# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA FACULTAD DE INGENIERÍA CULIACÁN PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN



# "DISEÑO Y PROCEDIMIENTO DE CONSTRUCCIÓN DE UNA MINIHIDRÁULICA EN CULIACÁN, SINALOA"

### **TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN

PRESENTA:

GUILLERMO JESÚS LAZCANO BELTRÁN

DIRECTOR DE TESIS:

DR. FERNANDO GARCÍA PÁEZ

CULIACÁN, SINALOA, MÉXICO, ENERO DE 2017

### UAS- Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional

Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual, 4.0 Internacional.

### Agradecimientos

Primeramente, a Dios, por haberme brindado ese deseo de superación, de preparación personal y profesional, además de orientarme por este camino, que he disfrutado día con día, todo gracias a que él me lo permite.

De una manera muy especial quiero agradecer a mis padres, por ser mi más grande ejemplo y apoyarme incondicionalmente en cualquier aspecto de mi vida.

A mis hermanos mayores Alán y Matías, por ser también un gran ejemplo, por todas las enseñanzas que me han regalado, consejos que me han brindado y por siempre preocuparse por mí.

Al resto de mi familia, abuelos, tíos, primos y sobrinos por alentarme a lograr este sueño.

A la Universidad Autónoma de Sinaloa y en particular a la Facultad de Ingeniería Culiacán, por todo el tiempo y el esfuerzo de su personal, primero en mi época de estudiante y posteriormente ya en el posgrado. Han sido años decisivos en mi formación profesional, los cuales nunca olvidaré y estaré profundamente agradecido.

Al cuerpo académico de la Maestría en Ingeniería de la Construcción, a todos sus maestros, locales y externos, quienes con su profesionalismo, experiencia y confianza permitieron que nuestro grupo sorteará las dificultades y tropiezos naturales de esa etapa.

Especialmente quiero agradecer al Dr. Fernando García Páez, por su asesoría, su apoyo y por sus palabras de aliento en todo momento.

### Dedicatoria

A mis padres, Matías Hiram Lazcano Armienta y Rosa María Beltrán Leyva por darme siempre su amor incondicional.

A mi sobrino Santiago Lazcano Cervantes, que desde su nacimiento ha llenado de una enorme felicidad a toda mi familia.

### **Objetivo General**

Diseñar todos los elementos que conforman una minihidráulica, desarrollar el procedimiento constructivo más adecuado para ello y realizar un estimado de costos de esta alternativa de energía renovable pertinente para el Campo El Diez, en el municipio de Culiacán, Sinaloa.

### Objetivos específicos

- Elaborar el diseño hidráulico de los elementos que conforman una minihidráulica, como una alternativa sustentable de generar electricidad, aprovechando el flujo de agua del Canal San Lorenzo, ubicado en el Campo El Diez, en Culiacán, Sinaloa.
- Desarrollar un estudio para determinar la generación de energía de la pequeña central hidroeléctrica y su capacidad de abastecimiento eléctrico.
- Determinar la reducción en la quema de combustibles fósiles para la generación de la energía producida por la minihidráulica.
- Mantener el nivel de demanda en las mismas condiciones de antes de la instalación de la minihidráulica.
- Desarrollar el procedimiento constructivo de una minihidráulica en un canal artificial de corriente controlada.
- Establecer el estimado de costos necesario para la realización del proyecto.

# Diseño y procedimiento de construcción de una minihidráulica en Culiacán, Sinaloa

Maestrante: Ing. Guillermo Jesús Lazcano Beltrán Director de Proyecto de Intervención: Dr. Fernando García Páez

Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Ingeniería Culiacán, Maestría en Ingeniería de la

Construcción, Sinaloa, México.

### Resumen

La energía minihidráulica es renovable y tiene beneficios, como reducir el consumo de combustibles fósiles para producir electricidad. Generar energía renovable urge, porque mundialmente, el 90% de electricidad es producida quemando combustibles fósiles provocando grave impacto ambiental. CFE comercializa la electricidad en México, actualmente tiene 14 minihidráulicas, ninguna en Sinaloa. Este proyecto muestra el diseño y procedimiento de construcción de la primer minihidráulica en Sinaloa, capaz de producir 1 MW, ubicada en el canal de riego San Lorenzo del Campo El Diez en Culiacán, además busca que a partir de él se desarrollen tantas más como sea factible.

### **Palabras Claves**

Minihidráulica en Sinaloa, diseño de minihidráulica, construcción de minihidráulica, proceso constructivo de minihidráulica.

# Design and construction procedure of a minihydraulic in Culiacán, Sinaloa

Masters Student: Ing. Guillermo Jesús Lazcano Beltrán
Project Manager Intervention: Dr. Fernando García Páez
Autonomous University of Sinaloa, Faculty of Engineering Culiacán, Master of Engineering Construction,
Sinaloa, México.

### **Abstract**

Mini hydro energy is renewable and has benefits, such as reduce the consumption of fossil fuels to produce electricity. Generate energy renewable urges, because globally, 90% of electricity is produced causing serious environmental impact. CFE sells electricity in Mexico, currently has 14 minihydraulic, none of them in Sinaloa. This project shows the design and procedure of construction of a minihydraulic capable of produce 1 MW, located in the irrigation canal San Lorenzo in the Campo El Diez in Sinaloa, also seeks to pioneer a state level and from it develop as many more as practicable.

## **Key words**

Minihydraulic in Sinaloa, design mini hydro, construction of mini hydro, mini hydro construction process.

# Índice

1 Introducción	1
1.1 Presentación	1
1.2 Análisis situacional	1
1.3 Descripción del problema general	4
1.4 Definición del problema seleccionado	8
2 Bases teóricas	11
2.1 Marco histórico y contextual	11
2.2 Marco referencial	16
2.3 Marco legal	18
2.4 Marco teórico	21
3 Proyecto de intervención	28
3.1 Su enunciado y descripción	28
3.2 Objetivo General	29
3.3 Objetivos específicos	29
3.4 Justificación	30
3.5 Metodología	35
3.5.1 Identificación del sitio	35
3.5.2 Trabajo de campo	37
3.5.3 Trabajo de gabinete	43
3.5.4 Análisis de los resultados	64
3.5.5 Procedimiento constructivo	66
3.5.6 Estimado de costos	72
3.5.7 Cierre de proyecto	73
3.5.8 Presentación de los resultados	74
4 Estrategias de implementación	75
4.1 Plan de acción	
4.1.1 Identificación del sitio	75
4.1.2 Trabajo de campo	79

4.1.3 Trabajo de gabinete y procesamiento de la información	85
4.1.4 Análisis de los resultados	103
4.1.5 Procedimiento constructivo	108
4.1.5.1 Etapa 1 del procedimiento constructivo - Canal de desvío	109
4.1.5.2 Etapa 2 del procedimiento constructivo – Obra de represamier obra de toma	•
4.1.5.3 Etapa 3 del procedimiento constructivo – Relleno del canal de desvío	121
4.1.5.4 Etapa 4 del procedimiento constructivo – Tubería a presión	122
4.1.5.5 Etapa 5 del procedimiento constructivo – Casa de máquinas	128
4.1.5.6 Etapa 6 del procedimiento constructivo – Tubería de retorno	128
4.1.6 Estimado de costos	129
4.1.7 Cierre de proyecto	131
4.1.8 Presentación de los resultados	133
4.2 Estrategias usadas para la presentación y venta del proyecto	136
4.3 Estrategias para vinculación	139
5 Administración del proyecto	141
5.1 Cronograma de actividades	141
5.2 Recursos	141
5.3 Presupuesto	143
6 Conclusiones y recomendaciones	144
6.1 Conclusiones y recomendaciones	144
Referencias documentales	146
Bibliografía complementaria	146
Anexos	151
Anexo 1	152
Anexo 2	159

# Índice de figuras

Figura 1. 1 Suministro total de energía en el mundo. (Sistema Nacional de
información del agua - CONAGUA)
Figura 1. 2 Generación hidroeléctrica en México. (Subsecretaría de Electricidad - Sector Eléctrico Nacional)
Figura 1. 3 Ciclo Hidrológico. Fuente: SENER, (2015) 5
Figura 1. 4 Minihidráulicas potenciales en México. (Inventario Nacional de Energías Renovables, 2015)
Figura 1. 5 Minihidráulicas potenciales en Sinaloa. (Inventario Nacional de Energías Renovables, 2015)
Figura 3. 1 Mapa de macro-localización de Culiacán, Sinaloa 30
Figura 3. 2 Mapa de micro-localización del Campo El Diez, Culiacán
Figura 3. 3 Canal San Lorenzo
Figura 3. 4 Fotografía satelital del canal San Lorenzo tomada en agosto del 2008
Figura 3. 5 Fotografía satelital del canal San Lorenzo tomada en febrero del 2015
Figura 3. 6 Secciones en un tramo de canal
Figura 3. 7 Esquema de una obra de represamiento
Figura 3. 8 Frente de obra de represamiento con compuertas radiales 45
Figura 3. 9 Perfil con compuerta radial
Figura 3. 10 Valores de Kt en función de la forma de las barras de la reiilla 53

Figura 3. 11 Esquema general de una instalación hidroeléctrica	57
Figura 3. 12 Diagrama para la selección de turbinas hidráulicas a nivel de pequeñas centrales hidroeléctricas.	60
Figura 3. 13 Bordo libre para canales con revestimiento de superficie dura, membrana enterrada y tierra. (Sotelo, 2002).	69
Figura 4. 1 Sitios probables para el emplazamiento de la minihidráulica	75
Figura 4. 2 Rápida ubicada en el canal San Lorenzo en el Campo El Diez en Culiacán Sinaloa - Sitio para el emplazamiento de la minihidráulica	77
Figura 4. 3 Margen derecha del canal San Lorenzo.	78
Figura 4. 4 Caída hidráulica del canal San Lorenzo.	78
Figura 4. 5 Vista lateral de la rápida ubicada en el canal San Lorenzo	79
Figura 4. 6 Estaciones sobre el eje de proyecto del canal San Lorenzo	80
Figura 4. 7 Puntos para levantamiento topográfico de cada estación del canal.	81
Figura 4. 8 Estado del material que conforma la sección transversal del canal	84
Figura 4. 9 Ubicación de la casa de máquinas – Vista en planta	90
Figura 4. 10 Fotografía 1 del sitio para la ubicación de la casa de máquinas	91
Figura 4. 11 Fotografía 2 del sitio para la ubicación de la casa de máquinas	91
Figura 4. 12 Fotografía 3 del sitio para la ubicación de la casa de máquinas	92
Figura 4. 13 Fotografía 4 del sitio para la ubicación de la casa de máquinas	92
Figura 4. 14 Turbina tipo Kaplan	99
Figura 4. 15 Turbina tipo Bulbo	99

Figura 4. 16 Partes de una turbina tipo Bulbo	100
Figura 4. 17 Interior de una turbina tipo Bulbo1	100
Figura 4. 18 Turbina tipo Bulbo (Eternoo Machinery Co., Ltd) 1	102
igura 4. 19 Sección transversal del canal de desvío - primera propuesta 1	114
igura 4. 20 Sección transversal definitiva del canal de desvío 1	114
Figura 4. 21 Máquina con pinza especial para tubos - Fotografía 1 1	123
Figura 4. 22 Máquina con pinza especial para tubos - Fotografía 2 1	123
Figura 4. 23 Máquina con pinza especial para tubos - Fotografía 3 1	124

# Índice de tablas

Tabla 1. 1 Generación hidroeléctrica en México. (Subsecretaría de Electricidad - Sector Eléctrico Nacional)
Tabla 1. 2 Minihidráulicas en México. (Inventario Nacional de Energías Renovables, 2015)
Tabla 1. 3 Datos técnicos de las principales centrales de CFE en operación en Sinaloa en 2014. (Comisión Federal de Electricidad, 2015)
Tabla 3. 1 Consumo de energía eléctrica para una casa promedio ubicada en el "Campo El Diez", Culiacán, Sinaloa
Tabla 3. 2 Factores a considerar para la selección del sitio
Tabla 3. 3 Selección del sitio de emplazamiento de la minihidráulica 37
Tabla 3. 4 Dimensiones de compuertas radiales y deslizantes
Tabla 3. 5 Características de materiales usados en tuberías a presión 50
Tabla 3. 6 Velocidades máximas permisibles 51
Tabla 3. 7 Valores de K para la ecuación 31 54
Tabla 3. 8 Valores de Kc para contracción brusca54
Tabla 3. 9 Valores del coeficiente Kv en función del tipo de válvula 55
Tabla 3. 10 Rango de cargas de trabajo para diferentes tipos de turbinas 59
Tabla 3. 11 Resumen de cálculos de tubería a presión, carga de la turbina y potencia real teórica
Tabla 3. 12 Tabla para cálculo del consumo diario de energía de una casa promedio

Tabla 3. 13 Tabla para cálculo de la potencia diaria generada por la minihidráulica
Tabla 4. 1 Resultados de la selección del sitio de emplazamiento de la minihidráulica
Tabla 4. 2 Características geométricas de las secciones transversales del canal "San Lorenzo"
Tabla 4. 3 Elementos geométricos de las secciones transversales analizadas 83
Tabla 4. 4 Cálculos de las dimensiones de la rejilla de la obra de toma 89
Tabla 4. 5 Gasto, longitud y cálculo de carga hidráulica para diseño de tubería a presión
Tabla 4. 6 Propuesta de diseño comparativa para cálculo de la tubería a presión (1 conducto)
Tabla 4. 7 Propuesta de diseño comparativa para cálculo de la tubería a presión (2 conductos)
Tabla 4. 8 Propuesta de diseño comparativa para cálculo de la tubería a presión (3 conductos)
Tabla 4. 9 Datos para el cálculo del espesor de la tubería a presión 96
Tabla 4. 10 Pérdidas de energía, carga de la turbina y potencia real teórica para una tubería a presión de 3.20 m de diámetro
Tabla 4. 11 Consumo diario de energía eléctrica para una casa promedio ubicada en la ciudad de Culiacán, Sinaloa
Tabla 4. 12 Consumo diario de energía eléctrica para una casa promedio ubicada en el Campo El Diez, en Culiacán, Sinaloa
Tabla 4. 13 Energía generada en KWh por la minihidráulica 105

Tabla 4. 14 Tabla de conversiones para unidades energéticas	107
Tabla 4. 15 Propuesta de dimensiones para diseño del canal de desvío	110
Tabla 4. 16 Información de curvas del canal de desvío	112
Tabla 4. 17 Resumen del estimado de costos	131
Tabla 5. 1 Presupuesto del proyecto de intervención	143

# 1.- Introducción

# 1.1.- Presentación

Campo El Diez es una localidad ubicada en el municipio de Culiacán del estado de Sinaloa. El canal principal de riego "San Lorenzo", con origen en el "Dique la Primavera", cruza esta comunidad.

Tiene un gasto de agua de hasta 37 m³ por segundo durante 8 meses aproximadamente en el año, una caída hidráulica de 7.5 metros, características pertinentes para la instalación de una minihidráulica.

Este proyecto de intervención tiene la aspiración de aprovechar el flujo de agua del canal "San Lorenzo" y producir energía eléctrica con un bajo impacto ambiental en la zona. Para ello debe llevarse a cabo el diseño y construcción de una pequeña central hidroeléctrica, es decir, una minihidráulica. De realizarse el proyecto, pretende venderse la energía producida a la CFE, que es la dependencia encargada de comercializar y distribuir la electricidad en México.

# 1.2.- Análisis situacional

El desarrollo económico de cualquier país es impensable sin la energía requerida para mover los elementos que componen su estructura social y productiva (Comisión Federal de Electricidad, 2015). La educación, la industria y la alimentación, son algunas actividades fundamentales de la sociedad, que forman parte de la evolución y progreso económico de cualquier comunidad, además de ser altamente dependientes de la energía eléctrica.

En el planeta, el porcentaje de energía eléctrica generada a partir de la quema de combustibles fósiles y de la energía nuclear es de más del 90%, tal y como se muestra en la figura 1. 1. El uso de estas fuentes ha sido cuestionado mundialmente, sobre todo por su alta producción de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que

se emite a la atmósfera, lo que contribuye a la acumulación de gases de efecto invernadero (GEI), que son impulsores del cambio climático. (González, 2009).

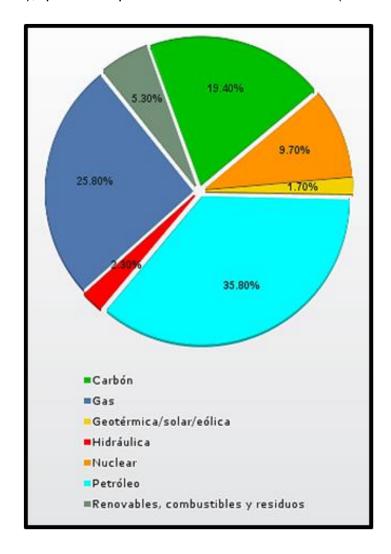


Figura 1. 1.- Suministro total de energía en el mundo. (Sistema Nacional de información del agua - CONAGUA).

Asimismo, los combustibles fósiles se vuelven escasos y cada vez cuesta más encontrarlos. No son renovables, lo que quiere decir que una vez que son utilizados, los sistemas basados en ellos literalmente habrán agotado el combustible. Al mismo tiempo el peligro de impulsar la contaminación y el cambio climático por la quema de ellos ha llegado a convertirse en un gran problema de

salud ambiental para cada persona y para cada lugar del mundo. (Hesperian health guides, 2011).

México no es la excepción ya que para el año 2014, solo el 14.8% de la generación de electricidad ha sido a través de la energía hidráulica, el resto, por otras fuentes como las termoeléctricas, tal y como se muestra en la tabla 1. 1 y figura 1. 2.

El alto porcentaje de generación de energía mediante la utilización de materias primas como el carbón, gas, petróleo y elementos nucleares, es preocupante, ya que provocan un gran desequilibrio ecológico, mismo que según la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) se define como la alteración de las relaciones de interdependencia entre los elementos naturales que conforman el ambiente, que afecta negativamente la existencia, transformación y desarrollo del hombre y demás seres vivos, dicho desequilibrio ecológico genera una situación actual de alarma.

Tabla 1. 1.- Generación hidroeléctrica en México. (Subsecretaría de Electricidad - Sector Eléctrico Nacional).

Generación bruta y capacidad efectiva de generación hidroeléctrica, en México							
Párametro	Año						
Parametro	2010	2011	2012	2013	2014		
Generación de energía hidroeléctrica (TWh)	36.70	35.80	31.30	27.40	38.10		
Generación total de energía eléctrica (TWh)	241.50	257.90	260.50	257.90	258.30		
Porcentaje respecto a la generación total	15.20	13.90	12.00	10.60	14.80		
Capacidad hidroeléctrica (MW)	11503.20	11452.90	11497.60	11508.80	12268.80		
Capacidad instalada (MW)	52945.40	51931.20	52533.90	53496.50	54371.70		
Porcentaje respecto a la capacidad total	21.70	22.10	21.90	21.50	22.60		

Fuente: CONAGUA, SINA.

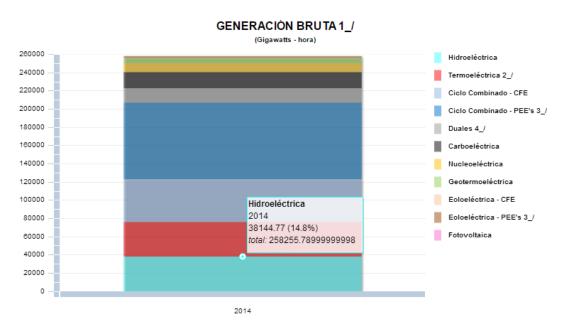


Figura 1. 2.- Generación hidroeléctrica en México. (Subsecretaría de Electricidad - Sector Eléctrico Nacional).

# 1.3.- Descripción del problema general

El poco porcentaje de producción de energía a través de fuentes renovables, alrededor del 9.3% mundialmente (CONAGUA, 2015), la alta producción de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el cambio climático, entre otras, son razones por las cuales empieza a ser urgente generar energía eléctrica de una manera diferente, por ejemplo, mediante el uso de las energías limpias.

Las energías limpias son aquellas que pueden producirse con un mínimo de perjuicios sociales, culturales, para la salud y el medio ambiente. Estas energías también se conocen como renovables o sostenibles.

Las energías renovables son: "todas aquellas energías derivadas de un proceso natural, las cuales son renovadas en una escala de tiempo humana. (International Energy Agency, 2015). Entre estas fuentes de energía están: la hidráulica, la solar, la eólica, la geotérmica, la oceánica y la de biomasa, las cuales

existen debido a la energía de la radiación solar, la atracción gravitacional de la luna, el sol y el calor interno de la Tierra.

La energía hidráulica se obtiene a partir de la energía cinética y potencial del agua. El inicio de la energía hidráulica ocurre principalmente por el "ciclo hidrológico" que tiene su origen a partir de la radiación del sol que incide sobre la tierra, tal y como se observa en la figura 1. 3.

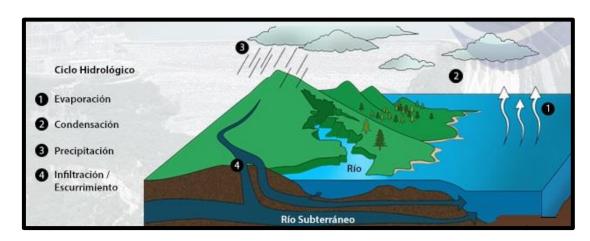


Figura 1. 3.- Ciclo Hidrológico. Fuente: SENER, (2015).

La energía hidráulica se transforma en electricidad al circular agua a presión a través de una turbina para producir energía mecánica. Las turbinas transmiten la energía mecánica de su rotación mediante un eje a un generador de electricidad.

La generación de energía a partir de una corriente de agua es la forma de energía renovable más usada en el mundo para generar electricidad. La mayoría es producida con centrales de gran escala que utilizan presas y embalses grandes los cuales pueden almacenar una gran cantidad de agua para regular la generación. Estas centrales tienen la capacidad de generar cantidades considerables de electricidad en forma constante durante ciertos períodos pero también causan impactos ambientales y sociales. Sin embargo, también existen sistemas a pequeña escala, las cuales son conocidas como centrales "al hilo del agua" ya que no requieren de un embalse, por lo tanto no causan estos problemas

y pueden contribuir a brindar el servicio de electricidad en zonas no electrificadas y fortalecer la red interconectada. (Secretaría de Energía, 2015).

Por lo anterior mencionado si se aprovecha una energía limpia como la hidráulica a pequeña escala se reducirá el daño que los combustibles fósiles causan a la salud humana y al ambiente.

Actualmente las plantas de energía hidroeléctricas, se catalogan como grandes o pequeñas dependiendo de su tamaño y potencia generada.

Las pequeñas centrales hidroeléctricas son aquellas que tienen una capacidad efectiva instalada menor de 30 MW, sin embargo, dentro de esta categoría se cuenta con otra ordenación, dividiendo a las mismas en pequeñas, micro y mini hidroeléctricas según su capacidad efectiva instalada. La pequeña central hidroeléctrica que se propone en este proyecto de intervención se cataloga como una minihidráulica, las cuales tienen la capacidad de producir hasta 5 MW.

En México, la Comisión Federal de Electricidad es la empresa que a partir de octubre del 2009, se encarga de brindar el servicio eléctrico en todo el país, desde su creación en 1937 hasta la fecha cuenta con 62 centrales hidroeléctricas, 31 de ellas clasificadas como pequeñas centrales, de las cuales, 14 pueden considerarse como minihidráulicas, mismas que se muestran en la tabla 1. 2 (Inventario Nacional de Energías Renovables, 2015).

De acuerdo con las cifras de la tabla 1. 2, en los últimos 20 años solo se ha construido una minihidráulica por parte de la CFE, cuando el potencial nacional minihidráulico es capaz de generar más de 4500 GW anuales, y es que tan sólo para una amplia región montañosa de Veracruz y Oaxaca, se han identificado sitios de aprovechamiento que alcanzarían una generación de 3570 GW al año. (Ver figura 1. 4).

Tabla 1. 2.- Minihidráulicas en México. (Inventario Nacional de Energías Renovables, 2015).

Nombre	Fecha de entrada en operación	Ubicación	Productor	Unidades	Capacidad Instalada (MW)
Bartolinas	20/11/1940	Tacámbaro de Codallo, Michoacán	CFE	2	0.75
Colina	01/09/1996	San Francisco de Conchos, Chihuahua	CFE	1	3
Electroquímica	01/10/1952	Ciudad Valles, San Luis Potosí	CFE	1	1.44
Itzicuaro	01/01/1929	Periban de Ramos, Michoacán	CFE	2	0.62
Ixtaczoquitlán	10/09/1905	Ixtaczoquitlán, Veracruz	CFE	1	1.6
Jumatán	17/07/1941	Tepic, Nayarit	CFE	4	2.18
Micos	01/01/1940	Ciudad Valles, San Luis Potosí	CFE	2	0.69
Portezuelos I y II	01/01/1901	Atlixco, Puebla	CFE	6	3.06
San Pedro Porúas	01/10/1958	Villa Madero, Michoacán	CFE	2	2.56
Schpoiná	07/05/1953	Venustiano Carranza, Chiapas	CFE	3	2.24
Tamazulapan	12/12/1962	Tamazulapan del Espíritu Santo, Oaxaca	CFE	2	2.48
Texolo	01/11/1951	Teocelo, Veracruz	CFE	2	1.6
Tirio	01/01/1905	Morelia, Michoacán	CFE	3	1.1

Fuente: INERE, 2015.

En Sinaloa, lugar donde se pretende llevar a cabo este proyecto, se cuenta con la pequeña central hidroeléctrica Salvador Alvarado ubicada en la presa Sanalona, en el municipio de Culiacán, misma que no entra en la clasificación de minihidráulica debido a que tiene una capacidad instalada de 14 MW, por lo que en el estado no se tiene registro que esté en funcionamiento alguna planta de esta índole. (Comisión Federal de Electricidad, 2014).

Existe información sobre más de 20 sitios, algunos ya probados dentro del estado de Sinaloa donde se podría instalar una central hidroeléctrica de este tipo, sin embargo, aún no se han puesto en marcha. Por lo tanto se procurará que este proyecto sea el pionero para a partir de él aprovechar los demás sitios posibles. (Ver figura 1. 5).



Figura 1. 4.- Minihidráulicas potenciales en México. (Inventario Nacional de Energías Renovables, 2015).

# 1.4.- Definición del problema seleccionado

Sinaloa es reconocido en México y el extranjero por su liderazgo en la producción alimentaria del país, por el volumen y calidad de sus productos pesqueros, cárnicos, agrícolas y por sus destinos turísticos de placer y de negocios. Pero sobre todo, por la pasión que su gente imprime día a día en la construcción de un mejor lugar para vivir.

Sinaloa tiene un excelente ambiente de negocios, apoyado tanto por organizaciones públicas como privadas. Es considerado por el Banco Mundial como el 8vo estado con más facilidad para hacer negocios en México. Es el 10mo estado del país en el Índice Mexicano de Competitividad. (Center for Investment & Trade Sinaloa, 2015).

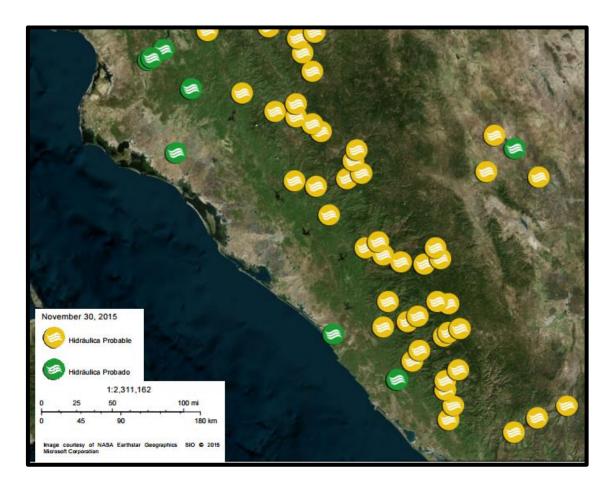


Figura 1. 5.- Minihidráulicas potenciales en Sinaloa. (Inventario Nacional de Energías Renovables, 2015).

Es importante resaltar que es el estado en primer lugar en la producción de maíz, tomate, hortalizas, papa, pesca de atún y camarón a nivel nacional.

En materia de producción de energía eléctrica, Sinaloa cuenta con 10 plantas hidroeléctricas y termoeléctricas con una capacidad instalada de 1,800 MW, las principales centrales eléctricas se muestran en la tabla 1.3.

Como se muestra en la tabla 1. 3, la generación anual de energía en GWh de la tecnología hidroeléctrica es menos del 50% del total de la termoeléctrica, con lo que se constata que Sinaloa es un estado altamente dependiente de la producción y generación de energía eléctrica a través de fuentes no renovables, al igual que nuestro país.

Tabla 1. 3.- Datos técnicos de las principales centrales de CFE en operación en Sinaloa en 2014. (Comisión Federal de Electricidad, 2015).

Central	Tecnología	Estado	No. de unidades	Capacidad (MW)	Generación (GWh)	Factor de planta (%) *
Mazatlán II (José Aceves Pozos)	Termoeléctrica	Sinaloa	3	616	2221	41.20
Huites (Luis Donaldo Colosio)	Hidroeléctrica	Sinaloa	2	422	1077	29.10
Topolobampo II (Juan de Dios Bátiz)	Termoeléctrica	Sinaloa	3	320	1324	47.20
Total Nacional			8	1358	4622	38.90

<sup>\*</sup> Caclulado con base en su operación contínua durante los 365 días del año

Fuente: Comisión Federal de Electricidad

El Desarrollo Sostenible o Sustentable, según la LGEEPA, es el proceso evaluable mediante criterios e indicadores del carácter ambiental, económico y social que tiende a mejorar la calidad de vida y la productividad de las personas, que se funda en medidas apropiadas de preservación del equilibrio ecológico, protección del ambiente y aprovechamiento de recursos naturales, de manera que no se comprometa la satisfacción de las necesidades de las generaciones futuras; a pesar del porcentaje de generación de energía con fuentes no renovables y de la urgencia en el mundo de impulsar el desarrollo sostenible, el 28 de mayo de 2015, comenzó la construcción en Sinaloa del megaproyecto del gasoducto impulsado por el gobierno del estado, el cual tendrá una longitud de 640 kilómetros y una inversión de \$840 millones de dólares (MDD), mismo que tiene la finalidad de cambiar el combustóleo por gas natural como materia prima para la generación de energía. Al hacer dicho cambio, según información proporcionada por Leovigildo Carranza, importante empresario e inversionista pesquero Sinaloense, el costo actual de 1 MW de electricidad se reduciría de \$1335.00 a \$300.00, gracias al uso del gas natural.

Sin embargo, el gas natural, es un recurso no renovable, que según la NOM-001-SECRE-2010, es una mezcla de hidrocarburos y otros componentes compuesta primordialmente por metano, mismo que está clasificado como un gas

de efecto invernadero (GEI), y por lo tanto representa una forma de producir energía eléctrica causando un alto impacto ambiental.

En base a lo mencionado, podemos reducir el problema a una sola oración:

En Sinaloa se requiere aprovechar mejor un recurso tan valioso como es el agua, y que tenemos a lo largo de todo el territorio. En particular la producción de energía eléctrica se hace por medio de grandes plantas hidroeléctricas y termoeléctricas, causantes de un gran desequilibrio ecológico, pero falta, establecer minihidráulicas, como alternativas de generación de electricidad con bajo impacto ambiental.

En busca de propiciar el desarrollo sustentable y de impulsar proyectos de bajo impacto ambiental para producción de energía, este proyecto de intervención propone el diseño de una minihidráulica en Sinaloa, estado mexicano donde se tienen identificados más de 20 sitios para el emplazamiento de obras de este tipo.

La realización de la minihidráulica propuesta en Sinaloa, específicamente en el municipio de Culiacán, sería la primera en el estado, esta obra sustentable permitiría reducir en gran medida el consumo de combustibles fósiles para la generación de electricidad, por lo que este proyecto podría fungir como pionero a nivel estatal y a partir de él desarrollar tantos más como sea factible.

# 2.- Bases teóricas

# 2.1.- Marco histórico y contextual

Alrededor de 3000 años a. C. en el antiguo Egipto, región árida de África donde la lluvia es muy escasa (100 mm a 200 mm anuales aproximadamente), se desarrollaron las primeras estructuras hidráulicas con la finalidad de aprovechar la energía originada por las avenidas del Río Nilo, que permitió el asentamiento y la subsistencia en esa región del mundo. Dicho aprovechamiento fue mediante la

construcción de ruedas hidráulicas, diques, estanques y canales para el riego de los cultivos.

