el parámetro de diseño óptimo para obtener el mayor costo-beneficio de la inversión.



3 CAPÍTULO 3: DATOS Y MÉTODOS

3.1 Descripción del aprovechamiento de la cuenca Mantaro

El proyecto de la pequeña central hidroeléctrica Mantaro se beneficia de la confluencia de los ríos Canipaco y Vilca, ubicados en el departamento de Huancavelica. (Latitud: -12.39549, Longitud: -75.14632). Un canal de derivación se encargará de llevar el caudal de la confluente, hasta aproximadamente 1 km después de la confluente de los ríos Mantaro y Vilca (Latitud: -12.38237, Longitud: -75.12279). El desnivel del terreno de la zona que se planea aprovechar comprende entre las cotas 3016,48 y 2966.85 msnm. La Figura 3-1 muestra la ubicación de la zona de captación y ubicación de la central hidroeléctrica del proyecto.

Figura 3-1 Ubicación Central Hidroeléctrica Mantaro



Fuente: Google Maps (s.f.).

3.2 Datos de la central hidroeléctrica y metodología

La central proyectada será de agua fluyente, por lo que no cuenta con un reservorio que almacene agua. La casa de máquinas se ubica a 250 metros aguas abajo del puente que cruza el río Mantaro a la altura de la localidad de Tellería. Una imagen satelital de la zona muestra detalladamente su ubicación en la Figura 3-2.

Figura 3-2 Localización de la central hidroeléctrica

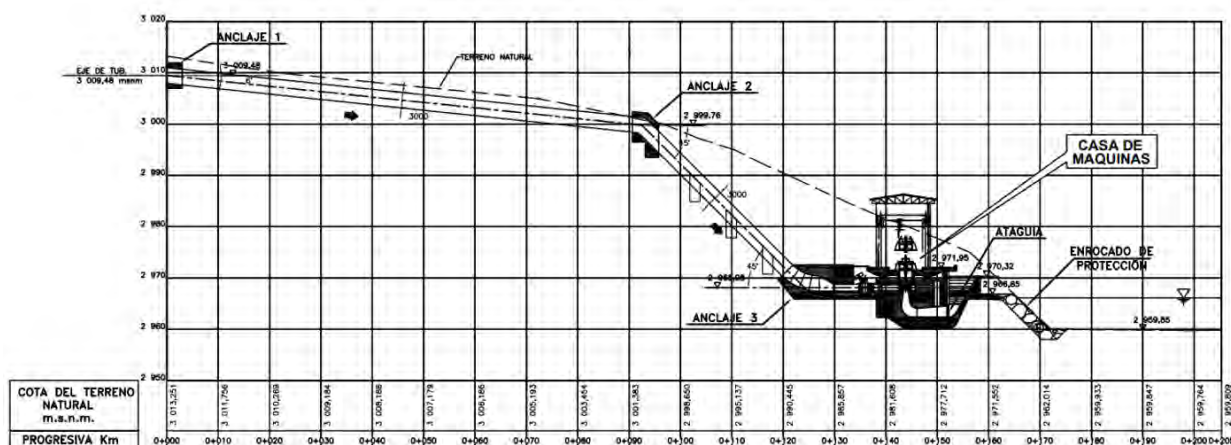


Fuente: Propia.

El caudal provisto para el diseño corresponde al caudal medio anual en el punto de captación, descontando el caudal ecológico de acuerdo a las normas. Se cuenta con información del registro público de la estación hidrométrica Moya, con un caudal medio mensual de $25.3 \text{ m}^3/\text{s}$ (ANA, 2015), aunque ciertamente esta se encuentra ubicada aguas arriba de la confluencia de los ríos Canipaco y Vilca, por lo que este valor únicamente servirá como referencia. Por lo mismo, se ha optado por utilizar un caudal de diseño de $31,86 \text{ m}^3/\text{s}$, obtenido mediante un estudio de prefactibilidad realizado por el sector privado (documento no publicado) para la realización de un canal de derivación en la misma zona.

La altura bruta del proyecto es de $46,42 \text{ m}$, medida entre el nivel de agua en la cámara de carga de la central y el nivel de la turbina donde se genera la energía en la casa de máquinas. Se planea una trifurcación en la entrada a la casa de máquinas. El caudal turbinado será devuelto al río Mantaro. La zona es bastante accesible, por lo que solo bastará proyectar accesos a nivel de afirmado hacia la casa de máquinas. Se cuenta con una alternativa de perfil longitudinal, el cual será utilizado como referencia para la determinación de la longitud de tuberías. Su esquema se presenta en la Figura 3-3.

Figura 3-3 Perfil Longitudinal Central Hidroeléctrica



Fuente: Empresa privada

En este perfil se definen dos tramos de tubería forzada. Con esta información, se tabula la distancias horizontales y verticales de cada tubería para hallar la longitud final de la conducción forzada, que será de principal interés para el cálculo de costos.

Tabla 3-1 Longitud de tramos tuberías forzadas

Tramo	Distancia Horizontal	Distancia Vertical	Longitud
	(m)	(m)	(m)
01	92.48	9.72	92.99
02	28.34	28.34	40.08
Longitud Total			133.07

Fuente: Propia

El cálculo de pérdidas en tuberías por fricción, así como los costos relacionados al movimiento de tierras, precio de tuberías, transporte y mantenimiento, se sustentan directamente en la longitud de la conducción forzada. Los análisis comparativos entre las distintas alternativas servirán para la determinación de parámetros de diseño a modificar con la finalidad de reducir el costo de la inversión. En esta investigación se usan costos de energía y cotización de tuberías del año 2019 y 2020.

En base a la información recolectada y propuestas generadas, se hará uso de la teoría del diámetro económico para la determinación de la opción que represente el mejor costo-beneficio, tomando en consideración el costo de la energía pérdida en las tuberías, costos de construcción, movimiento de tierras, obras de concreto y mantenimiento de las tuberías.

4 CAPÍTULO 4: CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Diámetros preliminares

Mediante las ecuaciones (2.4), (2.5) y (2.6), mencionadas en el Capítulo 3 para la estimación del diámetro preliminar, se puede obtener un valor cercano a lo que finalmente debe resultar el diámetro óptimo en cada una de las alternativas de materiales de tuberías. Los parámetros a utilizar corresponden a un caudal de diseño de $31.86 \text{ m}^3/\text{s}$ y una altura bruta de 46.42 m , valores justificados en el capítulo anterior. Asumiendo una eficiencia de turbina-generator de 0.85 común en este tipo de sistemas y recurriendo a la ecuación (2.3), se calcula de manera preliminar una Potencia Instalada aproximada de 12 MW .

$$\text{Sarkaria} \quad D_p = 0.71 \cdot \frac{12,000^{0.43}}{46.42^{0.63}} = 3.59 \text{ m}$$

$$\text{Ludin-Bundschu} \quad D_p = \sqrt[7]{\frac{5.2 \cdot 31.86^3}{46.42}} = 3.22 \text{ m}$$

$$\text{Fahlbusch} \quad D_p = 1.12 \cdot \frac{31.86^{0.45}}{46.42^{0.12}} = 3.35 \text{ m}$$

Estos valores de diámetro se utilizan para hallar una media en base a la cual determinar un intervalo de diámetros sobre los cuales diseñar. Se hará uso de la expresión de Sarkaria para la estimación preliminar del diámetro y se asignará un rango para comenzar el trabajo de iteración. En base al resultado, se opta por probar con un intervalo de diámetros entre $2.60 \text{ m} - 3.60 \text{ m}$, con aumentos de 10 cm sobre el límite inferior (2.60 m) hasta alcanzar el valor del límite superior (3.60 m).

Se corrobora que los diámetros cumplan con las velocidades máximas permisibles para los distintos materiales de tuberías, donde un menor diámetro interno representará la mayor velocidad de flujo para un caudal constante. Como ejemplo de este cálculo, se evalúa la ecuación (2.8) para el diámetro de 2.90 m bajo los parámetros de diseño como sigue.

$$V = \frac{4 \cdot 31.86}{\pi \cdot 2.90^2} = 4.82 \text{ m/s}$$

Como para el polietileno de alta densidad la velocidad máxima permisible no debe exceder un valor de 8 m/s, se confirma que los valores elegidos en el intervalo de diámetros cumplen con este requisito en este material (ver Tabla 4-1). De igual manera, las tuberías de acero y fibra de vidrio no tendrán problemas de desgaste con la presente elección de diámetros, pues se encuentran por debajo de la velocidad de 6 m/s como valor máximo recomendable.

Sin embargo, la velocidad del flujo en tuberías de PVC no debe exceder los 5 m/s. Para el caudal suministrado, el diámetro que la conducción forzada debería tener es de al menos 2.9 metros (Tabla 4-1), de modo que se cumpla esta condición. Tuberías de estos grandes diámetros para este material en específico no se producen industrialmente. En el mercado se suelen encontrar diámetros de hasta 2.0 metros, por lo que mandar a fabricar mayores diámetros resultaría en un encarecimiento significativo del costo constructivo. Por este motivo, construir en este material para el proyecto en cuestión resulta inviable.

4.2 Pérdida de carga y Potencia perdida

Para el cálculo de pérdidas por fricción, primero se debe establecer el régimen del flujo (laminar o turbulento). Para esto, se halla el número de Reynolds para cada uno de los diámetros escogidos. El valor de la viscosidad cinemática (ν) considerado es de $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Así, se tiene para el diámetro de 2.90 m, por ejemplo, con velocidad media de 4.82 m/s:

$$R_e = \frac{4.82 \cdot 2.90}{1 \cdot 10^{-6}} = 13,988,073$$

Se procede de la misma manera con el resto de diámetros. La Tabla 4-1 resume el cálculo de las velocidades del flujo y clasificación del tipo de régimen según los resultados del número de Reynolds obtenidos mediante la ecuación (2.9).

Tabla 4-1 Velocidad y Número de Reynolds para diámetros de diseño

Diámetro (m)	2.60	2.70	2.80	2.90	3.00	3.10	3.20	3.30	3.40	3.50	3.60
Velocidad (m/s)	6.00	5.56	5.17	4.82	4.51	4.22	3.96	3.73	3.51	3.31	3.13
Número de Reynolds	15600000	15012000	14476000	13988073	13521804	13085617	12676691	12292549	11931003	11590118	11268170
Régimen de Flujo	Turbulento	Turbulento	Turbulento	Turbulento	Turbulento	Turbulento	Turbulento	Turbulento	Turbulento	Turbulento	Turbulento

Fuente: Propia

Como era de esperarse, el régimen de flujo se clasifica como “Turbulento” ($Re > 4000$), por lo que se requiere de la relación de Colebrook-White para el cálculo del coeficiente de fricción. Las Tablas 2-2 y 2-3 muestran valores recomendados para la rugosidad absoluta para distintos materiales de fabricación. A continuación, en la Tabla 4-2 se presenta aquellos valores escogidos para cada uno de las tuberías de diseño.

Tabla 4-2 Rugosidad absoluta para materiales de tubería

Tubería	Rugosidad absoluta ϵ o k (mm)
Acero	0.1 (en obra)
Fibra de Vidrio	0.01/0.029 (en obra)
HDPE	0.0007

Fuente: Propia.

El proceso para calcular el factor de fricción (f) es iterativo. Una vez obtenido, se reemplaza en la expresión de Darcy-Weisbach (2.11), junto con el resto de parámetros de diseño para cada uno de los materiales de tubería, obteniéndose el valor resultante de la pérdida por fricción. Por ejemplo, para el diámetro de 2.90 m en la tubería de acero se obtuvo un coeficiente de fricción de 0.0102. Reemplazando en la ecuación (2.11).

$$h_{fricción} = 0.0102 \cdot \frac{133.07}{2.9} \cdot \frac{4.82^2}{2 \cdot 9.81} = 0.56 \text{ m}$$

Para calcular las pérdidas locales, primero se considera el coeficiente de pérdida por contracción repentina (K_c). En este caso, las tuberías forzadas no presentan ni contracciones ni expansiones adicionales, aparte de la trifurcación en la entrada de la casa de máquinas, cuyo efecto es considerado por separado como pérdida por ramificación

(K_r), por la complejidad de las variables involucradas. Entonces, el valor para el coeficiente K_c será de 0.

Como coeficiente de pérdidas en la entrada (K_e), la cámara de carga alimenta a la conducción forzada mediante una entrada de boca de campana. Según la Figura 2-11, a este tipo de entrada le corresponde un coeficiente K_e de 0.04 (Chinyere et al., 2017)

Los coeficientes de pérdidas en codos (K_b) depende del ángulo de deflexión en cada uno de los anclajes de concreto. Existen dos codos, ambos ocurren a 45° con la horizontal. Para la simplificación de cálculos, se asume que la relación entre el radio de giro de los codos y el diámetro interno de la tubería es de $r/d = 3$. Utilizando la Tabla 2-5 se determinan los valores de K_b para cada codo, como se resumen en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3 Coeficiente K_b para cada codo

Codo	Deflexión	K_b
1	45°	0.30
2	45°	0.30
Total		0.60

Fuente: Propia.

Para el coeficiente de pérdida en válvula (K_v) se utilizará una válvula mariposa, por lo que su valor correspondiente es de 0.3. Finalmente, para el valor del coeficiente de pérdida por ramificación (K_r), se utiliza el valor recomendado por Mays et al. (1997), donde para el caso de trifurcaciones simétricas este es equivalente a 0.3.

El coeficiente de pérdida local resultante será la suma de cada uno de los contribuyentes mencionados anteriormente.

$$K_t = K_c + K_e + K_b + K_v + K_r = 0 + 0.04 + 0.6 + 0.3 + 0.3 = 1.24$$

Este valor se debe multiplicar por la carga de velocidad para cada uno de los diámetros escogidos, a fin de determinar su pérdida local, como se detalla en la ecuación (2.14). De este modo, para la tubería de acero de diámetro 2.90 m se tiene.

$$h_{locales} = Kt \cdot \frac{V^2}{2g} = 1.24 \cdot \frac{4.82^2}{2 \cdot 9.81} = 1.47 \text{ m}$$

$$H_f = 0.56 + 1.47 = 2.03 \text{ m}$$

La potencia perdida se halla con el valor obtenido de pérdida de carga total, permitiendo conocer la energía que se deja de generar debido a la carga que se disipa por fricción y por presencia de accesorios que alteran el flujo del agua. La eficiencia de las turbinas Francis y del generador se estiman con un valor de 0.85. Se utiliza la ecuación (2.29) para el cálculo. Seguidamente se muestra el resultado para la tubería de acero de diámetro 2.90 m.

$$P_l = 10^{-3} \cdot 9,810 \cdot 31.86 \cdot 2.03 \cdot 0.85 = 538.09 \text{ kW}$$

Como cada material posee un distinto valor de rugosidad absoluta, la pérdida por fricción será diferente para cada uno de ellos y en cada diámetro de diseño. Los resultados finales correspondientes a pérdida de carga para cada tubería se muestran en la Tabla 4-4.

Tabla 4-4 Resumen Pérdida de carga y potencia perdida

Díámetro (m)	2.60	2.70	2.80	2.90	3.00	3.10	3.20	3.30	3.40	3.50	3.60
Velocidad (m/s)	6.00	5.56	5.17	4.82	4.51	4.22	3.96	3.73	3.51	3.31	3.13
f	Acero	0.0103	0.0103	0.0102	0.0102	0.0101	0.0101	0.0101	0.01	0.01	0.01
	GRP	0.0088	0.0088	0.0088	0.0088	0.0088	0.0088	0.0088	0.0088	0.0088	0.0088
	HDPE	0.0076	0.0077	0.0077	0.0078	0.0078	0.0078	0.0079	0.0079	0.0079	0.008
Pérdida por fricción (m)	Acero	0.97	0.80	0.66	0.56	0.46	0.39	0.34	0.29	0.25	0.21
	GRP	0.83	0.68	0.57	0.48	0.40	0.34	0.29	0.25	0.22	0.19
	HDPE	0.71	0.60	0.50	0.42	0.36	0.30	0.26	0.23	0.19	0.15
Pérdidas locales (m)	2.28	1.96	1.69	1.47	1.28	1.13	0.99	0.88	0.78	0.69	0.62
Pérdidas totales (m)	Acero	3.24	2.76	2.35	2.03	1.75	1.52	1.33	1.16	1.02	0.91
	GRP	3.10	2.64	2.26	1.95	1.69	1.47	1.28	1.13	0.99	0.88
	HDPE	2.99	2.56	2.19	1.89	1.64	1.43	1.25	1.10	0.97	0.86
Potencia Perdida (kW)	Acero	861.65	732.73	625.23	538.09	464.34	403.77	352.74	308.74	272.01	240.57
	GRP	824.21	701.73	601.11	517.85	448.48	390.31	341.25	299.65	264.18	233.80
	HDPE	794.27	679.00	582.16	503.39	436.27	379.95	333.30	292.83	258.31	229.28

Fuente: Propia.

