



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – OBRAS HIDRÁULICAS

DIAGNÓSTICO Y ESTRATEGIAS PARA UN APROVECHAMIENTO
HIDRÁULICO CON FINES DE GENERACIÓN DE ENERGÍA HIDROKINÉTICA
EN RÍOS, MEDIANTE EL USO DE LAS HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS FODA Y
PEST

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
RENAN MANUEL VELASCO ZENTENO

TUTOR PRINCIPAL
M. EN I. VÍCTOR FRANCO, INSTITUTO DE INGENIERÍA

CIUDAD DE MÉXICO, SEPTIEMBRE 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. JESÚS GRACIA SÁNCHEZ

Secretario: DR. RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA

Vocal: M. EN I. VÍCTOR FRANCO

1^{er}. Suplente: DR. OSCAR ARTURO FUENTES MARILES

2^{d o}. Suplente: DRA. MARITZA LILIANA ARGANIS JUÁREZ

Lugar donde se realizó la tesis: Cuernavaca Morelos, México.

TUTOR DE TESIS:

M. en I. VÍCTOR FRANCO

FIRMA

*Instruye al niño en su carrera.
Aun cuando fuere viejo, no se apartará de ella
Proverbios 22:6*

*El principio de la sabiduría, es honrar a Dios.
Proverbios 1:7*

Dedicatoria

A Dios.

Porque Él es el camino, la verdad, y la vida.

A mi padre, Víctor.

Por ser para mí el ser humano que más admiro, respeto y escucho.
Por la sabiduría que me expresa en sus palabras, en sus acciones.
Porque me inspira a ser mejor cada día.
Porque a través de su ejemplo, decidí heredar la profesión.
Porque nunca dejaré de aprender de él.

A mi madre, Adelita.

Por enseñarme la importancia de la espiritualidad y presencia de Dios en mi vida.
Por pelear siempre para lograr la unidad de la familia, a pesar de la distancia.
Por su visión de formar un hogar, una familia, que fuese la base de mi educación.
Por transmitirme su energía, felicidad y amor por la vida todas las mañanas.

A mi hermana, Xóchitl.

Por ser para mí un ejemplo de una mujer fuerte e inteligente.
Por contagiarme de su optimismo y prudencia.
Por favorecer siempre la comunicación entre nosotros.

A mi novia, Diana.

Por su amor incondicional, apoyo, paciencia y calidez.
Por ser un ejemplo para mí de valentía y coraje en la defensa de su felicidad.
Por ser una parte indispensable de los proyectos que forman mi vida.
Porque siempre brilla a través de su belleza externa e interna.

Ustedes, son mi fuerza. Los amo.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por la oportunidad que me brindó de acceder a educación de la más alta calidad y prestigio, gracias a la excelencia de sus docentes.

Al Maestro Víctor Franco. Admirador de las etimologías, la palabra *maestro* viene del latín *magister*, término dado a la persona de gran experiencia y conocimiento, y que por lo tanto, tiene la facultad de dirigir, ordenar, enseñar. Gracias por ser para mí un *maestro* en todo momento. Por las conversaciones en temas de ingeniería y ajenos a ella, de las que aprendí grandes cosas como que la ingeniería civil es tan amplia, que difícilmente se alcanza a saberlo todo sobre ella, pero bien vale la pena esforzarse, y que un ingeniero civil se debe caracterizar por hablar siempre con la verdad sin importar las consecuencias. Mi más profundo agradecimiento hacia él por su atención, consejo y tiempo. Ha sido un placer trabajar bajo su dirección y experiencia.

A mi centro de trabajo en Comisión Federal de Electricidad. Porque en el ejercicio de la profesión en esta empresa, pude confirmar la importancia del tema hídrico y energético en el desarrollo de un país, la relación intrínseca existente entre ambos recursos, y la importancia en la planeación de infraestructura necesaria para hacer una adecuada gestión de ambos ejes estratégicos.