Siglos después, en el XIX, apareció una gran invención desarrollada por el ingeniero francés Benoit Fourneyron a la que llamó "turbina" que prácticamente era una mejora de las antiguas ruedas hidráulicas tradicionales, con la diferencia de que esta se colocaba horizontalmente y las otras de modo vertical. Esta turbina era capaz de trabajar a más de 2300 rpm con un rendimiento de más del 80%, sin embargo, tenía algunos inconvenientes causados por el flujo centrífugo del agua que la atravesaba, lo que causaba problemas si se reducía el flujo de agua.

Asimismo en los Estados Unidos, James Francis realizó la más detallada investigación de su tiempo en referencia a las turbinas, lo que tuvo como consecuencia el desarrollo de la turbina de flujo mixto. Por su parte, en 1850, su compatriota Lester Pelton creó una turbina donde el agua se conducía desde un depósito a gran altura a través de un canal hasta una boquilla eyectora que convertía la energía cinética del agua en un chorro a presión que incidía sobre la rueda. (Edge, 1989).

Como consecuencia del perfeccionamiento de la turbina, en 1880 apareció la primera instalación que aprovechaba la energía hidráulica para hacer girar un alternador y así producir electricidad en Northumberland, Gran Bretaña. De igual forma la primera hidroeléctrica en Norteamérica fue construida en 1882 sobre el Río Fox, en Appleton Wisconsin, esta central fue iniciada por el dueño de una fábrica de papel, el señor H.F. Rogers, quien tuvo la idea de utilizar una turbina accionada por la fuerza del agua y así producir 12.5 kilovatios de energía eléctrica, lo suficiente como para abastecer dos fábricas de papel y su hogar. (Ramos y Montenegro, 2012).

### Según Ruiz (2009):

A principios del siglo XX se desarrollaron en Europa las centrales hidroeléctricas pequeñas con capacidades instaladas de varias decenas o centenas de kilowatts. La construcción de pequeñas centrales hidroeléctricas se siguió dando principalmente en varios países de este continente y en algunos de Asia. (p.8).

Todo lo anterior representa los primeros aprovechamientos del recurso hidráulico para generar energía eléctrica.

A partir de estos acontecimientos en la historia, la energía hidroeléctrica tomó gran auge y es para el día de hoy, la fuente de energía renovable más importante y más utilizada en el mundo, registrando 970 GW de capacidad de generación eléctrica en el año reciente de 2011. (SENER, 2012).

Los beneficios de producir electricidad a través de la energía hidráulica son muchos, algunos de ellos son la reducción del consumo de combustibles fósiles como el carbón o el combustóleo para la producción de energía, reducir los riesgos por inundación, evitar la erosión de las cuencas hidrológicas y detonar el desarrollo económico, entre otros , aun así, se estima que más de dos tercios del potencial y provecho que de ella puede obtenerse no ha sido explotado, lo que deja abierta la posibilidad de propuestas de diseño y construcción de nuevos proyectos con la finalidad de aprovechar este tipo de energía, como las pequeñas centrales hidroeléctricas que se han desarrollado activamente en muchos países y como la que se pretende en este proyecto.

En zonas rurales, las pequeñas centrales son de uso frecuente en aplicaciones semiautónomas para reemplazar generadores de diesel o de otras fuentes de energía a pequeña escala. En la última década y para precisar, a finales del 2009, la generación mundial hidroeléctrica en pequeña escala alcanzó un estimado de 60 GW, de los 980 GW totales producidos. Debe resaltarse que

Estados Unidos, registró 10 GW de pequeñas centrales hidroeléctricas, de los 81 GW de su capacidad total, es decir un 12.3% de su cabida. (SENER, 2012).

En México, las empresas eléctricas privadas eran las encargadas de suministrar la energía eléctrica a las principales ciudades, siendo sus iniciadores los empresarios mineros de Batopilas, Chihuahua, los cuales, en el año de 1889, comenzaron una pequeña central hidroeléctrica para aprovechar las aguas del río del mismo nombre, con objeto de generar electricidad para las instalaciones de la explotación minera. Este fue el detonante para que en México surgieran otras pequeñas plantas hidroeléctricas en distintas zonas del país.

Así a partir de ese momento, el territorio mexicano en materia de generación de hidroelectricidad estuvo poco más de 45 años a cargo de empresas extranjeras, las cuales fundaron pequeñas centrales hidroeléctricas y comercializaban este producto. En ese periodo se instalaron 372 MW, y dado el control monopolizado de energía eléctrica por parte de los extranjeros, el Presidente Lázaro Cárdenas decreta el 14 de agosto de 1937 la formación de la Comisión Federal de Electricidad. (Ramos y Montenegro, 2012).

En los años ochenta del siglo pasado a consecuencia de la crisis del petróleo y la búsqueda de fuentes de energía alternativa, se llevó a cabo la X Conferencia Mundial de la Energía celebrada en Estambul donde surgió la Ley 82/80 sobre Conservación de la Energía y el Real Decreto 1.217/1.991, para el fomento de la producción de electricidad en pequeñas centrales, se impulsó la restauración de este tipo de instalaciones, con un límite de potencia de 5 MW, dándose licencia a una primera partida de un centenar de mini centrales. (Ruiz, 2009).

Con la aparición de esta nueva Ley, en México, se elaboró el I Plan de Energías Renovables (PER-86), que estimuló la rehabilitación de minicentrales, hasta llegar a la puesta en producción de 105 de ellas en los años siguientes y activar enormemente la solicitud de concesiones de nuevos aprovechamientos.

En el año de 1989 aparece el II Plan de Energías Renovables con una vigencia de siete años que adecuaba la rehabilitación de minicentrales a un marco económico y temporal más favorable para sus promotores. Consecuencia de ello, se pusieron en marcha un total de 82 nuevas explotaciones en las décadas de los años ochenta y noventa del siglo pasado.

Desde la creación de la CFE hasta el día de hoy, en México se cuentan con 62 centrales hidroeléctricas, 31 de ellas clasificadas como pequeñas centrales, de las cuales, 14 pueden considerarse como minihidráulicas. (Comisión Federal de Electricidad, 2014).

De acuerdo con las cifras de la tabla 1.2, en los últimos 20 años solo se ha construido una minihidráulica por parte de la CFE, cuando el potencial nacional minihidráulico es capaz de generar más de 4500 GW anuales, y es que tan sólo para una amplia región montañosa de Veracruz y Oaxaca, se han identificado sitios de aprovechamiento que alcanzarían una generación de 3570 GW al año. (Ver figura 1.4).

En Sinaloa, lugar donde se pretende llevar a cabo este proyecto se cuenta con la pequeña central hidroeléctrica Salvador Alvarado ubicada en la presa Sanalona, en el municipio de Culiacán, misma que no entra en la clasificación de minihidráulica debido a que tiene una capacidad instalada de 14 MW, por lo que en el estado no se tiene registro que esté en funcionamiento alguna planta de esta índole. (Comisión Federal de Electricidad, 2014).

Existe información sobre más de 20 sitios, algunos ya probados dentro del estado de Sinaloa donde se podría instalar una central hidroeléctrica de este tipo, sin embargo, aún no se han puesto en marcha. Por tanto procuraremos que este proyecto sea el pionero para a partir de él aprovechar los demás sitios posibles. (Ver figura 1.5).

# 2.2.- Marco referencial

El alto porcentaje de generación de energía a través de la quema de combustibles fósiles en el mundo y en México, es preocupante, debido a la incompatibilidad que tiene esta manera de generar energía con el medio ambiente. Ramos L. y Montenegro M. en su artículo publicado en junio del 2012 llamado "Las pequeñas centrales hidroeléctricas en México: pasado, presente y futuro", hablan sobre ello y proponen que México debe tener como directriz la sustentabilidad, con base en el uso de recursos renovables, por lo que debe aprovechar el recurso hídrico debido a que es la fuente de energía renovable que más le favorece por sus características geográficas y topográficas. Aun teniendo conocimiento de esto, en las últimas décadas del siglo XX, no se construyeron en México centrales hidroeléctricas, ya que a mediados del siglo referido, por ser más económicamente factibles para las finanzas públicas, se construyeron centrales termoeléctricas, pues se consideraban más baratas; a esto se sumó el yacimiento natural de petróleo encontrado en marzo de 1971, conocido como Cantarell, que hizo al gobierno inclinarse por centrales que utilizaran combustibles fósiles y así liberar las finanzas públicas; situación que hoy en día, con el problema de tipo ambiental que experimenta el mundo, se considera un error.

Sin embargo, debido al activismo ambiental de los últimos años y la conciencia mundial en torno al llamado cambio climático, se ha despertado el interés por el desarrollo de centrales hidroeléctricas debido a que no usan combustibles fósiles, como la pequeña planta que se propone en este proyecto de intervención. Por esta razón y por el comercio mundial de bonos de carbono, el desarrollo de centrales hidroeléctricas en gran y pequeña escala es la manera en la que se vislumbra el futuro para el desarrollo y progreso en generación de electricidad en México.

De igual forma, en el año 2012, la Secretaría de Energía (SENER), publica la Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026 con la finalidad impulsar el uso

de tecnologías como la eólica, la solar, la hidroeléctrica, la minihidráulica, la geotermia, la mareomotriz y la biomasa, entre otras, así como dar a conocer el potencial energético de nuestro país proveniente de recursos naturales. Además se presenta un panorama internacional de las energías renovables, se describe el marco legal, regulatorio y normativo nacional, así como las políticas y programas de apoyo para el desarrollo de las energías renovables.

En el mencionado programa se analiza la situación actual de México referente a pequeñas, micro y mini centrales hidroeléctricas, y se menciona que la CFE, no contempla el potencial de este tipo de hidroeléctricas respecto al potencial eléctrico del país, debido a que los potenciales estimados por CFE corresponden a proyectos con una capacidad de generación mayor a los 40 GWh/año. Sin embargo, existen algunos estudios que permiten conocer los potenciales regionales, e identificar de manera general el potencial de dichas escalas de proyecto en el país. Además, en dicho programa se alude a las investigaciones llevadas a cabo por la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE, antes Comisión Nacional para el Ahorro de Energía, CONAE) donde identificaron, en la sierra norte de Puebla y Veracruz, un potencial estimado de 364 MW de potencia media y 61 MW de potencia instalada, con una generación media anual de más de 3,526.1 GWh/año, una razón más por las cual es necesario aprovechar y desarrollar proyectos de generación de energía eléctrica mediante energías limpias como la minihidráulica.

El cambio climático, la desaparición de numerosas especias de flora y fauna, el inadecuado uso de las fuentes de energías no renovables, entre muchas otras razones más, son por lo que se han desarrollado en el mundo proyectos de investigación sobre el desarrollo y diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas como alternativas de generación de electricidad, para las cuales es necesario la instalación de máquinas hidráulicas conocidas como turbinas, imprescindibles para este propósito. Es entonces, la selección del tipo de turbina un factor primordial para el buen rendimiento de una minihidráulica.

David Edge, en su obra "A historical survey of low-head hydropower generators and recent laboratory based work at the University of Salford", menciona las características a detalle de diferentes tipos de turbina con la finalidad de instalar equipos adecuados para sitios pequeños y de esa manera optimizar la producción de la electricidad. Esta obra se basa en la experiencia del autor obtenida en el laboratorio y su experiencia profesional en el campo de la ingeniería mecánica.

Las obras aquí mencionadas, han logrado clarificar en gran forma el panorama actual nacional e internacional en cuanto a la generación de energía eléctrica y fungen como impulsores para la realización de este proyecto de intervención.

# 2.3.- Marco legal

El diseño y procedimiento de construcción de una minihidráulica, es un proyecto de energías renovables, debido a esto, es necesario contar con un marco regulatorio o marco legal, y de esta forma contribuir a la seguridad energética del país y la protección y conservación del medio ambiente. Los principales ordenamientos legales aplicables para este proyecto son:

Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.- contiene en sus artículos 4o, 27 y 28, varios preceptos en los que el uso y aprovechamiento de las energías renovables y no renovables se sustentan, como el derecho a un medio ambiente adecuado (artículo 4°); así como la rectoría que le corresponde al Estado del desarrollo nacional para garantizar que éste sea integral y sustentable y que fortalezca la Soberanía Nacional. También, el derecho que se otorga a la Nación de regular el aprovechamiento de los elementos naturales susceptibles de apropiación (artículo 27), con objeto de hacer una distribución equitativa de la riqueza pública, cuidar de su conservación, lograr el desarrollo equilibrado del país y el

mejoramiento de las condiciones de vida de la población rural y urbana; y la necesidad que se establece de asegurar la eficacia de la prestación de los servicios y la utilización social de los bienes.

- Ley de Aguas Nacionales (LAN).- Esta Ley es reglamentaria del Artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en materia de aguas nacionales; es de observancia general en todo el territorio nacional, ya que sus disposiciones son de orden público e interés social. Tiene por objeto regular la explotación, uso o aprovechamiento de dichas aguas, su distribución y control; así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr su desarrollo integral sustentable. La reforma al Artículo 120 del Reglamento de esta Ley (DOF, 24/05/2011) establece que no se requerirá concesión para la explotación, uso o aprovechamiento de agua, en los términos del Artículo 80º de la Ley, cuando sea para generación de energía hidroeléctrica en pequeña producción o escala, entendida como tal, aquella que realizan personas físicas o morales aprovechando las corrientes de ríos y canales, sin desviar las aguas ni afectar su cantidad ni calidad, y cuya capacidad de generación no exceda de 30 MW.
- Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE).- Esta ley tiene por objeto regular el aprovechamiento de fuentes de energía renovables y las tecnologías limpias para la generación de electricidad "con fines distintos a la prestación del servicio público de energía eléctrica, así como establecer la estrategia nacional y los instrumentos para el financiamiento de la transición energética".

- Ley para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía.- Tiene como objeto propiciar un aprovechamiento sustentable de la energía mediante el uso óptimo de la misma en todos sus procesos y actividades, desde su explotación hasta su consumo.
- Ley de la Comisión Reguladora de Energía.- La Comisión tendrá por objeto promover el desarrollo eficiente de la generación, exportación e importación de energía eléctrica, que realicen los particulares
- Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica.- Corresponde exclusivamente a la Nación, generar, conducir, transformar, distribuir y abastecer energía eléctrica que tenga por objeto la prestación de servicio público, en los términos del artículo 27 Constitucional. En esta materia no se otorgarán concesiones a los particulares y la Nación aprovechará, a través de la Comisión Federal de Electricidad, los bienes y recursos naturales que se requieran para dichos fines.
- Ley de Desarrollo Rural Sustentable.
- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEPA).- La presente Ley es reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refieren a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección al ambiente, en el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción. Sus disposiciones son de orden público e interés social y tienen por objeto propiciar el desarrollo sustentable y establecer las bases para el aprovechamiento sustentable, la preservación y, en su caso, la restauración del suelo, el agua y los demás recursos naturales, de manera que sean compatibles la obtención de beneficios económicos

y las actividades de la sociedad con la preservación de los ecosistemas;

- Reglamento de la Ley para el Aprovechamiento de las Energías
   Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética.
- Reglamento de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica.
- Reglamento de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica, en Materia de Aportaciones.
- Reglamento de la Ley para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía.

## 2.4.- Marco teórico

El presente proyecto de intervención tiene la aspiración de instalar una minihidráulica que aprovecharía el caudal proveniente del canal San Lorenzo, el cual, es abastecido por una corriente controlada proveniente del dique "La Primavera" por lo que algunas partes con las que normalmente cuenta una minihidráulica no serían necesarias, por este motivo las partes que forman ésta particular obra son: una obra de represamiento, una obra de toma, una tubería a presión, la instalación de una turbina y una casa de máquinas.

La obra de toma o bocatoma es toda estructura hidráulica construida sobre el cauce de un río o canal con el fin de captar parcialmente el agua que acarrea, las principales consideraciones para el diseño de una obra de toma son:

 Con cualquier flujo de agua en el canal, se debe captar el mismo gasto en forma constante, es decir, asegurar la derivación permanente del caudal de diseño.

- Impedir al máximo la entrada de material sólido, partículas en suspensión y hacer que este siga el caudal del río.
- Estar colocada en un lugar que presente condiciones favorables desde el punto de vista del funcionamiento hidráulico y facilidades de construcción.
- La construcción debe ser sencilla, económica y debe permitir el mantenimiento.

La tubería a presión, es el conducto encargado de conducir el agua desde la obra de toma hasta la casa de máquinas, debido a que el costo de esta tubería puede representar gran parte del presupuesto de toda la minihidráulica, es prioritario que su diseño sea óptimo para reducir tanto inversión final como costos. (Mora y Hurtado, 2004). Para la selección de la tubería a presión debe considerarse lo siguiente:

- Considerar las diferentes clases de material para uniones.
- Comparar costos de mantenimiento.
- Tomar diámetros de tuberías y espesor de pared disponibles.
- Considerar la sobrepresión ocasionada por el golpe de ariete.
- Diseñar soportes, anclajes y uniones.
- Seleccionar el diámetro en función del costo y las pérdidas de energía.
- Considerar los materiales más usados, como el acero comercial, el hierro fundido, asbesto cemento y polietileno de alta densidad.

La casa de máquinas es una estructura civil que aloja la mayor parte del equipo electromecánico, ahí, la energía cinética del agua se convierte en energía mecánica y posteriormente en eléctrica, por lo que su ubicación representa una parte muy relevante para un buen funcionamiento de la central. (Ortiz, 2011). Pueden identificarse algunos factores que deben tomarse en cuenta para la

elección del sitio donde se ubicará la casa de máquinas, los cuales, se mencionan a continuación:

- Debe colocarse cercana al afluente al cual se entregará el agua turbinada.
- Debe ubicarse en un terreno estable.
- Debe contar con facilidades de acceso para mantenimientos y para ampliaciones o modificaciones futuras.

Una normalización del diseño de la casa de máquinas se puede obtener en función de la posición del eje del grupo turbina generador. Este puede ser horizontal o vertical. El grupo vertical que mencionamos se ajusta a centrales hidroeléctricas de gran potencia, mientras que en proyectos para minihidráulicas, el grupo de eje horizontal ofrece más facilidades para su montaje y mantenimiento, por tal motivo es el más usado (Mora y Hurtado, 2004), este tipo de grupo tiene las siguientes características:

- Cojinetes normales
- Transmisión directa por acoplamiento directo o con ejes paralelos.
- Inspección fácil, ya que todos los elementos están a la misma altura.
- Las cimentaciones son de mayor extensión superficial.
- El agua ingresa en el canal de desagüe a través de uno o dos codos de 90, originando pérdidas de carga, que serán mayores en la medida en que sea mayor la velocidad.
- Suelen compensar el momento de inercia del grupo con un volante acoplado a su eje.

El proceso de conversión de energía hidráulica en mecánica y de mecánica a eléctrica requiere la instalación dentro de la casa de máquinas de equipos que realicen estos procesos, mismos que reciben el nombre de hidrogrupos. Generalmente se instalan varios hidrogrupos a los cuales se les suministra el caudal de forma independiente; sin embargo, a la casa de máquinas suele llegar

una tubería de presión, por ello se requiere una bifurcación para dividir el caudal y suministrárselo a cada unidad (Ortiz, 2011). Cada hidrogrupo está conformado por los siguientes equipos:

- Empalme entre la tubería a presión y la entrada a la válvula.
- Válvula.- Elemento ubicado entre la tubería a presión y la turbina, permite el paso o el cierre total del flujo de agua.
- Turbina.- Permite la transformación de la energía hidráulica en mecánica, misma que se transmite a través de su eje al generador.
- Generador.- Permite la transformación de la energía mecánica en energía eléctrica, bien por acople directo o por una transmisión que por lo general es elevadora.
- Regulador de velocidad.- Debido a que el proceso de conversión de energía está sujeto a las variaciones en la demanda eléctrica, la potencia en el eje de la turbina debe variar proporcionalmente, de tal forma que se mantenga la frecuencia constante, para ello la turbina dispone de un regulador de velocidad que permite ajustar el caudal a la demanda de electricidad.
- Volante de inercia.- Tiene la finalidad de proporcionar mayor estabilidad al grupo de la turbina generador frente a la oscilación en la demanda de energía eléctrica, además se encarga de reducir el envalamiento del grupo causado por el rechazo de carga y a su vez mitigar los efectos del golpe de ariete en la tubería a presión.
- Subestación.- Se requiere instalar debido a que los recursos hidroenergéticos se suelen encontrar retirados del centro de consumo, por lo que se requiere la transmisión de la energía desde la minihidráulica. La subestación se encarga de elevar la tensión de generación, hasta una tensión de transmisión de acuerdo con la potencia de generación y longitud de transmisión.

- Puente grúa.- Es un elemento conveniente para facilitar la reparación y el montaje de la turbina.
- Conducto de salida de las aguas turbinadas.- El agua proveniente de la turbina sale al canal por medio de un tubo difusor o un canal de desagüe.

En una pequeña central hidroeléctrica, los hidrogrupos tienen un costo equivalente al 40 - 50% del costo total. Este costo es elevado y por tal motivo es necesario usar grupos, particularmente de turbinas, que además de tener bajo costo, ofrezcan:

- Construcción robusta de bajo peso.
- Número mínimo de componentes y geometría simple.
- Necesidades mínimas de mantenimiento.
- Facilidad de sustitución de componentes.
- Operación exenta de ruidos, vibraciones y cavitación en todo el campo de carga, con la obtención rápida de estabilidad operacional exenta de variaciones de carga en la posible fabricación seriada.

Es característico que los equipos trabajen con una buena eficiencia para un rango de potencia promedio que oscila entre 65 – 90% de su potencia nominal, rangos inferiores generan cavitación. Además es importante que las unidades sean de igual potencia e igual tipo; un número mayor de unidades permite obtener una mejor eficiencia de la central. Para seleccionar el número de unidades de la pequeña central hidroeléctrica, se debe partir del estudio hidroenergético, en el cual debemos determinar la potencia real teórica.

La turbina hidráulica es el elemento clave de la minihidráulica. Aprovecha la energía cinética y potencial que contiene el agua, transformándola en un movimiento de rotación, que transferido mediante un eje al generador produce energía eléctrica. Las turbinas hidráulicas se clasifican en dos grupos: turbinas de

acción y turbinas de reacción. (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2006).

En una turbina de acción la presión del agua se convierte primero en energía cinética. En una turbina de reacción la presión del agua actúa como una fuerza sobre la superficie de los álabes y decrece a medida que avanza hacia la salida.

Las turbinas de acción son aquellas que aprovechan únicamente la velocidad del flujo de agua para hacerlas girar. El tipo más utilizado es la denominada turbina Pelton, aunque existen otros como la Turgo con inyección lateral y la turbina de doble impulsión o de flujo cruzado, también conocida por turbina Ossberger o Banki-Michell.

La turbina Pelton se emplea en saltos elevados que tienen poco caudal. Está formada por un rodete (disco circular) móvil con álabes (cazoletas) de doble cuenco. El chorro de agua entra en la turbina dirigido y regulado por uno o varios inyectores, incidiendo en los álabes y provocando el movimiento de giro de la turbina. Estas turbinas tienen una alta disponibilidad y bajo coste de mantenimiento, además de que su rendimiento es bastante alto (superior al 90% en condiciones de diseño: presenta una curva de rendimiento bastante plana con un rendimiento superior al 80% para un caudal del 20% del nominal).

La turbina de flujo cruzado, también conocida como de doble impulsión, Ossberger o Banki-Michell. está constituida por un inyector de sección rectangular provisto de un álabe longitudinal que regula y orienta el caudal que entra en la turbina, y un rodete de forma cilíndrica, con sus múltiples palas dispuestas como generatrices y soldadas por los extremos a discos terminales. La potencia unitaria que puede instalar está limitada aproximadamente a 1 MW. El rendimiento máximo es inferior al de las turbinas Pelton, siendo aproximadamente el 85%, pero tiene un funcionamiento con rendimiento prácticamente constante para caudales de hasta 1/16 del caudal nominal.

Las turbinas de reacción cuentan con un diseño de rotor que permite aprovechar la presión que aún le queda al agua a su entrada para convertirla en energía cinética. Esto hace que el agua al salir del rotor tenga una presión por debajo de la atmosférica. Las turbinas de reacción más utilizadas son las Francis y la Kaplan.

La turbina Francis se adapta muy bien a todo tipo de saltos y caudales, y cuenta con un rango de utilización muy grande. Se caracteriza por recibir el fluido de agua en dirección radial, y a medida que ésta recorre la máquina hacia la salida se convierte en dirección axial. El rendimiento de las turbinas Francis es superior al 90% en condiciones óptimas de funcionamiento. Permite variaciones de caudales entre el 40% y el 105% del caudal de diseño, y en salto entre 60% y el 125% del nominal.

Las turbinas Hélice y Kaplan se componen básicamente de una cámara de entrada abierta o cerrada, un distribuidor fijo, un rodete con 4 ó 5 palas fijas en forma de hélice de barco y un tubo de aspiración. El rendimiento es de aproximadamente el 90% para el caudal nominal y disminuye a medida que nos alejamos de él.

# 3.- Proyecto de intervención

# 3.1.- Su enunciado y descripción

El presente proyecto de intervención es una propuesta factible, pertinente y creativa que consiste en el diseño y la construcción de una pequeña central hidroeléctrica clasificada como minihidráulica en el canal San Lorenzo, ubicada en Culiacán, Sinaloa, en la comunidad del Campo El Diez.

En Sinaloa, no existe registro de la existencia de una minihidráulica, por lo que este proyecto pretende ser el pionero a nivel estado, y a partir de él aprovechar el gran potencial minihidráulico con el que cuenta esta entidad.

Además el producir energía minihidráulica es una forma sostenible de hacerlo, es decir, contribuyendo al cuidado de nuestro planeta.

La minihidráulica será capaz de producir alrededor de entre 0.9 y 1.00 MW, siempre y cuando se aproveche al máximo las características hidráulicas del lugar, para ello es necesario diseñar y construir una obra de represamiento, que tenga la finalidad de aumentar la carga hidráulica del flujo del canal, y a partir de ello, captar el gasto de agua a través de una obra de toma compuesta por una rejilla colocada sobre la plantilla del mismo, con la finalidad de conducir el agua a una tubería a presión que la transportará hasta un cuarto de máquinas, ubicado sobre la margen derecha del canal San Lorenzo, en donde se instalará una turbina, que tendrá el objetivo de transformar la energía hidráulica en mecánica, y a través de un generador, transformar la energía mecánica en eléctrica, por último, el agua turbinada, se descargará nuevamente en el canal sin haber sufrido alteración alguna. Para lograr todo lo anterior, es necesario diseñar los elementos mencionados y desarrollar el proceso constructivo más adecuado para ello. Por todo lo anterior, las preguntas de investigación orientadas al presente proyecto son:

- 1.- ¿Cuál sería la energía eléctrica producida constantemente por la minihidráulica?
- 2.- ¿Cuál sería el proceso constructivo para la instalación de la minihidráulica en el canal que permita un aprovechamiento máximo de la energía?

En respuesta a las preguntas anteriores se plantean los siguientes objetivos.

### 3.2.- Objetivo General

Diseñar los elementos que conforman una minihidráulica, desarrollar el procedimiento constructivo más adecuado para ello y realizar un estimado de costos de esta alternativa de energía renovable pertinente para el Campo El Diez, en el municipio de Culiacán, Sinaloa.

## 3.3.- Objetivos específicos

- Elaborar el diseño hidráulico de los elementos que conforman una minihidráulica, como una alternativa sustentable de generar electricidad, aprovechando el flujo de agua del Canal San Lorenzo, ubicado en el Campo El Diez, en Culiacán, Sinaloa.
- Desarrollar un estudio para determinar la generación de energía de la pequeña central hidroeléctrica y su capacidad de abastecimiento eléctrico.
- Determinar la reducción en la quema de combustibles fósiles para la generación de la energía producida por la minihidráulica.
- Mantener el nivel de demanda en las mismas condiciones de antes de la instalación de la minihidráulica.
- Desarrollar el procedimiento constructivo de una minihidráulica en un canal artificial de corriente controlada.
- Establecer el estimado de costos necesario para la realización del proyecto.

#### 3.4.- Justificación

Campo El Diez es una localidad ubicada en el municipio de Culiacán del estado de Sinaloa, como se muestra en las figuras 3. 1 y 3. 2, se encuentra a una altura de 20 metros sobre el nivel del mar, tiene una población aproximada de 6650 personas, cuenta con aproximadamente 1500 viviendas, de las cuales 1400 tienen acceso a luz eléctrica. Además el canal "San Lorenzo", con origen en el "Dique la Primavera", atraviesa esta localidad, (ver figura 3. 3).



Figura 3. 1.- Mapa de macro-localización de Culiacán, Sinaloa.

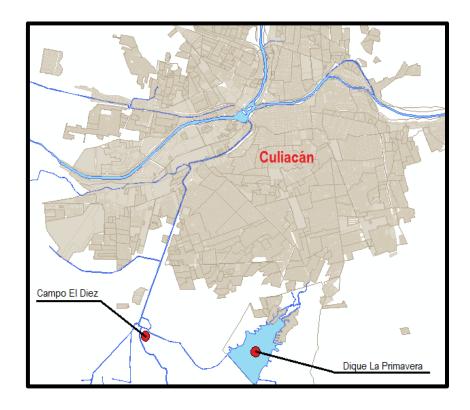


Figura 3. 2.- Mapa de micro-localización del Campo El Diez, Culiacán.



Figura 3. 3.- Canal San Lorenzo.

Debe acentuarse que el canal "San Lorenzo" tiene un gasto de hasta 37 m<sup>3</sup> por segundo durante el periodo del 15 de septiembre al 15 de mayo del año

siguiente aproximadamente, 8 meses, el tiempo restante, del 15 de mayo al 15 de septiembre, tiempo aproximado de 4 meses, no conduce ni la quinta parte de esos 37 m³/s, es decir ni 8 m³/s, información que se obtuvo directamente del jefe de operaciones del distrito de riego No. 10 de la Cuenca Pacífico Norte CONAGUA, además de haberse comprobado durante los trabajos y visitas de campo que se realizaron en el canal, asimismo existe un punto donde tiene una caída hidráulica de 7.5 metros, por lo que convierte a este lugar en un punto pertinente para la instalación de una minihidráulica. En las figuras 3. 4 y 3. 5 se muestran imágenes del punto mencionado donde se aprecia su potencial hidráulico.



Figura 3. 4.- Fotografía satelital del canal San Lorenzo tomada en agosto del 2008.

Este proyecto tiene la aspiración de aprovechar el agua que fluye por el canal "San Lorenzo" y producir energía eléctrica con un bajo impacto ambiental en la zona, refiriéndose por impacto ambiental según lo establecido en el artículo 3° de la LGEEPA, como la modificación del ambiente ocasionada por la acción del hombre o de la naturaleza, para ello debe llevarse a cabo el diseño y construcción de una pequeña central hidroeléctrica, para nuestro caso, una minihidráulica.



Figura 3. 5.- Fotografía satelital del canal San Lorenzo tomada en febrero del 2015.

La pequeña hidroeléctrica que proponemos permitirá producir una buena cantidad de electricidad sin la generación de CO<sub>2</sub>, aproximadamente entre 0.9 y 1.0 MW, energía suficiente para abastecer 1000 hogares diariamente tomando en cuenta que una casa en el campo el Diez consume en promedio 23.82 KWh al día y que la minihidráulica genera 24000 KWh diariamente. (ver tabla 3. 1), asimismo nuestra pequeña central reducirá los costos referentes en cuanto a conducción eléctrica ya que la energía se producirá en la región, impulsará el desarrollo de las actividades del sector, incrementará el desarrollo económico del "Campo El Diez" y representará una nueva forma de generar energía eléctrica a nivel del estado, ya que en Sinaloa, no existe una minihidráulica en la actualidad.

La Comisión Federal de Electricidad es la dependencia encargada de comercializar y distribuir la energía eléctrica en nuestro país, por lo tanto, de realizar el proyecto, buscaría venderse la energía producida a la CFE, y sería el organismo encargado de distribuirla y llevar a cabo lo mencionado en el párrafo anterior.

Tabla 3. 1.- Consumo de energía eléctrica para una casa promedio ubicada en el "Campo El Diez", Culiacán, Sinaloa.