4.3 Costo Energía Perdida

Utilizando el valor de potencia perdida hallado para el rango de diámetros de cada material, se procede a calcular la energía perdida anual (E_p) mediante la ecuación (2.30), asumiendo un factor de planta (F_c) de 0.6. Se presenta el cálculo para la tubería de acero y diámetro de 2.90 metros.

$$E_p = 538.09 \cdot 10^{-3} \cdot 24 \cdot 365 \cdot 0.6 = 2,828.18 \text{ MWh}$$

En el Perú, el costo marginal de generación de energía (C_e) tiene como media anual un valor de 25 \$/MWh (Mejía, 2019). Por consiguiente, el costo de la energía perdida anual (C_{EP}) se calcula con la ecuación (2.31).

$$C_{EP} = 2,828.18 \cdot 25 = 70,704.46 \text{ US\$}$$

De la misma manera, el procedimiento se repite para el resto de diámetros en cada material de tuberías forzadas. En la Tabla 4-5 se resume el cálculo del costo de energía perdida de los distintos escenarios contemplados en el análisis.

Tabla 4-5 Energía perdida anual y costo de energía perdida anual

Diámetro (m)		2.60	2.70	2.80	2.90	3.00	3.10	3.20	3.30	3.40	3.50	3.60
Energía Perdida (MWh)	Acero	4,528.81	3,851.21	3,286.22	2,828.18	2,440.56	2,122.23	1,854.00	1,622.73	1,429.69	1,264.44	1,122.33
	GRP	4,332.06	3,688.30	3,159.45	2,721.81	2,357.19	2,051.47	1,793.62	1,574.95	1,388.53	1,228.83	1,091.40
	HDPE	4,174.67	3,568.83	3,059.84	2,645.83	2,293.05	1,997.03	1,751.82	1,539.11	1,357.66	1,205.10	1,070.78
Costo energía perdida (US\$)	Acero	113,220.18	96,280.24	82,155.42	70,704.46	61,013.93	53,055.83	46,350.00	40,568.31	35,742.19	31,610.95	28,058.18
	GRP	108,301.56	92,207.46	78,986.17	68,045.23	58,929.65	51,286.72	44,840.58	39,373.69	34,713.21	30,720.81	27,284.99
	HDPE	104,366.66	89,220.75	76,496.04	66,145.77	57,326.36	49,925.87	43,795.59	38,477.72	33,941.48	30,127.38	26,769.53

Fuente: Propia

4.4 Cálculo del golpe de ariete y determinación de clase de tubería

La sobrepresión transitoria en tuberías forzadas originada por el golpe de ariete puede llegar a ser bastante significativa. Es necesario hallar el tiempo crítico que diferencia un cierre lento de válvula de uno rápido. Para fines prácticos, se asumirá un tiempo de cierre de válvula (T_L) de 15 segundos, común en centrales hidroeléctricas de características similares. El tipo de cierre crítico se define con las inecuaciones (2.15) y (2.16). Así, para tuberías reforzadas con fibra de vidrio se cuenta con información técnica proporcionada

por el proveedor, donde se indica una velocidad de onda (C) de 360 m/s. Reemplazando en (2.16) se obtiene:

$$10 \text{ seg} > \frac{2L}{C} = \frac{2 \cdot 133.07}{360} = 0.74 \text{ seg} \quad \rightarrow \quad \text{Cierre lento}$$

El cálculo demuestra que se trata de un cierre lento por un margen bastante amplio, por ser la longitud total de tuberías relativamente pequeña, en comparación con otras centrales hidroeléctricas. Para el HDPE se calcula la velocidad de onda en base a la ecuación (2.18), Se utilizan los datos del proveedor para un diámetro de 3000 mm y un espesor comercial de 74 mm, según la norma DIN 16961 mencionada en el ANEXO B para tuberías de HDPE.

$$C = \frac{1400}{\sqrt{1 + \left(\frac{2.1 \cdot 10^9 \cdot 3}{23 \cdot 10^8 \cdot 0.074} \right)}} = 227 \text{ m/s}$$

Como el tiempo de cierre (T_L) de 15 segundos es mayor que ($2L/C = 1.17 \text{ seg}$) para el HDPE, entonces también se trata de un cierre lento. De la misma manera ocurre para el acero, cuya velocidad de onda suele ser superior a los 600 m/s para una relación de diámetro/espesor de la tubería similar a la analizada (Bentley, 2018).

Se determina que en todos los escenarios se trata de un cierre lento, por lo que se utiliza la ecuación de Michaud (2.19) para calcular el golpe de ariete. En el hipotético caso de considerar que la sobrepresión aumenta linealmente a lo largo de la tubería, la magnitud de esta resulta de aproximadamente 70% para el primer tramo y del 100% en el segundo, proporcional a la longitud de las tuberías que la onda debe recorrer de ida y vuelta. Sin embargo, por el lado de la seguridad se asumirá que esta se presenta con su valor máximo a lo largo de la enteridad de la tubería.

Se calcula la sobrepresión transitoria debido a este fenómeno haciendo uso de la ecuación (2.19), siguiendo con el ejemplo de la tubería de acero de 3.00 m de diámetro. Nótese que este cálculo es independiente de las especificaciones técnicas y características del material.

$$\Delta H = \frac{2 \cdot 133.07 \cdot 4.51}{9.81 \cdot 15} = 8.15 \text{ m}$$

La presión nominal (PN) debe ser mayor o igual a la máxima presión estática (P_s) en una sección de la tubería. Adicionalmente, para el caso del GRP el diseño contempla que la presión máxima (P_{\max}) exceda hasta en un 40% a la presión nominal (Flowtite, 2013). Se presenta un resumen del cálculo de golpe de ariete en la Tabla 4-6.

Tabla 4-6 Cálculo del golpe de ariete

Diámetro (m)	2.60	2.70	2.80	2.90	3.00	3.10	3.20	3.30	3.40	3.50	3.60
Golpe de ariete (m)	10.85	10.06	9.36	8.72	8.15	7.63	7.16	6.74	6.35	5.99	5.66

Fuente: Propia

4.5 Cálculo del espesor de tubería

El espesor se determina mediante la ecuación (2.22), donde un espesor adicional por corrosión admisible (t_{corr}) de 3 mm se considera únicamente para tuberías de acero (Stewart, 2021). En el caso de tuberías de GRP y HDPE se asume de manera práctica una eficiencia de junta (e) del 100%, como es el caso de uniones con acoples y por electrofusión respectivamente. Para el caso de tuberías de acero, el valor de la eficiencia suele variar entre el 80% y el 100%, por lo que en el caso de estudio se asumirá de 100%, para simplificar las operaciones.

Siguiendo con el ejemplo, la presión máxima por tramo de la tubería de 3000 mm de acero se presenta en la Tabla 4-7.

Tabla 4-7 Presión hidrostática y presión máxima por tramos para diámetro de 3000 mm

Tramo	Altura de agua	Presión hidrostática	Presión máxima
	(m)	(bar)	(bar)
1	16.72	1.64	2.44
2	45.08	4.42	5.22

Fuente: Propia

Dependiendo del material, en el mercado se encuentran espesores comerciales que cumplen con los requisitos de cada clase de tubería. Para el caso de la tubería de acero

ASTM A36 de 3000 mm y resistencia a tracción de 4200 kg/cm², el espesor mínimo para los dos tramos se presenta a continuación.

$$P_{max1} = P_{s1} + \Delta H_1 = 16.72 + 8.15 = 24.87 \text{ m. c. a.} = 2.44 \text{ bar} = 2.49 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_{max2} = P_{s2} + \Delta H_2 = 45.08 + 8.15 = 53.23 \text{ m. c. a.} = 5.22 \text{ bar} = 5.32 \text{ kg/cm}^2$$

$$t_{1min} = \frac{2.49 \cdot 3}{2 \cdot 4200 \cdot 1} \cdot 3 + 0.003 = 0.00567 \text{ m} = 5.7 \text{ mm}$$

$$t_{2min} = \frac{5.32 \cdot 3}{2 \cdot 4200 \cdot 1} \cdot 3 + 0.003 = 0.0087 \text{ m} = 8.7 \text{ mm}$$

Se elegirá entonces un espesor de 6 mm para el primer tramo (entre primer y segundo anclaje de concreto) y un espesor de 9.5 mm para el segundo tramo (entre segundo y tercer anclaje de concreto). El mismo procedimiento se realiza para cada diámetro, obteniéndose la Tabla 4-8.

Tabla 4-8 Espesores mínimos y comerciales para tuberías de acero

Diámetro (m)		2.60	2.70	2.80	2.90	3.00	3.10	3.20	3.30	3.40	3.50	3.60
e mínimo (mm)	Tramo 1	5.6	5.6	5.6	5.6	5.7	5.7	5.7	5.8	5.8	5.8	5.9
	Tramo 2	8.2	8.3	8.4	8.6	8.7	8.8	9.0	9.1	9.2	9.4	9.5
e comercial (mm)	Tramo 1	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
	Tramo 2	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5

Fuente: Propia.

En el caso de tuberías de GRP y HDPE, los espesores que se encuentran en el mercado se definen mediante el coeficiente SDR (Standard Dimension Ratio), que relaciona el diámetro interno de la tubería con el espesor. Dependiendo de las normas bajo las que se rigen las tuberías fabricadas por los proveedores y sus especificaciones técnicas como rigidez y presión nominal, estas se venden en espesores definidos para cada diámetro, garantizando el buen desempeño de la tubería bajo cargas convencionales y teniendo un factor de seguridad bajo consideración.

4.6 Costo Constructivo Tubería Forzada

4.6.1 Costo de tubería

Los costos de tuberías se pueden cotizar directamente con los proveedores para cada uno de los materiales de análisis. En el caso de tuberías de acero, los espesores de cada tramo de conducción pueden ser distintos. Es común considerar el costo del kilogramo de acero para posteriormente hacer un análisis de precios, aunque también se pueden cotizar directamente las tuberías de acero rolado. En base a los cálculos de espesor mínimo, el salto bruto de la central hidroeléctrica y las especificaciones técnicas más comunes para este tipo de materiales, se presentan las clases de tubería a utilizar a continuación:

- Tubería de Acero: ASTM A36
- Tubería de GRP: SN 5000 PN 6 bar
- Tubería de HDPE: RS6 PN 2.5 bar – 6 bar

Se realizaron los análisis de precios unitarios (APU's) para determinar el costo por metro lineal de tuberías. Para las tuberías de acero, se cotizaron espesores de 6 mm y 9.5 mm con la empresa FACMETAL, debido a que estos son los espesores comerciales más cercanos a los espesores mínimos por tramos calculados anteriormente. Ellos proporcionan tuberías de acero rolado ASTM A36 de 3 metros de longitud para diámetros de 2.60 metros y 3.00 metros, mientras que para diámetros de 3.60 metros ofrecen tuberías de 2.40 metros de largo. Los costos de los diámetros intermedios fueron extrapolados.

Para la mano de obra, se considera el costo de mano de obra vestida, que toma en cuenta el costo de alimentación, alojamiento, examen médico, capacitaciones, implementos de seguridad y demás gastos relacionados, debido a que la locación del proyecto es en el departamento de Huancavelica. También se considera el costo de transporte de tuberías hacia el lugar de obra, cuya distancia media en carretera desde Lima es de 450 km. Los APU's detallados se presentan en el ANEXO C.

De los cálculos mostrados en la tabla (4.8) se determina que, para la tubería de acero, es posible construir el primer tramo con tuberías de 6 mm de espesor y el segundo con tuberías de 9.5 mm de espesor. El costo por metro lineal estimado de los APU's para un diámetro de 3 metros en $e = 6$ mm es de 1,669.66 US\$ y en $e = 9.5$ mm es de 2,637.68

US\$. Entonces, el costo de suministro e instalación correspondiente se calcula mediante el producto de los costos unitarios y la longitud de cada tramo.

$$C_{tub} = 1,669.66 \cdot 92.99 + 2,637.68 \cdot 40.08 = 260,979.9 \text{ US\$/m}$$

El procedimiento se realiza de manera análoga para las tuberías de los otros materiales. En el caso de tuberías de GRP, se cotizó con la empresa Flowtite. Las tuberías se venden en longitudes de 5.80 metros de longitud, con un acople por tubería para la unión. La fábrica O-TEK CENTRAL se encuentra en Colombia, por lo que la cotización incluye el costo de seguros, embalaje y transporte, de donde se obtiene un costo CIF Callao, por ser el puerto más cercano.

Las tuberías de HDPE fueron cotizadas con la empresa Krah, al ser los proveedores más próximos de tuberías forzadas de este material y para los diámetros solicitados. Por sugerencia de ellos, recomienda utilizar otro material como el acero o GRP para la construcción de la conducción forzada del proyecto, pues para el segundo tramo en particular no existe en Sudamérica tecnología común para la unión por electrofusión en estos grandes diámetros y por tramos tan cortos. De todos modos, proporcionaron una cotización de HDPE estructurada RS6 PN 2.5, que podría ser utilizada solamente para el primer tramo.

Para fines comparativos entre los materiales del análisis, se realiza el análisis de precios unitarios de esta tubería. La Tabla 4-9 presenta lado a lado los costos de tuberías en distintos materiales (Acero, GRP y HDPE) exclusivamente para el primer tramo.

Tabla 4-9 Comparación Precio en US\$ por metro lineal

Material	Diámetro (m)		
	2.60	2.80	3.00
Acero (6 mm)	1,555.69	1,612.68	1,669.66
Acero (9.5 mm)	2,283.82	2,460.75	2,637.68
GRP	2,643.87	2,880.39	3,309.88
HDPE	2,741.48	3,011.32	3,298.17

Fuente: Propia.

Los precios unitarios del HDPE son similares a los del GRP, aunque es importante mencionar que una comparación directa entre los dos resulta injusta, ya que con la tubería de HDPE cotizada solo se puede construir el primer tramo, por lo que evidentemente una

tubería de mayor presión nominal para el segundo tramo resultaría en un mayor costo por metro lineal, sin olvidar que esta tubería sería imposible de construir por las limitaciones de maquinaria disponible en la región. Por ende, la alternativa de HDPE queda descartada del análisis.

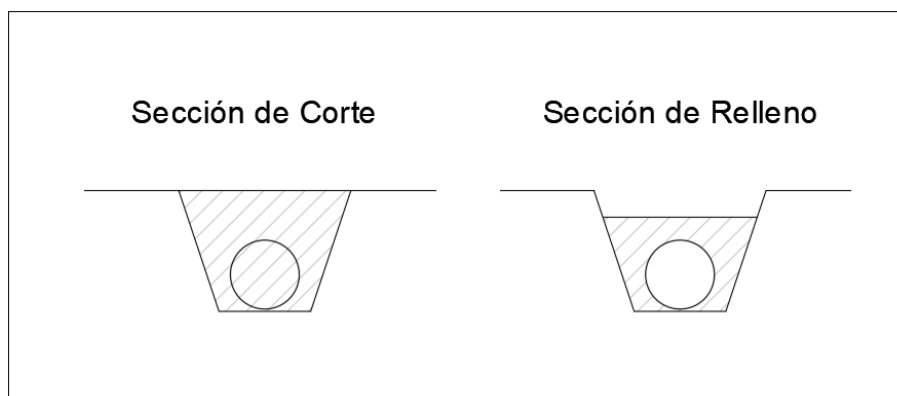
4.6.2 Costo de excavación

Las tuberías de acero o fibra de vidrio irán enterradas en su primero tramo (entre el 1er y 2do anclaje) y del segundo anclaje en adelante se encontrarán expuestas. Estas tuberías deben ir enterradas al menos 1 metro por debajo del suelo. Las secciones de corte y relleno son de forma trapezoidal, con la base inferior siendo equivalente a un metro más que el diámetro de la tubería.

Se debe realizar un solado en el caso de la tubería de acero, principalmente para evitar que esta se encuentre en contacto directo con el terreno y prevenir su deterioro. Este solado no es necesario en el caso de tuberías de GRP. Además, a lo largo de la zanja se debe colocar una cama de arena el fondo de un espesor de 10 cm.

La pendiente del talud considerada es de 3:1 (V:H), y la zanja deberá rellenarse como se muestra en el detalle de la figura 4-1. el fondo de zanja es 1 metro más ancho que el diámetro de la tubería. Por encima de la tubería hay una capa de relleno de 1 metro para los diámetros desde 2.60 metros hasta 3.00 metros. Para valores más altos, la capa es de 0.33 veces el diámetro de la tubería. En la Figura 4-1 se muestra una imagen del perfil típico de corte y de relleno de la zanja.

Figura 4-1 Sección típica de corte y de relleno



Fuente: Propia.

Para determinar los volúmenes estimados de corte, se realiza un perfil longitudinal para el alineamiento donde se ubicará la central hidroeléctrica, adjunto en el ANEXO A. Luego, se grafica la altura de corte, cuyo valor es la diferencia entre la cota del terreno y la cota de rasante. El producto de este valor y la base media del trapecio de corte permite obtener el área de corte.