Equipo	Potencia (Watts)	Unidades	Horas al día	Energía consumida por unidad en KWh	Energía total consumida en KWh	Energía diaria total consumida en KWh
Foco incandescente 75 W	75	5	5.00	0.075	0.375	1.88
Foco incandescente 60 W	60	2	2.00	0.060	0.120	0.24
Televisión de 21"	120	1	6.00	0.120	0.120	0.72
Equipo de sonido 200 W	200	1	0.50	0.200	0.200	0.10
Horno de microondas	1200	1	0.16	1.200	1.200	0.19
Celular	10	1	7.00	0.010	0.010	0.07
Refrigerador	350	1	24.00	0.350	0.350	8.40
Computadora	300	1	3.00	0.300	0.300	0.90
Aire acondicionado	1200	1	8.00	1.200	1.200	9.60
Plancha	1400	1	1.00	1.400	1.400	1.40
Lavadora	400	1	0.80	0.400	0.400	0.32
_	_			Total	5.68	23.82

Con el propósito de aprovechar al máximo las características hidráulicas del sitio, gasto y desnivel, se pretende instalar la o las turbinas a un costado del canal San Lorenzo, aguas abajo de una rápida existente en el sitio.

Debe resaltarse que en éste canal, la corriente es controlada, ya que es un canal principal de riego, esto le proporciona al proyecto una diferenciación con respecto a las minihidráulicas existentes en nuestro país, ya que en ellas no se aprovecha el agua de un canal de riego directamente. Por lo tanto, debemos desarrollar un proceso constructivo que describa la construcción de una minihidráulica en un canal principal de riego sin alterar la demanda en el recurso hídrico.

Además, recordemos que el planeta Tierra tiene la capacidad de absorber desperdicios contaminantes del aire, agua, desechos sólidos, entre otros, sin embargo, se corre el riesgo de sobrecargar dicha capacidad y provocar graves daños. Por lo tanto, es necesario alcanzar un equilibrio entre la disponibilidad de

los recursos naturales y su capacidad de recuperación, por un lado, y por otro, las expectativas de vida actuales y futuras de la población y los intereses de los diferentes sectores sociales y económicos del país. El desarrollo sustentable justamente significa utilizar los recursos de forma tal que nos sirvan ahora pero que sirvan también a las generaciones futuras. Por ende, es evidente que al aprovechar una energía limpia, como es la hidráulica, el proyecto presenta una factibilidad ambiental, punto sobre el cual se enmarca el trabajo.

### 3.5.- Metodología

#### 3.5.1.- Identificación del sitio

Primeramente, se realizará una revisión exhaustiva de la zona perteneciente a la Cuenca Pacífico Norte de la CONAGUA, en particular de la parte cercana al municipio de Culiacán, con la finalidad de identificar diversos puntos estratégicos para la probable instalación de una minihidráulica. Dichos puntos deben tener la particularidad de contar con las características de gasto y desnivel, parámetros indispensables para el desarrollo de un proyecto de este tipo.

Una vez con la información sobre los puntos probables, se enumerarán y se determinará cuál de las opciones posibles es la más conveniente, calificando algunos factores de la siguiente manera:

Los factores que se calificarán para la selección del punto de localización, así como la ponderación de cada uno de ellos se muestran en la tabla 3. 2.

En lo correspondiente a los accesos al sitio se tomará en cuenta la facilidad con la que se puede llegar a la zona de interés, si los caminos están en buenas condiciones, si son pavimentados o de terracería y si el ingreso es totalmente libre. En el factor de la distancia del lugar, se calificará la cercanía del lugar con la

ciudad de Culiacán, ya que es importante realizar numerosas y frecuentes visitas al punto de interés, por lo que su cercanía o lejanía es importante para el desarrollo de este proyecto. En lo referente al factor de infraestructura existente se evaluará si en el sitio de interés existen caminos, carreteras, obras de drenaje, electricidad u agua potable, así como cualquier tipo de edificación que pudiera verse afectada por el emplazamiento de una minihidráulica, en este caso, de no existir infraestructura que pueda dañarse por la construcción de la minihidráulica se calificará con excelente. Las características hidráulicas del sitio conforman uno de los factores de mayor importancia para el desarrollo de este proyecto, en este punto, se identificará de una manera general el gasto y desnivel que existe en cada lugar, ya que de ello depende la energía eléctrica que puede generarse. El factor de aspectos sociales que se evaluará consiste en identificar si con el emplazamiento de la minihidráulica se beneficiará la localidad en cuestión. El factor de la conservación del medio ambiente se calificará tomando como criterio que exista la mínima cantidad de flora y fauna que pueda afectarse por la construcción de una pequeña planta hidroeléctrica. La suma de las ponderaciones de todos los factores debe ser igual al 100%.

Tabla 3. 2.- Factores a considerar para la selección del sitio.

Factor	Ponderación
Accesos al sitio	13.00%
Distancia del lugar	16.00%
Infraestructura existente	13.00%
Características hidráulicas	20.00%
Aspectos sociales positivios	18.00%
Conservación del medio ambiente	20.00%
Total	100.00%

Por último, con las calificaciones y ponderaciones para los diferentes factores se realizará el cálculo de la localización con la siguiente fórmula:

$$S_j = \sum_{i=1}^6 W_i * F_{ij} \tag{3.1}$$

Dónde:

 $S_j = Puntaje\ del\ punto\ j$   $W_i = Ponderación\ del\ factor\ i$   $F_{ij} = Calificación\ del\ factor\ i\ para\ el\ punto\ j$ 

Para llevar a cabo la tarea de la selección del sitio se realizará la tabla 3. 3 que se muestra.

Tabla 3. 3.- Selección del sitio de emplazamiento de la minihidráulica.

Factor		•	Punto	Dandarasián		
		В	С	D	Ε	Ponderación
Accesos al sitio						13.00%
Distancia del lugar						16.00%
Infraestructura existente						13.00%
Características hidráulicas						20.00%
Aspectos sociales positivios						18.00%
Conservación del medio ambiente						20.00%
Puntaje del punto (Sj)						100.00%

#### 3.5.2.- Trabajo de campo

En esta etapa, el punto de localización seleccionado se detallará topográficamente a escalas mayores con curvas de nivel a cada metro mediante la compilación de cartas topográficas, o bien, se tendrá que asistir a campo para la ejecución de dicha tarea.

Con la topografía detallada del sitio se medirán la sección, área hidráulica, el gasto, la velocidad del agua y la pendiente del canal.

Para la realización del levantamiento topográfico y la determinación de la sección en campo, será necesario el siguiente material:

- Aerosol para marcar y ubicar puntos de referencias.
- Estación total marca "Leica" modelo CR 307.
- Prismas topográficos.
- Cinta métrica de 100 metros de longitud.
- Machetes para limpieza de accesos al lugar.
- Herramienta menor en caso de ser requerida.

Al ejecutar el levantamiento se definirán estaciones a cada 20 metros a lo largo de una longitud que se determinará en campo dependiendo de las condiciones del lugar. Los puntos a medir en cada estación del levantamiento topográfico serán los necesarios de acuerdo a nuestro criterio, dependiendo de las condiciones y características del sitio en el momento de realizar dicho trabajo.

Una vez definidas las secciones transversales del canal, se procederá a realizar un aforo, para ello aplicaremos el método sección-pendiente. Es importante que para la aplicación de este método se cuente con la topografía de un tramo del cauce y las marcas del nivel máximo del agua durante el paso de la avenida. (Aparicio, 1992). Según la fórmula de Chezy, la velocidad del agua es:

$$V = C * \sqrt{R * Sf} \tag{3.2}$$

Dónde:

 $V = Velocidad\ en\ m/s$ 

C = Coeficiente de fricción en función de la rugosidad del canal

R = Radio hidráulico en m

Sf = Pendiente de energía del canal

Para el cálculo del coeficiente de fricción "C" en la fórmula 3 .2, utilizaremos la fórmula de Manning:

$$C = \frac{R^{1/6}}{n} \tag{3.3}$$

Dónde:

n = Coeficiente de rugosidad de Manning (Consulte las tablas A. 1. 1, A.1. 2, A. 1. 3, A. 1. 4, A. 1. 5, A. 1. 6 y A. 1. 7 contenidas en el anexo 1)

Al combinar la ecuación 3. 2 con la 3. 3, obtenemos la siguiente expresión:

$$V = \frac{1}{n} * R^{2/3} * Sf^{1/2}$$
 (3.4)

Ahora bien del concepto de gasto o caudal, tenemos que:

$$Q = V * A \tag{3.5}$$

Dónde:

$$Q = Gasto\ en\ m^3/s$$

 $V = Velocidad\ en\ m/s$ 

A =Área hidráulica en  $m^2$ 

La ecuación 3. 4 en combinación con la ecuación 3. 5 da como resultado:

$$Q = \frac{A}{n} * R^{2/3} * Sf^{1/2}$$
 (3.6)

Que se conoce como la ecuación de Manning para el cálculo del gasto.

Aplicando la ecuación de Bernoulli entre los extremos inicial y final del tramo de un canal (véase figura 3. 6) resulta:

$$Z_1 + y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_f$$
 (3.7)

Dónde:

 $Z_{1,2} = Cota \ topográfica o \ elevación en la sección 1 ó 2 en m$ 

 $y_{1,2} = Tirante de agua en la sección 1 ó 2 en m$ 

 $\frac{{V_{1,2}}^2}{2g}$  = Altura o carga de velocidad en la sección 1 ó 2 en m

hf = Pérdidas de energía por fricción en m

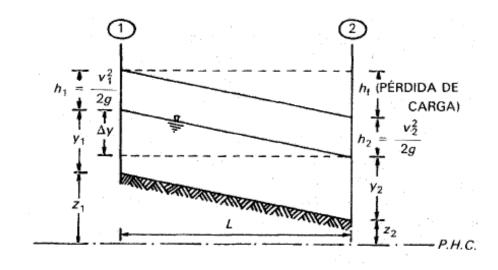


Figura 3. 6.- Secciones en un tramo de canal.

De las ecuaciones 3. 7 y 3. 5 se obtiene:

$$h_f = \Delta y + \frac{Q^2}{2g} \left( \frac{1}{{A_1}^2} - \frac{1}{{A_2}^2} \right) \tag{3.8}$$

Dónde:

$$\Delta y = (Z_1 + y_1) - (Z_2 + y_2) \tag{3.9}$$

 $\Delta y = dif.$  en elev. de nivel máximo del agua en los extremos del tramo

Para tomar en cuenta las pérdidas locales generadas por los cambios de dirección y de sección conviene escribir la ecuación 3. 8 en la forma:

$$h_f = \Delta y + \frac{Q^2}{b * g} \left( \frac{1}{{A_1}^2} - \frac{1}{{A_2}^2} \right) \tag{3.10}$$

Donde  $b = 2 \text{ si } A_1 > A_2 \text{ y } b = 4 \text{ si } A_1 < A_2.$ 

La ecuación 3. 6 puede escribirse de la forma siguiente:

$$Q = \frac{A}{n} * R^{2/3} * Sf^{1/2} = \overline{K}_d * S_f^{1/2}$$
 (3.11)

Donde  $\overline{K}_{d\,i}$  es el coeficiente de conducción medio en el tramo que puede calcularse como el promedio geométrico de los coeficientes de conducción en los extremos del mismo:

$$\overline{K}_{d_i} = \frac{A_i * R_i^{2/3}}{n_i} \tag{3.12}$$

$$\overline{K}_d = \sqrt{K_{d1} * K_{d2}} \tag{3.13}$$

Utilizando las ecuaciones 3. 10 y 3. 11 y tomando en cuenta que  $h_f=\mathcal{S}_f*$  L, donde "L" es la distancia entre las secciones 1 y 2 se obtiene:

$$Q = \frac{\sqrt{\Delta y/L}}{\sqrt{\frac{1}{\bar{K}_d}^2 - \frac{1}{b*g*L} \left(\frac{1}{A_1^2} - \frac{1}{A_2^2}\right)}}$$
(3.14)

Con la ecuación 3. 14 es posible estimar el gasto de una corriente si se conocen las marcas del nivel máximo del agua en las márgenes, la rugosidad del tramo y la topografía del mismo.

En los métodos mencionados es necesario el cálculo del área hidráulica, la cual se define como el área de la sección (normal o vertical) ocupada por el líquido. (Sotelo, 2002). Para el cálculo del área hidráulica, se utilizará la fórmula 3. 15:

$$A = (b + ty) * y \tag{3.15}$$

Dónde:

 $A = \text{Á} rea hidráulica en m}^2$ 

b = Plantilla del canal en m

t = Talud de las paredes laterales del canal

y = Tirante de agua en m

De igual forma, es necesario obtener el radio hidráulico, mismo que es la relación que existe entre el área hidráulica y el perímetro mojado. El perímetro mojado se define como el contorno de la sección transversal que se encuentra en contacto con el agua. Las fórmulas para el cálculo del perímetro mojado y el radio hidráulico son:

$$P = b + 2y * \sqrt{1 + t^2} \tag{3.16}$$

Dónde:

P = Perímetro mojado en m

b = Plantilla del canal en m

t = Talud de las paredes laterales del canal

y = Tirante de agua en m

$$R = \frac{A}{P} \tag{3.17}$$

Dónde:

 $A = \text{Á} rea \ hidráulica en } m^2$ 

P = Perímetro mojado en m

R = Radio hidráulico en m

#### 3.5.3.- Trabajo de gabinete

Con los resultados obtenidos en las etapas anteriores, se realizará el diseño de todos los elementos que conforman la minihidráulica. El presente proyecto de intervención tiene la aspiración de aprovechar el agua que conduce una corriente controlada y producir energía eléctrica mediante la colocación de una turbina, por lo tanto algunas partes con las que normalmente cuenta una minihidráulica no serían necesarias, por este motivo las que forman ésta particular obra son: una obra de toma, una obra de represamiento, una tubería a presión, la instalación de una turbina, una tubería de retorno o canal de descarga y una casa de máquinas.

La obra de toma se diseñará con una toma en el lecho del canal que capte el agua en el fondo del mismo con una estructura pertinente de acuerdo a las necesidades del proyecto, el agua captada será transportada a la tubería a presión y para evitar la entrada de materia sólida se colocará una rejilla además de un bordillo perimetral para impedir el acceso de sedimentos arrastrados por el flujo de agua.

Con la finalidad de garantizar que el gasto captado por la obra de toma sea el requerido, se colocará una obra de represamiento para obstruir la sección del canal obligando a que el agua se remanse y el tirante aumente hasta dar la carga necesaria.

La obra de represamiento se compone de:

- Transición de entrada.
- Transición de salida.
- Losa de maniobras.
- Cartones.
- Compuertas deslizantes o radiales.
- Mecanismo elevador.
- Cimentación.
- Pilas separadoras.

En las figuras 3. 7, 3. 8 y 3. 9 se muestran los componentes mencionados.

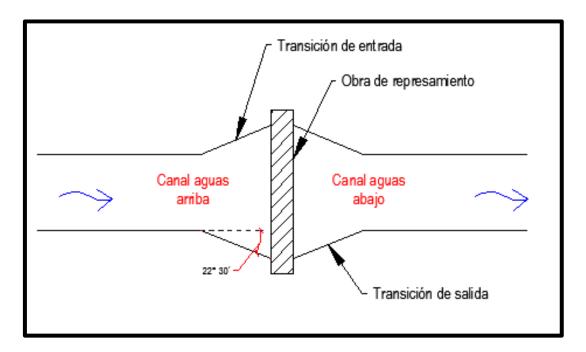


Figura 3. 7.- Esquema de una obra de represamiento.

Las compuertas deberán ser diseñadas para resistir su propio peso y el empuje hidrostático. Por tal razón se diseñan compuertas radiales cuando los tirantes son iguales o mayores a 2 metros, ya que de esa forma resulta la compuerta más esbelta; en cambio sí para tirantes grandes se diseñan

compuertas planas deslizantes, resultarían con mayor espesor y por consiguiente de mayor peso, lo que dificultaría su operación obligando a colocar mecanismos elevadores más costosos. Las dimensiones de las compuertas radiales y deslizantes que normalmente son utilizadas en obras de represamiento y que se consideran para el diseño de la estructura se muestran en la tabla 3. 4.

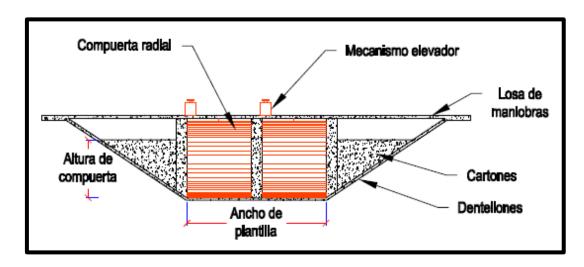


Figura 3. 8.- Frente de obra de represamiento con compuertas radiales.

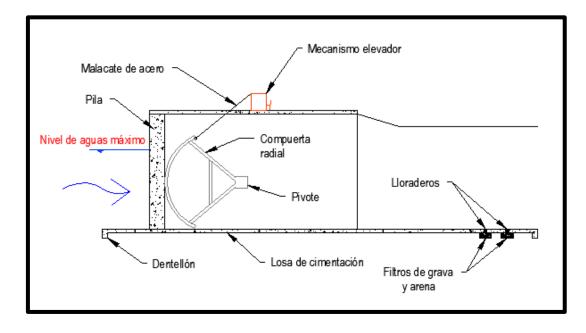


Figura 3. 9.- Perfil con compuerta radial.

Tabla 3. 4.- Dimensiones de compuertas radiales y deslizantes.

Compuerta	Compuertas radiales		Compuertas deslizantes		
Ancho (m)	Altura (m)	Ancho (m)	Altura (m)		
1.50	1.50	0.610	0.610		
1.50	2.00	0.610	0.914		
2.00	2.00	0.760	0.610		
2.00	2.15	0.760	0.750		
2.00	3.00	0.915	0.610		
3.00	1.45	0.915	0.915		
3.00	1.50	0.915	1.220		
3.00	2.00	1.067	1.067		
3.00	2.15	1.220	0.920		
3.00	2.50	1.220	1.220		
3.00	2.75	1.525	1.525		
3.00	3.55	1.525	1.220		
3.50	1.90	1.525	1.830		
4.00	2.00	1.830	1.830		
4.00	2.25	2.000	2.000		
4.00	4.00				
4.00	4.12				
4.00	4.20				
4.00	4.30				
4.50	2.15				
4.50	3.50				
4.50	4.40				
5.00	4.70				
6.00	4.80				

La longitud de transición de entrada y salida se determina con el criterio de HINDS, que considera que el ángulo que debe formar la intersección de la superficie del agua y la pared al principio y al final de la transición con el eje de la estructura sea de 22° 30′. Por lo tanto la expresión que permite el cálculo de las longitudes mínimas de transición es:

$$L = \left(\frac{T - t'}{2}\right) * (ctg \ 22^{\circ} \ 30') \tag{3.18}$$

Dónde:

L = Longitud de transición en m

 $T = Longitud\ de\ espejo\ de\ agua\ en\ la\ sección\ de\ la\ represa\ en\ m$   $t' = Longitud\ de\ espejo\ de\ agua\ en\ la\ sección\ del\ canal$ 

El cálculo del espejo de agua en la sección de la represa se obtiene mediante:

$$T = (2ty) + (Ancho de las compuertas + espesor de las pilas) (3.19)$$

El cálculo del espejo de agua en la sección del canal se obtiene mediante:

$$t' = (2ty) + b (3.20)$$

La sección transversal de la represa deberá tener un área hidráulica suficientemente grande para no aumentar considerablemente la velocidad del agua dentro de la estructura con respecto a la velocidad en el canal, ya que velocidades mayores a 1.5 m/s dificultan la operación de las compuertas.

En base a lo descrito anteriormente, el procedimiento de diseño de la obra de represamiento es el siguiente:

- 1.- Se selecciona el sitio donde se ubicará la obra de represamiento.
- 2.- Cálculo del área hidráulica mediante la ecuación 3. 15.
- 3.- Cálculo del área mínima de las compuertas mediante la ecuación 3. 15, considerando la velocidad máxima permisible de 1.5 m/s.
- 4.- Se seleccionan el número y dimensiones de las compuertas de la tabla 3. 4, de tal manera que se tenga un área mayor que la mínima, además se propone un espesor para las pilas separadoras de entre 0.30 y 0.50 metros.

- 5.- Se calcula la velocidad del agua con la que funcionará la represa mediante la ecuación 3. 5, ésta debe ser menor que 1.5 m/s.
- 6.- Se calcula la longitud de transición de entrada y salida con la ecuación3. 18.

Para la obra de toma es necesario conocer el caudal a captar, la geometría del canal y el nivel de la superficie libre de agua (y<sub>0</sub>).

El cálculo hidráulico en este caso, consiste en obtener las dimensiones óptimas de la obra de toma que consiste en una rejilla de fondo, éste se hace utilizando la formula general para orificios.

$$Q = A_0 * Cd * (2 * g * y_0)^{1/2}$$
(3.21)

Dónde:

 $Q = Gasto tomado por la obra de toma en <math>m^3/s$   $A_0 =$ Área neta de la rejilla en  $m^2$   $g = aceleración de la gravedad en <math>m/s^2$   $y_0 = Tirante sobre la rejilla en <math>m$  Cd = Coeficiente de gasto de la rejilla

En este caso, se calculan las dimensiones de la rejilla dependiendo del gasto de aportación, considerando un tirante promedio que se determinará mediante el levantamiento topográfico al medir la huella del tirante de agua sobre los taludes del canal y proponiendo una de las dos dimensiones (largo o ancho) para obtener la otra dimensión.

Para calcular el área total que deberá tener la rejilla, se considerará que el 40% del área neta de la rejilla seria ocupada por el acero, por lo que solamente estará entrando agua por el 60% del área neta (A<sub>0</sub>), con esto podemos calcular el área total (A<sub>T</sub>) de la siguiente manera:

$$A_T = \frac{A_0}{0.60} \tag{3.22}$$

Para el diseño de la tubería a presión se seguirán los siguientes pasos propuestos, basándose en la Guía para el desarrollo de una pequeña central hidroeléctrica elaborada por la European Small Hydropower Association (ESHA), por el Manual de diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas realizado por Novillo et al. (1985) y en el Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de la Comisión Nacional del Agua en su libro Lineamientos Técnicos para la elaboración de Estudios y Proyectos de Agua:

1.- Para el diseño de la tubería a presión o de la tubería forzada deberá conocerse el gasto o caudal (Q) en m³/s, la carga hidráulica (H) en metros y la longitud de la tubería (L) en metros. El gasto se calculará con anterioridad a este paso mediante la ecuación 3. 14. La longitud de la tubería se establecerá mediante la propuesta de un trazo para el diseño de la misma, y en lo que respecta a la carga hidráulica, está podrá calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$H = Z + \frac{V^2}{2a} + \frac{P}{\gamma} \tag{3.23}$$

Dónde:

Z = Elevación o cota topográfica del punto de interés en m

$$V^2/_{2g}={\it Energ}$$
ía cinética o carga de velocidad en m

 $P/_{\gamma}=E$ nergía de presión o carga de presión en m

V = Velocidad del agua en m/s

$$P = Presión en kg/m^2$$

#### $\gamma = Peso \ especifico \ del \ agua \ en \ kg/m^3$

La ecuación 3. 23 se aplicará al inicio de la tubería y con ella se establecerá la carga hidráulica a la que está sometida.

2.- Posteriormente se seleccionará un tipo de material para la tubería a presión basándose en sus características, tales como durabilidad, resistencia mecánica y costo. Una vez seleccionado el material se establecerá el coeficiente de rugosidad correspondiente, en esta ocasión se utilizará la ecuación de Manning para los cálculos y el coeficiente de rugosidad (n) se escogerá de la tabla 3. 5.

Tabla 3. 5.- Características de materiales usados en tuberías a presión.

Material	Módulo de elasticidad de Young "E" (N/m²) x 10 <sup>9</sup>	Coeficiente de expansión lineal "a" (m/m °C) x 10 <sup>6</sup>	Esfuerzo último a tensión (N/m²) x 10 <sup>6</sup>	n
Acero soldado	2.06	12	400	0.012
Polietileno	0.55	140	5	0.009
Policloruro de vinilo (PVC)	2.75	54	13	0.009
Asbesto cemento	-	8	-	0.011
Hierro fundido	78.50	10	140	0.014
Hierro dúctil	16.70	11	340	0.015

Fuente: European Small Hydropower Association, 1998.

3.- Se propondrá una velocidad de diseño, para ello se tomarán en cuenta las velocidades máximas permisibles para los diferentes tipos de tubería según el Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS) de la Comisión Nacional del Agua, las cuales se muestran en la tabla 3. 6.

Tabla 3. 6.- Velocidades máximas permisibles.

Material de la tubería	Velocidad máxima (m/s)		
Concreto simple hasta 45 cm. de diámetro	3.0		
Concreto reforzado de 60 cm. de diámetro o mayores	3.5		
Concreto presforzado	3.5		
Asbesto cemento	5.0		
Acero galvanizado	5.0		
Acero sin revestimiento	5.0		
Acero con revestimiento	5.0		
Policloruro de vinilo (PVC)	5.0		
Polietileno de alta densidad	5.0		

Fuente: MAPAS, CONAGUA.

4.- Se calculará el área hidráulica, despejando "A" de la ecuación 3. 5, obteniendo:

$$A = Q/V (3.24)$$

5.- Una vez con el área hidráulica (A) calculada, despejaremos el diámetro(D) de la siguiente fórmula:

$$A = (\pi * D^2)/4 \tag{3.25}$$

Obteniendo:

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \tag{3.26}$$

- 6.- Realizado el paso 5, se escogerá un diámetro cercano al anterior que se utilice comercialmente.
- 7.- Se revisará si la velocidad del diámetro seleccionado se encuentra dentro de los límites permisibles. Para ello se utilizará la siguiente ecuación:

$$V = Q/A (3.27)$$

8.- Cálculo de las pérdidas por fricción (hf) con la ecuación de Manning, donde L es la distancia total de la tubería a presión:

$$hf = (10.3 * n^2 * Q^2 * L)/D^{5.33}$$
 (3.28)

9.- En una tubería a presión, las pérdidas por turbulencia, las pérdidas al paso del agua por la rejilla, a la entrada y salida de la tubería, codos, reducciones, expansiones y válvulas se considerarán pérdidas locales o pérdidas menores de energía. Para el cálculo de ellas se utilizará la ecuación 3. 29.

$$h_{locales} = h_t + hacc (3.29)$$

Dónde:

 $h_{locales} = P\'erdidas de energ\'ia locales en m$ 

 $h_t = P$ érdida de carga por turbulencia en m

hacc = Pérdida de energía por accesorios en m

Para el cálculo de las pérdidas por turbulencia que se generan por el paso del agua a través de la rejilla se utilizará la ecuación Kirchner:

$$h_t = K_t * \left(\frac{e}{s}\right)^{4/3} * \frac{V^2}{2g} * (sen \theta)$$
 (3.30)

Dónde:

e = Espesor de las barras en m

s = Espaciamiento entre barras en m

 $V=Velocidad\ del\ agua\ a\ la\ entrada\ de\ la\ rejilla\ en\ m/s$   $g=Aceleración\ de\ la\ gravedad\ en\ m/s^2$   $\theta=$  Ángulo de la rejilla con respecto\ a\ la\ horizontal

 $K_t = Coef. de la forma de las barras, de la figura 3.10:$ 



Figura 3. 10.- Valores de Kt en función de la forma de las barras de la rejilla.

Para calcular las pérdidas menores correspondientes a los accesorios de conducción tales como codos, tees, cruces, válvulas, etc, se utiliza:

$$hacc = \sum K * \frac{V^2}{2g} \tag{3.31}$$

Dónde:

 $K = P\'erdida\ de\ cada\ accesorio, ver\ tabla\ 3.7, 3.8\ y\ 3.9$ 

 $V = Velocidad\ del\ agua\ en\ m/s$ 

 $g = Aceleración de la gravedad en m/s^2$ 

10.- Se realizará de nuevo los pasos del 3 al 9 para otros dos o tres diámetros diferentes con la finalidad de realizar comparaciones entre ellos.

Tabla 3. 7.- Valores de K para la ecuación 31.

Accesorio	Coeficiente k
De depósito a tubería (pérdida a la entrada)	
Conexión a ras de la pared	0.50
Tubería entrante	1.00
Conexión abocinada	0.05
De tubería a depósito (pérdida a la salida)	1.00
Contracción brusca (veáse tabla 11)	k <sub>c</sub>
Válvulas (veáse tabla 12)	$k_{v}$
Codos y tees	
Codos de 45°	0.35 - 0.45
Codos de 90°	0.50 - 0.75
Tees	1.5 - 2

Fuente: MAPAS, CONAGUA.

Tabla 3. 8.- Valores de Kc para contracción brusca.

D <sub>1</sub> /D <sub>2</sub>	k <sub>c</sub>
1.20	0.08
1.40	0.17
1.60	0.26
1.80	0.34
2.00	0.37
2.50	0.41
3.00	0.43
4.00	0.45
5.00	0.46

D<sub>1</sub> = Diámetro mayor, D<sub>2</sub> = Diámetro menor

Fuente: MAPAS, CONAGUA.

El espesor de la tubería es función de la carga hidráulica de trabajo o presión y de las características del material escogido. (European Small

Hydropower Association, 2006). En una tubería sometida a una presión Pi, el espesor se calcula con la ecuación:

$$e = \frac{P*D}{2*\sigma_f*} \tag{3.32}$$

Dónde:

e = Espesor de la tubería en mm

D = Diámetro interior del tubo en mm

 $P = Presión hidrostática en kN/mm^2$ 

 $\sigma_f = Resistencia \ a \ la \ tracción$ 

Tabla 3. 9.- Valores del coeficiente Kv en función del tipo de válvula.

Tipo de válvula	Coeficiente kv
Compuerta	0.20
Mariposa	0.60
Esférica	0.05
Excéntrica	1.00

Fuente: MAPAS, CONAGUA.

En tuberías de acero, la ecuación 3. 32 se modifica:

$$e = \frac{P*D}{2*\sigma_f*k_f} + e_s {(3.33)}$$

Dónde:

e = Espesor de la tubería en mm

D = Diámetro interior del tubo en mm

 $P = Presión hidrostática en kN/mm^2$ 

 $e_s = Sobrespesor para tener en cuenta la corrosión (3 mm)$ 

 $\sigma_f = Resistencia a la tracción (1400 kN/mm^2)$ 

 $k_f = Eficacia de la unión$ 

 $k_f = 1 para tubos sin soldadura$ 

 $k_f = 0.9$  para uniones soldadas y radiografiadas

 $k_f$ 

= 1 en uniones soldadas, radiografiadas y con aliviado de tensiones

La Asociación Americana de Ingenieros Mecánicos (American Society of Mechanical Engineers (ASME)) recomienda un espesor mínimo en milímetros las tuberías igual a 2.5 veces el diámetro en metros más 1.2 mm.

La ubicación de la casa de máquinas se propondrá en base a los factores determinados por Ortiz, R. (2011) en su libro *Pequeñas Centrales Hidroeléctricas*, los cuales se mencionan a continuación:

- La casa de máquinas debe colocarse cercana al afluente al cual se entregará el agua turbinada.
- Debe ubicarse en un terreno estable.
- Debe contar con facilidades de acceso para mantenimientos y para ampliaciones o modificaciones futuras.

La extensión territorial de la casa de máquinas se calculará posteriormente, una vez que se hayan determinado las características y dimensiones de los elementos que conforman los hidrogrupos de la minihidráulica, es importante mencionar que los hidrogrupos de este proyecto serán del tipo horizontal, ya que tal y como se mencionó anteriormente son los que ofrecen mayores facilidades

para el montaje y mantenimiento, por lo que se consideran más pertinentes para ésta minihidráulica.