Considerando tramos de 20 metros, se calcula el volumen de corte requerido para el trapecoide resultante. Se asume un volumen de material suelto de 80% y un volumen de roca suelta del 20%, según información geológica de la zona. El costo de excavación para la misma tubería de acero de 3.00 metros de diámetro se muestra en la Tabla 4-10.

Tabla 4-10 Costo de excavación tuberías de acero $d = 3.00$ m

Partidas	Metrado	Und.	Precio Unitario (US\$)	Costo (US\$)
Exc. Material Suelto	4,097.58	m3	7.11	29,122.19
Exc. Roca Suelta	1,024.39	m3	17.85	18,281.31
Relleno	1,958.61	m3	15.93	31,210.19
Eliminación Exc.	3,163.36	m3	3.78	11,945.77
Cama de Arena	55.09	m3	15.35	845.57
C_{exc} Total				91,405.02

Fuente: Propia.

El resumen de costos de excavación, donde se incluye excavación de material suelto, roca suelta, eliminación de excedente, relleno y cama de arena, se muestra más adelante en la Tabla 4-12.

4.6.3 Costo del concreto

Se utilizan anclajes de concreto usualmente en cambios de pendiente de tuberías forzadas, para contrarrestar los esfuerzos generados por el propio peso del agua y de la tubería, la presión del agua en el codo, fricción del suelo, etc. (Sundberg, 2013). Adicionalmente, en el caso de tuberías expuestas se suelen colocar apoyos de concreto, para evitar deslizamientos laterales de la conducción forzada.

En la pequeña central hidroeléctrica Mantaro es necesario construir un anclaje en la entrada a la tubería a presión, otro en el cambio de pendiente y uno último previo a la

llegada a la casa de máquinas. Como el segundo tramo de la tubería se encuentra expuesto, se colocarán 3 apoyos espaciados 10 metros uno del otro que sirvan de soporte.

El volumen de los bloques de concreto será estimado en base a las dimensiones de las tuberías y las cargas involucradas. El ratio de acero en concreto armado es de 30 kg/m³ y el de encofrados es de 1.2 m²/m³. El costo del concreto (C_{con}) para la tubería de acero de 3.00 m. de diámetro se presenta en la Tabla 4-11.

Tabla 4-11 Costo de concreto tuberías de acero d = 3.00 m

Partidas	Metrado	Und.	Precio Unitario (US\$)	Costo (US\$)
Concreto f'c 100 kg/cm ² - solado	167.78	m ³	128.25	21,518.30
Concreto f'c 210 kg/cm ²	310.76	m ³	216.31	67,219.55
Encofrado y desencofrado	372.91	m ²	38.50	14,356.91
Acero f'y 4200 kg/cm ²	9,322.67	kg	2.02	18,831.79
C_{con} Total				121,926.54

Fuente: Propia.

Los demás costos finales de las obras de concreto requeridas para la conducción forzada en los diámetros y materiales de análisis se presentan en la Tabla 4-12.

4.6.4 Costo de mantenimiento

El costo de mantenimiento para tuberías forzadas representa una porción del costo de tuberías. Se utiliza un porcentaje del 13% para tuberías de acero (Mosonyi, 1965) y un porcentaje de 10% para tuberías de fibra de vidrio, pues las propiedades del material hacen que se preserve de mejor manera. Se presenta el cálculo para una tubería de 3.00 m. de diámetro de acero utilizando la ecuación (2.29).

$$C_{mant} = 260,979.9 \cdot 0.13 = 33,927.4 \text{ US\$}$$

Finalmente, el costo constructivo total (C_{total}) para este diámetro de la tubería de acero resulta equivalente a la suma de todas las partidas calculadas anteriormente. Mediante la ecuación (2.23) se obtiene el siguiente resultado.

$$C_{total} = 260,979.9 + 90,785.3 + 104,013.77 + 33,927.4 = 489,706.4 \text{ US\$}$$

El costo de Amortización Anual (A_m), que considera una tasa de amortización del 12% y un periodo de vida útil de 25 años, valores conservadores en proyectos de pequeñas centrales hidroeléctricas, ya que estos suelen rondar los 40-60 años de vida útil (Water Power Magazine, 2010). Se realiza el cálculo haciendo uso de la ecuación (2.24).

$$A_m = \frac{489,706.4 \cdot 0.12 \cdot (1 + 0.12)^{25}}{(1 + 0.12)^{25} - 1} = 62,437.6 \text{ US\$}$$

La suma del costo de Amortización Anual (A_m) y el Costo de Energía Perdida Anual (C_{EP}) dan como resultado el Costo Total Anual (C_T), como se menciona en la ecuación (2.33). El resultado del ejemplo se muestra a continuación.

$$C_T = 62,437.6 + 61,013.9 = 123,451.5 \text{ US\$}$$

El resumen detallado de todos los costos calculados para las alternativas de análisis se presenta en la Tabla 4-12.

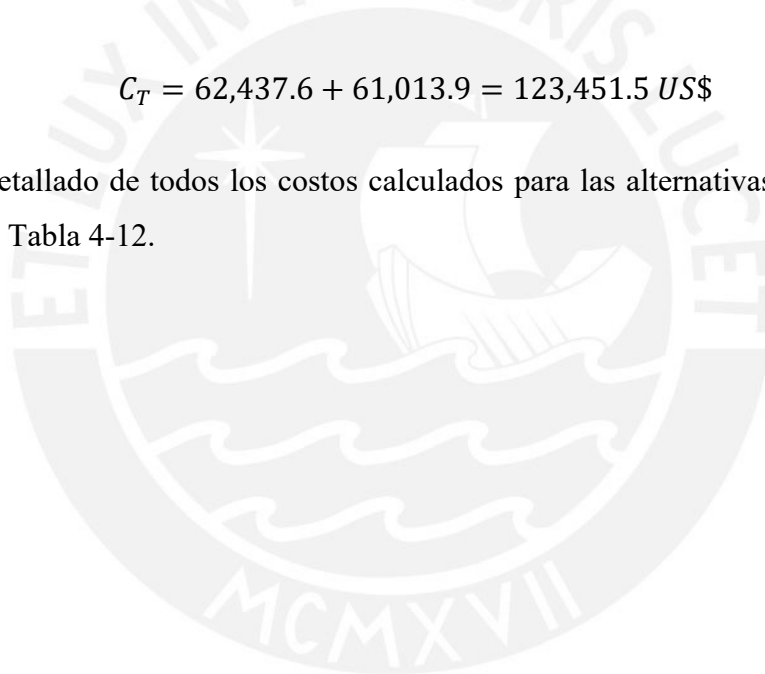


Tabla 4-12 Resumen de costos para alternativas de tuberías forzadas por diámetros

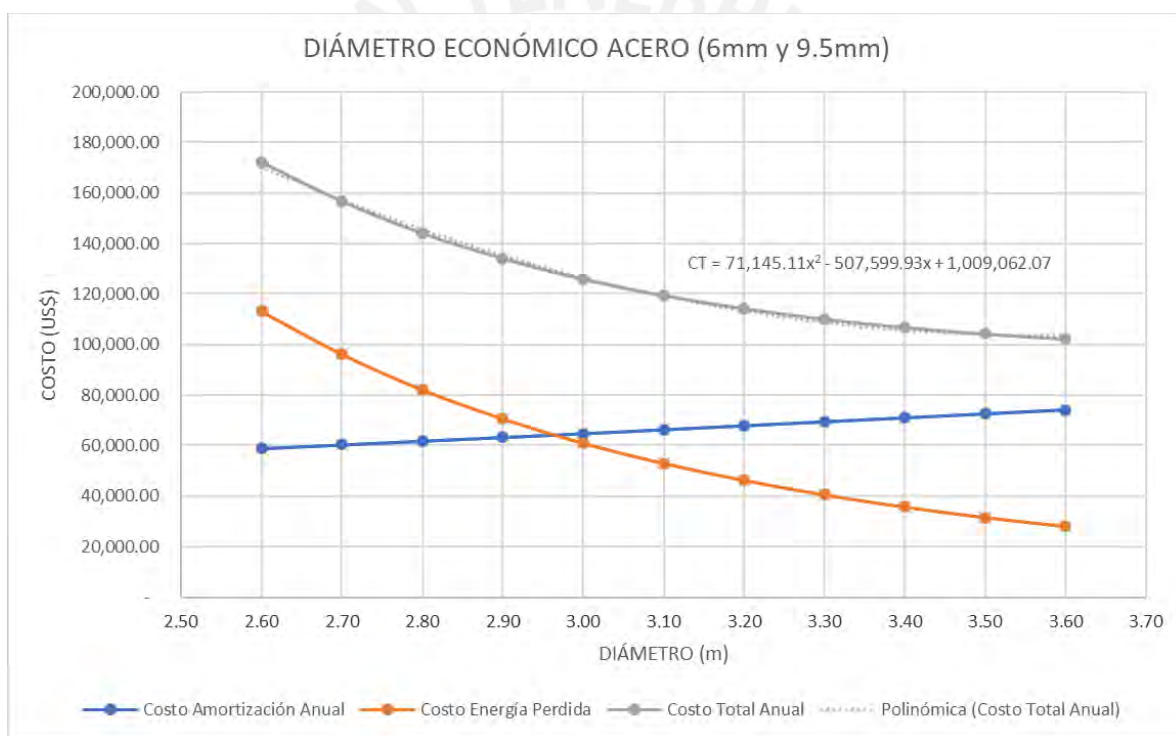
Concepto	Alternativa	Unidad	2.60	2.70	2.80	2.90	3.00	3.10	3.20	3.30	3.40	3.50	3.60
Suministro e Instalación	Acero (6mm y 9.5mm)	US\$	236,199.12	242,394.31	248,589.51	254,784.70	260,979.90	267,874.82	274,769.75	281,664.68	288,559.60	295,454.53	302,349.46
	Acero (9.5mm)	US\$	303,907.93	315,679.96	327,452.00	339,224.04	350,996.08	361,778.30	372,560.51	383,342.73	394,124.95	404,907.17	415,689.39
	GRP	US\$	351,819.78	367,556.64	383,293.50	411,869.61	440,445.73	-	-	-	-	-	-
Mantenimiento	Acero (6mm y 9.5mm)	US\$	30,705.89	31,511.26	32,316.64	33,122.01	33,927.39	34,823.73	35,720.07	36,616.41	37,512.75	38,409.09	39,305.43
	Acero (9.5mm)	US\$	39,508.03	41,038.40	42,568.76	44,099.13	45,629.49	47,031.18	48,432.87	49,834.56	51,236.24	52,637.93	54,039.62
	GRP	US\$	35,181.98	36,755.66	38,329.35	41,186.96	44,044.57	-	-	-	-	-	-
Excavación	Acero (6mm y 9.5mm)	US\$	78,418.19	81,664.90	84,911.61	88,158.32	91,405.02	95,039.22	98,673.42	102,307.61	105,941.81	109,576.01	113,210.21
	Acero (9.5mm)	US\$	78,418.19	81,664.90	84,911.61	88,158.32	91,405.02	95,039.22	98,673.42	102,307.61	105,941.81	109,576.01	113,210.21
	GRP	US\$	78,418.19	81,664.90	84,911.61	88,158.32	91,405.02						
Concreto	Acero (6mm y 9.5mm)	US\$	117,029.00	118,253.38	119,477.77	120,702.16	121,926.54	122,675.31	123,424.08	124,172.85	124,921.62	125,670.39	126,419.16
	Acero (9.5mm)	US\$	117,029.00	118,253.38	119,477.77	120,702.16	121,926.54	122,675.31	123,424.08	124,172.85	124,921.62	125,670.39	126,419.16
	GRP	US\$	97,232.17	98,285.90	99,339.62	100,393.35	101,447.07						
Costo Total (US\$)	Acero (6mm y 9.5mm)	US\$	462,352.19	473,823.86	485,295.52	496,767.19	508,238.85	520,413.09	532,587.32	544,761.55	556,935.79	569,110.02	581,284.26
	Acero (9.5mm)	US\$	538,863.15	556,636.64	574,410.14	592,183.64	609,957.13	626,524.01	643,090.88	659,657.76	676,224.63	692,791.51	709,358.38
	GRP	US\$	562,652.12	584,263.10	605,874.08	641,608.24	677,342.40						
Amortización Anual (US\$)	Acero (6mm y 9.5mm)	US\$	58,949.89	60,412.53	61,875.16	63,337.80	64,800.44	66,352.65	67,904.87	69,457.08	71,009.30	72,561.51	74,113.73
	Acero (9.5mm)	US\$	68,705.04	70,971.16	73,237.28	75,503.40	77,769.52	79,881.79	81,994.07	84,106.34	86,218.62	88,330.90	90,443.17
	GRP	US\$	71,738.13	74,493.53	77,248.93	81,805.03	86,361.14	-	-	-	-	-	-
Costo Energía Perdida Anual (US\$)	Acero (6mm y 9.5mm)	US\$	113,220.18	96,280.24	82,155.42	70,704.46	61,013.93	53,055.83	46,350.00	40,568.31	35,742.19	31,610.95	28,058.18
	Acero (9.5mm)	US\$	113,220.18	96,280.24	82,155.42	70,704.46	61,013.93	53,055.83	46,350.00	40,568.31	35,742.19	31,610.95	28,058.18
	GRP	US\$	108,301.56	92,207.46	78,986.17	68,045.23	58,929.65						
Costo Total Anual (US\$)	Acero (6mm y 9.5mm)	US\$	172,170.07	156,692.77	144,030.58	134,042.26	125,814.37	119,408.48	114,254.87	110,025.39	106,751.49	104,172.46	102,171.91
	Acero (9.5mm)	US\$	181,925.21	167,251.40	155,392.69	146,207.86	138,783.45	132,937.62	128,344.07	124,674.65	121,960.81	119,941.84	118,501.36
	GRP	US\$	180,039.69	166,700.99	156,235.09	149,850.26	145,290.79	-	-	-	-	-	-

Fuente: Propia.

4.7 Cálculo del Diámetro Económico

Una vez realizados los cálculos de los costos de tuberías (costo de energía perdida anual, amortización anual y costo total anual), se procede a graficar las curvas con los valores resultantes de los costos correspondientes a los diámetros de análisis y para cada una de las alternativas. Las Figuras 4-2, 4-3 y 4-4 presentan las curvas de costos para la alternativa de tuberías forzadas de acero con el primer tramo de espesor de 6 mm y el segundo de 9.5 mm, la de acero con espesor constante de 9.5 mm y la de fibra de vidrio, respectivamente.

Figura 4-2 Curva de diámetro óptimo de tuberías de acero de 6mm y 9.5mm



Fuente: Propia.

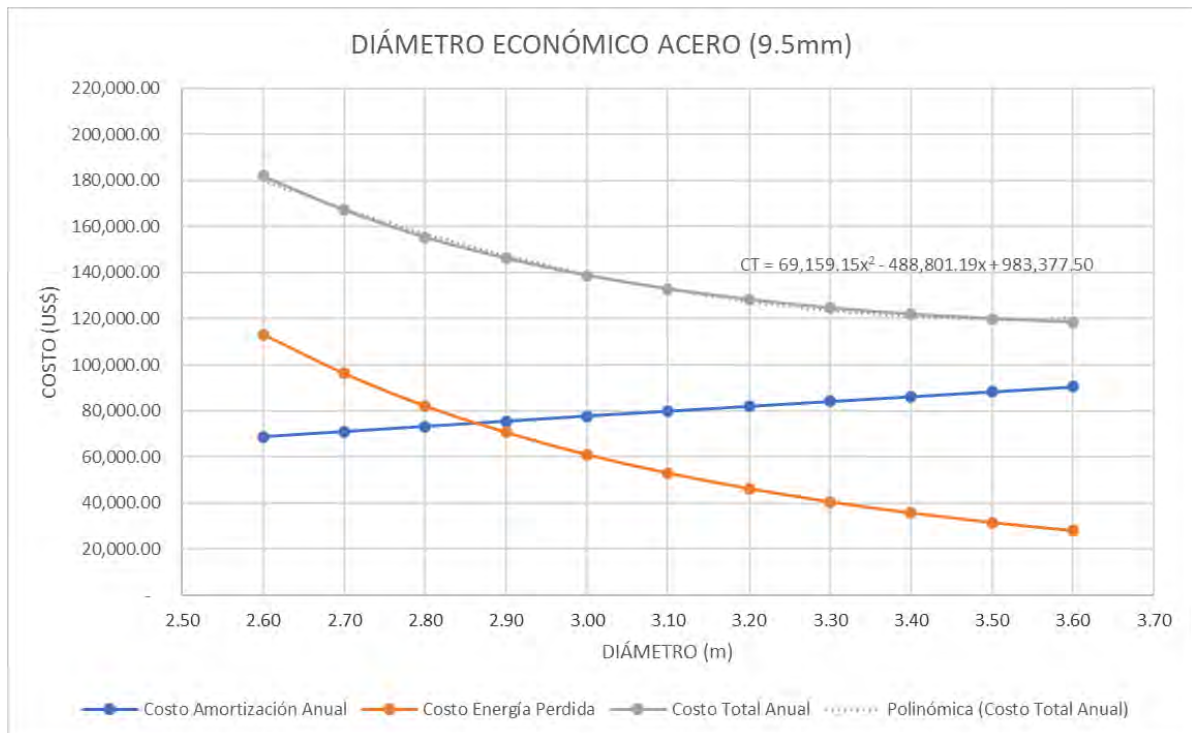
La elaboración de esta gráfica permite determinar el diámetro económicamente óptimo, que por definición es aquel que genera el menor costo total anual de la central hidroeléctrica. De este modo, se recurre a la expresión (2.34), donde se reemplaza la ecuación de la curva del costo total (C_T) obtenida de la curva.

$$\frac{\delta C_T}{\delta D} = \frac{\delta(71,145.11x^2 - 507,599.93x + 1,009,062.07)}{\delta D} = 0 \rightarrow D_E = 3.57 \text{ m}$$

El diámetro económico calculado resulta de 3.57 metros. Se elige entonces el valor próximo más cercano disponible en el mercado, que corresponde a un diámetro de 3.60 metros. Para esta alternativa, el espesor de la tubería será de 6 mm en el primer tramo y de 9.5 mm en el segundo tramo.

Siguiendo el mismo procedimiento, se genera la curva para la alternativa de tuberías forzadas de acero ASTM A36 con espesor uniforme de 9.5mm.

Figura 4-3 Curva de diámetro óptimo de tuberías de acero uniforme de 9.5mm



Fuente: Propia.

El diámetro económico para esta alternativa se halla reemplazando la ecuación de la curva en la fórmula (2.34).

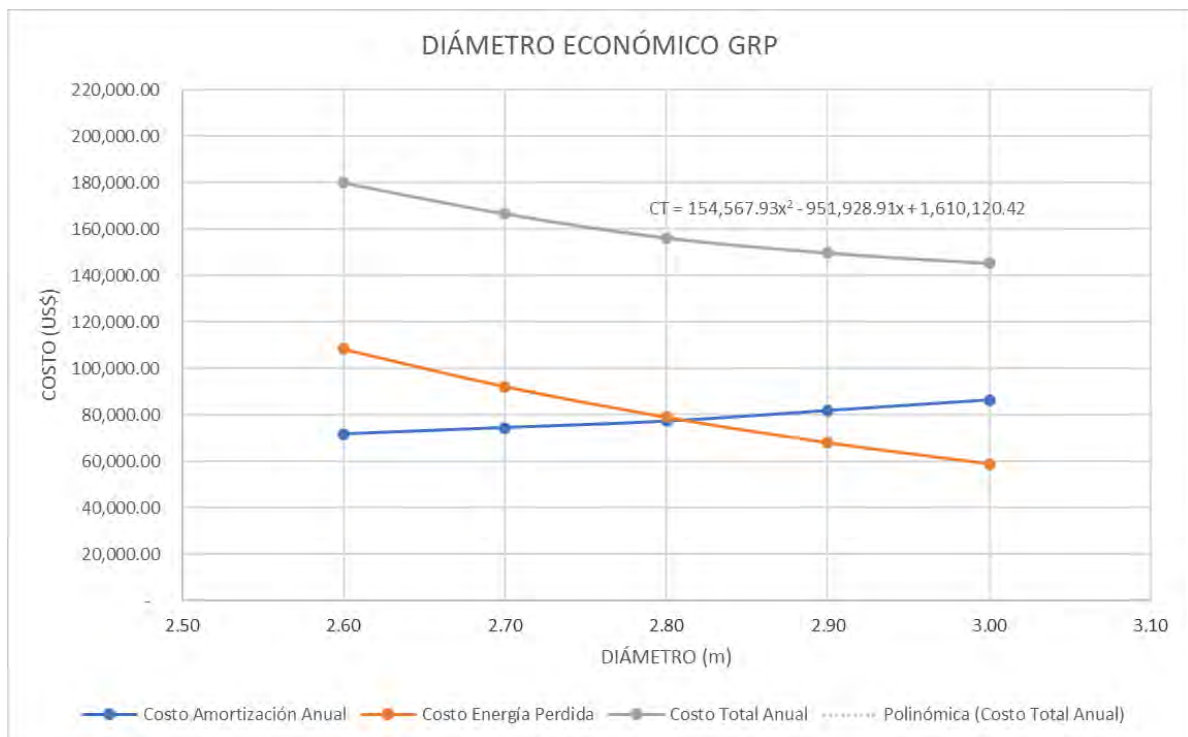
$$\frac{\delta C_T}{\delta D} = \frac{\delta(69,159.15x^2 - 488,801.19x + 983,377.50)}{\delta D} = 0 \rightarrow D_E = 3.53 \text{ m}$$

El resultado para el diámetro económico es de 3.53 m. Si bien este resultado podría sugerir que el diámetro económico comercial más próximo es el de 3.50 m, en las tablas presentadas anteriormente se cuenta con información contable que evidencia que el

diámetro de 3.60 m es de hecho el más barato. Esto se debe a que el ajuste polinómico obtenido de la curva es una proyección continua de una curva de diámetros, por lo que existen ligeras variaciones, aunque casi siempre despreciables, entre esta y la curva real.

De igual modo se procede con la alternativa que contempla tuberías de fibra de vidrio (GRP).

Figura 4-4 Curva de diámetro óptimo de tuberías de fibra de vidrio



Fuente: Propia.

Valores mayores a 3.0 m de diámetro no se suelen producir industrialmente para tuberías de GRP, por lo que solo se analizan diámetros entre los 2.6 m y 3.0 m. La curva obtenida para el costo total se deriva con respecto al diámetro y se iguala a cero, obteniendo el diámetro económico respectivo.

$$\frac{\delta C_T}{\delta D} = \frac{\delta(154,567.93x^2 - 951,928.91x + 1,610,120.42)}{\delta D} = 0 \rightarrow D_E = 3.07 \text{ m}$$

El diámetro económico teórico para las tuberías reforzadas con fibra de vidrio es de 3.07 metros, por lo que el diámetro comercial disponible que más se acerca es el de 3.00

metros, con un espesor de 55 mm estándar para el diámetro según las especificaciones del producto proporcionado por el proveedor.

Se realiza un cuadro resumen donde se presenta, para cada diámetro económico de cada alternativa, el costo de energía perdida, amortización anual y costo total anual. En la Tabla 4-13 se presenta el resumen de los resultados.

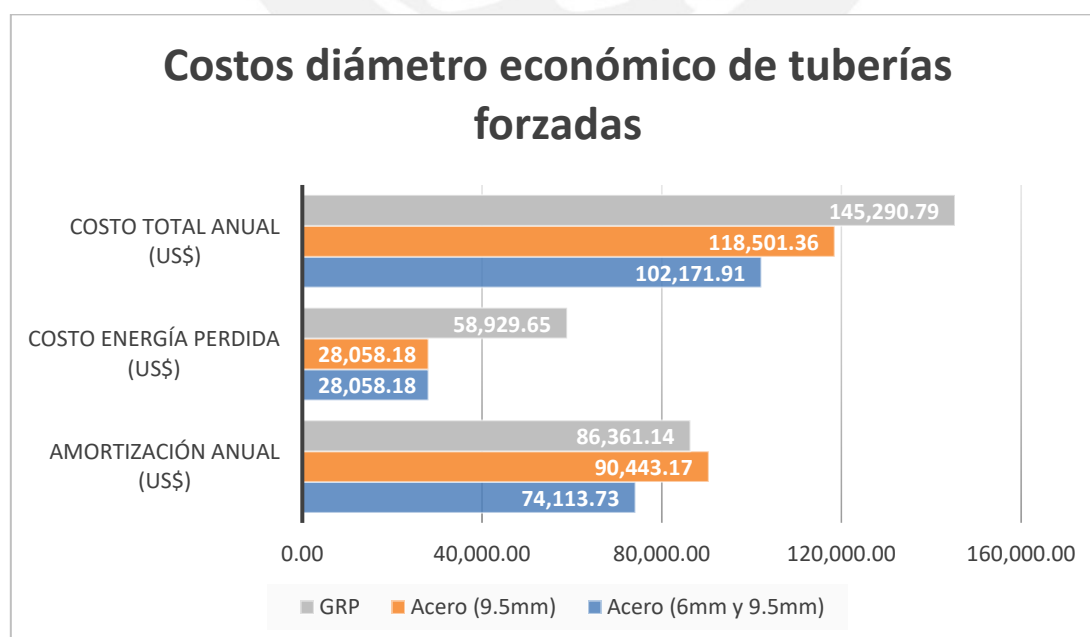
Tabla 4-13 Costo de tuberías forzadas para diámetros económicos

Alternativa	Diámetro Económico (m)	Amortización Anual (US\$)	Costo Energía Perdida (US\$)	Costo Total Anual (US\$)
Acero (6mm y 9.5mm)	3.60	71,649.54	28,058.18	102,171.91
Acero (9.5mm)	3.60	87,978.99	28,058.18	118,501.36
GRP	3.00	84,412.16	58,929.65	145,290.79

Fuente: Propia.

La comparación entre costos se aprecia de mejor manera mediante el gráfico de la Figura 4-5, donde se puede evidenciar claramente que el costo total anual de la alternativa de tubería forzada construida de acero comercial ASTM A36 cuyo primer tramo tiene un espesor de 6 mm y el segundo tramo de 9.5 mm, resulta ser el menor de entre las alternativas de materiales investigados para la central hidroeléctrica de interés.

Figura 4-5 Gráfico comparativo de costos de tuberías forzadas en su diámetro económico



Fuente: Propia.

Es importante mencionar que el diseño de la alternativa de acero más económica cumple por poco con las normas de diseño de la ASCE y el factor de seguridad sugerido de 3, específicamente hablando del espesor de 6 cm en el primer tramo de la tubería. Por lo mismo, una empresa constructora de carácter más conservador podría optar por realizar la tubería con la alternativa de acero de espesor uniforme de 9.5 mm.

El costo de inversión total para la construcción de esta tubería forzada (C_{total}), equivalente a aquel que se incluye en el presupuesto para una licitación o dentro de un estudio de prefactibilidad, contempla los costos del suministro e instalación de tuberías, costos de excavación, costo del concreto y costos de mantenimiento, como se menciona en la ecuación (2.23). En la Tabla 4-14 se resumen los costos constructivos totales de las tuberías forzadas para los diámetros económicos de diseño.

Tabla 4-14 Costo constructivo de tuberías forzadas

Alternativa	Diámetro Económico (m)	Costo Constructivo (US\$)
Acero (6mm y 9.5mm)	3.60	581,284.26
Acero (9.5mm)	3.60	709,358.38
GRP	3.00	677,342.40

Fuente: Propia

Nótese que, a pesar de que el costo constructivo de la tubería a presión de GRP es menor en comparación al de la tubería de acero con espesor enteramente uniforme de 9.5 mm, al incluir el efecto del costo de energía perdida anual la figura se invierte, pues el costo total anual de la tubería de GRP se convierte en la alternativa más costosa, por lo tanto, en la alternativa que representa el menor costo/beneficio para la pequeña central hidroeléctrica Mantaro.

5 CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

Tras la realización del diseño hidráulico de la conducción forzada mediante el criterio del diámetro económicamente óptimo para cada uno de los materiales de la investigación, se determina que el material de fabricación del equipo hidromecánico del cual se obtiene el mayor beneficio económico, considerando el costo constructivo y generación energética, corresponde a la tubería forzada de acero con tramos de 6mm y 9.5mm de espesor.

La disponibilidad de un mayor rango de diámetros que se encuentran en el mercado del acero permite utilizar tuberías superiores a los 3000 mm de diámetro interno sin un aumento exagerado del costo de fabricación de estas, a diferencia de las tuberías de GRP y HDPE, donde se debe solicitar un pedido especial si se desean obtener diámetros más grandes al mencionado. Para el caso de estudio en particular, un diámetro mayor en la tubería de acero se traduce en una reducción importante de la pérdida de energía anual, dándose como resultado una disminución del costo total anual como consecuencia de la diferencia de pérdidas en las tuberías con respecto a las otras alternativas.

A modo de comparación, la Tabla 5-1 representa el aporte o porcentaje de participación de los distintos componentes que forman parte del costo total anual para las tuberías forzadas de la pequeña central hidroeléctrica Mantaro, diseñadas en con su diámetro económico correspondiente.

Tabla 5-1 Porcentaje de participación de tuberías forzadas para diámetros económicos

	Alternativas		
	Acero (6mm y 9.5mm)	Acero (9.5mm)	GRP
Equipo hidromecánico	37.73%	44.73%	38.65%
Mantenimiento	4.90%	5.81%	3.87%
Movimiento de Tierras	14.13%	12.18%	8.02%
Obras de Concreto	15.78%	13.60%	8.90%
Energía Perdida	27.46%	23.68%	40.56%

Fuente: Propia

La mayor diferencia entre las distintas alternativas radica principalmente en el costo de energía perdida, cuyo resultado se debe al ahorro en pérdidas por fricción que trae consigo

un diámetro de diseño mayor. Adicionalmente, existe una pequeña variación en el costo de movimiento de tierras y obras de concreto entra la alternativa de fibra de vidrio y las alternativas de acero, pues los volúmenes de estos se ven mermados por el tamaño menor de las tuberías.

Se debe mencionar que los espesores comerciales disponibles para las tuberías de GRP y HDPE son invariables para la clase de tubería y diámetro elegido, por lo que en el caso del primer tramo de la tubería existe un sobredimensionamiento en cuanto al espesor necesario para soportar los efectos de presión hidrostática y golpe de ariete, ya que no se fabrican espesores variables para estas tuberías.

Las tuberías de GRP pueden llegar a resultar más económicas que las de acero en centrales hidroeléctricas que cuenten con un mayor salto bruto, ya que la presión resultante en la conducción obligaría a construir tuberías con espesores mayores. Un caso que ejemplifica lo mencionado es el de la central hidroeléctrica Hidromanta, donde con un caudal de diseño de 6.00 m³/s y una altura bruta de 407 m se optó por construir la tubería forzada de GRP (TDM, 2019).

Tuberías de HDPE y PVC no dejan de ser alternativas interesantes para mini y pequeñas centrales hidroeléctricas, donde las condiciones del proyecto y disposición de los proveedores locales posibiliten una reducción significativa de los costos, aprovechando el ahorro de energía que se puede obtener de materiales menos rugosos y de mayor eficiencia en cuanto a generación energética como estos.

Entre los años 2018 y 2020, la importación de la industria de plástico en el Perú se ha reducido en una medida importante como se puede observar en la Tabla 5-2, resultando de particular interés para la presente investigación la evolución de las importaciones del polietileno de alta densidad (HDPE) y el Policloruro de vinilo (PVC).

Tabla 5-2 Importaciones de la industria de plástico por producto en el Perú, en millones US\$ CIF

Partida	Descripción	2018	2019	2020
3902100000	Polímeros de polipropileno	280.4	215.5	196.8
3901200000	Poliétileno de densidad mayor o igual a 0.94	226.8	176.9	168.9
3926909090	Demás manufacturas de plásticos	128.2	139.3	150.9
3901100000	Poliétileno de densidad menor a 0.94	205.7	153.2	150.8
3904102000	Policloruro de vinilo por polimerización en suspensión	129.5	127.8	107.5
3907619000	Demás productos de Politereftalato de etileno	160.1	152.6	97.4
3902300000	Copolímeros de propileno	103.2	87.5	75.1
3906909000	Demás polímeros acrílicos	42.1	43.0	40.4
3919909000	Demás placas, láminas, hojas y tiras de formas planas	45.0	47.7	38.8
3907699000	Demás productos de Politereftalato de etileno	42.8	40.0	36.2
3901400000	Copolímeros de etileno y alfa-olefina densidad menor a 0,94	20.7	22.8	34.3
3920100000	Demás placas, láminas, hojas y tiras de polímeros de etileno	33.9	32.1	33.0
3924109000	Demás vajillas y artículos para el servicio de mesa o cocina	32.0	32.0	28.4
3907203000	Poliéteres polioles derivados del óxido de propileno	24.4	23.1	28.4
3923509000	Demás tapones, tapas, cápsulas y dispositivos de cierre	27.5	29.2	27.9
Resto de partidas		746.7	766.2	711.1
Total		2249	2089	1926

Fuente: INEI (2021)

La disminución en importaciones de productos de plástico puede atribuirse al reciente desarrollo de plantas de producción de plástico a nivel nacional, como el Grupo Hidráulica con su nueva planta de HDPE en Lurín (Trigroso, 2022), por lo que en los próximos años se podría esperar que el crecimiento de esta industria amplíe el abanico de posibilidades para conseguir tuberías forzadas de HDPE, GRP y PVC de distintos diámetros y características, sin tener la necesidad de importar estos elementos y, en consecuencia, disminuyendo los costos de inversión en proyectos que contemplen estos materiales como alternativa para tuberías forzadas.