El tipo o clasificación de los hidrogrupos que conformarán ésta pequeña central hidroeléctrica dependerán del tipo de turbina que se instale, para su selección es necesario conocer la caída neta o carga hidráulica de trabajo, la cual se determina aplicando la ecuación de la energía o de Bernoulli a la entrada del conducto a presión y la salida de la tubería de descarga de la turbina. Tomando como referencia el esquema de una hidroeléctrica que se muestra en la figura 3. 11 y aplicando la ecuación de la energía o de Bernoulli al sistema mostrado entre los puntos 1 y 2 se tiene:

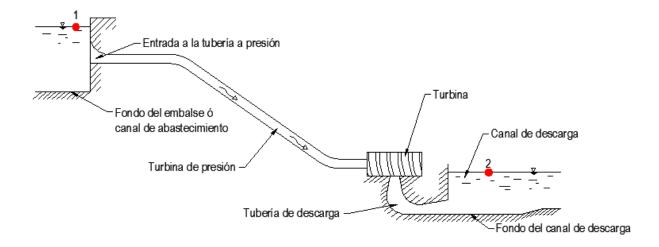


Figura 3. 11.- Esquema general de una instalación hidroeléctrica.

$$Z_1 + y_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{{V_1}^2}{2g} - H_T = Z_2 + y_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{{V_2}^2}{2g} + \Delta H$$
 (3.34)

Dónde:

 $Z_1 = Elevación \ del \ fondo \ del \ embalse \ en \ la \ sección \ 1 \ en \ m$ 

 $Z_2 = Elevación del fondo del canal de descarga en la sección <math>2$  en m

 $y_{1,2}$  = Tirante de agua en la sección 1 ó 2 en m

$$\frac{P_{1,2}}{\gamma} = Altura \ o \ carga \ de \ presión \ en \ la \ sección \ 1 \ ó \ 2 \ en \ m$$

 $\gamma = Peso \ especifico \ del \ agua \ en \ kg/m^3$ 

$$\frac{{V_{1,2}}^2}{2g}$$
 = Altura o carga de velocidad en la sección 1 ó 2 en m

 $H_T = Carga de trabajo de la turbina en metros$ 

 $\Delta H$ 

= Pérdidas de energía por fricción y accesorios en la tubería en m

En la superficie libre de agua de un embalse, la carga de presión puede considerarse nula, ya que en hidráulica se acostumbra trabajar con presiones manométricas, es decir, considerando la atmosférica como nula para facilitar el análisis, además la altura o carga de presión podrá despreciarse debido a que arroja valores muy pequeños que no se reflejan en los resultados, por lo tanto, la ecuación 3. 34 nos queda:

$$Z_1 + y_1 - H_T = Z_2 + y_2 + \Delta H \tag{3.35}$$

Despejando la carga de trabajo de la turbina de la ecuación 3. 35, se obtiene:

$$H_T = Z_1 + y_1 - Z_2 - y_2 - \Delta H \tag{3.36}$$

La ecuación 3. 36 será la expresión matemática para el cálculo de la carga hidráulica de trabajo en metros con la que trabajará la turbina.

Una vez conocida la carga hidráulica de trabajo, se consultará la tabla 3. 10 para la selección del tipo de turbina, en ella puede apreciarse que las turbinas de

acción están relacionadas con altas caídas y las de reacción con bajas y medias caídas. Además debemos aclarar que la tabla 3. 10 muestra los tipos de turbinas recomendados para caudales de entre 10 y 1000 m³/s.

Tabla 3. 10.- Rango de cargas de trabajo para diferentes tipos de turbinas.

Tipo	de turbina	Caída (m)
Acción	Pelton	50 < H <sub>T</sub> < 1300
	Turgo	50 < H <sub>T</sub> < 250
	Michell-Banki	3 < H <sub>T</sub> < 250
Doggajón	Francis	10 < H <sub>T</sub> < 350
Reacción	Kaplan y Hélice	2 < H <sub>T</sub> < 40

Fuente: Ortiz, R. 2011.

De igual forma, el caudal o gasto de diseño es otro parámetro importante en la selección del tipo de turbina hidráulica, por lo tanto, tomando en cuenta este factor y la caída o carga hidráulica de trabajo, se consultará la figura 3. 12, esto se realizará con la finalidad de garantizar que se seleccione el tipo de turbina más pertinente para nuestro proyecto.

Con el tipo de turbina establecido para la minihidráulica, procederá a determinarse el número de hidrogrupos de la pequeña central hidroeléctrica, tomando en cuenta, tal y como se mencionó anteriormente que además de tener bajo costo, ofrezcan:

- Construcción robusta de bajo peso.
- Número mínimo de componentes y geometría simple.
- Necesidades mínimas de mantenimiento.
- Facilidad de sustitución de componentes.
- Operación exenta de ruidos, vibraciones y cavitación en todo el campo de carga, con la obtención rápida de estabilidad operacional exenta de variaciones de carga en la posible fabricación seriada.

Sin embargo, para conocer el peso, geometría y las características de los hidrogrupos, primeramente debemos determinar la potencia real teórica.

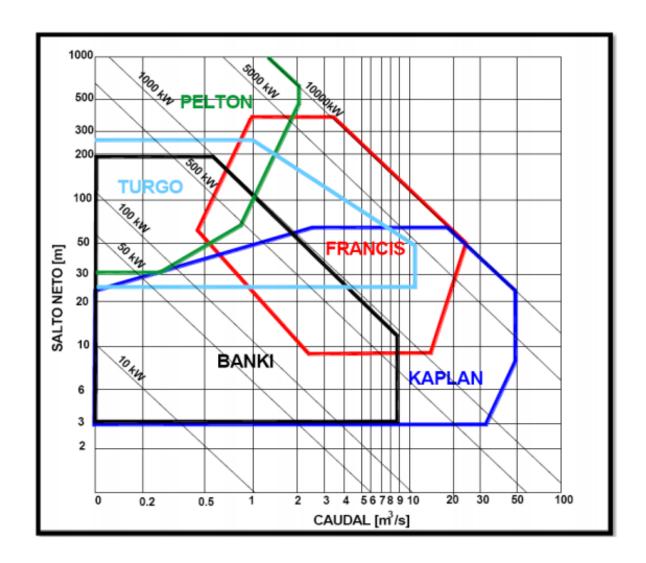


Figura 3. 12.- Diagrama para la selección de turbinas hidráulicas a nivel de pequeñas centrales hidroeléctricas.

La potencia real teórica del recurso hidroenergético está dada en función del caudal y de la altura disponible y se calcula de la siguiente forma:

$$P_R = 9.81 * n_T * n_C * Q * H_T \tag{3.37}$$

Dónde:

 $P_R$  = Potencia real teórica en kilowatts

 $n_T = Eficiencia de la turbina, se toma como 0.77 preliminarmente$ 

 $n_C = Eficiencia del generador, se toma como 0.95 preliminarmente$ 

 $H_T = Carga de trabajo de la turbina en m$ 

 $Q = Gasto de diseño en m^3/s$ 

El procedimiento y los resultados obtenidos con referencia al diámetro de la tubería a presión, la carga de trabajo de la turbina, y la potencia real teórica se resumirán en una tabla como la que se muestra a continuación.

Tabla 3. 11.- Resumen de cálculos de tubería a presión, carga de la turbina y potencia real teórica.

	Propuestas de diseño para el cálculo de la tubería a presión (1 conducto)															
Datos: Q= 30 m <sup>3</sup> /s						L=	280	m		n=	0.012					
No. de propuesta		V <sub>diseño</sub> Área (m/s) (m <sup>2</sup> ) Diámetro (m) Diámetro (m/s) (m <sup>2</sup> ) Diámetro (m) (m) Diámetro comercial (m) Pérdidas menores (m) Por turbulencia (ht) Por acceso (m)			comercial ht			accesorios	Pérdidas de energía	Carga H <sub>⊤</sub>	Potencia P <sub>R</sub>					
propacsia	(1111/3)	(III <i>)</i>	(''')	/\	(m/a)	(,	K,	4 ( \	h /\	0 (0)	h /\	-:-	haaa /m)	totales	(111)	(14144)
				(m)	(m/s)		n <sub>t</sub>	t (m)	D (M)	θ(')	h <sub>t</sub> (m)	ΣK	hacc (m)	totales		

#### Dónde:

- No. de propuesta.
- (2) Velocidad de diseño en m/s.
- (3) Área en m<sup>2</sup>.
- (4) Diámetro en m.
- (5) Diámetro comercial en m.
- (6) Velocidad para el diámetro comercial.
- (7) Pérdidas de energía por fricción en m.
- (8) Coeficiente K<sub>t</sub> para el cálculo de las pérdidas por turbulencia.

- (9) Espesor de las barras de la rejilla en m.
- (10) Separación de las barras de la rejilla en m.
- (11) Ángulo de la rejilla con respecto a la horizontal.
- (12) Pérdidas de energía por turbulencia en m.
- (13) Sumatorio de coeficientes K de pérdidas por accesorios.
- (14) Pérdidas de energía por accesorios en m.
- (15) Pérdidas de energía totales en m.
- (16) Carga de la turbina H<sub>T</sub> en m.
- (17) Potencia real teórica P<sub>R</sub> en MW.

Con el tipo de turbina establecido, la carga hidráulica de trabajo, el gasto y la potencia real teórica calculada, procederá a realizarse una búsqueda en el mercado internacional de turbinas, de una equipo que cumpla con todas las características necesarias para el desarrollo de la minihidráulica, una vez encontrada, procederá a investigarse las especificaciones técnicas de la máquina hidráulica, tales como diámetro de la entrada y salida del conducto, dimensiones, su capacidad de generación y toda la información técnica que pueda recabarse, debido a que todo esto será necesario para el diseño de la casa de máquinas, del conducto de retorno y de un estimado de costos que se realizará posteriormente.

Conforme a los resultados que se obtengan del análisis anterior se propondrán el número de hidrogrupos que integrarán la minihidráulica. En el caso, de existir dos o más hidrogrupos, también podemos expresar la potencia real teórica como:

$$P_R = \sum_{i}^{n} P_i \tag{3.38}$$

Dónde:

 $P_i = Potencia \ real \ del \ hidrogrupo \ i$ 

n = Número de unidades

De igual forma, de existir dos o más hidrogrupos del mismo tipo, en las expresiones anteriores el único parámetro que podría oscilar es el caudal, por lo tanto la potencia real teórica también puede expresarse como:

$$P_R = 9.81 * n_T * n_C * H_T * \sum_{i=1}^{n} Q_i$$
 (3.39)

$$Q_i = \frac{Q}{n} \tag{3.40}$$

Dónde:

 $Q_i = Caudal del hidrogrupo i$ 

n = Número de unidades

Una vez conocida la potencia es posible calcular la producción media de la minihidráulica, como producto de la potencia en cada momento por las horas de funcionamiento.

En base a las dimensiones de la turbina seleccionada y al número de hidrogrupos propuestos, se planteará el área que tendrá la casa de máquinas, donde se alojarán, un tramo de la tubería a presión, los hidrogrupos conformados por turbina y generador, un tramo del conducto de retorno y un espacio para la instalación de una subestación eléctrica. Debemos aclarar que el diseño estructural y geotécnico de la casa de máquinas, y el diseño de la subestación eléctrica no se encuentra dentro del alcance de este proyecto de intervención, debido a que es un proyecto de tipo académico y se tiene un tiempo límite para su terminación.

Finalmente establecidas las dimensiones de la casa de máquinas, procederá a realizarse el diseño de la tubería o conducto de retorno, parte de la minihidráulica encargada de regresar las aguas turbinadas de nuevo al cauce de la fuente de abastecimiento. El diseño de la tubería o conducto de retorno, será el mismo que el desarrollado para la tubería a presión, por lo tanto, el diámetro y

espesor de este elemento serán iguales que los obtenidos en los cálculos para la tubería a presión.

#### 3.5.4.- Análisis de los resultados

En esta etapa del proyecto de intervención se examinará y comparará la potencia real producida por la minihidráulica obtenida en la etapa anterior con el consumo energético promedio de una casa promedio de la localidad del Campo El Diez y de una de la ciudad de Culiacán, Sinaloa, esto nos proporcionará que porcentaje de la población puede abastecerse con la minihidráulica, es importante aclarar que la energía pretende venderse a la CFE, por lo tanto, ésta se añadiría a una red eléctrica, por lo que no se abastecería el Campo El Diez directamente, sin embargo, el realizar este análisis nos brinda una información sobre la gran cantidad de energía eléctrica minihidráulica que puede producirse por este medio. Los siguientes pasos deberán seguirse para realizar el análisis mencionado:

- 1.- Elaborará una lista de los equipos eléctricos y electrónicos con los que cuenta una casa promedio del Campo El Diez y una de la ciudad de Culiacán.
- 2.- Asignará una potencia en Watts para cada equipo contenido en la lista realizada del paso anterior.
- 3.- Se establecerá el número de unidades de cada equipo con los que se cuenta en una casa promedio.
- 4.- Se fijará un número de horas al día en las cuales trabaja cada uno de los equipos contenidos en la lista realizada.
- 5.- Se obtendrá la energía consumida por unidad en KWh dividiendo la potencia en watts de cada equipo entre mil y multiplicando el resultado por 1 hora.

- 6.- Se determinará la energía total consumida en KWh multiplicando el número de unidades por la energía consumida por unidad en KWh.
- 7.- Se calculará la energía diaria total consumida KWh multiplicando las horas al día en las cuales trabaja cada equipo por la energía total consumida en KWh.
- 8.- Se realizará una suma de la energía total consumida en KWH y otra para la energía diaria total consumida en KWh.
- 9.- Se resumirán los pasos descritos a manera de tabla, como la que se muestra a continuación:

Tabla 3. 12.- Tabla para cálculo del consumo diario de energía de una casa promedio.

Consumo diario de energía eléctrica para una casa promedio ubicada en el Campo El Diez, Culiacán, Sinaloa									
Equipo	Potencia (Watts)	Unidades	Horas al día	Energía consumida por unidad en KWh	Energía total consumida en KWh	Energía diaria total consumida en KWh			
				Total					

De igual forma se obtendrá la energía diaria generada por la minihidráulica en KWh, para ello será necesario multiplicar la potencia total en KW por las horas al día en las que se está generando energía, el cálculo se realizará en una tabla como la 3.13.

Posteriormente, se obtendrá el número de casas que pueden abastecerse energéticamente dividiendo la energía total producida en KWh de la minihidráulica entre la energía total consumida en KWh de una casa promedio.

Tabla 3. 13.- Tabla para cálculo de la potencia diaria generada por la minihidráulica.

Central hidroeléctrica	Potencia generada (Watts)	Unidades	Horas al día	Energía por unidad en KWh	Energía total generada en KWh	Energía diaria total generada en KWh
Minihidráulica Campo El Diez						
				Total		

Además, una vez que se tiene la potencia real producida por la minihidráulica, se determinará cuanto se reduce la quema de combustibles fósiles para la generación de electricidad, es decir, por ejemplo, ¿cuántos barriles o cuántas toneladas de petróleo se necesitan para producir la misma energía?, para ello se tomará como referencia la información proporciona por la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE).

De igual forma, en esta fase, se analizará que el nivel de agua demandado antes de la minihidráulica siga siendo el mismo, punto que a nuestra consideración podrá garantizarse ya que la demanda y calidad del agua que entre y salga por nuestro conducto a presión seguirá teniendo las mismas propiedades, realmente esto es un factor importante en el desarrollo de proyectos de este tipo.

### 3.5.5.- Procedimiento constructivo

Un procedimiento constructivo es el conjunto de fases sucesivas o solapadas en el tiempo, necesarias para la materialización de un edificio o una infraestructura. Los procesos constructivos son singulares para cada obra que se puede concebir, sin embargo existen algunos pasos comunes que siempre deben realizarse.

El procedimiento constructivo que se propone para la construcción de la minihidráulica en el Campo El Diez, en Culiacán, Sinaloa, involucra movimiento de tierras a través de medios mecánicos, como desmonte y limpieza del terreno, excavaciones y trabajos de terraplén; además involucra trabajos de tipo

tradicional, es decir, que cualquier albañil puede realizarlos, tales como afines en excavaciones, cimbra común en cimentaciones, cimbra en elementos estructurales, colocación de concreto y acabados comunes. Es importante mencionar que será necesario contar con mano de obra especializada para el acoplamiento de los equipos electromecánicos a la tubería a presión en la casa de máquinas, sin embargo, se buscará que estos trabajos los realice el proveedor de los mismos.

El procedimiento constructivo tendrá el objetivo de ser relativamente "sencillo", aunque para nuestro criterio no es una obra pequeña, trataremos de establecer una metodología para la ejecución de una obra sustentable de este tipo sin la erogación de grandes cantidades de dinero, en busca de propiciar beneficios sociales y económicos de las regiones donde se lleven a cabo causando un bajo impacto ambiental.

Por lo anterior, el procedimiento constructivo del presente proyecto de intervención se dividirá en etapas, mismas que se describirán paso a paso una vez que se tenga el diseño completo de la minihidráulica, las etapas son las siguientes:

- Etapa 1 del procedimiento constructivo Canal de desvío.
- Etapa 2 del procedimiento constructivo Obra de represamiento y obra de toma.
- Etapa 3 del procedimiento constructivo Relleno del canal de desvío.
- Etapa 4 del procedimiento constructivo Tubería a presión.
- Etapa 5 del procedimiento constructivo Casa de máquinas.
- Etapa 6 del procedimiento constructivo Tubería de retorno.

Parte de la minihidráulica, al menos la obra de toma, tendrá lugar en el cauce del canal San Lorenzo, por ello la etapa 1 del procedimiento constructivo corresponde a la construcción de un canal de desvío, ya que es necesario apartar

el flujo proveniente aguas arriba de la zona del proyecto que se encuentre dentro del cauce, de tal forma que se logre que dicha región esté seca, y así llevar a cabo los trabajos para su construcción. Debido a esto es necesario definir la metodología que se utilizará para el diseño del canal de desvío, ésta es la siguiente:

- 1. Propuesta de dimensiones (plantilla, tirante, talud y pendiente), de un canal de sección transversal trapecial excavado en tierra.
- 2. Cálculo de elementos geométricos de la sección trapecial, es decir, el área hidráulica, el perímetro mojado y el radio hidráulico, con las ecuaciones 3. 15, 3. 16 y 3. 17 respectivamente.
- 3. Debido a que el diseño del canal se realizará con la ecuación de Manning, deberá obtenerse el coeficiente de rugosidad "n" de Manning de la tabla A. 1. 5 contenida en el anexo 1.
- 4. Una vez realizado lo anterior, se calculará el gasto resultante mediante la ecuación 3. 6.
- 5. El resultado del gasto obtenido en el paso 4 se comparará con el gasto a desviar, para que el diseño del canal de desvío sea correcto debe cumplirse:

### $Q_{canal\ de\ desvio} > Q_{a\ desviar}$

- Deberá considerarse un bordo libre como protección para evitar el desbordamiento del canal de desvío, mismo que deberá obtenerse de la figura 3. 13.
- 7. Una vez establecidas las dimensiones del canal, procederá a realizarse el trazo, el cual deberá rodear el área necesaria para la realización de los trabajos de la obra de toma y aquellos otros que sean necesarios, las curvas que se presenten en el trazo, deberán cumplir con lo siguiente según el Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS) de la CONAGUA en su libro de "Conducciones":

$$\frac{r_m}{t'} > 4Fr_1^2$$

Dónde:

 $r_m=$  Radio de la curva  $Fr_1=$  Número de Froude antes de la curva t'= Ancho de la superficie libre antes de la curva

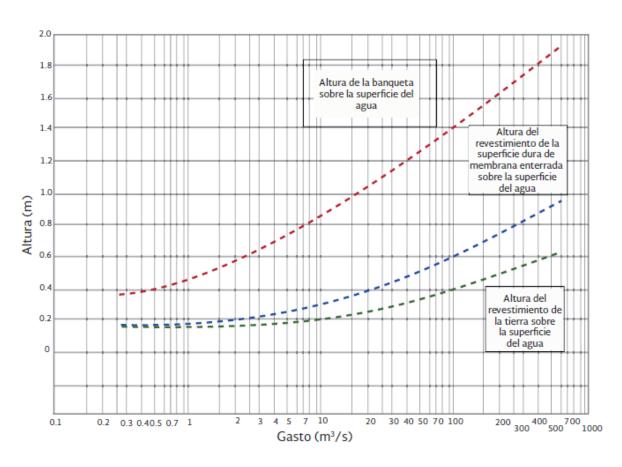


Figura 3. 13.- Bordo libre para canales con revestimiento de superficie dura, membrana enterrada y tierra. (Sotelo, 2002).

Para el cálculo del número de Froude antes de la curva, se utilizará la siguiente ecuación:

$$Fr_1 = \frac{V}{\sqrt{g*D}} \tag{3.41}$$

Dónde:

V = Velocidad media en la sección en m/s

 $g = Aceleración de la gravedad en m/s^2$ 

D = Profundidad hidráulica en m

La profundidad hidráulica, es también un elemento geométrico de la sección transversal de un canal, el cual se obtiene:

$$D = \frac{A}{t'} \tag{3.42}$$

Dónde:

 $A = \text{Área hidráulica en } m^2$ 

t' = Longitud del espejo de agua en la sección el canal

- 8. En el caso de que no se cumpla con la condición del paso 7, y no exista la posibilidad de realizar el trazo de otra forma para obtener radios menos pronunciados, deberá proponerse una sobreelevación en las curvas para protección del canal.
- Posteriormente deberá diseñarse un bordo de contención con la finalidad de obstruir el paso del caudal por el cauce del canal San Lorenzo y así enviarlo al canal de desvío.
- 10. Finalmente se elaborarán los planos necesarios, en los cuales se expliquen gráficamente los pasos anteriores.

Finalizado, el trazo y teniendo el diseño definitivo del canal de desvío, es decir, las dimensiones de la sección transversal, los radios de curvatura, el bordo de contención que funge como tapón del flujo del canal San Lorenzo y la sobreelevación que debe colocarse en las curvas, se procederá a describir

detalladamente como debe llevarse a cabo la construcción del mismo, es decir, los trabajos preliminares que deben hacerse, los trabajos referentes al movimiento de tierras y el orden en que deben ejecutarse.

Concluida la etapa 1 del procedimiento de construcción, se procederá con la etapa 2 correspondiente a la obra de represamiento y obra de toma. Esta parte del sistema constructivo deberá llevarse a cabo de acuerdo al diseño de estos elementos de la minihidráulica, aquí, se establecerá una serie de pasos con la finalidad de llevar a cabo dicha tarea de la manera más segura posible, de tal forma que se cuide la integridad del trabajador, además se definirá si es necesario realizar trabajos preliminares, tales como rellenos o demoliciones.

La etapa 3 del procedimiento de construcción, consiste en la desaparición del canal de desvío, es decir, el relleno del mismo, tarea que deberá llevarse a cabo una vez que se garantice que el flujo proveniente del canal San Lorenzo podrá controlarse mediante algún dispositivo instalado en las etapas anteriores, esta fase del procedimiento constructivo se conformará mayoritariamente por trabajos relacionados con movimientos de tierra, tales como rellenos y acarreos.

La colocación de la tubería a presión constituye la etapa 4 del procedimiento de construcción, esta etapa deberá realizarse de acuerdo a los detalles constructivos contenidos en los planos de proyecto, mismos que deberán elaborarse de acuerdo a las especificaciones para las dimensiones de las zanjas marcadas en el Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de la Comisión Nacional del Agua (MAPAS – CONAGUA). Además deberán fijarse las medidas de seguridad, tanto para la recepción, la descarga y la colocación de la tubería.

La etapa 5 del procedimiento constructivo del presente proyecto comprende la casa de máquinas, sin embargo, al no tener un diseño estructural ni geotécnico de esta pate de la minihidráulica debido a que no se encuentran dentro del alcance de este proyecto de intervención, el proceso de construcción de esta parte

no se describirá, ya que se desconocen las características de la edificación, por lo tanto, se procederá con la siguiente etapa del procedimiento constructivo.

La última etapa del procedimiento de construcción de la minihidráulica, es la número 6, referente a la tubería o conducto de retorno, en ella deberán seguirse los mismos pasos que en la etapa 4, debido a que la tubería a presión y la tubería de retorno están diseñadas de acuerdo a las mismas especificaciones y tienen las mismas características.

El procedimiento de construcción deberá redactarse de manera que de la descripción se obtenga los conceptos de obra, posteriormente elaborar un catálogo y en base a él determinar un estimado de costos.

#### 3.5.6.- Estimado de costos

Un parámetro fundamental para la realización de un proyecto, es la inversión requerida para su desarrollo. Diseñados los elementos que forman parte de la minihidráulica y una vez descrito el procedimiento de construcción, procederemos a la elaboración de un estimado de costos.

Primeramente, apoyándose del procedimiento de construcción propuesto, se elaborará una lista con todos los elementos que conforman esta obra, es decir, las partes de la minihidráulica, los trabajos preliminares y las obras de desvío correspondientes. Hecho esto, se redactarán de una manera general los conceptos que conforman cada uno de los elementos de esta obra, es importante aclarar, que no se realizará un presupuesto, por lo que solamente tratarán de incluirse aquellos conceptos que a nuestra consideración tengan un peso importante en el costo de la obra.

Posteriormente se calcularán los volúmenes para los conceptos de obra redactados en base a los planos que se elaboren durante el diseño del proyecto.

Para la determinación de los precios unitarios de cada uno de los conceptos de obra redactados, se utilizará el software de ingeniería de costos, programación y control de obra llamado Opus de la marca Ecosoft, además del software Microsoft Excel. Los costos referentes a la turbina y a su instalación, se investigarán directamente con diversos proveedores. Finalizado lo anterior, se elaborará un catálogo de conceptos, el cual se dividirá por partidas de acuerdo con el procedimiento constructivo propuesto, el catálogo de conceptos deberá contener la clave, descripción, unidad, cantidad, precio unitario, total y observaciones para cada uno de los conceptos que lo forman. Lo anterior descrito constituye el estimado de costos base.

Es importante, que al realizar el estimado de costos, se considere un porcentaje de contingencias, es decir, una cantidad de dinero que debe agregarse al estimado base para predecir el costo total del proyecto.

Por último, el estimado de costos será la suma del estimado base más las contingencias.

# 3.5.7.- Cierre de proyecto

Al igual que todas las etapas que comprenden el presente proyecto de intervención, el cierre de proyecto es una fundamental. En esta fase se realizará una revisión de la información obtenida anteriormente, asegurando que el trabajo, en este caso el proyecto de intervención este completo y cumpla con los objetivos específicos planteados.

La información que deberá revisarse, son los cálculos de cada uno de los elementos que conforman la minihidráulica propuesta como una fuente de energía eléctrica sustentable, además del procedimiento de construcción y el estimado de costos.

Una vez que se revise toda la información mencionada, se hará una reunión entre los involucrados de este proyecto de intervención y se declarará si el

proyecto fue exitoso o un fracaso, es decir si se cumple con todos los entregables planteados.

### 3.5.8.- Presentación de los resultados

En esta parte del presente proyecto de intervención, se darán a conocer, de manera clara, breve y concisa los resultados que dan respuesta a cada uno de los objetivos específicos planteados.

# 4.- Estrategias de implementación

### 4.1.- Plan de acción

### 4.1.1.- Identificación del sitio

Como resultado de una revisión exhaustiva de toda la zona perteneciente a la Cuenca Pacífico Norte de la CONAGUA, en particular de la parte cercana al municipio de Culiacán, Sinaloa, se identificaron diversos puntos estratégicos para la probable instalación de una minihidráulica, los cuales se muestran en la figura 4. 1, dichos puntos cuentan con las características de gasto y desnivel, parámetros imprescindibles para generar hidroelectricidad.



Figura 4. 1.- Sitios probables para el emplazamiento de la minihidráulica.

Los puntos señalados en la figura anterior corresponden a los siguientes sitios:

Punto A.- Localidad de Guatenipa en el municipio de Badiraguato, Sinaloa.

Punto B.- Localidad del Campo El Diez en el municipio de Culiacán, Sinaloa.

Punto C.- Localidad de Tamazula en el municipio de Tamazula, Durango.

Punto D.- Localidad de El Copete en el municipio de Tamazula, Durango.

Punto E.- Localidad de San Gregorio en el municipio de Tamazula, Durango.

Una vez con la identificación de los puntos se procedió a elaborar la tabla 4. 1 para la selección del sitio, los resultados fueron los siguientes:

Tabla 4. 1.- Resultados de la selección del sitio de emplazamiento de la minihidráulica.

Factor			Punto	Ponderación		
		В	С	D	Ε	Ponderación
Accesos al sitio	6	10	6	4	4	13.00%
Distancia del lugar	6	10	6	4	2	16.00%
Infraestructura existente	10	10	8	10	8	13.00%
Características hidráulicas	10	8	6	8	4	20.00%
Aspectos sociales positivios	2	10	10	6	4	18.00%
Conservación del medio ambiente	4	10	10	10	10	20.00%
Puntaje del punto (Sj)	6.20	9.60	7.78	7.14	5.40	100.00%

El punto con mayor puntaje resultó ser una rápida que termina en una caída hidráulica que se encuentra sobre el canal "San Lorenzo" en la comunidad del Campo El Diez en Culiacán, Sinaloa. Este canal pertenece al distrito de riego número 10 que se encuentra dentro de la región hidrológica Pacífico-Norte, en Culiacán, Sinaloa, dicho canal cuenta con un tramo donde se ubica una estación o sección de aforo de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), es decir una

sección donde la pendiente del canal cambia de "suave o subcrítica" a "fuerte o pronunciada", debido a esto se genera un desnivel importante, que junto con el gasto que transporta dicho canal, lo convierten en el sitio más pertinente y donde la ubicación de la minihidráulica representa mayor factibilidad. En las figuras 4. 2, 4. 3, 4. 4 y 4. 5 se muestran imágenes del sitio donde seleccionado para el emplazamiento de la minihidráulica. Para ver más fotografías del sitio, consulte el anexo 2.



Figura 4. 2.- Rápida ubicada en el canal San Lorenzo en el Campo El Diez en Culiacán Sinaloa - Sitio para el emplazamiento de la minihidráulica.



Figura 4. 3.- Margen derecha del canal San Lorenzo.



Figura 4. 4.- Caída hidráulica del canal San Lorenzo.



Figura 4. 5.- Vista lateral de la rápida ubicada en el canal San Lorenzo.

# 4.1.2.- Trabajo de campo

Una vez seleccionado el punto para el emplazamiento de la minihidráulica, se procedió a detallar topográficamente el sitio, esta tarea decidió llevarse a cabo asistiendo a campo.

Debido a la configuración y geometría del canal "San Lorenzo", el levantamiento topográfico comenzó aproximadamente 70 metros aguas arriba de donde se encuentra la sección de control o sección de aforo de la CONAGUA, a partir de ahí se definieron estaciones a cada 20 metros hasta una distancia de más de 600 metros como se muestra en la figura 4. 6. Los puntos a medir en cada estación del levantamiento topográfico corresponden a las márgenes o

caminos laterales y la sección transversal del canal, como se muestra en la figura 4.7.

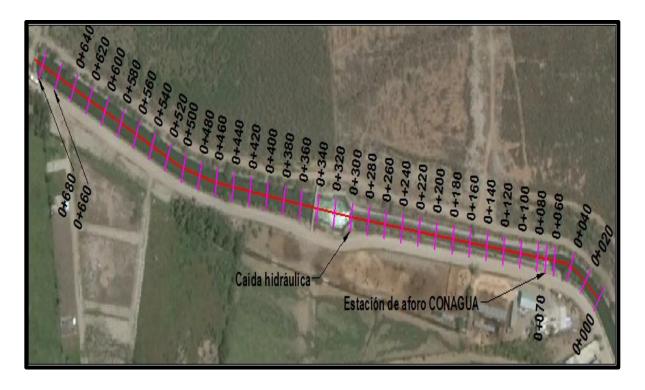


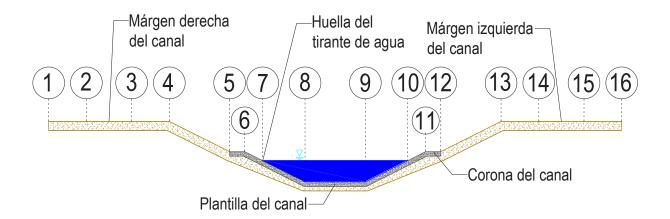
Figura 4. 6.- Estaciones sobre el eje de proyecto del canal San Lorenzo.

Como resultado del levantamiento topográfico se dibujó en planta el canal "San Lorenzo" tal y como se observa en el plano MH – 01, consulte al autor del proyecto para visualización del plano..

De igual forma se obtuvieron tres secciones transversales; una en la estación 0 + 070, donde se encuentra la estación de aforo de CONAGUA; la segunda en la estación 0 + 300, donde se encuentra una caída hidráulica al final de una rápida; y la tercera en la estación 0 + 050, aproximadamente 20 metros aguas arriba de la estación de aforo de CONAGUA. Las secciones mencionadas se muestran en el plano MH – 02; consulte al autor para visualización del plano.

Es importante hacer mención que tal y como se muestra en el plano MH - 01, el desnivel existente de la superficie libre del agua entre la sección transversal

en la estación de aforo y la caída hidráulica es de aproximadamente 7.5 metros, un valor numérico que nuevamente justifica de gran forma nuestro proyecto.



Puntos	Corresponden a:
1 2 3 4 13 14 15 16	Márgenes del canal
5 6 11 12	Corona del canal
7 10	Huella del tirante de agua
89	Plantilla del canal

Figura 4. 7.- Puntos para levantamiento topográfico de cada estación del canal.

Una vez finalizados los trabajos topográficos, se elaboró la tabla 4. 2 donde se resumen las características geométricas obtenidas del canal "San Lorenzo".

Posteriormente, con la recopilación de datos que se muestra en la tabla 4. 2, se aplicó el método sección pendiente para la realización de un aforo. Al sustituir los valores de los tirantes de agua, la plantilla del canal y el talud en las ecuaciones 3. 15, 3. 16 y 3. 17, se obtuvieron los elementos geométricos de las secciones transversales. Los resultados se muestran en la tabla 4. 3.

Tabla 4. 2.- Características geométricas de las secciones transversales del canal "San Lorenzo".

Características geométricas de las secciones transversales del canal "San Lorenzo"					
У1	1.5				
У2	0.6				
У3	2.7				
b	5 m				
t	1.5				
L <sub>1-2</sub>	237 m				
$Z_1$	46				
$Z_2$	39.4				
$Z_3$	44.8				
1 = Sección transversal del canal er	n la estación de aforo CONAGUA				
2 = Sección transversal del canal er	n la caída hidráulica				
3 = Sección transversal del canal 20 aforo	) m aguas arriba de la estación de				
y <sub>1</sub> = Tirante de agua en la estación o	de aforo CONAGUA				
y <sub>2</sub> = Tirante de agua en la caída hidi	ráulica				
y <sub>3</sub> = Tirante de agua en la sección 2 aforo	20 m aguas arriba de la estación de				
L <sub>1-2</sub> = Distancia entre las secciones	1 y 2				
Z <sub>1</sub> = Cota de plantilla en la estación	de aforo CONAGUA				
Z <sub>2</sub> = Cota de plantilla en la caída hid	ráulica				
Z <sub>3</sub> = Cota de plantilla en la sección 2	20 m aguas arriba de la estación de				
aforo					

Tabla 4. 3.- Elementos geométricos de las secciones transversales analizadas.

$A_1 (m^2)$	10.875	$A_2 (m^2)$	3.540
P <sub>1</sub> (m)	10.408	P <sub>2</sub> (m)	7.163
R <sub>1</sub> (m)	1.045	R <sub>2</sub> (m)	0.494

Los valores con el subíndice 1 corresponden a la sección de control y los del subíndice 2 a los de la caída hidráulica.

De igual forma, conocidos los valores de las cotas de plantilla  $(Z_1 \ y \ Z_2) \ y$  los tirantes de agua  $(y_1 \ y \ y_2)$  en los extremos del canal de estudio se calculó la diferencia de elevaciones de los tirantes de agua, al sustituir los valores mencionados en la ecuación 3. 9 tenemos:

$$\Delta y = (Z_1 + y_1) - (Z_2 + y_2) = (46 m + 1.5 m) - (39.4 m + 0.60 m)$$
  
$$\Delta y = 7.5 m$$

El coeficiente de rugosidad de Manning, se asignó una vez que se realizó el trabajo de campo, donde se pudo observar detalladamente el estado del material que conforma el canal "San Lorenzo" en el tramo de nuestro interés. El canal "San Lorenzo" es un canal trapecial revestido de concreto rugoso, para el cual consultando las tablas A. 1. 1, A. 1. 2, A. 1. 3, A. 1. 4, A. 1. 5, A. 1. 6 y A. 1. 7 contenidas en el anexo 1, y considerando un coeficiente de rugosidad mínimo, se tiene que:

$$n = 0.014$$

La figura 4. 8 muestra una fotografía del canal "San Lorenzo" donde se observa el estado del material que conforma el canal.



Figura 4. 8.- Estado del material que conforma la sección transversal del canal.

Conocidos los valores de la rugosidad y de los elementos geométricos de las secciones transversales, se calculó el coeficiente de conducción medio en el tramo, para ello fue necesario obtener primeramente el coeficiente de conducción para cada sección de los extremos, por lo tanto, sustituyendo el área hidráulica, radio hidráulico y rugosidad de cada sección en la ecuación 3. 12 se tiene:

$$\overline{K}_{d_1} = \frac{A_1 * R_1^{2/3}}{n_1} = \frac{(10.875) * (1.045)^{2/3}}{0.014} = 799.834$$

$$\overline{K}_{d_2} = \frac{A_2 * R_2^{2/3}}{n_2} = \frac{(3.540) * (.494)^{2/3}}{0.014} = 158.052$$

Posteriormente, sustituyendo los valores de los coeficientes medios de conducción de las secciones de los extremos del tramo en la ecuación 3. 13 se obtuvo el coeficiente de conducción medio:

$$\overline{K}_d = \sqrt{K_{d1} * K_{d2}} = \sqrt{(799.834) * (158.052)} = 355.55$$

Por último, en lo que respecta al método sección-pendiente, se calculó el gasto, para ello se sustituyeron en la ecuación 3. 14 los valores obtenidos del coeficiente de conducción medio, el área hidráulica de las secciones de los extremos del tramo en estudio, la diferencia de elevaciones entre la superficie libre

del agua entre las dos secciones y la longitud entre una y otra, como resultado se obtuvo:

$$Q = \frac{\sqrt{\Delta y/L}}{\sqrt{\frac{1}{\overline{K_d}^2} - \frac{1}{b * g * L} \left(\frac{1}{A_1^2} - \frac{1}{A_2^2}\right)}}$$

$$Q = \frac{\sqrt{7.5 \, m/237 \, m}}{\sqrt{\frac{1}{(355.55)^2} - \frac{1}{2 * 9.8 \, m/s^2 * 237 \, m} \left(\frac{1}{(10.875 \, m^2)^2} - \frac{1}{(3.540 \, m^2)^2}\right)}}$$

$$Q = 36.878 \, m^3/s$$

El resultado obtenido del gasto es muy significativo, ya que junto al desnivel entre las secciones extremas del tramo en estudio, le aportan un poderoso potencial minihidráulico a este proyecto de intervención. Sin embargo para este proyecto de intervención, debido a la información proporcionada por el jefe de operaciones del distrito de riego número 10 de la Cuenca Pacífico Norte de la CONAGUA, el gasto de diseño que se tomará para este proyecto será de 30 m³/s, ya que regularmente es el volumen que fluye por el canal "San Lorenzo".

# 4.1.3.- Trabajo de gabinete y procesamiento de la información

A partir de los resultados obtenidos en las etapas anteriores, se realizó el diseño hidráulico de todos los elementos que conforman la minihidráulica.

Un esquema general de la minihidráulica que propone este proyecto de intervención se aprecia en el plano MH – 03; consulte al autor para su visualización.

Con la finalidad de garantizar que el gasto captado por la obra de toma sea el requerido, se colocará una obra de represamiento, misma que se ubicará aproximadamente 20 metros aguas arriba de la sección del cambio de pendiente.

La sección transversal del canal en el punto donde se instalará la obra de represamiento se muestra en el plano MH - 02, misma que se obtuvo a partir del levantamiento topográfico efectuado.

Despejando el área hidráulica y sustituyendo los datos correspondientes en la ecuación 3. 5 considerando una velocidad máxima permisible de 1.5 m/s se obtiene el área hidráulica mínima:

$$A_{min} = \frac{Q}{V} = \frac{30 \ m^3/s}{1.5 \ m/s} = 20 \ m^2$$

Como el tirante de agua en la sección transversal de interés es mayor que 2 metros se escogen compuertas radiales. Por lo tanto, para la obra de represamiento de la minihidráulica se proponen instalar dos compuertas con una pila central separadora de 0.5 metros de ancho, de la tabla 3. 4 se obtiene las siguientes dimensiones para las compuertas radiales:

Dimensiones de las compuertas: 3m de ancho x 3.55 m de altura.

Una vez con las dimensiones de las compuertas obtenidas, se calcula el área de las mismas y se verifica si ésta es mayor que el área hidráulica mínima.

$$A_{compuertas} = (3 m) * (3.55 m) * (2 compuertas) = 21.3 m^2$$

Como:

$$A_{compuertas} = 21.3 \ m^2 > A_{min} = 20 \ m^2$$

La propuesta realizada para el número y dimensionamiento de las compuertas en cuanto al área necesaria es correcta.

Ahora se procede a realizar el cálculo de la velocidad del agua con la que funcionará la represa, despejando la velocidad y sustituyendo los datos correspondientes en la ecuación 3. 5 se obtiene:

$$V_{represa} = \frac{Q}{A_{compuertas}} = \frac{30 \text{ m}^3/\text{s}}{21.3 \text{ m}^2} = 1.4 \text{ m/s}$$

Como:

$$V_{represa} = 1.4 \frac{m}{s} < V_{m\acute{a}xima} = 1.5 m/s$$

La propuesta realizada para el número y dimensionamiento de las compuertas en cuanto a la velocidad permisible es correcta.

Para el cálculo de la longitud de transición de entrada y salida es necesario calcular primeramente la longitud del espejo de agua tanto en la sección de la represa y en la sección del canal.

Sustituyendo en la ecuación 3. 19 se obtiene:

$$T = (2) * (1.5) * (2.7 m) + (3 m + 3 m + 0.5 m) = 14.6 m$$

Sustituyendo en la ecuación 3. 20 se obtiene:

$$t' = (2) * (1.5) * (2.7 m) + (5 m) = 13.1 m$$

Con los resultados anteriores y sustituyendo en la ecuación 3. 18 se obtiene:

$$L = \left(\frac{14.6 \, m - 13.1 \, m}{2}\right) * (ctg \, 22^{\circ} \, 30') = 1.828 \, m$$

Sin embargo por practicidad se tomará un valor de 2 m para las longitudes de transición de entrada y de salida.

Los resultados finales del diseño de la obra de represamiento se plasmaron gráficamente en los planos MH - 04, MH - 05 y MH – 06; consulte al autor para su visualización. Debe aclararse que el diseño estructural de las compuertas, sus detalles y los demás elementos de esta obra se realizaron conforme a los manuales de diseño de la Comisión Nacional del Agua (MAPAS, CONAGUA).

La obra de toma se diseñará con una toma en el lecho del canal que capte el agua en el fondo del mismo con una estructura en forma cuadrada, a través de la cual, el agua captada será transportada a la tubería a presión y para evitar el acceso de materia sólida se colocará una rejilla además de un bordillo perimetral para evitar la entrada del arrastre de sedimentos.

Sustituyendo en la ecuación 3. 21 los valores del gasto de diseño de 30 m³/s, un tirante promedio de 2.5 m, un coeficiente de descarga de 0.60, y despejando el área neta de la rejilla en m² se obtiene:

$$Q = A_0 * Cd * (2 * g * h_0)^{\frac{1}{2}}$$

$$30 \ m^3/s = A_0 * 0.6 * (2 * 9.8 \frac{m}{s^2} * 2.5 \ m)^{\frac{1}{2}}$$

$$A_0 = \frac{30 \frac{m^3}{s}}{0.6 * (2 * 9.8 \frac{m}{s^2} * 1.0380 \ m)^{\frac{1}{2}}} = 7.14 \ m^2$$

El área total que deberá tener la rejilla, se obtuvo sustituyendo el área neta de la rejilla en la ecuación 3. 22.

$$A_T = \frac{A_0}{0.60} = \frac{11.085 \, m^2}{0.60} = 11.9 \, m^2$$

Una vez obtenida el área total de la rejilla se proponen las dimensiones hasta que el área de diseño propuesta sea igual o mayor que el área total de la rejilla. En la tabla 4. 4 se muestran algunas dimensiones propuestas al realizar dicho cálculo.

Tabla 4. 4.- Cálculos de las dimensiones de la rejilla de la obra de toma.

Área de diseño de la rejilla de la obra de toma de la minihidráulica en el canal "San Lorenzo"						
Dimensiones	Área (m²)					
L (m)	L (m)					
3.20	10.24					
3.30	3.30					
3.40	3.40					
3.50		12.25				
	Área del cuadrado	- (I X I )				

La rejilla de fondo de la obra de toma con un área de 12.25 m<sup>2</sup> cumple con la condición de ser mayor que el área total de 11.9 m², por lo tanto, la rejilla cuadrada tendrá 3.50 metros por lado.

Los resultados finales del diseño de la obra de toma se plasmaron gráficamente en los planos MH -07 y MH - 08; consulte al autor para su visualización. Debe aclararse que el diseño estructural de la misma se realizó conforme a lo establecido en los manuales de diseño de la CONAGUA.

El diseño de la tubería a presión se realizará en base a un trazo propuesto, éste dependerá de la ubicación de la obra de toma y de la casa de máquinas. La ubicación de la obra de toma ya ha quedado definida, para la ubicación de la casa de máquinas será necesario basarnos en los factores mencionados en la sección 3.5.3 del presente proyecto propuestos por Ortiz, R. (2011) en su libro *Pequeñas Centrales Hidroeléctricas*, los cuales se mencionan nuevamente:

- La casa de máquinas debe colocarse cercana al afluente al cual se entregará el agua turbinada.
- Debe ubicarse en un terreno estable.
- Debe contar con facilidades de acceso para mantenimientos y para ampliaciones o modificaciones futuras.

La ubicación de la casa de máquinas se muestra en la figura 4. 9.

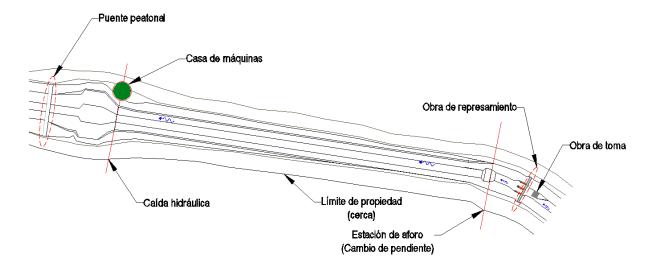


Figura 4. 9.- Ubicación de la casa de máquinas – Vista en planta.

Tal y como se muestra en la figura 4. 9, la casa de máquinas se localizará sobre la margen derecha del canal, lugar donde se cuenta con facilidades de acceso ya que ahí existe un camino de terracería, además el sitio cuenta con espacio suficiente para futuras ampliaciones y se encuentra cerca al afluente en donde se entregará el agua turbinada, dicho lugar se muestra en las figuras 4. 10, 4. 11, 4. 12 y 4. 13.



Figura 4. 10.- Fotografía 1 del sitio para la ubicación de la casa de máquinas.



Figura 4. 11.- Fotografía 2 del sitio para la ubicación de la casa de máquinas.



Figura 4. 12.- Fotografía 3 del sitio para la ubicación de la casa de máquinas.



Figura 4. 13.- Fotografía 4 del sitio para la ubicación de la casa de máquinas.

Determinado el sitio donde se ubicará la casa de máquinas, se realizó el trazo de la tubería a presión mostrado en el plano MH – 09; consulte al autor para su visualización; en él pueden determinarse los accesorios hidráulicos y la longitud total. Para el diseño de la tubería se siguieron los pasos de la sección 3.5.3:

1.- El gasto, la longitud de la tubería y el cálculo de la carga hidráulica se muestra en la tabla 4. 5.

Tabla 4. 5.- Gasto, longitud y cálculo de carga hidráulica para diseño de tubería a presión.

Información necesaria para diseño de la tubería a presión								
Gasto	Q=	30	m <sup>3</sup> /s					
Longitud	L=	280.35	m					
Aplicando la ecuación 20 y sutituyendo los siguiente punto donde inicia el trazo de la tubería se obtiene:	s datos c	orrespondier	ntes al					
Elevación topográfica a la entrada del conducto	Z <sub>1</sub> =	46	m					
Elevación topográfica a la salida del conducto	Z <sub>2</sub> =	39.4	m					
Tirante de agua en la entrada del conducto	y <sub>1</sub> =	1.5	m					
Tirante de agua a la salida del conducto	y <sub>2</sub> =	0.6	m					
Elevación topográfica al inicio de la tubería con respecto al final de la misma	Z=	6.6	m					
Pantilla del canal	b=	5	m					
Talud	t=	1.5						
Área hidráulica	A=	10.875	m <sup>2</sup>					
Velocidad	V=	2.75862069	m/s					
Aceleración de la gravedad	g=	9.8	m/s <sup>2</sup>					
Presión	P=	1500	kg/m <sup>2</sup>					
Peso específico	γ=	1000	kg/m <sup>3</sup>					
Carga hidráulica al inicio de la tubería con respecto al final de la misma	H=	8.4882647	m					

2.- Seleccionaremos tubería de acero soldada por los beneficios que tiene en cuanto a durabilidad y resistencia mecánica. De la tabla 3. 5 mostrada

en la sección 3.5.3, para tubería de acero soldado, el coeficiente de rugosidad de Manning es:

### n = 0.012

3.- De la tabla 3. 6 contenida en la sección 3.5.3, para tuberías de acero se puede apreciar que la velocidad máxima de diseño es:

### $V_{max} = 5 \text{ m/s}$

En base al dato anterior se propone una velocidad de diseño de:

### Vdiseño = 4.5 m/s

Los pasos 4, 5, 6, 7, 8 y 9 del procedimiento de diseño de la tubería a presión se obtuvieron al sustituir la información mostrada en la tabla 4. 5 en las ecuaciones 3. 24, 3. 25, 3. 26, 3. 27, 3. 28, 3. 29, 3. 30 y 3. 31, además los cálculos correspondientes a la carga de trabajo de la turbina y la potencia real teórica se obtuvieron sustituyendo los resultados obtenidos en las ecuaciones 3. 36 y 3. 37; esto se realizó considerando diferentes velocidades de diseños, diferentes diámetros comerciales y diferente número de conductos con la finalidad de realizar comparaciones y seleccionar el diámetro más pertinente para nuestra minihidráulica. Los resultados se muestran en las tablas 4. 6, 4. 7 y 4. 8.

En base a los cálculos realizados en las tablas 4. 6, 4. 7 y 4. 8 se seleccionó la propuesta para la tubería a presión conformada por un conducto de acero soldado con un diámetro de 3.20 metros, esto debido a que la entrada al conducto estará sobre la plantilla del canal de 5 m de ancho, por lo que 3.20 metros es una medida adecuada, además los valores obtenidos de las pérdidas de energía correspondientes son aceptables en comparación con el resto y la potencia real teórica de 1.00 MW que se logra producir con dicho diámetro es un valor muy relevante para nuestro proyecto.

Tabla 4. 6.- Propuesta de diseño comparativa para cálculo de la tubería a presión (1 conducto).

				Propuesta	s de diseño pa	ara el	cálcı	lo de	la tub	ería a	presió	n (1 c	onducto)			
	Datos: Q= 30 m <sup>3</sup> /s							L=	280	m		n=	0.012			
No. de			Diámetro	Diámetro comercial	Velocidad Ф comercial	hf		Dor tı		rdida ncia (	s meno		accesorios	Pérdidas de energía	Carga H <sub>T</sub>	T Potencia P <sub>R</sub>
propuesta	(m/s)	(m <sup>2</sup> )	(m)	(m)	(m/s)	(m)					h <sub>t</sub> (m)		hacc (m)	totales	(m)	(MW)
1	4.50	6.67	2.91	3.00	4.24	1.07	2.40	0.01	0.05	2.00	0.01	2.96	2.72	3.80	3.70	0.80
2	4.00	7.50	3.09	3.10	3.97	0.90	2.40	0.01	0.05	2.00	0.01	2.96	2.39	3.29	4.21	0.91
3	3.80	7.89	3.17	3.20	3.73	0.76	2.40	0.01	0.05	2.00	0.01	2.96	2.10	2.87	4.63	1.00
4	3.50	8.57	3.30	3.30	3.51	0.64	2.40	0.01	0.05	2.00	0.01	2.96	1.86	2.51	4.99	1.08
5	3.00	10.00	3.57	3.50	3.12	0.47	2.40	0.01	0.05	2.00	0.00	2.96	1.47	1.94	5.56	1.20

Tabla 4. 7.- Propuesta de diseño comparativa para cálculo de la tubería a presión (2 conductos).

	Propuestas de diseño para el cálculo de la tubería a presión (2 conductos)															
	Datos: Q= 15 m <sup>3</sup> /s							L=	280	m		n=	0.012			
No. de	No. de V <sub>diseño</sub> Área Diámetro Diámetro Velocidad h										s meno			Pérdidas	Carga H <sub>⊤</sub>	Potencia P <sub>R</sub>
propuesta		_		comercial (m)	Φ comercial (m/s)	(m)				ncia (l	ht) h <sub>t</sub> (m)		hacc (m)	de energía totales	(m)	(MW)
				, ,	, ,			` ,	, ,		,	_	,			
1	4.50	3.33	2.06	2.10	4.33	1.79	2.40	0.01	0.05	2.00	0.01	2.96	2.83	4.63	2.87	0.31
2	4.00	3.75	2.19	2.20	3.95	1.40	2.40	0.01	0.05	2.00	0.01	2.96	2.35	3.76	3.74	0.40
3	3.80	3.95	2.24	2.30	3.61	1.10	2.40	0.01	0.05	2.00	0.01	2.96	1.97	3.08	4.42	0.48
4	3.50	4.29	2.34	2.40	3.32	0.88	2.40	0.01	0.05	2.00	0.01	2.96	1.66	2.54	4.96	0.53
5	3.00	5.00	2.52	2.50	3.06	0.71	2.40	0.01	0.05	2.00	0.00	2.96	1.41	2.12	5.38	0.58

Tabla 4. 8.- Propuesta de diseño comparativa para cálculo de la tubería a presión (3 conductos).

	Propuestas de diseño para el cálculo de la tubería a presión (3 conductos)															
	Datos: Q= 10 m <sup>3</sup> /s							L=	280	m		n=	0.012			
No. de	Vdisaño	Área	Diámetro	Diámetro	Velocidad	hf					s meno			Pérdidas	Carga H <sub>⊤</sub>	Potencia P <sub>R</sub>
propuesta		•		comercial (m)	Φ comercial (m/s)	(m)				ncia ( Ө (°)	ht) h <sub>t</sub> (m)		hacc (m)	de energía totales	(m)	(MW)
1	4.50	2.22	1.68	1.70	4.41	2.45	2.40	0.01	0.05	2.00	0.01	2.96	2.93	5.39	2.11	0.15
2	4.00	2.50	1.78	1.80	3.93	1.81	2.40	0.01	0.05	2.00	0.01	2.96	2.33	4.15	3.35	0.24
3	3.80	2.63	1.83	1.90	3.53	1.36	2.40	0.01	0.05	2.00	0.01	2.96	1.88	3.24	4.26	0.31
4	3.50	2.86	1.91	2.00	3.18	1.03	2.40	0.01	0.05	2.00	0.01	2.96	1.53	2.57	4.93	0.35
5	3.00	3.33	2.06	2.20	2.63	0.62	2.40	0.01	0.05	2.00	0.00	2.96	1.05	1.67	5.83	0.42

Una vez calculado el diámetro interior de la tubería a presión, se procedió a calcular el espesor de la misma, para ello es necesaria la información que se presenta en la tabla 4. 9.

Tabla 4. 9.- Datos para el cálculo del espesor de la tubería a presión.

Información necesaria para cálculo del es	spesor de la t	ubería a pre	sión
Material del conducto a presión	A	Acero soldad	0
Diámetro interior del tubo	D=	320	mm
Sobrespesor para corrosión	e <sub>s</sub> =	3	mm
Eficacia de la unión considerada	k <sub>f</sub> =	0.9	
Resistencia a la tracción del acero	σ <sub>f</sub> =	1400	KN/mm <sup>2</sup>
Presión hidrostática a la entrada del conducto	P=	10020	kg/m <sup>2</sup>
Presion filurostatica a la entrada del conducto	P=	0.00009825	KN/mm <sup>2</sup>

Sustituyendo los valores mostrados de la tabla 4. 9 en la ecuación 3. 33 se tiene que:

$$e = \frac{(0.00009825 \ ^{KN}/_{mm^2})*(320 \ mm)}{2*(1400 \ ^{KN}/_{mm^2})*(0.9)} + 3 \ mm = 3.00001 \ mm$$

Calculando, de igual forma con la recomendación de la Asociación Americana de Ingenieros Mecánicos (American Society of Mechanical Engineers (ASME)), se tiene que:

$$e = [2.5*(Diámetro\ del\ conducto\ en\ metros)] + 1.2\ mm$$
 
$$e = [2.5*(3.2)] + 1.2\ mm = 9.2\ mm$$

Por lo tanto con los resultados obtenidos, y con la finalidad de realizar un proyecto donde se garantice la seguridad y durabilidad del mismo, el espesor de la tubería de acero de 3.20 metros de diámetro deberá ser de al menos 9.2 mm, sin embargo se realizará el diseño tomando un espesor de 10 mm, el cual es más conservador.

Además tal y como se observa en la tabla 4. 6, ya se han calculado los valores de la carga de trabajo de la turbina y la potencia real teórica para un diámetro de 3.20 metros, los cuales se muestran a manera de resumen en la tabla 4. 10.

Tabla 4. 10.- Pérdidas de energía, carga de la turbina y potencia real teórica para una tubería a presión de 3.20 m de diámetro.

Resume	n de resultado	os para un D	= 3.20 m
Diámetro comercial (m)	Pérdidas de energía totales (m)	Carga de la turbina H <sub>T</sub> (m)	Potencia real teórica P <sub>R</sub> (MW)
3.20	2.87	4.63	1.00

Los resultados finales del diseño de la tubería a presión se plasmaron en los planos MH - 09 y MH - 10 y MH - 11, consulte al autor para su visualización; en los cuales se muestra el trazo, el perfil y la sección de la zanja donde se alojará

la tubería. Debe aclararse que el diseño de la zanja para la colocación de la tubería se realizó conforme a lo establecido en los manuales de diseño de la CONAGUA.

Además, como resultado del diseño de la tubería a presión se obtuvieron las secciones transversales a cada 10 metros, desde la estación 0 + 000 hasta la 0 + 280.35 del eje de la tubería, con ello se obtuvieron los volúmenes totales de corte, de plantilla, de relleno para acostillado y colchón de la tubería, además del volumen del relleno a volteo. Los resultados obtenidos del trazo de las secciones transversales se muestran en los planos MH – 12, MH – 13, MH – 14, MH – 15, MH – 16, MH – 17, MH – 18, MH – 19, MH – 20 y MH – 21; consulte al autor para su visualización.

Para una carga de trabajo de la turbina de 4.63 m, consultado la tabla 3. 10 correspondiente al rango de cargas para diferentes tipos de turbina se tiene que la turbina de reacción tipo Kaplan o Hélice son las más adecuadas para la minihidráulica, mismas que trabajan con cargas hidráulicas de entre 2 y 40 m.

De igual forma tomando como referencia una carga hidráulica de trabajo de la turbina de 4.63 m y un gasto de diseño de 30 m³/s, al consultar la gráfica mostrada en la figura 3. 12, correspondiente a un diagrama para la selección de turbinas hidráulicas a nivel de pequeñas centrales hidroeléctricas se tiene que la turbina tipo Kaplan es la más pertinente para la minihidráulica, por lo tanto la minihidráulica estará conformada por turbina(s) tipo Kaplan al haberse repetido este resultado mediante los dos métodos analizados.

En pequeñas centrales hidroeléctricas, las turbinas Kaplan pueden ser de eje vertical, inclinado u horizontal. Un tipo de turbina Kaplan de eje horizontal es la turbina Bulbo, en donde el generador está confinado en un bulbo y por sus paredes fluye el caudal. El término bulbo describe la forma de la carcasa que se coloca aguas arriba, ésta es a prueba de agua y contiene un generador situado en

un eje horizontal, como se mencionó anteriormente. En la figura 4.16 se muestran las partes de una turbina tipo Bulbo.

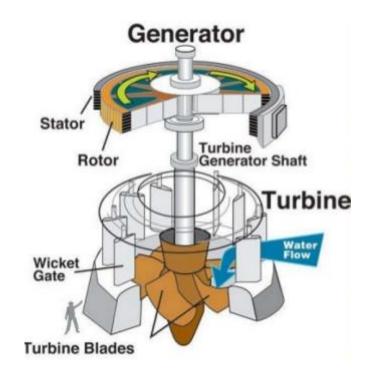


Figura 4. 14.- Turbina tipo Kaplan



Figura 4. 15.- Turbina tipo Bulbo.

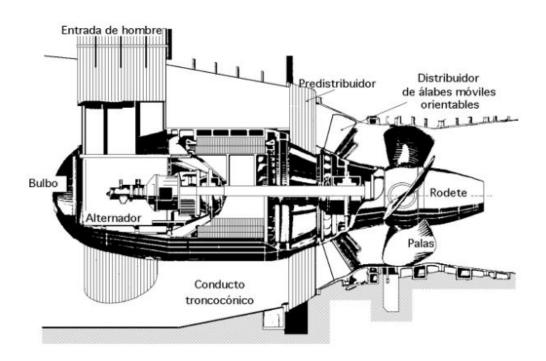


Figura 4. 16.- Partes de una turbina tipo Bulbo.

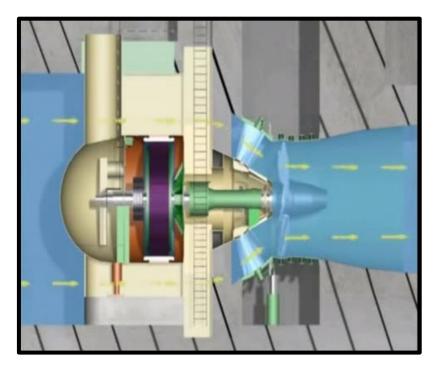


Figura 4. 17.- Interior de una turbina tipo Bulbo.

En una minihidráulica, el hidrogrupo de eje horizontal ofrece más facilidades para su montaje y mantenimiento, por tal motivo es el que se usará en este proyecto, por lo tanto para esta pequeña central hidroeléctrica se tendrá una turbina tipo Bulbo.

En base a todo lo anterior, se procedió a realizar una exhaustiva búsqueda en el mercado internacional de turbinas tipo Bulbo, como resultado, se logró contactar a la empresa China "Eternoo Machinery Co., Ltd.", la cual tiene a la venta una turbina tipo Bulbo que cuenta con los requisitos necesarios para formar parte del presente proyecto de intervención, las características o especificaciones de dicha máquina son las siguientes:

- Un diseño avanzado de una estructura de soporte pertinente para una excelente transmisión entre los ejes de la turbina.
- El generador se encuentra instalado herméticamente dentro de una carcasa de metal de tipo bombilla o tipo bulbo, el cual tiene su eje principal conectado directamente al corredor de la turbina. La conexión entre el generador y la turbina es horizontal.
- La turbina de tipo axial está diseñada para que el flujo de agua pase alrededor de la carcasa tipo bulbo a través del conducto a presión, mismo, que una vez que fluye a través de los alabes de la turbina, se dirija hacia fuera mediante un tubo de forma cónica.
- Debido a que el flujo de agua atraviesa la turbina de manera rectilínea, se tiene una alta eficiencia hidráulica, mucho mayor al de otro tipo de turbinas, como las Pelton ó Kaplan.
- Se destaca, que este tipo de turbina puede funcionar con altos flujos de agua, mayores de 50 m<sup>3</sup>/s.
- La máquina hidráulica es capaz de producir entre 200 KW y 100 MW, dependerá de las características hidráulicas del sitio. El precio del equipo está en función de este parámetro.

El equipo puede operar para un rango de cargas hidráulicas de entre
 2m y 25 m.

En la figura 4.18 se muestra la turbina tipo Bulbo mencionada.

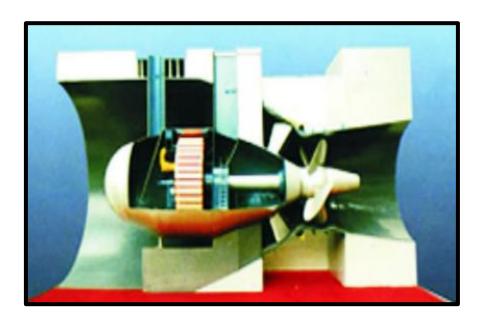


Figura 4. 18.- Turbina tipo Bulbo (Eternoo Machinery Co., Ltd).