7 CAPÍTULO 6: RECOMENDACIONES

Es probable que para centrales hidroeléctricas con un menor caudal de diseño los resultados de la investigación se vean revertidos, pues los diámetros de las tuberías forzadas en general serán menores y parecidos entre las distintas alternativas, por lo que el costo constructivo de las tuberías adquiere una mayor relevancia en cuanto a su influencia en el costo de amortización, a diferencia del costo de energía perdida.

En esta investigación se diseñan tuberías forzadas de diámetro uniforme e invariable, aunque este no siempre es el caso. Es recomendable contemplar la posibilidad del uso de tuberías telescópicas para el diseño del equipo hidromecánico bajo ciertas condiciones, ya que estas varían el tamaño de su diámetro interno a lo largo de su extensión, por lo que se pueden generar un ahorro del costo total de encontrarse un equilibrio entre costo constructivo y costo de energía perdida.

Las tuberías forzadas de GRP y HDPE que se utilizan en el Perú se suelen importar de países vecinos como Colombia y Chile, puesto que no se cuentan con plantas locales importantes que fabriquen este tipo de tuberías en los grandes diámetros necesarios para optimizar el diseño. Esto desemboca en elevados costos de importación de las mismas, factor determinante que motiva a inversionista a optar por otras opciones más económicas. El crecimiento de la industria local mediante la implementación de plantas importantes de GRP se puede traducir en la reducción de costos, potencialmente desplazando al acero como material predilecto para pequeñas centrales hidroeléctricas.

Se sugiere que los resultados de esta investigación se utilicen como precedente para futuras investigaciones sobre centrales hidroeléctricas con características de diseño similares. Es indispensable actualizar el valor de costo de producción de energía, proporcionado por el Osinergmin para el año 2019, así como el valor de las cotizaciones de las tuberías obtenidas durante el periodo de investigación, pues la constante fluctuación de la economía está sujeta a las decisiones de inversión y podría modificar los resultados obtenidos.

8 REFERENCIAS

Aboitiz Power Corporation (2019). Run-of-River Hydro. Recuperado de: <https://aboitizpower.com/generation/run-of-river-hydro/>

Aguirre, C. & Ramirez, R. (2014). Head analysis in symmetrical trifurcations of penstock – high pressure pipelines systems CFD. Universidade federal de Itajubá, Minas Gerais, Brasil.

American Iron and Steel Institute (1998). Buried Steel Penstocks. Washington D. C.: Construction Marketing Committee.

American Society of Civil Engineers (1993). Exposed penstock. Manuals and Reports on Engineering Practice N° 79, Steel Penstocks, 73-109

Autoridad Nacional del Agua (2015). Evaluación de Recursos Hídricos en la Cuenca de Mantáro. Recuperado de: https://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/36/ANA0000052_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Arzapalo, V. (2000). Diseño económico de conductos forzados con verificación computarizada de sobrepresiones y cambios de sección. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Atil, B. (2000). Hydroelectric Power Plants. Istanbul Technical University, Istanbul, Turquía.

Balsiger, A., Lara, B. & Behm, J. (2014). Minor losses in Pipes. Colorado State University, Colorado, Estados Unidos.

Bentley Hammer Connect (2018). Celerity and Pipes Elasticity. Recuperado de: <https://docs.bentley.com/LiveContent/web/Bentley%20HAMMER%20SS6-v1/en/GUID-860F7792-1873-46A7-A07D-06FB40F62D8B.html>

Butchers, J., Williamson, S., Booker, J., Maitland, T., Bikram, P., Raj, B., Raj, S. & Gautam, B. (2022) Cost estimation of micro-hydropower equipment in Nepal. *Development Engineering*, Volume 7. doi: 10.1016/j.deveng.2022.100097

Chegg Study (2019). Run-of-River Micro-hydropower Plant. Recuperado de: <https://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/mechanical-engineering-archive>

Cheng Fluid Systems (2017). Water Hammer. Recuperado de: http://www.chengfluid.com/flow_problems/water_hammer

Chinyere, O., Obasih, N., Ojo, E., Okonkwo, C. & Mafiana, E. (2017). Technical Details for the Design of a Penstock for Kuchigoro Small Hydro Project. *American Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 3(4), 27-35.

Flowtite (2011). Pipe systems technical data. Recuperado de: <http://flowtite.amiantitigroup.com/Products-Pipe-systems-technical-data.aspx>

Gamio, P. (2016). Perú Potencial Energético: Propuestas y Desafíos. *Círculo de Derecho Administrativo PUCP*. 16, 217-231. Recuperado de: <http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/derechoadministrativo/article/view/16301/16712>

Gayathri, K. (2013). Main Elements of Hydroelectric Power Plant. Recuperado de: <http://www.engineeringenotes.com/power-plants-2/hydroelectric-power-plant/12-main-elements-of-hydroelectric-power-plant/29416>

Geth, F., Brijs, T., Kathan, J., Driesen, J. & Belmans, R. (2015). An overview of large-scale stationary electricity storage plants in Europe: current status and new developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 1212-1227 doi: 10.1016/j.rser.2015.07.145.

Google. (s. f.). Ubicación Central Hidroeléctrica Mantaro, Huancavelica, Perú. Recuperado de: <https://www.google.com.pe/maps/place/HV-110/@-12.3886149,->

75.1243756.14z/data=!4m5!3m4!1s0x910e8427eb299961:0x101331e05b823712!8m2!3d-12.5057788!4d-75.1946708?hl=es-419

GPS PE Pipe Systems (2014). Inver Hydro Scheme. Recuperado de: <http://www.gpsuk.com/casestudy/5/22/inver-hydro-scheme.html>

HOBAS (2012). HOBAS Hydropower Pipe Systems. Recuperado de: <http://www.hobas.nl/toepassingen/waterkracht.html>

Inforegión (2016). Obras de la Central Hidroeléctrica Chaglla se realizan con total normalidad. Recuperado de: <http://www.inforegion.pe/218321/obras-de-la-central-hidroelectrica-chaglla-se-realizan-con-total-normalidad/>

International Finance Corporation (2015). Hydroelectric Power: A Guide for Developers and Investors. Recuperado de: https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/06b2df8047420bb4a4f7ec57143498e5/Hydropower_Report.pdf?MOD=AJPERES

International Hydropower Association (2018). 2018 Hydropower Status Report. Recuperado de: <https://www.hydropower.org/country-profiles/south-america>

International Hydropower Association (2019). Hydropower generation in South America. Recuperado de: <https://www.hydropower.org/publications/2018-hydropower-status-report>

International Renewable Energy Agency IRENA (2018). Renewable Power Generation Costs in 2017. Recuperado de: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Jan/IRENA_2017_Power_Costs_2018.pdf

Instituto Nacional de Estadística e Informática INEI (2021). Situación del Sector Plástico en el Perú. Recuperado de: <https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/boletines/presentacion-iii-congreso-internacional-plasticos.pdf>

Kudela H. (2010). Hydraulic losses in pipes, *Journal of Science*, vol.1, Wrocław University of Technology

Mays, L. (1997). Hydraulic design handbook. Editorial McGraw-Hill Educaion, New York, USA.

Mejía, M. (2019). Costo de producir electricidad corre el riesgo de subir en 700% al 2023, advierte la SIN. Diario Gestión: Economía. Recuperado de: <https://gestion.pe/economia/costo-producir-electricidad-corre-riesgo-subir-700-2023-advierte-sni-260595-noticia/>

Ministerio de Energía y Minas (2011). Atlas del Potencial Hidroeléctrico de Perú. Recuperado de: http://www.ede.pe/web/wp-content/uploads/2017/05/ATLAS_ENERGI%CC%81A_HIDRAU%CC%81LICA_PER_U%CC%81.pdf

Mosonyi, E. (1965). Water power development. Hungarian Academy of Sciences, Budapest, Hungría

Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (2022). Types of Hydropower Plants. Recuperado de: <https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-plants>

Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (2015). Reporte de Análisis Económico Sectorial. Recuperado de: http://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios_Economicos/RAES/RAES-Electricidad-Diciembre-2015-GPAE-OS.pdf

Pallugna, R., Cultura, A., Gozon, C. & Estoperez, N. (2012). British Hydro Association. A guide to UK mini-hydro developments v3.0. Recuperado de: <http://www.british-hydro.org/wp-content/uploads/2018/03/A-Guide-to-UK-mini-hydro-development-v3.pdf>

Plastic Pipe Institute (2009). HDPE Pipe for Water Distribution and Transmission Applications. Recuperado de: <https://plasticpipe.org/pdf/tn-27-faq-hdpe-water-transmission.pdf>

Pini Group (2008). Pumped storage hydropower plant Nant de Drance. Recuperado de: <https://www.piniswiss.com/it/pini/expertise/energy-power/nant-de-drance.html>

Qurren (2012). Kanidera hydroelectric power station penstock. Recuperado de: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kanidera_hydroelectric_power_station_penstock.jpg

Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (2015). Renewables 2015 Global Status Report. Global Status Report, Johannesburgo, Sudáfrica.

Rodríguez, D. (2016). Estudio del golpe de ariete en bombas volumétricas. Universidad de la Coruña, Ferrol, España.

Schmerler, D. (2018). Osinergmin: El 6% de la población no cuenta con electricidad. *El Comercio*. Recuperado de: <https://elcomercio.pe/economia/osinergmin-6-poblacion-cuenta-electricidad-noticia-493422>

Singhal, M. K. & Arun, K. (2015) Optimum Design of Penstock for Hydro Projects. *International Journal of Energy and Power Engineering*, 4(4), 216-226. doi: 10.11648/j.ijepe.20150404.14

Stewart, M. (2021). Surface Production Operations. *Mechanical design of pressure vessels*, pp. 117-196 doi: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-03881-6>

Sundberg, C. (2013). Pipelines 2013: Pipelines and Trenchless Construction and Renewals—A Global Perspective. *Anchor Block Design Made Easy*, pp. 520-533. doi:10.1061/9780784413012.048.

TMD Perú. (2019). Grupo TDM en la recta final de La Pampa. Recuperado de: <https://www.tdm.com.pe/noticias-105-hidromanta-central-hidroelectrica-tuberia-grp/>

Trigroso, M. (2022). Grupo Hidráulica triplica capacidad de producción de su fábrica de tuberías. Diario Gestión: Economía. Recuperado de: <https://gestion.pe/economia/empresas/grupo-hidraulica-triplica-capacidad-de-produccion-de-su-fabrica-de-tuberias-noticia/?ref=gesr>

Universidad Autónoma Metropolitana (2011). Hidrología. Recuperado de: <http://www.uamenlinea.uam.mx/materiales/licenciatura/hidrologia/libro2-hidrologia/HU4.8-03.pdf>

Universidad de Cádiz (2018). Tabla de rugosidad absoluta de materiales. Recupardo de: <https://elaborate.uca.es/sistemas-del-buque-tabla-de-rugosidad-absoluta-de-materiales/>

U.S. Department of Energy (2016). Types of Hydropower Plants. Washington, DC 20585: Water Power Technologies Office.

Valiulis, A. (2014). A History of Materials and Technologies Development, Vilna, Lituania: VGTU Press TECHNIKA

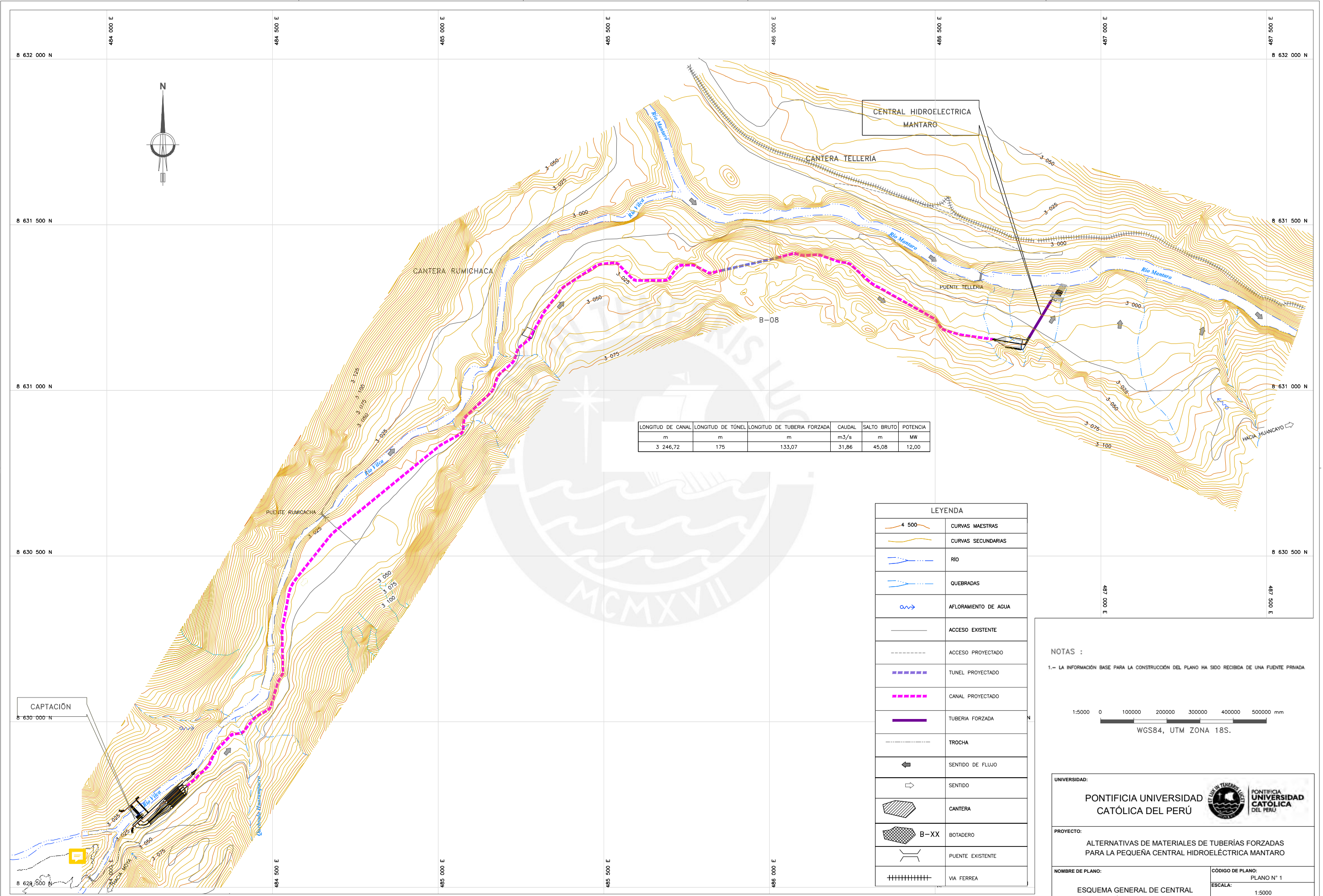
Vásquez, D. & Rayme, F. (2018). Optimización del diámetro, diseño preliminar y simulación fluido-dinámica de la tubería forzada de la minicentral hidroeléctrica Hydrika 4 (tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica, Lima, Perú.

Water Power Magazine (2010). Life-span of storage dams. Recuperado de: <https://www.waterpowermagazine.com/features/featurelife-span-of-storage-dams>

Yañez, G. (2016). Diseño hidráulico de la conducción forzada de la Central Hidroeléctrica Aricota 3. Universidad Mayor de San Marcos, Lima, Perú.



ANEXO A: PLANOS



LONGITUD DE CANAL	LONGITUD DE TÓNEL	LONGITUD DE TUBERIA FORZADA	CAUDAL	SALTO BRUTO	POTENCIA
m	m	m	m ³ /s	m	MW
3 246,72	175	133,07	31,86	45,08	12,00

LEYENDA	
	CURVAS MAESTRAS
	CURVAS SECUNDARIAS
	RIO
	QUEBRADAS
	AFLORAMIENTO DE AGUA
	ACCESO EXISTENTE
	ACCESO PROYECTADO
	TUNEL PROYECTADO
	CANAL PROYECTADO
	TUBERIA FORZADA
	TROCHA
	SENTIDO DE FLUJO
	SENTIDO
	CANTERA
	B-XX BOTADERO
	PUENTE EXISTENTE
	VIA FERREA

NOTAS :

1.- LA INFORMACIÓN BASE PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL PLANO HA SIDO RECIBIDA DE UNA FUENTE PRIVADA

1:5000 0 100000 200000 300000 400000 500000 mm

WGS84, UTM ZONA 18S.