Debido a que la energía eléctrica producida por la minihidráulica se vendería a la Comisión Federal de Electricidad (CFE), organismo nacional encargado de comercializar y distribuir la energía eléctrica en México, el número de hidrogrupos con los que contará esta pequeña central hidroeléctrica será solamente uno, y es que en el caso de que la minihidráulica llegará a necesitar mantenimiento o se necesite efectuar alguna maniobra de reparación, solamente dejaría de funcionar en ese lapso sin tener alguna consecuencia mayor, como la tendría si la planta abasteciera a una industria privada, donde la generación tendría que ser imprescindible. Es importante destacar que los trámites necesarios para vender la energía eléctrica producida por la minihidráulica a la CFE tendrían que investigarse, ya que ese detalle, no se encuentra dentro del alcance de este proyecto de intervención.

Una vez definida la turbina que se utilizará en el presente proyecto de generación de energía sustentable, se propone un área para la casa de máquinas de 190 m², superficie suficiente para la instalación de la turbina tipo Bulbo. Es importante aclarar, que el diseño geotécnico y estructural de la casa de máquinas no se contempla en el presente proyecto de intervención, por lo tanto, en el plano MH - 22, solo se muestran aspectos generales de la misma.

Finalmente, en lo que respecta al diseño de la minihidráulica, se tiene el conducto de retorno, el cual tiene la finalidad de transportar el flujo de agua de nuevo al cauce del canal San Lorenzo, debido a las facilidades de instalación y a las características de la turbina tipo Bulbo, se propone un conducto de retorno con las mismas características de la tubería a presión, es decir, una tubería de acero soldado de 3.20 metros de diámetro que deberá tener al menos 9.2 mm de espesor.

### 4.1.4.- Análisis de los resultados

La minihidráulica propuesta en el presente proyecto de intervención, según los cálculos realizados en la sección anterior, será capaz de generar una potencia de 1 MW aproximadamente, sin embargo, ¿qué representa esto?, ¿cuántas lámparas pueden funcionar con esa energía?, ¿la energía minihidráulica, es la mejor forma de generar esta cantidad de energía?, ¿qué cantidad de petróleo se necesita para producir esa cantidad de energía?, en respuesta a estas preguntas, se realizó, lo que a continuación se presenta.

De realizarse el proyecto de la minihidráulica, buscaría venderse la energía producida a la Comisión Federal de Electricidad (CFE), ya que son los encargados de comercializarla en México, por lo tanto, la electricidad generada se añadiría a una red eléctrica, por lo que no se abastecería el Campo El Diez directamente, realmente no podría determinarse que lugares son los que están consumiendo esa energía. Sin embargo, el comparar la energía generada por la minihidráulica con la

energía que se consume en un hogar promedio, por así llamarle, nos proporciona una información objetiva sobre lo que puede lograrse con este proyecto. Para realizar este análisis, se calculará la energía que se consume en una casa promedio de la ciudad de Culiacán y una casa promedio de la localidad de Campo El Diez.

El cálculo del consumo diario promedio de una casa promedio ubicada en Culiacán, Sinaloa se muestra en la tabla 4.11, mismo que se realizó siguiendo los pasos descritos en la sección 3.5.4.

Tabla 4. 11.- Consumo diario de energía eléctrica para una casa promedio ubicada en la ciudad de Culiacán, Sinaloa.

Equipo	Potencia (Watts)	Unidades	Horas al día	Energía consumida por unidad en KWh	Energía total consumida en KWh	Energía diaria total consumida en KWh
Foco ahorrador de 30 W	30	10	7.00	0.030	0.300	2.10
Pantalla LCD de 32"	140	1	6.00	0.140	0.140	0.84
Pantalla LCD de 27"	120	1	2.00	0.120	0.120	0.24
Equipo de sonido 200 W	200	1	1.00	0.200	0.200	0.20
Horno de microondas	1200	1	0.25	1.200	1.200	0.30
Celular	10	3	7.00	0.010	0.030	0.21
Refrigerador	350	1	24.00	0.350	0.350	8.40
Computadora	300	1	4.00	0.300	0.300	1.20
Aire acondicionado	1200	1	9.00	1.200	1.200	10.80
Abánico de pie mediano	150	2	4.00	0.150	0.300	1.20
Plancha	500	1	0.33	0.500	0.500	0.17
Lavadora	400	1	0.80	0.400	0.400	0.32
·				Total	5.04	25.98

También, se calculó el consumo promedio diario de una casa promedio ubicada en la localidad del Campo El Diez en Culiacán, Sinaloa, el resultado se muestra en la tabla 4.12.

Tabla 4. 12.- Consumo diario de energía eléctrica para una casa promedio ubicada en el Campo El Diez, en Culiacán, Sinaloa.

Equipo	Potencia (Watts)	Unidades	Horas al día	Energía consumida por unidad en KWh	Energía total consumida en KWh	Energía diaria total consumida en KWh
Foco incandescente 75 W	75	5	5.00	0.075	0.375	1.88
Foco incandescente 60 W	60	2	2.00	0.060	0.120	0.24
Televisión de 21"	120	1	6.00	0.120	0.120	0.72
Equipo de sonido 200 W	200	1	0.50	0.200	0.200	0.10
Horno de microondas	1200	1	0.16	1.200	1.200	0.19
Celular	10	1	7.00	0.010	0.010	0.07
Refrigerador	350	1	24.00	0.350	0.350	8.40
Computadora	300	1	3.00	0.300	0.300	0.90
Aire acondicionado	1200	1	8.00	1.200	1.200	9.60
Plancha	1400	1	1.00	1.400	1.400	1.40
Lavadora	400	1	0.80	0.400	0.400	0.32
				Total	5.68	23.82

De una manera similar, se determinó la potencia generada en KWh por la minihidráulica, los resultados se muestran en la tabla 4.13.

Tabla 4. 13.- Energía generada en KWh por la minihidráulica.

Central hidroeléctrica	Potencia generada (Watts)	Unidades	Horas al día	Energía por unidad en KWh	Energía total generada en KWh	Energía diaria total generada en KWh
Minihidráulica Campo El Diez	1000000	1	24.00	1000.000	1000.000	24000.00
				Total	1000.00	24000.00

En base a los resultados obtenidos en las tablas 4.11, 4.12 y 4.13, podemos realizar la siguiente comparación, en una casa promedio ubicada en la ciudad de Culiacán, Sinaloa, se tiene una energía diaria total consumida de 25.98 KWh, mientras que la minihidráulica genera una energía diaria de 24000 KWh, por lo tanto, dividiendo la energía diaria generada de la minihidráulica entre la energía

diría total consumida de una casa promedio de la ciudad de Culiacán, se tiene que la minihidráulica sería capaz de abastecer a 924 casas diariamente de la ciudad de Culiacán aproximadamente.

De igual forma, para una casa promedio ubicada en la localidad del Campo El Diez, en Culiacán, Sinaloa, se tiene una energía diaria total consumida de 23.82 KWh, mientras que la minihidráulica genera una energía diaria de 24000 KWh, por lo tanto, dividiendo la energía diaria generada de la minihidráulica entre la energía diría total consumida de una casa promedio de la localidad del Campo El Diez, se tiene que la minihidráulica sería capaz de abastecer a 1008 casas diariamente de la localidad del Campo El Diez aproximadamente.

Ahora, procederemos a responder a la siguiente pregunta, ¿cuántos barriles de petróleo se necesitan para producir la misma energía que produce la minihidráulica?, antes de dar respuesta a la cuestión planteada, debemos definir los siguientes conceptos:

- Barril equivalente de petróleo (bep/boe).- Unidad de energía equivalente a 42 galones estadounidenses o a 158.987 litros. Es el volumen de gas (u otros energéticos) expresado en barriles de petróleo crudo a 60°F, y que equivalen a la misma cantidad de energía (equivalencia energética) obtenida del petróleo crudo. Este término es utilizado frecuentemente para comparar el gas natural en unidades de volumen de petróleo crudo para proveer una medida común para diferentes calidades energéticas de gas.
- Tonelada equivalente de petróleo (tep/toe).- Se define como la cantidad de energía que se libera al quemar una tonelada de petróleo. Es equivalente a 40.2 Giga-Joules (GJ) aproximadamente.

Una vez definidos estos conceptos, puede establecerse para la minihidráulica, según información proporcionada por la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) en su tabla de conversión de unidades

energéticas, la equivalencia entre MW y bep, y entre MW y tep. La tabla se muestra a continuación:

Tabla 4. 14.- Tabla de conversiones para unidades energéticas.

				Conversion	table for en	ergy units				
	bep boe	tep toe	tec tce	T cal	TJ	10 <sup>3</sup> BTU	MWh	kg GLP kg LPG	m <sup>3</sup> Gas Nat. m <sup>3</sup> Nat. Gas	
bep / boe	1	0.13873	0.1982593	0.00139	0.00581	5524.86	1.61394	131.0616	167.2073	5917.1598
tep / toe	7.205649	1	1.4285868	0.01	0.04184	39810.22	11.62952	944.3839	1204.8371	42636.9763
tec / tce	5.0439	0.6999925	1	0.007	0.029288	27866.85	8.14057	661.0616	843.3769	29845.5621
Tcal	720.5649	100	142.85868	1	4.184	3981022	1162.952	94438.388	120483.714	4263697.6
TJ	172.21914	23.900574	34.144044	0.2390057	1	951487	277.95214	22571.316	28796.2988	1019048.19
10 <sup>3</sup> BTU	0.00018	2.51 E-05	3.59 E-05	2.51 E-07	1.05 E-06	1	0.00029	0.02372	0.030265	1.07101
MWh	0.6196	0.08599	0.1228	0.00086	0.0036	3423.2	1	81.20577	103.6016	3666.2722
kg GLP kg LPG	0.00763	0.00106	0.001513	1.06 E-05	4.43 E-05	42.154696	0.0123144	1	1.2758	45.1479
m³ Gas Nat. m³ Nat. Gas	0.00598	0.00083	0.001186	8.30 E-06	3.47 E-05	33.041989	0.0096524	0.783827	1	35.3882
pc Gas Nat. cf Nat. Gas	0.00017	2.35 E-05	3.35 E-05	2.35 E-07	9.81 E-07	0.9337017	0.0002728	0.0221494	0.028258	1

Fuente: OLADE, 2012.

Como puede observarse en la tabla 4.14, 1 MWh equivale a 0.6196 bep, por lo tanto es necesario quemar 98.508 litros de petróleo cada hora, 2364.192 litros de petróleo cada día, 70925.76 litros de petróleo cada mes ó 567406.08 litros de petróleo en un periodo de 8 meses, tiempo aproximado de funcionamiento anual de la minihidráulica, para liberar la energía suficiente para producir la misma energía que la minihidráulica.

De igual forma, en la tabla 4.14, puede apreciarse que 1 MWh equivale a 0.08599 toe, por lo tanto es necesario quemar 85.99 kg de petróleo cada hora, 2063.76 kg de petróleo cada día, 61912.8 kg de petróleo cada mes ó 495302.4 kg de petróleo en un periodo de 8 meses, tiempo aproximado de funcionamiento

anual de la minihidráulica, para liberar la energía suficiente para producir la misma energía que la pequeña central hidroeléctrica.

Ahora, retomando la pregunta de ¿la energía minihidráulica, es la mejor forma de generar esta cantidad de energía?, basándose en el análisis realizado al momento, no puede asegurarse que sí lo sea, sin embargo, a lo largo de este proyecto de intervención se ha mencionado que en el mundo existe una urgencia por producir energía a través de recursos renovables debido a la alta contaminación que hoy sufrimos, por lo que la minihidráulica diseñada en este proyecto de intervención resulta ser una manera sustentable y pertinente para hacerlo, por encima de cualquier tipo de energía producida mediante recursos no renovables, como las termoeléctricas y plantas nucleares.

Ahora bien, en comparación con otras energías limpias, como la solar o la eólica, habría que realizarse un análisis detallado para determinar si una es mejor que la otra, sin embargo, recordemos que la presente minihidráulica aprovecha el agua de un canal principal de riego, que año con año transporta gran cantidad de agua, por lo tanto, se requiere aprovechar mejor un recurso tan valioso, no solo en el Campo El Diez, lugar de emplazamiento de la minihidráulica del presente proyecto, sino también en todos los lugares potenciales identificados que se muestran en la figura 1.5.

### 4.1.5.- Procedimiento constructivo

El procedimiento de construcción de la minihidráulica propuesta para El Campo El Diez, se divide en las siguientes etapas, tal y como se mencionó anteriormente en la sección 3.5.5:

- Etapa 1 del procedimiento constructivo Canal de desvío.
- Etapa 2 del procedimiento constructivo Obra de represamiento y obra de toma.

- Etapa 3 del procedimiento constructivo Relleno del canal de desvío.
- Etapa 4 del procedimiento constructivo Tubería a presión.
- Etapa 5 del procedimiento constructivo Casa de máquinas.
- Etapa 6 del procedimiento constructivo Tubería de retorno.

A continuación se describe paso a paso cada una de ellas, de tal manera que de dicha descripción se obtengan los conceptos de obra para la elaboración del estimado de costos.

### 4.1.5.1.- Etapa 1 del procedimiento constructivo - Canal de desvío

La obra de toma y la obra de represamiento de la minihidráulica propuesta en el presente documento están situadas sobre la plantilla del canal San Lorenzo, tal y como se aprecia en el plano MH – 03, por lo tanto es necesario el diseño y construcción de un canal de desvío con el objetivo de apartar el flujo proveniente aguas arriba de dicha zona, de tal forma que se logre que dicha región esté seca, y así llevar a cabo los trabajos para la construcción de las mismas.

El canal San Lorenzo, canal principal de riego del distrito No. 10, todo el año conduce cierto caudal, durante el periodo del 15 de Septiembre al 15 de Mayo del año siguiente aproximadamente, conduce hasta 37 m³/s, el tiempo restante, del 15 de Mayo al 15 de Septiembre, tiempo aproximadamente de 4 meses, no conduce ni la quinta parte de esos 37 m³/s, es decir ni 8 m³/s, información que se obtuvo directamente del jefe de operaciones del distrito de riego No. 10 de la Cuenca Pacífico Norte CONAGUA, además de haberse comprobado durante los trabajos y visitas de campo que se realizaron en el canal. Por lo tanto, la construcción del canal de desvío deberá llevarse a cabo durante ese periodo, tomando en cuenta un gasto de 10 m³/s, dato un poco conservador.

Considerando lo anterior, se siguieron los pasos que se detallan en la sección 3.5.5, el desarrollo de los mismos se muestra a continuación:

1.- En la tabla 4. 15 se muestran las dimensiones propuestas (plantilla, tirante, talud y pendiente), de un canal de sección transversal trapecial excavado en tierra.

Tabla 4. 15.- Propuesta de dimensiones para diseño del canal de desvío.

Dimensiones	Magnitud
Plantilla (b) =	5 metros
Tirante (y) =	1.4 metros
Talud (t) =	1.5
Pendiente (So) =	0.001

2.- Al sustituir los datos contenidos en la tabla 4. 15 en la ecuación 3. 15, se obtuvo el área hidráulica.

$$A = (5 m + 1.5 * (1.4 m)) * (1.4 m) = 9.94 m^{2}$$

De igual forma, sustituyendo los datos contenidos en la tabla 4. 15, en las ecuaciones 3. 16 y 3. 17 se obtuvieron el perímetro mojado y el radio hidráulico.

$$P = (5 m) + 2 * (1.4 m) * \sqrt{1 + (1.5)^2} = 10.0478 m$$

$$R = \frac{A}{P} = \frac{9.94 m^2}{10.0478 m} = 0.9893 m$$

3.- De la tabla A. 1. 5 contenida en el anexo 1, para canales de tierra, sinuosos y flujos de poca velocidad sin vegetación, se obtuvo un coeficiente "n" de rugosidad de Manning máximo de:

$$n = 0.030$$

4.- Sustituyendo los resultados obtenidos en los pasos 1, 2 y 3 en la ecuación 3. 6, se obtuvo el gasto del canal de desvío:

$$Q = \frac{9.94 \, m^2}{0.030} * 0.9893^{2/3} * 0.001^{1/2} = 10.4026 \, m^3/s$$

5.- Comparando el resultado del gasto obtenido para el canal de desvío con el gasto a desviar de 10 m<sup>3</sup>/s, se tiene que:

$$Q_{canal \ de \ desvio} = 10.4026 \frac{m^3}{s} > Q_{a \ desviar} = 10 \ m^3/s$$

6.- De la figura 3. 13, para un canal excavado en tierra que transporta 10 m<sup>3</sup>/s, se obtiene un bordo libre de:

$$bordo\ libre\ (b.l.) = 0.20\ m$$

7.- Posteriormente se procedió a realizar el trazo del canal, dejando una distancia de más de 18 metros entre el eje de la tubería a presión y la corona más próxima del canal de desvío, teniendo como resultado un área suficientemente grande para la realización de los trabajos de construcción que ahí se requieran. Al hacer esto se obtuvo un trazo para el canal de desvío donde existen tres curvas, la información referente a ellas se muestra en la tabla 4. 16.

Para cada una de las curvas del canal de desvío, se revisa la siguiente condición, tal y como se menciona en la sección 3.5.5.

$$\frac{r_m}{t'} > 4Fr_1^2$$

Dónde:

### $r_m = Radio de la curva$

 $Fr_1 = N$ úmero de Froude antes de la curva

t' = Ancho de la superficie libre antes de la curva

<b>-</b> 4	40						,
Iahla /I	16 -	Información	40 C	HAD SCALL	canal	വ വ	261/10
i abia 4.	10	IIIIOIIIIacioii	uc c	ui vas uci	Cariar	uc u	<b>5371U.</b>

Curva	Radio (m)	Estación topográfica donde inicia la curva	Estación topográfica donde termina la curva
C1	34.5	0 + 024.60	0 + 076.77
C2	25.25	0 + 076.77	0 + 097.18
C3	25.25	0 + 105.07	0 + 124.00

Antes de sustituir la información correspondiente de cada curva, se calcula el ancho de la superficie libre, para ello sustituiremos los datos en la ecuación 3. 20.

$$t' = (2 * (1.5) * (1.4 m)) + 5 m = 9.2 m$$

Sustituyendo el área hidráulica y el gasto obtenido para el canal de desvío en la ecuación 3. 27, tenemos que:

$$V = \frac{10.4026 \ m^3/s}{9.94 \ m^2} = 1.0465 \ m/s$$

También, es necesario calcular la profundidad hidráulica, para ello es necesario sustituir el área hidráulica y el ancho de la superficie libre del agua en la ecuación 3. 42:

$$D = \frac{9.94 \ m^2}{9.2 \ m} = 1.080 \ m$$

Ahora bien, sustituyendo la información obtenida en los pasos anteriores en la ecuación 3. 41, se tiene que:

$$Fr_1 = \frac{1.0465 \, m/s}{\sqrt{\left(9.8 \frac{m}{s^2}\right) * (1.080 \, m)}} = 0.3215$$

Con el número de Froude calculado, se procederá a revisar la condición mencionada para cada curva del canal de desvío.

Para la curva C1, se tiene que:

$$\frac{34.50 \, m}{9.2 \, m} > 4(0.3215)^2$$

Por lo tanto, el radio de 35.40 m para la curva C1 es aceptable.

De igual forma, revisando la condición para las curvas C2 y C3, las cuales presentan el mismo radio, se tiene que:

$$\frac{25.25 \, m}{9.2 \, m} > 4(0.3215)^2$$

Por lo tanto, el radio de 25.25 m para las curvas C2 y C3 es aceptable.

Hasta este punto del diseño del canal de desvío, se tiene una sección transversal como la que se muestra en la figura 4. 19.

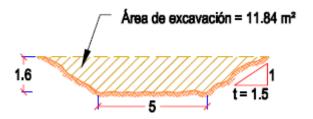


Figura 4. 19.- Sección transversal del canal de desvío - primera propuesta.

De acuerdo a la figura 4. 19, se tiene una distancia de 1.6 metros medida desde la superficie del terreno natural de las márgenes del canal San Lorenzo hasta la plantilla del canal de desvío, la cual contempla un bordo libre de 0.20 metros, sin embargo, al revisar el levantamiento topográfico, se observa que la diferencia entre los niveles de las márgenes izquierda y derecha del canal San Lorenzo, y su plantilla, son de aproximadamente 4 metros, por lo que si el canal de desvío se construye con la sección mostrada en la figura 4. 19, habría que esperar a que el tirante de agua alcanzará una profundidad de 2.5 metros en el cauce del canal San Lorenzo y apenas así lograr entrar al canal de desvío, cosa, que a nuestro parecer no es conveniente; por lo tanto, con la finalidad de lograr que el agua proveniente del canal San Lorenzo ingrese lo más rápidamente posible en el canal de desvío, se propone aumentar la sección transversal de tipo trapecial a la que se muestra en la figura 4. 20.

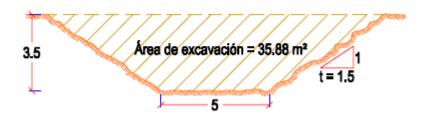


Figura 4. 20.- Sección transversal definitiva del canal de desvío.

8.- Los radios para las curvas del canal de desvío, son aceptables según se revisó en el paso anterior, sin embargo, con la finalidad de garantizar la

seguridad de esta obra temporal, se colocará una sobreelevación de 0.50 m en las mismas para protección del canal, utilizando el material producto de excavación.

- 9.- Para obstruir el paso del agua proveniente del canal San Lorenzo y enviarlo hacia el canal de desvío, se propone la construcción de un bordo de contención conformado por un relleno compactado al 90% de la prueba PROCTOR con material de banco en capas de 0.20 m de espesor, el bordo tendrá una altura de 5 metros y se extenderá a todo lo ancho del canal San Lorenzo, además tendrá un talud de 1.5:1 del lado donde recibirá el agua del canal San Lorenzo y un talud de 1:1 del otro lado. Su corona será de 3.5 metros de ancho, permitiendo de esta forma que sirva también como un medio transporte vehicular, peatonal o de maquinaria de un lado a otro del canal San Lorenzo.
- 10.- Como resultado del diseño del canal de desvío, se elaboraron los planos MH 23 y MH 24; consulte al autor para su visualización; en el cual se muestra el trazo del canal de desvío, el área de excavación y la información de las curvas del canal, el detalle del bordo de contención, un esquema de la sobreelevación en las curvas del canal, entre otros detalles constructivos.

Definidos el trazo, la sección transversal, los radios de curvatura, el bordo de contención y la sobreelevación que debe colocarse en el borde de las curvas del canal San Lorenzo, a continuación se describe paso a paso el procedimiento de construcción del mismo.

1.- Se identificarán los árboles y las zonas de vegetación que no se encuentren dentro del trazo del canal de desvío y se establecerán las medidas de prevención necesarias para no dañarlos.

- 2.- Posteriormente se comenzará con los trabajos de limpieza y desmonte del terreno, el cual consiste en el retiro de una capa de entre 10 y 15 cm de toda la vegetación existente dentro del área de interés, incluyendo árboles, la remoción de estos últimos se llevará a cabo excavando alrededor de los mismos a una profundidad que permita su extracción. Este trabajo debido a la configuración del terreno y las facilidades de acceso se realizará por medios mecánicos. El material producto del desmonte deberá colocarse en el área de proyecto, al costado derecho de la margen derecha del canal San Lorenzo, con la finalidad de evitar que impida el paso vehicular y el desarrollo de actividades posteriores.
- 3.- Se realizará el trazo del canal de desvío, tomando como referencia algunos de los puntos marcados durante la realización del levantamiento topográfico. Primeramente se marcaran el punto inicial, puntos de inicio y término de cada curva y punto final del eje del canal de desvío de acuerdo a los planos de proyecto, posteriormente, de igual forma se realizará el trazo de los límites del canal de desvío.
- 4.- Procederá a realizarse la excavación del canal de desvío, tarea que se ejecutará a través de medios mecánicos, para ello se dividió el área de excavación en tres partes, las cuales se muestran en el plano MH 23, mismas que se ejecutarán en el orden siguiente y a las que se nombró como:
  - 1era. etapa de excavación del canal de desvío.
  - 2da. etapa de excavación del canal de desvío.
  - 3era. etapa de excavación del canal de desvío.

La 1era. etapa de excavación comienza 6 metros antes de la descarga del canal de desvió en el canal San Lorenzo, es decir en la estación 0 + 118.00 marcada en el eje del canal hasta la estación 0 + 008.00, es decir, 8 metros después del inicio del mismo. La 2da. etapa de excavación comprende desde la descarga del canal de desvío en la estación 0 + 124.00 hasta la estación 0 + 118.00 ubicada 6 metros antes. Por último, la 3era. etapa de excavación abarca

desde la estación 0 + 0.008.00 hasta el punto de inicio del canal de desvío, es decir, la estación 0 + 000.00.

El sentido en el que deberá realizarse la excavación es hacia aguas arriba del canal de desvío, punto que se indica en el plano MH – 23, además de incluir todo lo referente a las etapas de la excavación.

Es importante aclarar, que una vez finalizada la excavación no deberán realizarse trabajos de afine de taludes, debido a que el canal de desvío representa una obra temporal, además el material producto de excavación, mismo que se utilizará para relleno del canal de desvío en etapas posteriores, deberá colocarse al costado derecho de la margen derecha del canal San Lorenzo, a un lado de los acopios de desmonte de los pasos anteriores,

5.- Una vez que el flujo proveniente del canal San Lorenzo comience a ingresar al canal de desvío, procederá a realizarse la conformación del bordo de contención, para ello deberá contarse con material de banco y comenzará a colocarse por medios mecánicos en capas de 0.20 m sobre la plantilla del canal San Lorenzo en la ubicación que marca el plano MH – 23, mismas que deberán compactarse hasta alcanzar el 90% de la prueba PROCTOR. Esta actividad se realizará hasta que el bordo de contención alcance una altura de 5 metros conforme a lo que se muestra en el detalle PC – 02 del plano mencionado.

Estos cinco pasos integran el procedimiento de construcción del canal de desvío, por lo que puede continuarse con la siguiente etapa.

# 4.1.5.2.- Etapa 2 del procedimiento constructivo – Obra de represamiento y obra de toma

Esta etapa del proceso de ejecución de la obra deberá llevarse conforme a lo que se establece en los siguientes pasos:

- 1.- Preliminarmente, una vez que el canal de desvío se encuentra en funcionamiento y que el área de interés se encuentre seca, se conformará un relleno con material de banco que comenzará a colocarse por medios mecánicos en capas de 0.20 m sobre la plantilla del canal San Lorenzo en la ubicación que marca el plano MH 25; consulte al autor para su visualización; mismas que deberán compactarse hasta alcanzar el 90% de la prueba PROCTOR. Esta actividad se realizará hasta que el relleno alcance los niveles del terreno natural de las márgenes del canal, aproximadamente 5 metros, la sección transversal que tendrá dicho trabajo preliminar se muestra en el detalle PC 03 del plano mencionado. Este relleno tendrá el objetivo de permitir el paso de la maquinaria desde la margen izquierda del canal a la derecha, además de permitir que se realicen trabajos de excavación, asimismo proporcionará una plataforma donde mediante una piloteadora, podrán ejecutarse los trabajos de cimentación para la obra de represamiento.
- 2.- El relleno del paso 1, tal y como se mencionó, permitirá el paso de maquinaria, vehículos y peatones de un lado a otro del canal San Lorenzo, esto hará posible que comiencen los trabajos de excavación para la colocación de la tubería a presión desde la estación 0 + 010.00 hasta la 0 + 030.00 de la misma. Es importante que la excavación, la cual se realizará a través de medios mecánicos, se efectúe de acuerdo a las secciones transversales que se muestran en los planos MH 09. MH 10, MH 11, MH 12 y MH 13.
- 3.- Finalizada la excavación del paso 2, se comenzarán los trabajos relacionados con la construcción del registro de sección circular de 3.9 m de diámetro para la colocación de una válvula de control, la cual permitirá manipular el flujo que conduzca la tubería a presión. Una vez colocada la válvula se procederá a colocar la tubería a presión desde la estación 0 + 010.00 hasta la 0 + 030.00 de la misma, siguiendo el detalle nombrado sección transversal tipo de zanja para alojamiento de tubería a presión que se encuentra en el plano MH 11. Es importante mencionar, que una vez colocada la tubería, iniciarán los trabajos

correspondientes del relleno acostillado y al relleno a volteo de la zanja donde se aloja la tubería a presión colocada, a la par de esto, el registro de sección circular seguirá construyéndose, de tal forma, que al momento de que se finalice con los trabajos de relleno de la zanja, también finalice el registro circular. Los trabajos de relleno mencionados de la tubería a presión no deberán cubrir por completo la tubería en sus extremos debido a que posteriormente se realizará una unión en cada uno de ellos.

- 4.- Se procederá a realizar el trazo de las pilas que conforman la cimentación de la obra de represamiento sobre el relleno hecho en el paso 1, para efectuar esta actividad se tomarán como referencia algunos de los puntos marcados durante la realización del levantamiento topográfico.
- 5.- Una vez efectuado el trazo, se continuará con la habilitación del acero de refuerzo de las pilas de cimentación, mismas que deberán armarse en obra mientras se ejecutan los trabajos previos. El habilitado del acero de refuerzo se realizará mediante medios mecánicos con ayuda de una grúa. Colocado el acero de refuerzo, deberá proseguirse con la colocación del concreto en la cimentación, la cual se ejecutará hasta una profundidad de 1 metro a partir del nivel de plantilla del canal San Lorenzo, esto debido a que posteriormente se realizará el colado integral de la parte faltante de las pilas con los demás elementos de la obra de represamiento para lograr una mayor rigidez.
- 6.- Se llevará a cabo el retiro del relleno a través de medios mecánicos, una vez finalizado, para acceder a la zona de la obra de represamiento y de la obra de toma se utilizará el bordo de contención construido en la etapa 1 del procedimiento de construcción.
- 7.- Este paso del procedimiento de construcción consiste en la demolición de la plantilla y talud existente del canal San Lorenzo en donde se ubicará la obra de toma y la obra de represamiento. El área por demoler se muestra en el plano MH 26; consulte al autor para su visualización.

- 8.- Concluida la demolición, se efectuará la excavación de la estructura donde se ubicará la rejilla de la obra de toma de acuerdo al plano MH 10, de igual forma se realizará la excavación donde se localizarán los muros de las pilas separadoras y las transiciones de la obra de represamiento.
- 9.- Colocación de la tubería a presión, a partir de la estación 0 + 000.00 hasta la 0 + 010.00 de la misma, siguiendo el detalle nombrado sección transversal tipo de zanja para alojamiento de tubería a presión que se encuentra en el plano MH 11.
- 10.- Este paso consiste en la construcción de la losa y muros de concreto que conforman la estructura donde se ubicará la rejilla de fondo e iniciará la tubería a presión, al realizar esta parte de la obra, deberá colocarse el contramarco de la rejilla con la finalidad de ahogarlo en el concreto, además deberá realizarse la unión entre la estructura y la tubería a presión.
- 11.- Posteriormente, en las zonas de la plantilla del canal, donde a causa de la demolición efectuada y de los demás trabajos realizados se haya deformado el suelo, se acomodará un relleno con material de banco en capas de 0.20 m, que deberá compactarse hasta alcanzar el 90 % de la prueba PROCTOR, el cual se colocará hasta el nivel donde posteriormente se repondrá la losa de concreto que conformará la nueva plantilla del canal. El área por rellenar se muestra en el plano MH 26.
- 12.- Se procederá a finalizar el colado de la cimentación de la obra de represamiento, es decir, los 2.5 metros faltantes de las pilas así como los cimientos de los muros separadores.
- 13.- Una vez, finalizada la cimentación de los muros separadores de las compuertas de la obra de represamiento, se efectuarán los trabajos correspondientes a la construcción de los muros.

- 14.- Se realizará la reposición de la losa de concreto que conforma la plantilla del canal y de los taludes del mismo que fueron demolidos en los pasos anteriores del procedimiento.
- 15.- Terminado el colado de la plantilla del canal, se continuará con la instalación de las compuertas radiales parcialmente armadas en el taller y finalizadas en el sitio de la obra.
- 16.- Colocadas las compuertas radiales en los muros separadores, se realizará la construcción de la losa de maniobras.
- 17.- Se llevarán a cabo los trabajos correspondientes a los acabados de los elementos que conforman la obra de represamiento y la obra de toma, así como los detalles faltantes de estas partes de la minihidráulica.

## 4.1.5.3.- Etapa 3 del procedimiento constructivo – Relleno del canal de desvío

Los siguientes pasos, describen aquello que debe llevarse a cabo para el relleno del canal de desvío.