UNIVERSIDAD:

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

PROYECTO:

ALTERNATIVAS DE MATERIALES DE TUBERÍAS FORZADAS PARA LA PEQUEÑA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MANTARO

NOMBRE DE PLANO:

ESQUEMA GENERAL DE CENTRAL HIDROELÉCTRICA MANTARO PLANTA

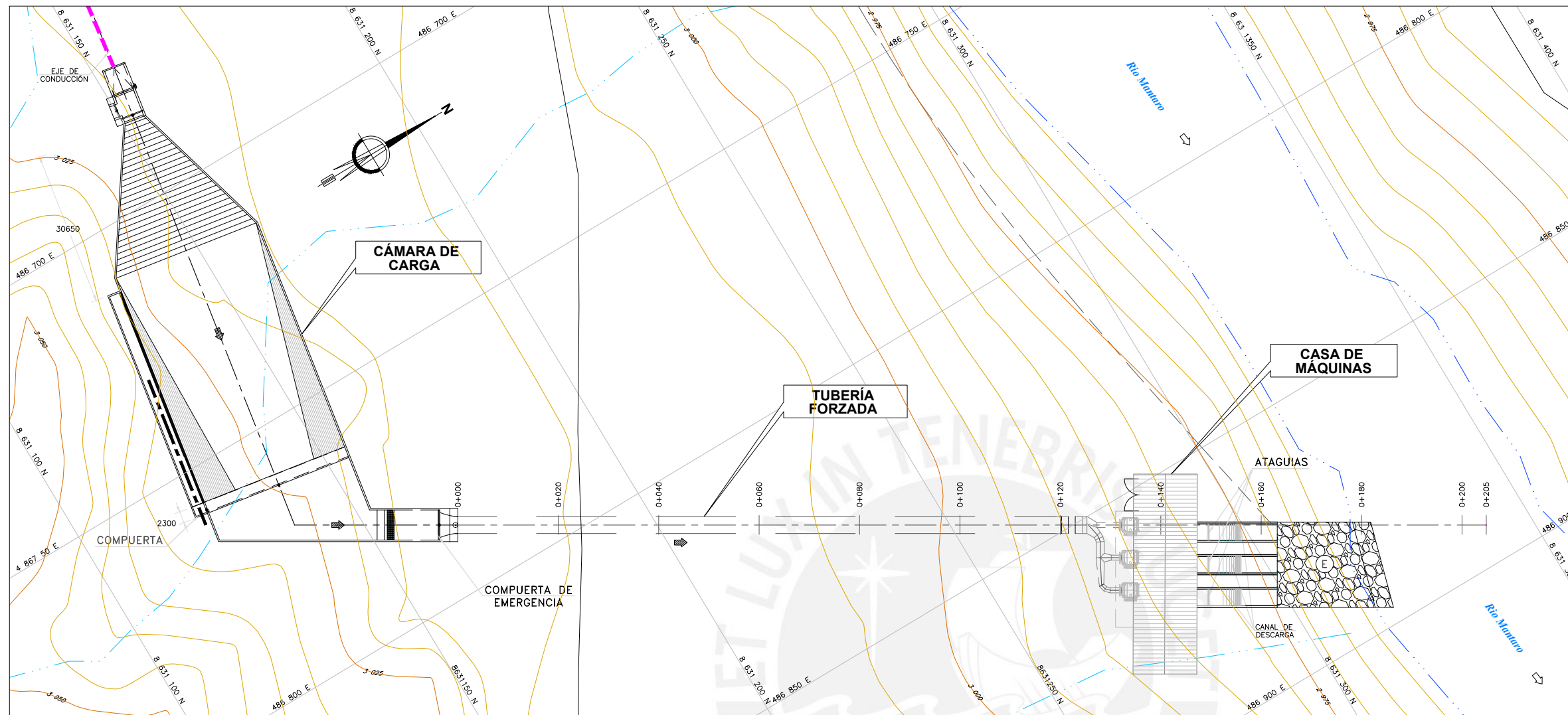
CÓDIGO DE PLANO: PLANO N° 1

ESCALA: 1:5000

FECHA: NOVIEMBRE - 2020

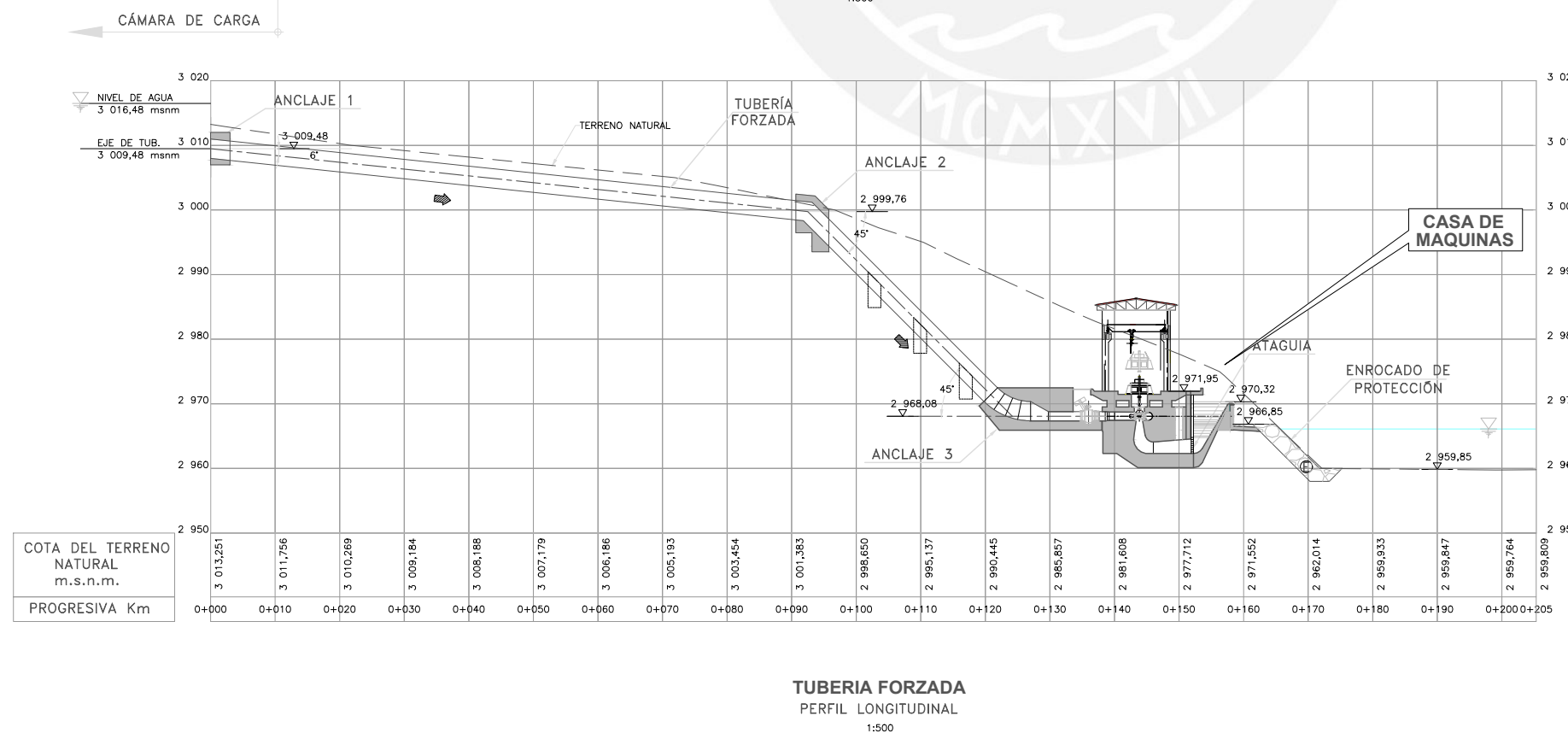
CAD: JUAN DELGADO - MILUSKA ROSAS

CAPTACIÓN



LEYENDA	
	CURVAS MAESTRAS
	CURVAS SECUNDARIAS
	RIO
	QUEBRADAS
	ACCESO PROYECTADO
	ACCESO EXISTENTE
	CANAL PROYECTADO
	TROCHA
	SENTIDO DE FLUJO
	CONCRETO ARMADO f'c=210 kg/cm²
	ENROCADO (E)
	NIVEL DE AGUA

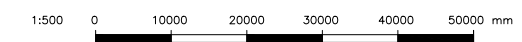
OBRAS DE GENERACIÓN
PLANTA
1:500



TUBERIA FORZADA
PERFIL LONGITUDINAL
1:500

NOTAS :

1.- LA INFORMACIÓN BASE PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL PLANO HA SIDO RECIBIDA DE UNA FUENTE PRIVADA



UNIVERSIDAD:		PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ	
PROYECTO:			
ALTERNATIVAS DE MATERIALES DE TUBERÍAS FORZADAS PARA LA PEQUEÑA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MANTARO			
NOMBRE DE PLANO:		CÓDIGO DE PLANO:	
TUBERÍA FORZADA PLANTA Y PERFIL		PLANO N° 2	
		ESCALA:	
		INDICADA	
		FECHA:	
		NOVIEMBRE - 2020	
		CAD:	
		JUAN DELGADO - MILUSKA ROSAS	

ANEXO B: COTIZACIONES



O-TEK CENTRAL S.A.S.
 Planta Zona Franca Parque Central
 Variante Cartagena Calle 1, Carrera # 2-05.
 Turbaco, Bolívar - Colombia
 Teléfono Of. ppal: + (574) 444 42 42 Ext.5157

F-ESP-001-OTK
 (Rev. 01 - Vigencia: 2012/07/03)

Cotización No. 201911191-1

Empresa:	Ing. Juan Alvaro Delgado Mansilla / Ing. Miluska Rosas
NIT / RUC	
Contacto:	
Email:	jadelgadam@pucp.pe
Ciudad:	
Dirección:	
Teléfono:	
Fax:	

PROYECTO: Central Hidroeléctrica de Estudio

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UND	CANTIDAD	VALOR UNITARIO (US\$)	VALOR PARCIAL (US\$)
	Tubería de Conducción a Baja Presión				
1	Tubería GRP DN 2600 PN 06 SN 05000	ML	100.00	\$ 1,597.20	\$ 159,720.00
2	Acople GRP DN 2600 PN 06	Und	18.00	\$ 1,066.70	\$ 19,200.60
3	Tubería GRP DN 2800 PN 06 SN 05000	ML	100.00	\$ 1,763.70	\$ 176,370.00
4	Acople GRP DN 2800 PN 06	Und	18.00	\$ 1,136.20	\$ 20,451.60
5	Tubería GRP DN 3000 PN 06 SN 05000	ML	100.00	\$ 2,058.40	\$ 205,840.00
6	Acople GRP DN 3000 PN 06	Und	18.00	\$ 1,270.20	\$ 22,863.60

DN=Diámetro Nominal (mm), PN=Presión Nominal (bar), SN=Rigidez Nominal (N/m²), L=Longitud (m)

Subtotal	\$ 604,445.80
Transporte y Embalaje	\$ 63,000.00
Seguros	\$ 667.45
Total CIF Callao	\$ 668,113.25

La tubería se suministra para sistemas a flujo libre y a presión hasta 32 bar (470 psi), en diámetros entre 300 y 3000mm, cumpliendo con todas las normas de fabricación AWWA C-950 y las NTC 3826, NTC 3870 y NTC 3871.

Términos Comerciales

*** Moneda:** Dolares Americanos

*** Criterios utilizados para el despiece:**

- La longitud de los tubos es de 5.8 metros para tubería DN3000, 2800 y 2600, se considera un acople por tubo.
- La tubería se considera en INSTALACIÓN ENTERRADA o AEREA.
- Los accesorios se consideran con BL estandar.

*** Impuestos y Pólizas:**

- Esta propuesta no incluye: Retenciones locales, ni impuestos imputables al suministro. Estos deberán ser contemplados de manera adicional y sobre el valor ofertado.

*** Transporte:**

- El costo del transporte incluye embalaje, seguro, transporte terrestre, gastos aduaneros en el país de origen y marítimo hasta el país de destino según término de incoterm CIF (Cost Insurance and Freight): No se incluyen impuestos, nacionalización, flete interno ni descargue en el sitio de la obra. De (18) paquetes de carga suelta de 5.8 metros de largo x 3.1 de ancho v 3.1 de alto.

*** Entregas:**

- El plazo de entrega será fijado de mutuo acuerdo. El plazo de entrega dependerá de la carga de trabajo en fábrica y los compromisos acordados previamente a la recepción de la orden de compra.
- Una vez se tenga confirmado el pedido y la tubería este fabricada, el CLIENTE deberá recibir todo lo solicitado. Cualquier cambio adicional de cantidades deberá tramitarse como un pedido nuevo. Lo anterior se debe a que no se maneja inventario de este tipo de producto.
- En el momento de tener el suministro de tubería y/o accesorios en patio disponibles para el despacho, el Coordinador de zona comunicará por escrito al CLIENTE confirmando las cantidades y así proceder con el despacho. Si pasado 60 días después de recibida esta confirmación, el CLIENTE no está en capacidad de recibir la tubería y/o accesorios confirmados, OTEK cobrará a título de bodegaje el 1.25% efectivo del valor de la mercancía disponible, por cada mes o proporcional al tiempo que la tubería permanezca en nuestras instalaciones. La mercancía no se liberará hasta tanto el CLIENTE no haya pagado la suma adeudada por concepto de dicho bodegaje.
- Cualquier cambio, cancelación, demora o atraso de los suministros solicitados por el CLIENTE (dificultad de acceso, falta de permisos, expropiaciones pendientes, etc...) no será impedimento para que OTEK pueda proceder a la facturación de materia prima adquirida o del material fabricado y no suministrado a la obra.
- Si el desarrollo de las obras sufriese paralización o retraso por un tiempo superior a los 60 días por causas ajenas a OTEK, ésta podría analizar las nuevas condiciones económicas de acuerdo con las variables del mercado. Si la obra se paralizara definitivamente el proveedor cobraría el material suministrado hasta entonces y el que se hallara en fabricación.
- OTEK no será responsable ni se considerará que ha incumplido sus obligaciones si cumple con las mismas de manera tardía o con impedimentos debido a: (a) causas ajenas a su razonable control; o (b) actos de fuerza mayor, actos (u omisiones) de autoridades gubernamentales, incendios, condiciones meteorológicas severas, terremotos, huelgas u otros disturbios laborales, huelgas en vías que impidan el tránsito por ellas, cierres de puertos o fronteras, inundaciones, guerra (declarada o no), epidemias, revueltas sociales, disturbios, retrasos en transportes; o (c) actos u omisiones del CLIENTE.

*** Para soporte técnico:**

- O-TEK, incluye (4) visitas a la obra de máximo (5) días para el soporte técnico programadas de acuerdo al cronograma de instalación de obra: Una inicial donde se dicta la charla de instalación y manejo de la tubería, las otras dos son de seguimiento, con el fin de dar un buen acompañamiento durante el tiempo de instalación. El número de visitas de nuestra oferta dependerá de la complejidad del proyecto.
- El transporte dentro de la obra es responsabilidad del CLIENTE.
- En el caso que el CLIENTE requiera de soporte técnico adicional al ofrecido, este se facturará adicionalmente al valor presupuestado y será responsabilidad del CLIENTE.

*** Tramos cortos:**

- Hasta un 10% de la longitud de la tubería puede entregarse en tubos de longitudes diferentes a las descritas. Los acoples necesarios para la unión de esta tubería serán despachados por o-tek internacional sin costo para el cliente.
- Para instalación estándar de la Tecnología Flowite, es requisito considerar tramos cortos y acoples adicionales, que no están considerado en esta propuesta, salvo se exprese lo contrario.

*** Forma de pago:**

- 30% anticipo y 70% facturado a 30 días después del despacho (respaldado con carta de credito documentarios irrevocable, a la vista, confirmada). Otros a tratar.
- En el evento de incumplimiento de las condiciones de pago acordadas o retraso en el pago, se cobrarán intereses a la tasa máxima legal permitida por el mercado sobre los dineros adeudados, los cuales empezarán a contar al día siguiente de vencimiento de la fecha de pago, y podrá ejecutarse de manera inmediata las garantías y/o pagarés que existan en favor de OTEK.

Fecha de elaboración: 21 de noviembre de 2019	Plazo de entrega: 45-60 días estimado. Según disponibilidad de planta.
Vencimiento: Treinta (30) días	Sitio de entrega: INCOTERMS 2010 CIF Callao, Peru



Siempre estaremos atentos para asistirlos técnica y comercialmente

Otek Internacional S.A

Alfredo Noriega Lay

Elaboró: ANL

KRAH CHILE S.A.
RUT: 76.014.035-K
Cam.Chorrillos Km. 0,55 Parc.A s/n, Lote 6 Lampa
Teléfono 2 7130400
Fax 2 7130401



Santiago, Lunes 28 de Octubre de 2019

COTIZACIÓN N° 3438

Señores: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU
Proyecto: C.H. HUANGAVELICA
País: CHILE

Att. Sr (a): *Juan Delgado*
Mail: *jadelgadam@pucp.pe*
Cel / Tel.:

De nuestra consideración:

Nos es grato ofertar los siguientes materiales, de acuerdo a vuestra solicitud:

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	UNITARIO USD	TOTAL NETO USD	FORMATO
01	TUBERIA ESTRUCTURADA HDPE RS6 KN/m2 DN 2600 MM PN2,5 BAR	m	96	USD 1.778,00	USD 170.688,00	TIRA 6 M
02	TUBERIA ESTRUCTURADA HDPE RS6 KN/m2 DN 2800 MM PN2,5 BAR	m	96	USD 2.006,00	USD 192.576,00	TIRA 6 M
03	TUBERIA ESTRUCTURADA HDPE RS6 KN/m2 DN 3000 MM PN2,5 BAR	m	96	USD 2.247,00	USD 215.712,00	TIRA 6 M

OBSERVACIONES:

TUBERIA FABRICADA BAJO NORMA DIN 16961.-

TOTAL NETO:

USD 578.976,00

CONDICIONES COMERCIALES

Precios: Están expresados en Dólares Americanos.

Forma de Pago: A convenir.

Plazo de Entrega: A convenir.

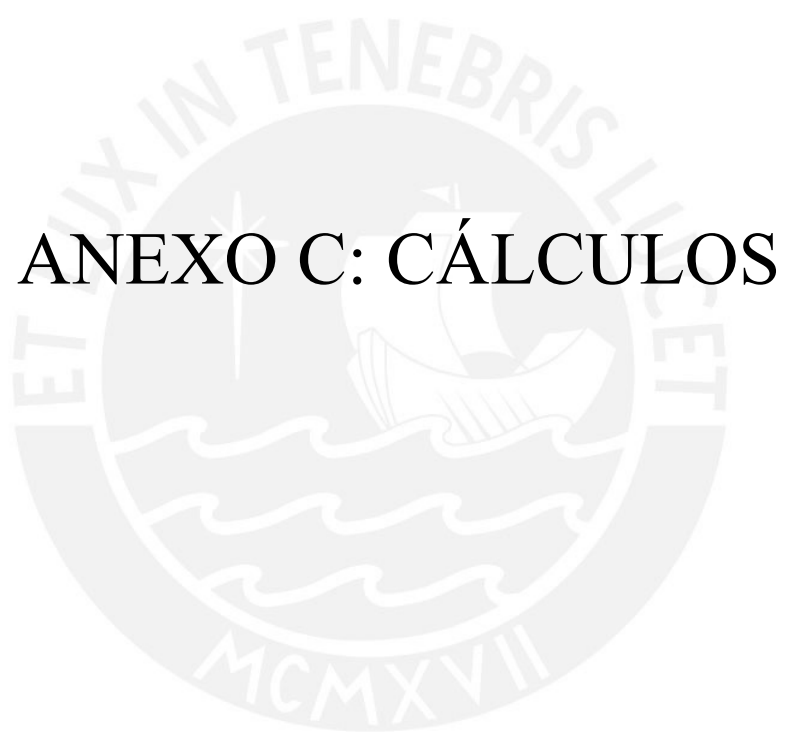
Material Puesto en: Planta Krah E.X.W. Sobre camión.

Validez de la oferta: 5 Días.

Orden de compra tiene que hacer referencia a esta cotización.

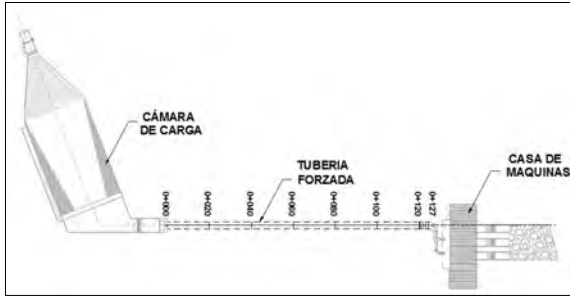
PRODUCTO NO CANCELABLE UNA VEZ INGRESADO A PRODUCCION, LAS PARTIDAS SON FABRICADAS COMPLETAS.

JAIME RODRIGUEZ
GERENTE COMERCIAL KRAH CHILE S.A.



ANEXO C: CÁLCULOS

Movimiento de Tierras



Diámetro de tubería (m)	2.60
--------------------------------	------



Excavación en material suelto
Excavación en roca suelta

TRAMO	PROGRESIVA (km)		LONGITUD m	Alt. Corte inicial m	Alt. Corte final m	A _{INICIAL} m ²	A _{FINAL} m ²	A _{PROMEDIO} m ²	VOLUMEN m ³
	INICIO	FIN							
1er Tramo	0+000.00	0+020.00	20.00	4.80	3.92	24.96	19.23	22.10	441.94
	0+020.00	0+040.00	20.00	3.92	3.97	19.23	19.55	19.39	387.80
	0+040.00	0+060.00	20.00	3.97	4.07	19.55	20.17	19.86	397.19
	0+060.00	0+080.00	20.00	4.07	3.39	20.17	16.03	18.10	362.08
2do Tramo	0+080.00	0+091.81	11.81	3.39	2.18	16.03	9.45	12.74	150.47
	0+091.81	0+100.00	8.19	2.18	7.92	9.45	49.42	29.43	241.06
	0+100.00	0+120.00	20.00	7.92	19.69	49.42	200.12	124.77	2,495.37
TOTAL									4,475.92

M SUELTO	R. SUELTA
80%	20%

Total	Und	EXCAVACIÓN		Total
		M. SUELTO	R.SUELTA	
	m ³	3,580.74	895.18	4,475.92

Relleno

TRAMO	PROGRESIVA (km)		LONGITUD m	A _{INICIAL} m ²	A _{FINAL} m ²	A _{PROMEDIO} m ²	VOLUMEN m ³
	INICIO	FIN					
TUBERÍA	0+000.00	0+091.81	91.81	17.12	17.12	17.12	1,571.79
TOTAL							1,571.79

Relleno con material cantera

Total	Und	Cantidad
	m ³	1,571.79

Eliminación de material excedente d = 1km

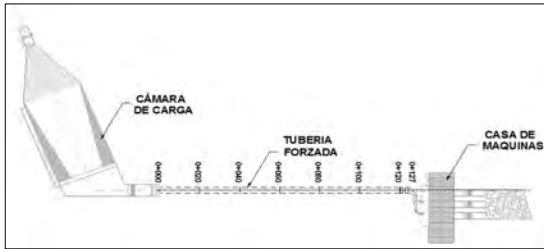
Descripción	Und	Cantidad
Excavación de plataforma	m ³	4,475.92
Relleno	m ³	1,571.79
Eliminación	m³	2,904.13

Cama de arena h = 0.15 m

TRAMO	PROGRESIVA (km)		LONGITUD m	A _{INICIAL} m ²	A _{FINAL} m ²	A _{PROMEDIO} m ²	VOLUMEN m ³
	INICIO	FIN					
TUBERÍA	0+000.00	0+091.81	91.81	0.54	0.54	0.54	49.58
TOTAL							49.58

Total	Und	Cantidad
	m ³	49.58

Movimiento de Tierras



Diámetro de tubería (m)	3.00
-------------------------	------



Excavación en material suelto
Excavación en roca suelta

TRAMO	PROGRESIVA (km)		LONGITUD m	Alt. Corte inicial m		A _{INICIAL} m ²	A _{FINAL} m ²	A _{PROMEDIO} m ²	VOLUMEN m ³
	INICIO	FIN							
1er Tramo	0+000.00	0+020.00	20.00	5.20	4.32	29.81	23.50	26.66	533.14
	0+020.00	0+040.00	20.00	4.32	4.37	23.50	23.85	23.67	473.46
	0+040.00	0+060.00	20.00	4.37	4.47	23.85	24.54	24.19	483.86
	0+060.00	0+080.00	20.00	4.47	3.79	24.54	19.95	22.24	444.88
2do Tramo	0+080.00	0+091.81	11.81	3.79	2.58	19.95	12.56	16.25	191.94
	0+091.81	0+100.00	8.19	2.58	8.32	12.56	56.35	34.46	282.19
	0+100.00	0+120.00	20.00	8.32	20.09	56.35	214.90	135.63	2,712.50
TOTAL									5,121.97

M SUELTO	R. SUELTA
80%	20%

Total	Und m ³	EXCAVACIÓN		Total
		M. SUELTO	R. SUELTA	
		4,097.58	1,024.39	5,121.97

Relleno

TRAMO	PROGRESIVA (km)		LONGITUD m	A _{INICIAL} m ²	A _{FINAL} m ²	A _{PROMEDIO} m ²	VOLUMEN m ³
	INICIO	FIN					
TUBERÍA	0+000.00	0+091.81	91.81	21.33	21.33	21.33	1,958.61
TOTAL							1,958.61

Relleno con material cantera

Total	Und m ³	Cantidad
		1,958.61

Eliminación de material excedente d = 1km

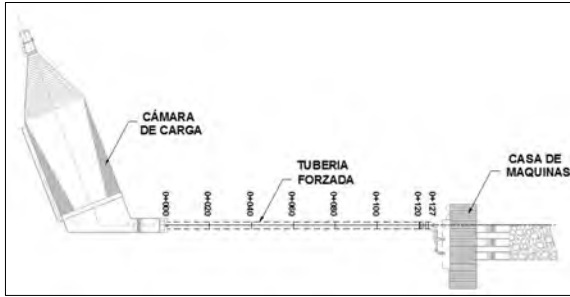
Descripción	Und	Cantidad
Excavación de plataforma	m ³	5,121.97
Relleno	m ³	1,958.61
Eliminación	m³	3,163.36

Cama de arena h = 0.15 m

TRAMO	PROGRESIVA (km)		LONGITUD m	A _{INICIAL} m ²	A _{FINAL} m ²	A _{PROMEDIO} m ²	VOLUMEN m ³
	INICIO	FIN					
TUBERÍA	0+000.00	0+091.81	91.81	0.60	0.60	0.60	55.09
TOTAL							55.09

Total	Und m ³	Cantidad
		55.09

Movimiento de Tierras



Diámetro de tubería (m)	3.60
-------------------------	------



Excavación en material suelto
Excavación en roca suelta

TRAMO	PROGRESIVA (km)		LONGITUD m	Alt. Corte inicial m	Alt. Corte final m	A _{INICIAL} m ²	A _{FINAL} m ²	A _{PROMEDIO} m ²	VOLUMEN m ³
	INICIO	FIN							
1er Tramo	0+000.00	0+020.00	20.00	5.80	4.92	37.89	30.70	34.30	685.94
	0+020.00	0+040.00	20.00	4.92	4.97	30.70	31.10	30.90	617.96
	0+040.00	0+060.00	20.00	4.97	5.07	31.10	31.89	31.49	629.86
	0+060.00	0+080.00	20.00	5.07	4.39	31.89	26.62	29.25	585.08
2do Tramo	0+080.00	0+091.81	11.81	4.39	3.18	26.62	18.02	22.32	263.58
	0+091.81	0+100.00	8.19	3.18	8.92	18.02	67.55	42.79	350.42
	0+100.00	0+120.00	20.00	8.92	20.69	67.55	237.87	152.71	3,054.20
TOTAL									6,187.05

M SUELTO	R. SUELTA
80%	20%

Total	Und m ³	EXCAVACIÓN		Total
		M. SUELTO	R.SUELTA	
		4,949.64	1,237.41	

Relleno

TRAMO	PROGRESIVA (km)		LONGITUD m	A _{INICIAL} m ²	A _{FINAL} m ²	A _{PROMEDIO} m ²	VOLUMEN m ³
	INICIO	FIN					
TUBERÍA	0+000.00	0+091.81	91.81	28.32	28.32	28.32	2,600.06
TOTAL							2,600.06

Relleno con material cantera

Total	Und	Cantidad
	m ³	2,600.06

Eliminación de material excedente d = 1km

Descripción	Und	Cantidad
Excavación de plataforma	m ³	6,187.05
Relleno	m ³	2,600.06
Eliminación	m³	3,586.99

Cama de arena h = 0.15 m

TRAMO	PROGRESIVA (km)		LONGITUD m	A _{INICIAL} m ²	A _{FINAL} m ²	A _{PROMEDIO} m ²	VOLUMEN m ³
	INICIO	FIN					
TUBERÍA	0+000.00	0+091.81	91.81	0.69	0.69	0.69	63.35
TOTAL							63.35

Total	Und	Cantidad
	m ³	63.35

TABLA RESUMEN DE MOVIMIENTO DE TIERRAS

Diámetro (m)	Unidad	2.60	2.70	2.80	2.90	3.00	3.10	3.20	3.30	3.40	3.50	3.60
Excavación Material suelto	m3	3580.74	3709.95	3839.16	3968.37	4097.58	4239.59	4381.60	4523.61	4665.62	4807.63	4949.64
Excavación Roca Suelta	m3	895.18	927.49	959.79	992.09	1024.39	1059.90	1095.40	1130.90	1166.41	1201.91	1237.41
Relleno	m3	1571.79	1668.49	1765.20	1861.91	1958.61	2065.52	2172.43	2279.34	2386.24	2493.15	2600.06
Eliminación excedente	m3	2962.35	3012.60	3062.85	3113.11	3163.36	3233.97	3304.57	3375.18	3445.78	3516.39	3586.99
Camá de Arena	m3	49.58	50.95	52.33	53.71	55.09	56.46	57.84	59.22	60.59	61.97	63.35

Diámetro (m)	Unidad	2.60	2.70	2.80	2.90	3.00	3.10	3.20	3.30	3.40	3.50	3.60
Costo Excavación Material suelto	US\$	25,448.90	26,367.22	27,285.54	28,203.86	29,122.19	30,131.48	31,140.77	32,150.07	33,159.36	34,168.66	35,177.95
Costo Excavación Roca Suelta	US\$	15,975.42	16,551.89	17,128.37	17,704.84	18,281.31	18,914.89	19,548.47	20,182.05	20,815.63	21,449.21	22,082.79
Costo Relleno	US\$	25,046.17	26,587.18	28,128.18	29,669.18	31,210.19	32,913.74	34,617.30	36,320.85	38,024.41	39,727.97	41,431.52
Costo Eliminación excedente	US\$	11,186.69	11,376.46	11,566.23	11,756.00	11,945.77	12,212.40	12,479.03	12,745.66	13,012.29	13,278.91	13,545.54
Costo Cama de Arena	US\$	761.01	782.15	803.29	824.43	845.57	866.71	887.85	908.99	930.12	951.26	972.40
Costo Total Excavación	US\$	78,418.19	81,664.90	84,911.61	88,158.32	91,405.02	95,039.22	98,673.42	102,307.61	105,941.81	109,576.01	113,210.21

Partidas	Metrado	Und.	P. U. (US\$)	Costo (US\$)
Exc. Material Suelto	4,097.58	m3	7.11	29,122.19
Exc. Roca Suelta	1,024.39	m3	17.85	18,281.31
Relleno	1,958.61	m3	15.93	31,210.19
Eliminación Exc.	3,163.36	m3	3.78	11,945.77
Cama de Arena	55.09	m3	15.35	845.57
Cexc Total				91,405.02

TABLA RESUMEN DE OBRAS DE CONCRETO

Diámetro (m)	Unidad	Material	2.60	2.70	2.80	2.90	3.00	3.10	3.20	3.30	3.40	3.50	3.60
Concreto Fc 100 kg/cm2	m3	GRP	7.26	7.47	7.68	7.89	8.10	8.31	8.52	8.73	8.94	9.15	9.36
		ACERO	161.62	163.16	164.70	166.24	167.78	169.32	170.87	172.41	173.95	175.49	177.03
Concreto Fc 210 kg/cm2	m3	AMBOS	298.04	301.22	304.40	307.58	310.76	312.46	314.17	315.87	317.58	319.28	320.99
Encofrado y desencofrado	m2	AMBOS	357.65	361.47	365.28	369.09	372.91	374.95	377.00	379.05	381.09	383.14	385.19
Acero fy 4200 kg/cm2	kg	AMBOS	8941.33	9036.66	9132.00	9227.33	9322.67	9373.84	9425.02	9476.19	9527.37	9578.54	9629.72

Diámetro (m)	Unidad	Material	2.60	2.70	2.80	2.90	3.00	3.10	3.20	3.30	3.40	3.50	3.60
Costos Concreto Fc 100 kg/cm2	US\$	GRP	931.10	958.03	984.96	1,011.89	1,038.83	1,065.76	1,092.69	1,119.62	1,146.56	1,173.49	1,200.42
		ACERO	20,727.92	20,925.51	21,123.11	21,320.70	21,518.30	21,715.89	21,913.49	22,111.08	22,308.68	22,506.27	22,703.87
Costos Concreto Fc 210 kg/cm2	US\$	AMBOS	64,469.95	65,157.35	65,844.75	66,532.15	67,219.55	67,888.54	68,557.53	69,226.52	69,895.51	70,564.50	71,233.49
Encofrado y desencofrado	US\$	AMBOS	13,769.64	13,916.46	14,063.28	14,210.09	14,356.91	14,435.72	14,514.53	14,593.34	14,672.15	14,750.96	14,829.77
Costos Acero fy 4200 kg/cm2	US\$	AMBOS	18,061.48	18,254.06	18,446.64	18,639.21	18,831.79	18,935.16	19,038.54	19,141.91	19,245.29	19,348.66	19,452.03
Costo Obras de Concreto	US\$	GRP	97,232.17	98,285.90	99,339.62	100,393.35	101,447.07	102,025.18	102,603.29	103,181.39	103,759.50	104,337.61	104,915.72
		ACERO	117,029.00	118,253.38	119,477.77	120,702.16	121,926.54	122,675.31	123,424.08	124,172.85	124,921.62	125,670.39	126,419.16