- 1.- Una vez que la válvula de control, instalada en la parte colocada de la tubería a presión en la etapa 2 del procedimiento de construcción funcione correctamente, procederá a retirarse el bordo de contención, el cual funcionaba como tapón y como estructura de desvío del agua proveniente de aguas arriba del canal San Lorenzo. El retiro del bordo se realizará a través de medios mecánicos, y se transportará fuera de la obra. Para la realización de este trabajo nos ayudaremos de una retroexcavadora de brazo largo y dos o tres camiones de volteo.
- 2.- Procederá a realizarse la colocación de un relleno a volteo del canal de desvío, con el material producto de la excavación del mismo, esta actividad deberá ejecutarse en el sentido contrario al que fue excavado, es decir, iniciará a partir de

la estación 0 + 000.00 hasta la 0 + 124.00. El área comprendida entre la estación 0 + 110.00 y la 0 + 120.00 no deberá rellenarse, ya que por ese sitio cruzará la tubería a presión, misma que se colocará en la etapa siguiente del procedimiento de construcción.

3.- Por último, una vez que se terminaron los trabajos de relleno, deberá reponerse el talud del canal San Lorenzo demolido para la conformación de la entrada y la descarga del canal de desvío.

### 4.1.5.4.- Etapa 4 del procedimiento constructivo – Tubería a presión

Antes, de describir detalladamente como debe realizarse esta etapa del procedimiento constructivo, será necesario fijar las medidas o recomendaciones de seguridad que deberán seguirse al momento de la recepción y la descarga de la tubería en obra, ya que el diámetro de la misma es muy grande, razón por la cual debe tenerse mucha precaución. Las recomendaciones, mismas que establecen los manuales de diseño e instalación de tuberías de la CONAGUA, son las siguientes:

- Deberá revisarse cuidadosamente que el tramo de tubo no este agrietado o roto antes de ser descargado, debido a que durante el transporte pueda haberse dañado, esta revisión se hará de la parte del tubo que puede apreciarse cuando aún está en el tráiler.
- Sólo operadores de equipo autorizados deberán descargar el tráiler.
- El personal encargado de realizar la descarga deberá vestir casco de seguridad, zapatos, guantes y protección de ojos, aprobados.
- El camión y el tráiler deberán estacionarse en tierra nivelada antes de empezar la descarga.
- Deberá mantenerse a todas las personas no autorizadas fuera del área cuando el chofer libere los amarres del tráiler durante la descarga.

- No deberá liberarse el fleje alrededor del marco de madera hasta que las tarimas o amarres se han colocado en el suelo nivelado y no se moverán otra vez como una unidad.
- La descarga del material deberá realizarse con máquina de tubos con uso de una pinza especial, tal y como se muestra en la figuras 4.21, 4.22 y 4.23.



Figura 4. 21.- Máquina con pinza especial para tubos - Fotografía 1.



Figura 4. 22.- Máquina con pinza especial para tubos - Fotografía 2.

 En la maniobra de carga y descarga de los tubos se deberá emplear equipo adecuado, para evitar el contacto directo entre las superficies de los tubos y partes metálicas del equipo. Deben utilizarse correas de nylon, lonas, bandas y horquillas acolchonadas, así como patinas diseñadas para prevenir daños al recubrimiento anticorrosivo. Las cadenas y cables deberán estar forrados con materiales apropiados, a fin de evitar los deterioros mencionados. Mientras los tubos se encuentren suspendidos en la maniobra de carga y descarga, se inspeccionará que no existan daños en la parte inferior de los mismos.



Figura 4. 23.- Máquina con pinza especial para tubos - Fotografía 3.

- Es de suma importancia conocer las habilidades y capacidades de carga de su equipo de levantamiento. Nunca deberán excederse.
- Por ningún motivo, ni un trabajador deberá parase o caminar sobre los tubos durante la maniobra de descarga.
- Si la descarga se realiza en puntos múltiples, deberán asegurarse las tarimas entre puntos de descarga. Siempre habrá que descargar primero las tarimas.
- No deberán amarrarse cadenas o cuerdas al tubo, ya que éstas podrían dañarlo.

- No empujarán las tarimas fuera del tráiler, ni se permitirá que el tubo se deslice al suelo.
- Únicamente se usarán astas recomendadas de descarga para levantar el tubo. El uso de astas no recomendadas puede provocar prácticas no seguras y el daño de la tubería.

Además de las recomendaciones anteriores, deberá tomarse en cuenta la siguiente advertencia: la caída o el tubo rodando podrá causar lesiones personales severas o muerte. A pesar de recomendaciones mencionadas, será responsabilidad del consignatario o agente del consignatario que planee los procedimientos de descarga y manejo.

También, al igual que se fijaron las recomendaciones de la recepción y descarga de la tubería en obra, dadas las consecuencias que se pueden presentar durante el proceso de instalación de una tubería deben adoptarse medidas preventivas, las cuales pueden resumirse en:

- El personal que trabajará en el interior de las zanjas deberá conocer los riesgos a los que puede estar sometido.
- Para acceder o salir de una zanja deberán utilizarse escaleras de mano, ancladas en el borde superior de la zanja y apoyadas sobre una superficie sólida de reparto de cargas. Para pasar por encima de una zanja se deberán instalar pasarelas adecuadas. Nunca deberá pasarse sobre los elementos del apuntalamiento, en caso de que los haya.
- Deberán prohibirse los acopios (tierras, materiales, etc.) a una distancia menor a 0,50 m, como regla, del borde de la zanja.
- Cuando la profundidad de la zanja sea igual o superior a los 2 m se deberán protegerse los bordes mediante una barandilla situada a una distancia mínima de 2 m.

- Si la profundidad de la excavación es menor a 2 m, podrá instalarse una señalización de peligro (puede ser una línea de yeso o cal situada a 2 m del borde de la zanja, cuerda con banderolas, etc.).
- Se deberán revisarse los taludes o cortes a intervalos regulares, para evitar desprendimientos debido al uso de martillos neumáticos, compactadores, excavadoras, etc.
- Se deberá efectuar el achique inmediato de las aguas que afloren o caigan en el interior de la zanja, para evitar que se altere la estabilidad de los taludes:
- Todos los apuntalamientos deberán ser revisados periódicamente, en caso de que los haya.

Establecidas las sugerencias o recomendaciones para la recepción, descarga e instalación de la tubería, se procede a describir el procedimiento constructivo.

- 1.- Excavación y retiro de una capa de 0.60 m de la parte que no se rellenó del canal de desvío en la etapa del procedimiento constructivo anterior, es decir, de la estación 0 + 110.00 a la 0 + 120.00, debido a que el suelo de ese lugar, se encontrará húmedo, por lo tanto para evitar asentamientos posteriores, se retirará la capa mencionada.
- 2.- Relleno con material de banco en capas de 0.20 m compactadas al 90 % de la prueba PROCTOR, en el lugar donde se retiró la capa de suelo del paso anterior.
- 3.- Excavación por medios mecánicos de la zanja para el alojamiento de la tubería a presión de acuerdo al detalle constructivo titulado sección transversal tipo de zanja para alojamiento de tubería a presión contenido en el plano MH 11 y en los planos de las secciones transversales MH 12, MH 13, MH 14, MH 15, MH 16, MH 17, MH 18, MH 19 y MH 20, MH 21. El material producto de excavación deberá colocarse al costado derecho de la margen

derecha del canal San Lorenzo, con la finalidad de evitar que impida el paso vehicular.

- 4.- Afine de manera manual en el fondo de la excavación realizada en el paso anterior.
- 5.- Se colocarán unas calzas de madera de entre 6" y 8" de espesor sobre el fondo de la excavación separadas aproximadamente 1 metro, centradas en el fondo de la excavación, con la finalidad de que al colocar el tubo, éste quede suspendido y pueda realizarse la unión con soldadura por la parte debajo de la misma.
- 6.- Colocación de un tramo de tubería de acero soldado de 3.20 m de diámetro y 10 mm de espesor en zanja mediante medios mecánicos, deberán revisarse las recomendaciones de seguridad establecidas anteriormente antes de ejecutar este paso.
- 7.- De igual forma se colocará el siguiente tramo de la tubería de acero soldado, de manera que quede lo más cerca posible del tramo anterior, una vez colocado sobre las calzas de madera, se empujará el tramo de tubo directamente con la pala mecánica de una retroexcavadora de brazo largo con la finalidad de pegarlo al tramo de tubo anterior.
- 8.- Se procederá a realizar la unión con soldadura de los dos tramos de tubo colocados sobre las calzas de madera, actividad que realizará un soldador certificado, cabe destacar que para la ejecución de esta actividad deberán seguirse las medidas de seguridad adecuadas para ello.
- 9.- Colocación y tendido de una plantilla apisonada y compactada al 90 % de la prueba PROCTOR de 0.42 m de espesor con material de banco clasificación SUCS (SM), de acuerdo a lo establecido en el plano MH 11.

- 10.- Colocación de un relleno acostillado compactado al 90 % de la prueba PROCTOR con material de banco a 0.30 m sobre el lomo de la tubería, en capas de 0.15 m de espesor, de acuerdo a lo establecido en el plano MH 11.
- 11.- Relleno a volteo con material producto de excavación hasta el nivel de la margen derecha del canal San Lorenzo (camino de terracería), de acuerdo a lo establecido en el detalle constructivo de la zanja del plano MH 11.

Los pasos del 1 al 11, deberán ejecutarse por tramos, es decir, la tubería a presión tiene una longitud de 266 m hasta el punto donde descargará en la casa de máquinas de acuerdo al plano MH – 09, por lo tanto, la instalación de la misma se realizará en tramos de 10 metros, por lo que estos pasos deberán repetirse al menos 26 veces.

### 4.1.5.5.- Etapa 5 del procedimiento constructivo – Casa de máquinas

Esta etapa comprende la casa de máquinas, sin embargo, como se mencionó anteriormente, el diseño estructural y geotécnico de esta edificación no se encuentra dentro del alance de este proyecto de intervención, por lo tanto el proceso de construcción de esta parte de la minihidráulica no se describirá, entonces se procederá con la siguiente etapa del procedimiento constructivo.

### 4.1.5.6.- Etapa 6 del procedimiento constructivo – Tubería de retorno

Para finalizar la construcción de la minihidráulica, será necesario llevar a cabo la instalación de la tubería o conducto de retorno, para ello deberán seguirse los pasos siguientes:

- 1.- Procederá a demolerse el talud existente del canal San Lorenzo en la ubicación donde descargará el agua turbinada el conducto o tubería de retorno, dicha ubicación se muestra en el plano MH 22.
- 2.- Excavación por medios mecánicos de la zanja para el alojamiento de la tubería de retorno de acuerdo al detalle constructivo titulado sección transversal

tipo de zanja para alojamiento de tubería a presión contenido en el plano MH – 11 y en el plano de las secciones transversales MH – 21. El material producto de excavación deberá colocarse al costado derecho de la margen derecha del canal San Lorenzo, con la finalidad de evitar que impida el paso vehicular.

- 3.- Se realizará los pasos 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 y 11 del procedimiento de construcción de la tubería a presión, mismos que deberán repetirse hasta que toda la tubería de retorno esté instalada, es decir, hasta la estación del eje de la tubería 0 + 290.64.
- 4.- Procederá a realizarse la reposición del talud demolido del canal San Lorenzo, en donde descarga la tubería de retorno.

Aquí concluye el procedimiento de construcción de la minihidráulica propuesta en este proyecto de intervención, recordemos que se redactó de tal forma que de su descripción se obtengan los conceptos de obra, posteriormente se elabore un catálogo y en base a él se determine un estimado de costos.

### 4.1.6.- Estimado de costos

Con apoyo del procedimiento de construcción propuesto en la sección anterior y de los planos, se elaboró un catálogo de conceptos, el cual se encuentra dividido en partidas, cada una de ellas referidas a cada una de las etapas del procedimiento de construcción. Las partidas del catálogo de conceptos son las siguientes:

- Partida A.- Canal de desvío.
- Partida B.- Obra de represamiento y obra de toma.
- Partida C.- Relleno del canal de desvío.
- Partida D.- Tubería a presión.
- Partida E.- Casa de máquinas.
- Partida F.- Tubería de retorno.

En el catálogo de conceptos elaborado se muestran, la descripción, clave, unidad, cantidad, precio unitario, total y las observaciones para cada uno de los conceptos.

La asignación de la clave se realizó primeramente colocando la letra de la partida correspondiente, posteriormente el número del concepto utilizando dos cifras seguido de las iniciales MH que significan minihidráulica, por ejemplo, la clave A01MH significa, partida A, concepto número 1 de la minihidráulica.

La descripción de cada uno de los conceptos se realizó de una manera detallada, de tal forma, que se entienda por completo la tarea o actividad por realizar y lo que incluye cada uno de ellos, como herramienta, equipo de seguridad, material y todo lo necesario para su correcta ejecución.

La unidad de medida se estableció de manera que se facilitará la generación de volúmenes de obra.

La cantidad, es decir, los volúmenes de obra, se obtuvieron en base al diseño de todos los elementos de la minihidráulica y en base al procedimiento de construcción, los cuales se encuentran plasmados en 26 planos; consulte al autor para su visualización.

La determinación de los precios unitarios se realizó mediante el software de ingeniería de costos, programación y control de obras Opus de la marca Ecosoft, además de realizarlo en el software de Microsoft Excel. Como resultado de ello se obtuvo un estimado de costos; consulte al autor para su visualización. Sin embargo, en la tabla 4.17, se muestra un estimado de costos a manera de resumen por partida.

Tabla 4. 17.- Resumen del estimado de costos.

PRESUPUESTO REFERENTE A LA CONSTRUCCIÓN DE MINIHIDRÁULICA UBICADA EN CAMPO EL DIEZ, PERTENECIENTE AL MUNICIPIO DE CULIACÁN, SINALOA

Presupuesto						
Clave	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Total	
Α	Canal de desvío				\$ 2'021,084.36	
В	Obra de represamiento y obra de toma				\$ 6'243,587.67	
С	Relleno del canal de desvío				\$ 43,521.00	
D	Tubería a presión				\$ 37'609,398.53	
E	Casa de máquinas				\$ 3'500,983.11	
F	Tubería de retorno				\$ 843,637.17	
	Subtotal de Presupuesto				\$ 50'262,211.84	
				I.V.A. Total	\$ 8'041,953.89 \$ 58'304.165.73	

#### 4.1.7.- Cierre de proyecto

Antes de cerrar el presente proyecto de intervención, se procedió a realizar una inspección completa de todo el documento, con la finalidad de asegurar que se hayan cumplido los objetivos planteados al inicio del mismo.

La minihidráulica propuesta en este proyecto de intervención representa una forma de producir energía de sustentable, para ello fue necesario llevar a cabo el diseño hidráulico de cada uno de los elementos que forman parte de esta particular obra, con la finalidad de aprovechar el flujo de agua proveniente del canal San Lorenzo, tarea que se realizó por completo y que se muestra a lo largo del documento en los capítulos 3 y 4.

Una vez, concluido el diseño de los elementos de la pequeña central hidroeléctrica, procedió a realizarse un estudio para la determinación de la generación de energía de la minihidráulica y su capacidad de abastecimiento eléctrico, teniendo como resultado que la minihidráulica es capaz de generar una potencia de 1 MW, cantidad suficiente para abastecer a más de 900 casas promedio. Además se determinó que la minihidráulica permitiría reducir la quema de combustibles fósiles, ya que para generar 1 MW se necesitan quemar 98.508

litros de petróleo o 85.99 kg de petróleo para liberar la energía suficiente para producir esa potencia, por lo que se reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera y con ello la contaminación.

Además de disminuir la contaminación y aumentar la capacidad de generación de energía eléctrica en el estado de Sinaloa, no se altera el nivel de demanda de la fuente de abastecimiento de la minihidráulica, es decir, del canal principal de riego San Lorenzo, debido a que el agua es captada, transportada a través de una tubería a presión hacia una casa de máquinas donde atraviesa una turbina para generar energía eléctrica y posteriormente vuelve al canal principal de riego San Lorenzo, todo esto ocurre en una zona donde no hay irrigación, por lo que esta actividad de gran importancia no se ve afectada.

Es importante, que para lograr lo anterior mencionado, el proyecto se construya, por ello, en el presente documento se elaboró el procedimiento constructivo de la minihidráulica, el cual se dividió en 6 pertinentes etapas y se redactaron de una manera clara y detallada.

Posteriormente se elaboró un estimado de costos, ya que es un aspecto fundamental en la toma de decisiones para la realización de cualquier proyecto.

Por lo tanto, al revisar el proyecto de intervención, puede observarse que se cumple con el objetivo general y con cada uno de los objetivos específicos.

El cumplimiento de los objetivos no fue solamente lo que se inspeccionó, sino también los cálculos realizados en el diseño hidráulico de los elementos de la pequeña central hidroeléctrica, los pasos del procedimiento de construcción, los conceptos de obra, volúmenes de obra y los precios unitarios para la realización del estimado de costos.

Finalmente, procedió a realizarse una reunión entre los involucrados en el presente proyecto de intervención declarando exitoso, debido a que se cumple con cada uno de los objetivos planteados.

#### 4.1.8.- Presentación de los resultados

A continuación, de una manera breve se presentan los resultados obtenidos del presente proyecto de intervención:

Los elementos que conforman a la minihidráulica como una alternativa sustentable de generar electricidad son:

- Una obra de represamiento ubicada 20 metros aguas arriba de la sección del cambio de pendiente en el canal San Lorenzo, lugar donde se ubica una estación de aforo de la CONAGUA, dicha obra de represamiento estará conformada por dos compuertas radiales de hierro de 3 metros de ancho por 3.55 metros de altura, soportadas por unos muros separadores de 0.50 metros de ancho, mismos que se cimentarán mediante pilas de 0.50 metros de diámetro. Las transiciones de entrada y salida del canal San Lorenzo hacia la obra de represamiento tendrán una longitud de 2 metros y un ángulo de deflexión o de abertura de 22.5°. Como resultado final del diseño de la obra de represamiento se elaboraron los planos MH 04, MH 05 y MH 06.
- Una obra de toma localizada 5 metros aguas arriba de la obra de represamiento, conformada por una toma en la plantilla del canal San Lorenzo en forma cuadrada de 3.50 metros de lado, misma que funcionará con un tirante promedio de 2.5 metros. Además se colocará una rejilla con un marco a base de ángulo de lados iguales de 2" x 3/8" de espesor, solera de 2" x 3/8" de espesor a cada 0.05 metros de separación en el sentido del flujo y solera de 2" x 3/8" de espesor a cada 0.1 m de separación en el sentido perpendicular. El contramarco, mismo que se ahogará en el

- concreto durante el colado de la estructura cuadrada de la obra de toma, estará formado por ángulo de lados iguales de  $2 \frac{1}{2}$ " x 3/8" de espesor. Asimismo se construirá un bordillo perimetral de concreto f´c=  $250 \text{ kg/cm}^2$  reforzado con mallalac 44 44 de 0.1 metros de altura, con la finalidad de evitar la entrada del arrastre de sedimentos. Los resultados obtenidos del diseño de la obra de toma se plasmaron en los planos MH 07 y MH 08.
- Una tubería a presión diseñada para transportar un gasto de hasta 30 m³/s, conformada por un conducto de acero soldado con una longitud de 280.35 metros, que va desde la obra de toma de la minihidráulica ubicada a una elevación topográfica de 46 metros, hasta la casa de máquinas ubicada a una cota topográfica de 39.4 metros, el diámetro del conducto a presión es de 3.2 metros y deberá tener un espesor mínimo de 0.010 metros, además se determinó que el conducto trabajará bajo una carga hidráulica de 8.48 metros y que se tendrá una pérdida de energía total por fricción y por accesorios de 2.87 metros, sin embargo, este conducto permitirá producir generar una potencia constante de hasta 1MW. Como resultado del diseño de la tubería a presión se elaboraron los planos MH 09, MH 10, MH 11, MH 12, MH 13, MH 14, MH 15, MH 16, MH 17, MH 18, MH 19, MH 20 y MH 21.
- Una casa de máquinas ubicada entre la estación 0 + 266.00 a la 0 + 288.00 de 188.5 m² de superficie, área necesaria para el alojamiento de una turbina tipo Bulbo con la capacidad de generar 1 MW de energía eléctrica, misma que trabajará con una carga hidráulica de 4.63 m y un gasto de 30 m3/s. La turbina será suministrada por la empresa China Eternoo Machinery Co. Ltd., mismos que se encargarán de la instalación del equipo. La ubicación de la casa de máquinas se estableció debido a la cercanía que presenta el sitio con el lugar donde se entregará el agua turbinada, además de presentar facilidades de acceso para mantenimiento y ampliaciones o modificaciones futuras. El diseño estructural y geotécnico de la casa de

- máquinas no se encuentran dentro del alcance de este proyecto. Como resultado del diseño de la casa de máquinas se elaboró el plano MH 22.
- Una tubería o conducto de retorno de acero soldado de 3.20 metros de diámetro que deberá tener al menos 9.2 mm de espesor con una longitud de 5.64 metros que va desde la estación 0 + 285.00 hasta la 0 + 290.64 del eje de la tubería trazado, mismo que tiene la finalidad de transportar el flujo de agua de la casa de máquinas al cauce del canal San Lorenzo.

Además del diseño hidráulico de los elementos de la minihidráulica, se obtuvieron los siguientes resultados:

- La potencia generada por la minihidráulica sería de 1 MW aproximadamente, energía suficiente para abastecer a más de 800 casas promedio, además de reducir la quema de combustibles fósiles, ya que para liberar energía y producir esa potencia necesitan quemarse 98.508 litros ó 85.99 kg de petróleo cada hora, 2364.192 litros ó 2063.76 kg de petróleo cada día, 70925.76 litros ó 61912.8 kg de petróleo cada mes y 567406.08 litros ó 495302.4 kg de petróleo cada 8 meses.
- Un procedimiento constructivo dividido en 6 etapas, el cual fue elaborado detalladamente, de manera que de él se obtuviera un catálogo de conceptos para la elaboración de un estimado de costos. Como apoyo para la explicación del proceso constructivo se elaboraron los planos MH 23, MH 24, MH 25 y MH 26. Las etapas en las que se dividió el procedimiento de construcción son las siguientes:
  - Etapa 1.- Canal de desvío.
  - Etapa 2.- Obra de represamiento y obra de toma.
  - Etapa 3.- Relleno del canal de desvío.
  - Etapa 4.- Tubería a presión.
  - Etapa 5.- Casa de máquinas.
  - Etapa 6.- Tubería de retorno

Un estimado de costos donde se presenta un catálogo de conceptos dividido por partidas de acuerdo al procedimiento de construcción propuesto, dicho catálogo contiene la clave, descripción, unidad, precio unitario, total y las observaciones para cada uno de los conceptos de obra que lo forman. Como resultado de esta etapa del proyecto de intervención se obtuvo un estimado de costos para la minihidráulica de \$58, 304, 165.73.

# 4.2.- Estrategias usadas para la presentación y venta del proyecto

Para la presentación y venta de la minihidráulica de este proyecto de intervención se plantean las siguientes estrategias:

Organizar una conferencia en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería Culiacán de la Universidad Autónoma de Sinaloa, donde se expondrá el presente proyecto de intervención titulado "Diseño y procedimiento de construcción de una minihidráulica en Culiacán, Sinaloa", en dicha conferencia se dará a conocer el sitio donde se planea llevar a cabo el emplazamiento de esta obra, se explicará cómo está compuesta la minihidráulica, de qué manera funciona, cuál es su capacidad de producción eléctrica y que beneficios representa producir electricidad a través de una energía limpia, como la minihidráulica, mismos que se resumen de una manera breve a continuación, ya que hemos hablado de ello en los capítulos I y II del presente proyecto.

#### Beneficios:

 Producir energía eléctrica sin la necesidad de explotar recursos naturales no renovables como los combustibles fósiles.

- Reducir los daños provocados a la salud y al ambiente por la quema de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica.
- Contribuir con el cuidado y la preservación de nuestro planeta.
- Impulsar proyectos de bajo impacto ambiental en el estado de Sinaloa.
- Representar una nueva e innovadora forma de producir energía a nivel estado, ya que en Sinaloa, no se tiene registros de la existencia de una minihidráulica en la actualidad.

La conferencia impartida será de carácter público, con la finalidad de que nuestro proyecto sea del conocimiento del mayor número de personas posibles.

Además se extenderá una invitación al Colegio de Ingenieros Civiles de Sinaloa A. C., al Organismo de la Cuenca Pacífico Norte de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), a la Comisión Federal de Electricidad, al Gobierno del Estado y al H. Ayuntamiento del municipio de Culiacán, dependencias y organismos de gobierno que a nuestro criterio podrían involucrarse directamente con nuestro proyecto de intervención.

En lo referente al sector privado, se extenderá una invitación a todo el sector industrial del "Campo El Diez", y sugerirles que mediante una concesión otorgada por la CFE, una vez que ésta apruebe nuestro proyecto, puedan suministrarse de energía eléctrica. Además se realizará una investigación en el Inventario Nacional de Energía Renovables de la Secretaría de Energía para identificar empresas privadas a nivel nacional dedicadas al desarrollo de proyectos y construcción de bajo impacto ambiental y de igual manera invitarlas a este evento.

Con el objetivo de tener la mayor participación posible en esta ponencia, se llevará a cabo un plan de publicidad, el cual consistirá en la elaboración de trípticos en los que se resuma la situación actual que existe en el mundo, en nuestro país y obviamente en nuestro estado, en lo referente a la producción de energía eléctrica, y de la urgencia que existe hoy en día por producir electricidad mediante las energías limpias. Además se resumirán algunas de las características más importantes de nuestro proyecto de intervención. También, para dar publicidad al evento, se considera elaborar carteles para ser distribuidos y desplegados en las instalaciones de la Universidad Autónoma de Sinaloa, en el Colegio de Ingenieros Civiles de Sinaloa A. C., en el Organismo de la Cuenca Pacífico Norte de la CONAGUA y en las oficinas de la Comisión Federal de Electricidad. Para finalizar, en cuanto a la publicidad de la conferencia se refiere, se publicará el cartel en la página de internet de la Facultad de Ingeniería Culiacán de la UAS así como en algunas redes sociales.

Se desarrollará un video explicativo de nuestro proyecto de intervención en el que se incluirá la información más relevante del mismo, tal como información del lugar del emplazamiento de la obra, características generales de la minihidráulica, componentes de la misma, potencia generada por la minihidráulica, el procedimiento constructivo de la pequeña planta hidroeléctrica, entre otras cosas más. El video tendrá una duración relativamente corta, entre 7 y 8 minutos aproximadamente.

Este video será publicado en la página de internet de la Facultad de Ingeniería Culiacán de la UAS y en diversas redes sociales, además se llevará cabo la grabación de copias del mismo en formato DVD, mismas que se repartirán en algunas instituciones, organismos y dependencias de gobierno, tales como el Colegio de Ingenieros Civiles de Sinaloa A. C., el Organismo de la Cuenca Pacífico Norte de la CONAGUA, la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC), La comisión Federal de

Electricidad (CFE), empresas del sector industrial del "Campo El Diez" y empresas del sector privado relacionadas con el tema de las minihidráulicas.

Las estrategias de presentación y venta presentadas tienen el objetivo de informar a las instituciones, organismos y dependencias de gobierno y empresas del sector privado, sobre el proyecto de intervención, ya que son estas instituciones las que tienen el poder de decisión sobre la aceptación o no del mismo.

## 4.3.- Estrategias para vinculación

El presente proyecto de intervención es un producto o mercancía generada en la Universidad Autónoma de Sinaloa, en la Facultad de Ingeniería Culiacán y particularmente en la Maestría en Ingeniería de la Construcción, y como tal para su vinculación debemos hacer alusión al reglamento de la Dirección General de Vinculación y Relaciones Internacionales (DGVRI) de la UAS, el cual en el capítulo VIII, de una forma muy general, habla sobre la vinculación, sin embargo con tal de tener los mejores resultados posibles, se visitará la DGVRI para recibir orientación y apoyo de su parte.

En el apartado de estrategias para la presentación y venta del proyecto, se mencionaron algunas instituciones, organismos y dependencias de gobierno, y empresas del sector privado que a nuestro criterio pudieran verse involucradas o beneficiadas directamente por este proyecto de intervención, sin embargo, no se mencionó el porqué, por ello a continuación se detallará.

El Colegio de Ingenieros Civiles de Sinaloa A. C., es una asociación constituida para fortalecer y proporcionar la actualización de los conocimientos y la capacidad profesional de sus socios en beneficio de nuestro país, al cual están inscritos gran número de ingenieros de nuestro estado, por ello, al hacer llegar la información de nuestro proyecto de intervención a dicha institución, el proyecto

podría tener muchos beneficios, ya que cabe la posibilidad de despertar el interés en más de algún miembro del Colegio y vincularnos con alguna empresa privada interesada.

El Organismo de la Cuenca Pacífico Norte de la CONAGUA es el encargado de administrar y preservar las aguas nacionales para el uso sustentable de este recurso en las cuencas dentro de las que se ubica la totalidad de la superficie del estado de Sinaloa y parte de los estados de Durango, Chihuahua, Nayarit y Zacatecas, por ello al ser el organismo gestor del canal San Lorenzo, mismo donde se planea llevar a cabo el emplazamiento de la minihidráulica, es uno de los principales involucrados en este proyecto, el cual se vería beneficiado por el hecho de que con el desarrollo de la minihidráulica estaría cumpliendo con su objetivo que es el de buscar un uso sustentable de las aguas nacionales, además de propiciar el desarrollo de un mayor número de proyectos de bajo impacto ambiental como las minihidráulicas.

La Comisión Federal de Electricidad, es un organismo paragubernamental de importancia trascendental para la implementación de este proyecto, ya que en nuestro país solamente la CFE puede distribuir y comercializar la electricidad. Con la implementación de este proyecto de intervención la CFE se vería beneficiada debido a que aumentaría su capacidad de generación eléctrica sin propiciar un desequilibrio ecológico y preservando los recursos naturales existentes.

El Gobierno del Estado de Sinaloa y el H. Ayuntamiento del municipio de Culiacán, también figuran como importantes organismo involucrados, ya que de realizarse la minihidráulica, al ser un proyecto pionero en nuestro estado, podría llegar a tener una muy buena aceptación social, lo que representaría un beneficio para la sociedad de nuestro municipio y estado, y por lo tanto para estos organismos.

Finalmente, las empresas del sector industrial privado, relacionadas con la producción de energía eléctrica a través de minihidráulicas, serían beneficiadas ya

que el proyecto estaría finalizado, solamente tendrían que apoyarlo y posteriormente hacer lo necesario para llevarlo a cabo y generar sus respectivas ganancias.

## 5.- Administración del proyecto

### 5.1.- Cronograma de actividades

Con la intención de organizar de la mejor forma posible las actividades a realizar para el desarrollo exitoso del presente proyecto de intervención se elaboró el calendario de actividades o cronograma de actividades quincenal que se muestra en la figura A. 1. 8 del anexo 1, el cual comprende desde la elaboración del protocolo hasta la finalización y presentación del proyecto. Las duraciones contempladas en el cronograma mostrado fueron propuestas por los responsables del mismo, que son:

Director de proyecto de intervención:

Dr. Fernando García Páez

- Coordinadora del Posgrado de la Maestría en Ingeniería de la Construcción:
  - M. I. Magnolia Soto Félix
- Estudiante del Posgrado Maestría en Ingeniería de la Construcción:

Ing. Guillermo Jesús Lazcano Beltrán.

#### 5.2.- Recursos

Para la realización del presente proyecto de intervención son indispensables una serie de elementos o recursos que podemos clasificar en recursos humanos, físicos o materiales y financieros.

En relación a los recursos humanos podemos identificar los siguientes:

- Director de proyecto de intervención.- Es el encargado de orientar, revisar y aprobar las actividades que se realicen durante el proyecto las veces que sean necesarias para el éxito del mismo.
- Estudiante de Posgrado de la Maestría en Ingeniería de la Construcción.-Es el responsable de la elaboración del proyecto de intervención, mismo que debe cumplir con los tiempos establecidos en el cronograma de actividades.

En lo referente a los recursos físicos o materiales podemos identificar los siguientes:

- Computadora.- Es imprescindible para la elaboración del proyecto de intervención, ya que por medio de la misma, recopilamos la información, la almacenamos, la manipulamos y desarrollamos el proyecto de intervención por escrito. Es necesario que ésta tenga la capacidad de trabajar software como: Office de Microsoft, AutoCAD de Autodesk, CivilCAD, Hcanales en su versión 3.0 y Hec Ras en su versión 4.1.
- Automóvil.- Podría prescindirse de este recurso, sin embargo, un medio de transporte es necesario ya que deben realizarse varias visitas al sitio de emplazamiento de la minihidráulica, mismo que se ubica en las afueras, a una distancia de 10 km de la ciudad de Culiacán, además se necesita asistir a las oficinas del Organismo de la Cuenca Pacífico Norte de la CONAGUA en busca de apoyo e información para la realización de dicho proyecto.
- Internet.- Herramienta y fuente de consulta altamente necesaria para el desarrollo de este proyecto, ya que permite la revisión de información de todo tipo referente al tema de estudio, además permite realizar un intercambio de información de una manera rápida y segura.
- Celular inteligente.- Hoy en día el uso de celulares es indispensable en nuestra vida diaria, para la realización de este proyecto también lo fue, ya que nos permitió estar en contacto constante con los involucrados, además

de servir como una cámara topográfica para la toma de fotografías para evidenciar las actividades a realizar y como un dispositivo de consulta e investigación cuando no se tenía al alcance una computadora con acceso a internet.

En lo concerniente a los recursos financieros podemos identificar solamente uno:

Recursos financieros.- Es imprescindible para llevar a cabo este y cualquier proyecto de intervención, en nuestro caso es necesario para los gastos relacionados con la papelería, renta de equipo topográfico así como de maquinaria para la realización del estudio de mecánica de suelos, visitas al lugar de la obra y diversos puntos de interés y herramienta menor para la realización del trabajo de campo.

# 5.3.- Presupuesto

Los gastos efectuados aproximadamente para la realización del presente proyecto de intervención se muestran en la tabla 5.1, donde se separan por tipo y se indica su correspondiente cantidad, así como la suma total de ellos.

Concepto	Cantidad
Papelería	\$4,000.00
Celular (Saldo)	\$2,500.00
Renta de equipo topográfico	\$1,000.00
Topógrafo	\$4,000.00
Combustible	\$3,500.00
Herramienta menor	\$1,000.00
Otros	\$4,000.00
Total	\$20,000.00

Tabla 5. 1.- Presupuesto del proyecto de intervención.

# 6.- Conclusiones y recomendaciones

#### 6.1.- Conclusiones y recomendaciones

Dentro de los 20 sitios pertinentes para el emplazamiento de una minihidráulica se encuentra un tramo del canal principal de riego San Lorenzo en la localidad del Campo El Diez, en Culiacán, Sinaloa, lugar que cuenta con todas las características necesarias para el desarrollo de un proyecto de este tipo.

La minihidráulica que se presentó en este proyecto de intervención representa la primera propuesta de una mini central hidroeléctrica para el estado de Sinaloa, diseñada para aprovechar el agua proveniente del canal principal de riego San Lorenzo en la localidad del Campo El Diez en Culiacán, Sinaloa. Al realizar el diseño de cada uno de los elementos de la minihidráulica y proponer un procedimiento constructivo para esta obra, se concluye lo siguiente:

- La minihidráulica del Campo El Diez representa una alternativa de generación eléctrica sustentable viable, misma que de una manera sustentable que permite disminuir el consumo de combustibles fósiles y por ende las emisiones que estos emiten a la atmósfera causando problemas para nuestra salud y la contaminación de nuestro planeta, además se fortalece la red eléctrica.
- El generar energía eléctrica a través de fuentes renovables como la energía minihidráulica para el estado de Sinaloa, México es posible, por lo tanto, deben aprovecharse los sitios potenciales para el emplazamiento de minihidráulicas en Sinaloa, los combustibles fósiles no son renovables, es decir, se agotan, por lo que se requiere aprovechar mejor un recurso tan valioso como es el agua, y que tenemos a lo largo de todo el territorio estatal.
- La potencia generada por la minihidráulica del Campo El Diez es de un 1
   MW, por lo tanto, en un tiempo de una hora, la central produce un MWh,

cantidad equivalente a quemar 95.508 litros de o 85.99 kg de petróleo cada hora, 2364.192 litros ó 2063.76 kg de petróleo cada día, 70925.76 litros ó 61912.8 kg de petróleo cada mes y 567406.08 litros ó 495302.4 kg de petróleo cada 8 meses, esto significa que con el establecimiento de minihidráulicas, el consumo de combustibles fósiles puede disminuirse en gran medida.

El procedimiento de construcción de la minihidráulica aprovecha el flujo de agua proveniente de una corriente controlada y resulta no ser complicado, además, comprende pocos conceptos de obra, por lo que esto no debe ser una limitante o un motivo para pensar en llevar a cabo más proyectos de esta índole.

#### Referencias documentales

#### Bibliografía complementaria

Abdullah, B. Design of Micro – Hydro – Electric Power Station. International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). Volume 2 (5): 39 – 47. 2013.

Aparicio, F. J. Fundamentos de hidrología de superficie. Limusa. Primera edición. Ciudad de México. 13 – 46. 1992.

Baca, G. Evaluación de proyectos. McGraw-Hill. Sexta edición, Ciudad de México. 86 – 88. 2010.

Center for Investment & Trade of Sinaloa. (2015). Fecha de consulta: abril 20 de 2015. Recuperado de http://www.citsinaloa.gob.mx/es/sinaloa/infraestructura.html

Center for Investment & Trade Sinaloa. Competimos por el mundo. 2015.

Chow, V.T. Open-Channel Hydraulics. McGraw-Hill INTERAMERICANA. Santafé de Bogotá. 3 – 314. 1994.

Comisión Federal de Electricidad (CFE). Minihidráulicas en México. Recuperado de http://www.cfe.gob.mx. 2014.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Manual de Instalación de Tubería para Drenaje Sanitario. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Ciudad de México. 2012.

Comisión Nacional del Agua. Sistema Nacional de Información del Agua (SINA). México. 2015.

Edge, D. A historical survey of low-head hydropower generators and recent laboratory based work at University of Salford. Tesis de doctorado no publicada. Salford. 1 – 69. 1999.

European Small Hydropower Association. LAYMAN'S GUIDEBOOK on how to develop a small hydro site. 1998.

Giles, R. Mecánica de los fluidos e hidráulica. McGraw-Hill. 225 – 245.

Gómez, M. Notas sobre Obras Hidroagrícolas. Culiacán. 93 – 119. 1994.

González, J. La Generación Eléctrica a Partir de Combustibles Fósiles. Boletín IIE. Año 33, (4): 143 – 151. 2009.

Hesperian health guides. (2011). *Guía comunitaria para la salud ambiental*. Recuperado de http://hesperian.org/wp-content/uploads/pdf/es\_cgeh\_2011/es\_cgeh\_2011\_cap23.pdf

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Minicentrales Hidroeléctricas. Recuperado de www.idae.es. Madrid. 2006.

International Energy Agency. Energy use in the new millennium – Trends in IEA countries. IEA magazine. 2007.

International Energy Agency. Technology Roadmap Hydropower. París. 2012.

Inventario Nacional de Energías Renovables. Recuperado desde http://inere.energia.gob.mx/publica/version4.2/. 2015.

Martínez, M., Fernández, D., Mendoza, C., Martínez, R. y Ramírez, H. Diseño hidráulico de un canal de llamada. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA).

Martínez, M., Fernández, D., Uribe, D., Jiménez, G. y Medina, A. Obras de toma para aprovechamientos hidráulicos. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA).

Martínez, M., Fernández, D., Uribe, D., Jiménez, G. y Medina, A. Obras de toma para aprovechamientos hidráulicos. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA).

Mataix, C. Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. Ediciones del Castillo. Segunda edición. Madrid. 440 – 518. 1986.

Mishan, E. J. y Quah, E. Cost-Benefit Analysis. Routledge. Quinta edición. New York. 1 – 11. 2007.

Mora D., y Hurtado M. Guía para estudios de prefactibilidad de pequeñas centrales hidroeléctricas como parte de sistemas híbridos. Tesis de licenciatura no publicada, Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá. 2004.

Morales, M. Orígenes de la industria eléctrica en Puebla, México. La hidroeléctrica de El Portezuelo. 1899 – 1910. Simposio Internacional Globalización, innovación y construcción de redes técnicas urbanas en América y Europa. Barcelona. 2012.

Müller, S., Brown, A. y Ölz, S. Renewable Energy – Policy Considerations for Deploying Renewables. International Energy Agency. París. 8 – 30. 2012.

Museo Pirenaico de la Electricidad. Turbinas Hidráulicas. Recuperado de http://www.mupiel.es/elect/presas/hidrau.html. 2010.

Novillo, M., Galarza, L., y Romero, G. Manual de diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas. Editorial Olade. Versión preliminar. Bucamaranga. 1985.

Oberlender, G. Project Management for Engineering and Construction. McGraw-Hill. Tercera edición. New York. 61 – 90. 2014.

Organización Latinoamericana de Energía (OLADE). Energy Economic Information System Energy Statistics. Versión 22. Quito. 2012.

Ortiz, R. Pequeñas Centrales Hidroeléctricas. Ediciones de la U. Bogotá. 2011.

Ramos, L., y Montenegro, M. La generación de energía eléctrica en México. XXII Congreso Nacional de Hidráulica. 2012.

Ramos, L., y Montenegro, M. Las centrales hidroeléctricas en México: pasado, presente y futuro. Tecnología y ciencias del agua. 3(2): 103 - 121. 2012.

Ruiz, E. Central hidroeléctrica basada en una microturbina. Tesis de licenciatura no publicada, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Michoacán. 2009.

Ruiz, P. Estudio del recurso hidráulico y proyecto de una central minihidráulica en la cuenca del río Tormes. Tesis de licenciatura no publicada, Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena. 2013.

Schlumberger Excellence in Education Development. La energía y el cambio climático mundial, Fuentes de energía alternativa: Energía hidroeléctrica. Estados Unidos de América. 2012.

Secretaría de Energía (SENER). NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SECRE-2010, Especificaciones del gas natural.

Secretaría de Energía (SENER). Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026. Ciudad de México. 2012.

Secretaría de Energía (SENER). Proyectos minihidráulicos. Recuperado de http://www.energia.gob.mx. 2014.

Serrano, M. Energía minihidráulica – Condiciones de operación y posibles ríos en México. Recuperado de https://energiaunam.wordpress.com/pa ge/3/. 2010.

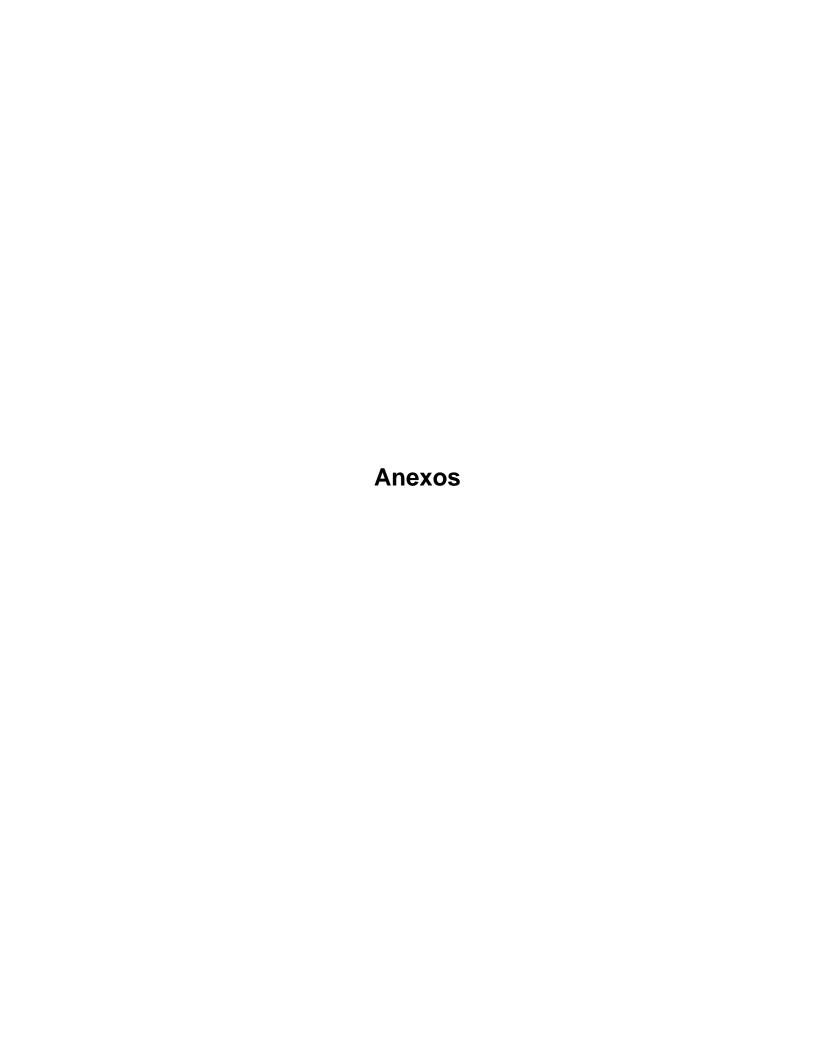
Soria, E. Energías renovables para todos. Energías renovables. Colección elaborada por Haya Comunicación. 2011.

Sotelo, A. Apuntes de Hidráulica II. Ciudad de México. 1 – 288. 2002.

Sotelo, A. Hidráulica General. Limusa. Volumen 1. Ciudad de México. 111 – 322. 1997.

Torres, J.J. ¿Cuál es la primera planta hidroeléctrica del mundo? Recuperado de www.hidroenergia.net/index.php?option=com\_content&view= article&id=69:icual-es-la-primera-planta-hidroelectrica-delmundo&catid=28:isabia s-que&Itemid=59. 2008.

Valdez, L. Metodología para evaluar centrales minihidráulicas. CONAE. Ciudad de México. 1999.



# Anexo 1

Tablas, gráficas y figuras

Conductos cerrados operando parcialmente llenos				
Tipo y descripción del canal	Mínimo	Normal	Máximo	
A. Metales:				
a) Latón, liso.	0.009	0.010	0.013	
b) Acero:				
1 Con bridas y soldado.	0.010	0.012	0.014	
2 Remachado y espiral.	0.013	0.016	0.017	
c) Hierro fundido:				
1 Con recubrimiento superficial.	0.010	0.013	0.014	
2 Sin recubrimiento.	0.011	0.014	0.016	
d) Hierro forjado:				
1 Negro.	0.012	0.014	0.015	
2 Galvanizado.	0.013	0.016	0.017	
e) Metal corrugado:				
1 Subdren.	0.017	0.019	0.021	
2 Dren pluvial.	0.021	0.024	0.030	
B. No metales:				
a) Acrílico.	0.008	0.009	0.010	
b) Vidrio.	0.009	0.010	0.013	
c) Cemento:				
1 Pulido.	0.010	0.011	0.013	
2 En mortero.	0.011	0.013	0.015	
d) Concreto:				
1 Alcantarilla recta y libre de azolve.	0.010	0.011	0.013	
2 Alcantarilla con curvas, conexiones y algunos azolvamientos.	0.011	0.013	0.014	
3 Terminado.	0.011	0.012	0.014	
4 Alcantarilla recta, con pozos de visita, entradas, etc.	0.013	0.015	0.017	
5 Colado en molde de acero, sin acabado.	0.012	0.013	0.014	
6 Colado en molde de madera, sin acabado.	0.012	0.014	0.016	
7 Colado en molde de madera rugosa, sin acabado.	0.015	0.017	0.020	
e) Madera:				
1 Machihembrada.	0.010	0.012	0.014	
2 Laminada y tratada.	0.015	0.017	0.020	

Continúa...

Tabla A. 1. 1.- Valores del coeficiente n en la ecuación de Manning. Conductos cerrados operando parcialmente llenos.

f) Arcilla:			
1 Tubos de barro cocido, común.	0.011	0.013	0.017
2 Tubos de albañal vitrificado.	0.011	0.014	0.017
3 Tubos de albañal vitrificado para drenes, con pozos de visita,	0.013	0.015	0.017
accesos, etc.	0.013	0.015	0.017
4 Tubo vitrificado para subdrenes, con juntas abiertas.	0.014	0.016	0.018
g) Mampostería de ladrillo:			
1 De vitricota.	0.011	0.013	0.015
2 Revestida con mortero de cemento.	0.012	0.015	0.017
h) Alcantarillado sanitario, cubierto de lama de desechos, con curvas	0.012	0.013	0.016
y conexiones.	0.012	0.013	0.016
i) Drenaje con fondo liso, pavimentado en el fondo.	0.016	0.016	0.020
j) Mampostería de piedra pequeña cementada en las juntas.	0.018	0.025	0.030

Tabla A. 1. 2.- Valores del coeficiente n en la ecuación de Manning. Conductos cerrados operando parcialmente llenos. (Continuación).

Canales recubiertos o revestidos			
Tipo y descripción del canal	Mínimo	Normal	Máximo
A. Metal:			
a) Superficie de acero, lisa:			
1 No pintada.	0.011	0.012	0.014
2 Pintada.	0.012	0.013	0.017
b) Corrugado.	0.021	0.025	0.030
B. No metal:			
a) Cemento:			
1 Superficie lisa.	0.010	0.011	0.013
2 En mortero.	0.011	0.013	0.015
b) Madera:			
1 Cepillada, no tratada.	0.010	0.012	0.014
2 Cepillada, creosotada.	0.011	0.012	0.015
3 No cepillada.	0.011	0.013	0.015
4 Entablada con listones.	0.012	0.015	0.018
5 Cubierta de papel impermeable.	0.010	0.014	0.017

Fuente: Hidráulica de canales abiertos, Ven Te Chow, 1994.

Continúa...

Tabla A. 1. 3.- Valores del coeficiente n en la ecuación de Manning. Canales recubiertos o revestidos.

c) Concreto:			
1 Acabado con llana metálica.	0.011	0.013	0.015
2 Acabado con llana de madera.	0.013	0.015	0.016
3 Acabado, con grava en el fondo.	0.015	0.017	0.020
4 Sin acabado.	0.014	0.017	0.020
5 Guniteado, buena sección.	0.016	0.019	0.023
6 Guniteado, sección ondulada.	0.018	0.022	0.025
7 Sobre roca bien excavada.	0.017	0.020	-
8 Sobre roca de excavado irregular.	0.022	0.027	-
d) Fondo de concreto acabado con llana, bordos de:			
1 Piedra acomodada sobre mortero.	0.015	0.017	0.020
2 Mampostería de piedra mal acomodada sobre mortero.	0.017	0.020	0.024
3 Mampostería de piedra pequeña, cementada y revocada.	0.016	0.020	0.024
4 Mampostería de piedra pequeña cementada.	0.020	0.025	0.030
5 Mampostería seca de piedra pequeña, o zampeado.	0.020	0.030	0.035
e) Fondo de grava con taludes de:			
1 Concreto colado en moldes.	0.017	0.020	0.025
2 Piedra mal acomodada en mortero.	0.020	0.023	0.026
3 Mampostería seca de piedra pequeña, o zampeado.	0.023	0.033	0.036
f) Ladrillo:			
1 Vitricota.	0.011	0.013	0.015
2 Con mortero de cemento.	0.012	0.015	0.018
g) Mampostería de piedra:			
1 Pequeña, cementada.	0.017	0.025	0.030
2 Pequeña, seca.	0.023	0.032	0.035
h) Piedra labrada.	0.013	0.015	0.017
i) Asfalto:			
1 Liso.	0.013	0.013	-
2 Rugoso.	0.016	0.016	-
j) Cubierta vegetal.	0.030	-	0.500
k) Suelo-cemento.	0.015	0.016	0.017

Tabla A. 1. 4.- Valores del coeficiente n en la ecuación de Manning. Canales recubiertos o revestidos. (Continuación).

Canales excavados o dragados en diferentes tipos de suelo				
Tipo y descripción del canal	Mínimo	Normal	Máximo	
a) Tierra, recto y uniforme:				
1 Limpio, recientemente terminado.	0.016	0.018	0.020	
2 Limpio, después de intemperizado.	0.018	0.022	0.025	
3 Grava, sección uniforme y limpia.	0.022	0.025	0.030	
4 Con poco pasto y poca hierba.	0.022	0.027	0.033	
b) Tierra, sinuoso, flujo con poca velocidad:				
1 Sin vegetación.	0.023	0.025	0.030	
2 Pasto, algo de hierba.	0.025	0.030	0.033	
3 Hierba densa o plantas acuáticas en canales profundos.	0.030	0.035	0.040	
4 Fondo de tierra y mampostería en los bordos.	0.028	0.030	0.035	
5 Fondo rocoso y hierba en los bordos.	0.025	0.035	0.040	
6 Fondo empedrado y bordos limpios.	0.030	0.040	0.050	
c) Excavado o dragado en línea recta:				
1 Sin vegetación.	0.025	0.028	0.033	
2 Pocos arbustos en los bordos.	0.035	0.050	0.060	
d) Cortado en roca:				
1 Liso y uniforme.	0.025	0.035	0.040	
2 Con salientes agudas e irregulares.	0.035	0.040	0.050	
e) Canales abandonados, hierbas y arbustos sin cortar:				
1 Hierba densa, tan alta como el nivel del agua.	0.050	0.080	0.120	
2 Fondo limpio, arbustos en las orillas.	0.040	0.050	0.080	
3 Igual al anterior, con máximo nivel del agua.	0.045	0.070	0.110	
4 Arbustos densos, altos niveles del agua.	0.080	0.100	0.140	

Tabla A. 1. 5.- Valores del coeficiente n en la ecuación de Manning. Canales excavados o dragados en diferentes tipos de suelo.

Cauces naturales			
Tipo y descripción del canal	Mínimo	Normal	Máximo
A. Arroyos (ancho de la superficie libre del agua en avenidas < 30 m):			
a) Corrientes en planicie:			
Limpios, rectos, sin deslaves ni estancamientos profundos,     tirante alto.	0.025	0.030	0.033
2 Igual al anterior, pero más rocoso y con hierba.	0.030	0.035	0.040

Fuente: Hidráulica de canales abiertos, Ven Te Chow, 1994.

Continúa...

Tabla A. 1. 6.- Valores del coeficiente n de Manning. Cauces naturales.

3 Limpios, sinuosos, algunas irregularidades del fondo.	0.033	0.040	0.045
4 Igual al anterior, algo de hierba y rocas.	0.035	0.045	0.050
5 Igual al anterior, pero menor profundidad y secciones poco	0.040	0.048	0.055
eficaces.	0.040	0.040	0.055
6 Igual que el 4, pero con más piedras.	0.045	0.050	0.060
7 Tramos irregulares con hierba y estancamientos profundos.	0.050	0.070	0.080
8 Tramos con mucha hierba, estancamientos profundos, cauces de inundación con raíces y plantas subacuáticas.	0.075	0.100	0.150
b) Corrientes de montaña, sin vegetación en el cauce, bordos muy			
inclinados, árboles y arbustos a lo largo de las márgenes, que			
quedan sumergidos durante las inundaciones:			
1 Fondo de grava, boleo y algunos cantos rodados.	0.030	0.040	0.050
2 Fondo de boleo y grandes rocas.	0.040	0.050	0.070
B. Planicies de inundación:			
a) Pastura sin arbustos:			
1 Pasto bajo.	0.025	0.030	0.035
2 Pasto alto.	0.030	0.035	0.050
b) Áreas de cultivo:			
1 Sin cultivo.	0.020	0.030	0.040
2 Cultivo maduro en surcos.	0.025	0.035	0.045
3 Cultivo maduro en campo.	0.030	0.040	0.050
c) Arbustos:			
1 Arbustos escasos y mucha hierba.	0.035	0.050	0.070
2 Pocos arbustos y árboles, en invierno.	0.035	0.050	0.060
3 Pocos arbustos y árboles, en verano.	0.040	0.060	0.080
4 Mediana a densa población de arbustos, en invierno.	0.045	0.070	0.110
5 Mediana a densa población de arbustos, en verano.	0.070	0.100	0.160
d) Árboles:			
1 Población densa de sauces en verano, rectos.	0.110	0.150	0.200
2 Terrenos talados con troncos muertos.	0.030	0.040	0.050
3 Igual al anterior, pero con troncos retoñados.	0.050	0.060	0.080
4 Gran concentración de madera, algunos árboles caídos, pocos	0.080	0.100	0.120
de escaso crecimiento, nivel de inundación debajo de las ramas.	0.000	0.100	0.120
5 Igual al anterior, pero el nivel de inundación alcanza a las ramas.	0.100	0.120	0.160
C. Ríos (ancho de la superficie libre del agua en avenidas > 30 m)			
a) Secciones regulares sin cantos rodados ni arbustos.	0.025	-	0.060
b) Secciones rugosas e irregulares.	0.035	-	0.100

Tabla A. 1. 7.- Valores del coeficiente n de Manning. Cauces naturales. (Continuación).

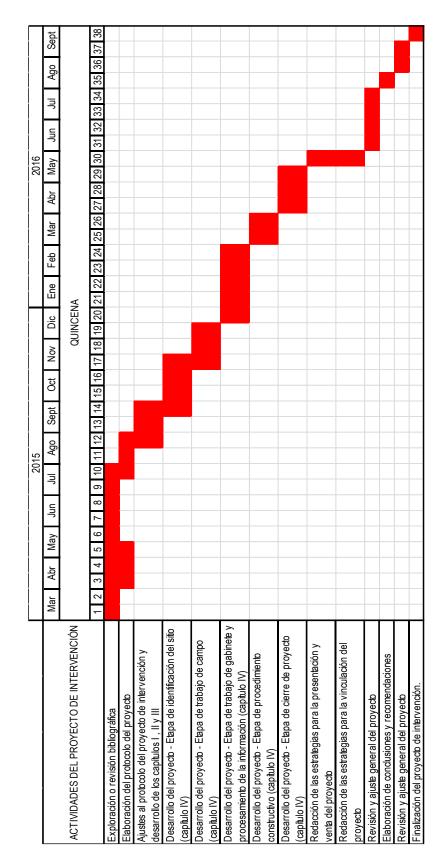


Tabla A. 1. 8.- Cronograma de actividades del proyecto de intervención.

# Anexo 2

Fotografías



Fotografía A. 2. 1.- Reconocimiento del sitio 01.



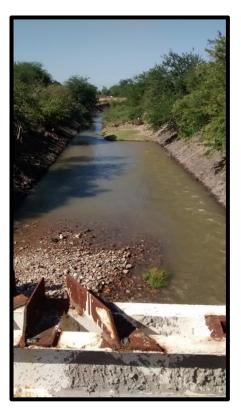
Fotografía A. 2. 2.- Reconocimiento del sitio 02.



Fotografía A. 2. 3.- Reconocimiento del sitio 03.



Fotografía A. 2. 4.- Reconocimiento del sitio 04.



Fotografía A. 2. 5.- Reconocimiento del sitio 05.



Fotografía A. 2. 6.- Reconocimiento del sitio 06.



Fotografía A. 2. 7.- Reconocimiento del sitio 07.



Fotografía A. 2. 9.- Reconocimiento del sitio 09.



Fotografía A. 2. 8.- Reconocimiento del sitio 08.



Fotografía A. 2. 10.- Reconocimiento del sitio 10.



Fotografía A. 2. 11.- Reconocimiento del sitio 11.



Fotografía A. 2. 12.- Reconocimiento del sitio 12.



Fotografía A. 2. 13.- Potencial minihidráulico 01.



Fotografía A. 2. 14.- Potencial minihidráulico 02.



Fotografía A. 2. 15.- Potencial minihidráulico 03.



Fotografía A. 2. 16.- Potencial minihidráulico 04.



Fotografía A. 2. 17.- Potencial minihidráulico 05.



Fotografía A. 2. 18.- Margen izquierda del canal 01.



Fotografía A. 2. 19.- Margen izquierda del canal 02.



Fotografía A. 2. 20.- Margen izquierda del canal 03.



Fotografía A. 2. 21.- Margen izquierda del canal 04.



Fotografía A. 2. 22.- Margen izquierda del canal 05.



Fotografía A. 2. 23.- Margen derecha del canal 01.



Fotografía A. 2. 24.- Margen derecha del canal 02.



Fotografía A. 2. 25.- Margen derecha del canal 03.



Fotografía A. 2. 26.- Margen derecha del canal 04.



Fotografía A. 2. 27.- Margen derecha del canal 05.



Fotografía A. 2. 28.- Margen derecha del canal 06.



Fotografía A. 2. 29.- Levantamiento topográfico - Parte 1 - 01.



Fotografía A. 2. 30.- Levantamiento topográfico - Parte 1 - 02.



Fotografía A. 2. 31.- Levantamiento topográfico - Parte 1 - 03.



Fotografía A. 2. 32.- Levantamiento topográfico - Parte 2 - 01.



Fotografía A. 2. 33.- Levantamiento topográfico - Parte 2 - 02.



Fotografía A. 2. 34.- Levantamiento topográfico - Parte 2 - 03.



Fotografía A. 2. 35.- Levantamiento topográfico - Parte 2 – 04.



Fotografía A. 2. 36.- Levantamiento topográfico - Parte 2 - 05.



Fotografía A. 2. 37.- Levantamiento topográfico - Parte 2 - 06.



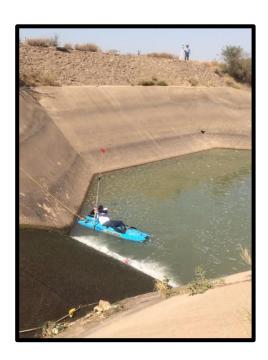
Fotografía A. 2. 38.- Levantamiento topográfico - Parte 3 - 01.



Fotografía A. 2. 39.- Levantamiento topográfico - Parte 3 - 02.



Fotografía A. 2. 40.- Levantamiento topográfico - Parte 3 - 03.



Fotografía A. 2. 41.- Levantamiento topográfico - Parte 3 - 04.



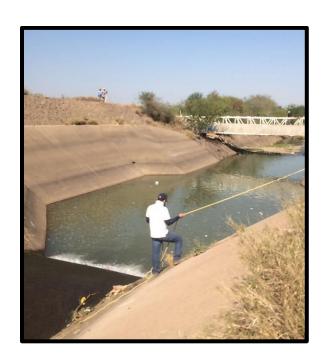
Fotografía A. 2. 42.- Levantamiento topográfico - Parte 3 - 05.



Fotografía A. 2. 43.- Levantamiento topográfico - Parte 3 - 06.



Fotografía A. 2. 44.- Levantamiento topográfico - Parte 3 - 07.



Fotografía A. 2. 45.- Levantamiento topográfico - Parte 3 - 08.



Fotografía A. 2. 46.- Levantamiento topográfico - Parte 3 - 09.



Fotografía A. 2. 47.- Levantamiento topográfico - Parte 3 - 10.



Fotografía A. 2. 48.- Estación de aforo CONAGUA ubicada sobre la margen izquierda del canal.



Fotografía A. 2. 49.- Vegetación en el sitio de emplazamiento de la minihidráulica 01.



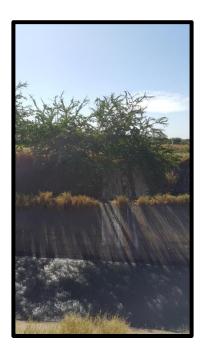
Fotografía A. 2. 50.- Vegetación en el sitio de emplazamiento de la minihidráulica 02.



Fotografía A. 2. 51.- Vegetación en el sitio de emplazamiento de la minihidráulica 03.



Fotografía A. 2. 52.- Vegetación en el sitio de emplazamiento de la minihidráulica 04.



Fotografía A. 2. 54.- Vegetación en el sitio de emplazamiento de la minihidráulica 06.



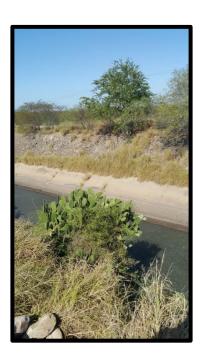
Fotografía A. 2. 53.- Vegetación en el sitio de emplazamiento de la minihidráulica 05.



Fotografía A. 2. 55.- Vegetación en el sitio de emplazamiento de la minihidráulica 07.



Fotografía A. 2. 56.- Vegetación en el sitio de emplazamiento de la minihidráulica 08.



Fotografía A. 2. 58.- Vegetación en el sitio de emplazamiento de la minihidráulica 10.



Fotografía A. 2. 57.- Vegetación en el sitio de emplazamiento de la minihidráulica 09.



Fotografía A. 2. 59.- Vegetación en el sitio de emplazamiento de la minihidráulica 11.



Fotografía A. 2. 60.- Vegetación en el sitio de emplazamiento de la minihidráulica 12.



Fotografía A. 2. 61.- Vegetación en el sitio de emplazamiento de la minihidráulica 13.



Fotografía A. 2. 62.- Vegetación en el sitio de emplazamiento de la minihidráulica 14.