Partidas	Metrado	Und.	P. U. (US\$)	Costo (US\$)
Concreto Fc 100 kg/cm2 - solado	167.78	m3	128.25	21,518.30
Concreto Fc 210 kg/cm2	310.76	m3	216.31	67,219.55
Encofrado y desencofrado	372.91	m2	38.50	14,356.91
Acero fy 4200 kg/cm2	9322.67	kg	2.02	18,831.79
Ccon Total				121,926.54

Material	Unidad	Ratio
Encofrado solado tub.	m2/m3	2
Encofrado anclaje	m2/m3	1.2
Acero	kg/m3	30



ANEXO D: APUS

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

Partida **EXCAVACIÓN EN MATERIAL SUELTO**
 Rendimiento 160.00 m3/día Costo Unit. : **7.11**

Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio U\$	Parcial U\$
Mano de Obra					
Capataz (Vestido)	hh	0.10	0.0050	13.98	0.07
Operario (Vestido)	hh	1.00	0.0500	11.38	0.57
Peón (Vestido)	hh	4.00	0.2000	8.78	1.76
Operador de Equipo Pesado (Vestido)	hh	1.00	0.0500	13.21	0.66
					3.06
Equipos					
Herramientas Manuales	%MO		5.00%	3.06	0.15
Excavadora CAT 320	hm	1.00	0.0500	77.98	3.90
					4.05

Partida **EXCAVACIÓN EN ROCA FRACTURADA (ROCA SUELTA)**
 Rendimiento 80.00 m3/día Costo Unit. : **17.85**

Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio U\$	Parcial U\$
Mano de Obra					
Capataz (Vestido)	hh	0.10	0.0100	13.98	0.14
Operario (Vestido)	hh	1.00	0.1000	11.38	1.14
Peón (Vestido)	hh	2.00	0.2000	8.78	1.76
Perforista Oficial (Vestido)	hh	2.00	0.2000	9.79	1.96
Operador de Equipo Pesado (Vestido)	hh	1.50	0.1500	13.21	1.98
					6.97
Equipos					
Herramientas Manuales	%MO		5.00%	6.97	0.35
Compresora Neumática 335-375 PCM, 93 HP	hm	1.00	0.1000	36.23	3.62
Martillo Neumático de 29 kg	hm	2.00	0.2000	15.01	3.00
Excavadora CAT 320	hm	0.50	0.0500	77.98	3.90
					10.87

Partida **RELLENO CON MATERIAL PROPIO SELECCIONADO, COMPACT. EQUIP. LIVIANO**
 Rendimiento 42.00 m3/día Costo Unit. : **15.93**

Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio U\$	Parcial U\$
Mano de Obra					
Capataz (Vestido)	hh	0.10	0.0190	13.98	0.27
Operario (Vestido)	hh	1.00	0.1905	11.38	2.17
Peón (Vestido)	hh	4.00	0.7619	8.78	6.69
Operador de Equipo Pesado (Vestido)	hh	2.00	0.3810	9.79	3.73
					12.85
Materiales					
Agua, incluye transporte a pie de obra (Camión ciste	m3		0.2000	4.52	0.90
					0.90
Equipos					
Herramientas Manuales	%MO		5.00%	12.85	0.64
Compactador Vibr. Tipo Plancha 5.8 HP	hm	2.00	0.3810	4.03	1.54
					2.18

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

Partida	ELIMINACION DE MATERIAL EXCEDENTE DM = 1KM				
Rendimiento	300.00 m3/día			Costo Unit. :	3.78

Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio U\$	Parcial U\$
Mano de Obra					
Operador de Equipo Pesado (Vestido)	hh	2.00	0.0533	13.21	0.70
					0.70
Equipos					
Herramientas Manuales	%MO		5.00%	0.70	0.04
Cargador Frontal CAT-966	hm	1.00	0.0267	82.82	2.21
Camión Volquete 15 m3	hm	1.00	0.0267	31.05	0.83
					3.07

Partida	CAMA DE ARENA e = 0.15 m				
Rendimiento	60.00 m3/día			Costo Unit. :	15.35

Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio U\$	Parcial U\$
Mano de Obra					
Capataz (Vestido)	hh	0.50	0.0667	13.98	0.93
Peón (Vestido)	hh	4.00	0.5333	8.78	4.68
					5.61
Materiales					
Arena	m3		1.0000	8.38	8.38
					8.38
Equipos					
Herramientas Manuales	%MO		5.00%	5.61	0.28
Compactador Vibr. Tipo Plancha 5.8 HP	hm	2.00	0.2667	4.03	1.07
					1.36

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

Partida	CONCRETO F'C 210 KG/CM2 PARA BLOQUE DE ANCLAJE				Costo Unit. :	216.31
Rendimiento	15.00 m3/día					
Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio U\$	Parcial U\$	
Mano de Obra						
Capataz (Vestido)	hh	0.10	0.0533	13.98	0.75	
Operario (Vestido)	hh	1.00	0.5333	11.38	6.07	
Oficial (Vestido)	hh	1.00	0.5333	9.78	5.22	
Peón (Vestido)	hh	6.00	3.2000	8.78	28.10	
Operador Camión Grúa (Vestido)	hh	1.00	0.5333	13.21	7.05	
Rigger (Vestido)	hh	1.00	0.5333	11.99	6.39	
					53.58	
Materiales						
Cemento Portland Tipo I	bls		9.0000	10.61	95.49	
Piedra Chancada	m3		0.8000	20.40	16.32	
Arena Gruesa	m3		0.6000	17.07	10.24	
Agua	m3		0.2000	4.52	0.90	
Aditivo Curador de Concreto	lt		0.2500	2.61	0.65	
					123.60	
Equipos						
Herramientas Manuales y Andamios (% MO)	%MO		10.00%	53.58	5.36	
Mezcladora 11 p3.	hm	1.00	0.5333	3.91	2.09	
Vibrador de concreto 4 HP 18 PL (1,5")	hm	1.00	0.5333	2.01	1.07	
Camion Grua	hm	1.00	0.5333	57.39	30.61	
					39.13	

Partida	ENCOFRADO Y DEENCOFRADO PARA ANCLAJES				Costo Unit. :	38.50
Rendimiento	12.00 m2/día					
Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio U\$	Parcial U\$	
Mano de Obra						
Capataz (Vestido)	hh	0.10	0.0667	13.98	0.93	
Operario (Vestido)	hh	1.00	0.6667	11.38	7.59	
Oficial (Vestido)	hh	1.00	0.6667	9.78	6.52	
Peón (Vestido)	hh	1.00	0.6667	8.78	5.85	
					20.89	
Materiales						
Alambre negro N° 8	kg		0.5000	1.31	0.66	
Clavo c/cabeza para madera (promedio)	kg		0.2000	1.61	0.32	
Madera para encofrado y carpintería	p2		2.1000	1.71	3.59	
Triplay de espesor 19 mm	m2		1.0000	8.94	8.94	
Aditivo Desmoldante	kg		0.1000	20.11	2.01	
					15.52	
Equipos						
Herramientas Manuales y Andamios (% MO)	%MO		10.00%	20.89	2.09	
					2.09	

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

Partida **ACERO DE CONSTRUCCIÓN PARA ANCLAJES**
 Rendimiento 350.00 kg/día Costo Unit. : **2.02**

Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio U\$	Parcial U\$
Mano de Obra					
Capataz (Vestido)	hh	0.10	0.0023	13.98	0.03
Operario (Vestido)	hh	1.00	0.0229	11.38	0.26
Oficial (Vestido)	hh	1.00	0.0229	9.78	0.22
Peón (Vestido)	hh	1.00	0.0229	8.78	0.20
					0.71
Materiales					
Fo. Construcción	kg		1.0700	1.06	1.13
Alambre negro N° 16	kg		0.0600	1.31	0.08
					1.21
Equipos					
Herramientas Manuales y Andamios (% MO)	%MO		10.00%	0.71	0.07
Cizalla para corte de fierro	hm	1.00	0.0228571	1.10	0.03
					0.10

Partida **CONCRETO F'C 100 KG/CM2 - SOLADO**
 Rendimiento 10.00 m3/día Costo Unit. : **128.25**

Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio U\$	Parcial U\$
Mano de Obra					
Operario (Vestido)	hh	1.00	0.8000	11.38	9.10
Oficial (Vestido)	hh	1.00	0.8000	9.78	7.82
Peón (Vestido)	hh	4.00	3.2000	8.78	28.10
					45.02
Materiales					
Cemento Portland Tipo I	bls		5.5100	10.61	58.46
Piedra Chancada	m3		0.6170	20.40	12.59
Arena Gruesa	m3		0.5400	17.07	9.22
Agua	m3		0.1100	4.52	0.50
					80.77
Equipos					
Herramientas Manuales y Andamios (% MO)	%MO		2.00%	45.02	0.90
Mezcladora 11 p3.	hm	0.50	0.4000	3.91	1.56
					2.46

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

Partida **TUBERÍA DE FIBRA VIDRIO GRP SN 5000 PN 6, D= 2.60 MTS.**
 Rendimiento 11.60 ml/día Costo Unit. : **2,643.87**

Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio U\$	Parcial U\$
Mano de Obra					
Capataz (Vestido)	hh	1.00	0.6897	13.98	9.64
Operario Tubero (Vestido)	hh	2.00	1.3793	12.64	17.43
Peón (Vestido)	hh	4.00	2.7586	8.78	24.22
Operador Camión Grúa (Vestido)	hh	1.00	0.6897	13.21	9.11
Rigger (Vestido)	hh	1.00	0.6897	11.99	8.27
					68.67
Materiales					
Tubería GRP DN 2600, PN 6, SN 5000	ml		1.0000	1,772.89	1,772.89
Transporte tub. GRP DN 2600, PN 6, SN 5000	ml		1.0000	551.72	551.72
Acople GRP DN 2600, PN 6	und		0.1724	1,184.04	204.14
					2,528.75
Equipos					
Herramientas Manuales y Andamios	%MO		10.00%	68.67	6.87
Camión Grúa 22 ton	hm	1.00	0.6897	57.39	39.58
					46.45

Partida **TUBERÍA DE FIBRA VIDRIO GRP SN 5000 PN 6, D= 2.80 MTS.**
 Rendimiento 8.70 ml/día Costo Unit. : **2,880.39**

Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio U\$	Parcial U\$
Mano de Obra					
Capataz (Vestido)	hh	1.00	0.9195	13.98	12.86
Operario Tubero (Vestido)	hh	2.00	1.8391	12.64	23.25
Peón (Vestido)	hh	4.00	3.6782	8.78	32.29
Operador Camión Grúa (Vestido)	hh	1.00	0.9195	13.21	12.15
Rigger (Vestido)	hh	1.00	0.9195	11.99	11.03
					91.58
Materiales					
Tubería GRP DN 2800, PN 6, SN 5000	ml		1.0000	1,957.71	1,957.71
Transporte tub. GRP DN 2800, PN 6, SN 5000	ml		1.0000	551.72	551.72
Acople GRP DN 2800, PN 6	und		0.1724	1,261.18	217.45
					2,726.88
Equipos					
Herramientas Manuales y Andamios	%MO		10.00%	91.58	9.16
Camión Grúa 22 ton	hm	1.00	0.9195	57.39	52.77
					61.93

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

Partida **TUBERÍA DE FIBRA VIDRIO GRP SN 5000 PN 6, D= 3.00 MTS.**
 Rendimiento 5.80 ml/día Costo Unit. : **3,309.88**

Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio U\$	Parcial U\$
Mano de Obra					
Capataz (Vestido)	hh	1.00	1.3793	13.98	19.28
Operario Tubero (Vestido)	hh	2.00	2.7586	12.64	34.87
Peón (Vestido)	hh	4.00	5.5172	8.78	48.44
Operador Camión Grúa (Vestido)	hh	1.00	1.3793	13.21	18.22
Rigger (Vestido)	hh	1.00	1.3793	11.99	16.54
					137.35
Materiales					
Tubería GRP DN 3000, PN 6, SN 5000	ml		1.0000	2,284.82	2,284.82
Transporte tub. GRP DN 3000, PN 6, SN 5000	ml		1.0000	551.72	551.72
Acople GRP DN 3000, PN 6	und		0.1724	1,409.92	243.09
					3,079.63
Equipos					
Herramientas Manuales y Andamios	%MO		10.00%	137.35	13.74
Camión Grúa 22 ton	hm	1.00	1.3793	57.39	79.16
					92.90

Partida **TUBERÍA ESTRUCTURADA DE HDPE, RS 6 KN/m2, PN 2.5,D= 2.60 MTS.**
 Rendimiento 6.00 ml/día Costo Unit. : **2,741.48**

Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio U\$	Parcial U\$
Mano de Obra					
Capataz (Vestido)	hh	1.00	1.3333	13.98	18.64
Operario Electrofusionador (Vestido)	hh	1.00	1.3333	15.24	20.32
Peón (Vestido)	hh	2.00	2.6667	8.78	23.41
Operador Camión Grúa (Vestido)	hh	1.00	1.3333	13.21	17.61
Rigger (Vestido)	hh	1.00	1.3333	11.99	15.99
					95.97
Materiales					
Tubería HDPE RS6, DN 2600, PN 2,5 BAR	ml		1.0000	1,973.58	1,973.58
Transporte tub. HDPE RS6, DN 2600, PN 2,5 BAR	ml		1.0000	533.33	533.33
					2,506.91
Equipos					
Herramientas Manuales y Andamios	%MO		10.00%	95.97	9.60
Equipo de Electrofusión	hm	1.00	1.3333	27.06	36.08
Grupo Electrónico	hm	1.00	1.3333	12.30	16.40
Camión Grúa 22 ton	hm	1.00	1.3333	57.39	76.52
					138.60

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

Partida **TUBERÍA ESTRUCTURADA DE HDPE, RS 6 KN/m2 PN 2.5,D= 2.80 MTS.**
 Rendimiento 5.60 ml/día Costo Unit. : **3,011.32**

Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio U\$	Parcial U\$
Mano de Obra					
Capataz (Vestido)	hh	1.00	1.4286	13.98	19.97
Operario Electrofusionador (Vestido)	hh	1.00	1.4286	15.24	21.77
Peón (Vestido)	hh	2.00	2.8571	8.78	25.09
Operador Camión Grúa (Vestido)	hh	1.00	1.4286	13.21	18.87
Rigger (Vestido)	hh	1.00	1.4286	11.99	17.13
					102.83
Materiales					
Tubería HDPE RS6, DN 2800, PN 2,5 BAR	ml		1.0000	2,226.66	2,226.66
Transporte tub. HDPE RS6, DN 2800, PN 2,5 BAR	ml		1.0000	533.33	533.33
					2,759.99
Equipos					
Herramientas Manuales y Andamios	%MO		10.00%	102.83	10.28
Equipo de Electrofusión	hm	1.00	1.4286	27.06	38.66
Grupo Electrónico	hm	1.00	1.4286	12.30	17.57
Camión Grúa 22 ton	hm	1.00	1.4286	57.39	81.99
					148.50

Partida **TUBERÍA ESTRUCTURADA DE HDPE, RS 6 KN/m2 PN 2.5,D= 3.00 MTS.**
 Rendimiento 5.20 ml/día Costo Unit. : **3,298.17**

Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio U\$	Parcial U\$
Mano de Obra					
Capataz (Vestido)	hh	1.00	1.5385	13.98	21.51
Operario Electrofusionador (Vestido)	hh	1.00	1.5385	15.24	23.45
Peón (Vestido)	hh	2.00	3.0769	8.78	27.02
Operador Camión Grúa (Vestido)	hh	1.00	1.5385	13.21	20.32
Rigger (Vestido)	hh	1.00	1.5385	11.99	18.45
					110.75
Materiales					
Tubería HDPE RS6, DN 3000, PN2, 5 BAR	ml		1.0000	2,494.17	2,494.17
Transporte tub. HDPE RS6, DN 3000, PN 2,5 BAR,	ml		1.0000	533.33	533.33
					3,027.50
Equipos					
Herramientas Manuales y Andamios	%MO		10.00%	110.75	11.08
Equipo de Electrofusión	hm	1.00	1.5385	27.06	41.63
Grupo Electrónico	hm	1.00	1.5385	12.30	18.92
Camión Grúa 22 ton	hm	1.00	1.5385	57.39	88.29
					159.92