A Jorge Cortés, compañero de la maestría y gran amigo mío. A Raúl Becerra, Luis Rodríguez y Gerardo Román, quienes en distintas etapas, mostraron interés en el trabajo y quienes han aportado de distintas maneras a mi proceso de formación.

A la Dra. Maritza Arganis, al Dr. Jesús Gracia, Dr. Oscar Fuentes y Dr. Ramón Domínguez, con quienes tuve la oportunidad de tomar clases, y quienes enriquecieron el trabajo a través de sus recomendaciones.

ABSTRACT

There is energy contained in the movement of water, some part of it could be converted into electrical energy for its consumption by using Hydrokinetic Energy Generation Technologies (HEGT) in rivers. This is an emerging technology with few cases of real application around the world, none of them in Mexico. This work makes a diagnosis of the development of HEGT in some of the rivers in Mexico, by studying the **P**olitical, **E**conomic, **S**ocial and **T**echnological macro-environmental factors that may influence its development, to conform what it is called, the **PEST** analysis. Subsequently, this work studies the characteristics that belongs to the HEGT in rivers, which places it in an advantage position (**S**trengths) and disadvantage (**W**eaknesses) over other technologies, as well as external elements of the HEGT that could be taken for its benefit (**O**pportunities) or might damage the development (**T**hreats) of the hydrokinetic technology, in what it is called, the **SWOT** analysis.

From the **PEST** analysis, it is concluded that:

The Political macro-environmental factors do benefit the development of the HEGT in rivers.

The Economical macro-environmental factors do not benefit the development of the HEGT in rivers.

The Social macro-environmental factors do benefit the development of the HEGT in rivers.

The Technological macro-environmental factor do benefit the development of the HEGT in rivers.

Both, PEST and SWOT analysis, are supported by activities such as geographic information system management, population data analysis, energy assessment through a hydraulic model, rivers identifications and their flow rate characteristics.

The diagnosis it is presented as an SWOT matrix.

This work concludes with the proposal of a strategy with the aim of promoting the development of the HEGT in rivers that focuses in two-work axis: Resource Assessment and Development of technology.

Specific activities, expected results and involved stakeholders are proposed.

The Hydrokinetic Energy Generation Technologies in rivers satisfy different kind of needs than those that conventional hydropower satisfies. This is the reason why both types of technologies should be considered as complementary technologies and not substitutes.

RESUMEN

Existe energía contenida en el movimiento del agua, de la cual, una parte de ella podría ser convertida en energía eléctrica para su consumo por medio de las Tecnologías de Generación de Energía Hidrocinética (TGEH) en ríos.

Se trata de una tecnología emergente con pocos casos de aplicación en el mundo, ninguno de ellos en México. El presente trabajo realiza un diagnóstico del desarrollo de las TGEH en algunos de los ríos de México, por medio del estudio de los factores del macro-entorno Político, Económico, Social y Tecnológico que pueden influir en el desarrollo de la tecnología. A este estudio se le denomina el análisis **PEST**. A continuación, el trabajo estudia las características pertenecientes a las TGEH en ríos, que las coloca en una posición de ventaja (**F**ortalezas) o desventaja (**D**ebilidad) sobre otras tecnologías, así como elementos externos a las TGEH que podrían ser aprovechados para su beneficio (**O**portunidades) o perjudicar (**A**menazas) el desarrollo de la tecnología hidrocinética, en lo que se le denomina, el análisis **FODA**.

Del análisis **PEST**, se concluye que:

Los factores del macro-entorno Político benefician a las TGEH en ríos.

Los factores del macro-entorno Económico no benefician a las TGEH en ríos.

Los factores del macro-entorno Económico benefician a las TGEH en ríos.

Los factores del macro-entorno Económico benefician a las TGEH en ríos.

Tanto el análisis PEST como el FODA, fueron fundamentados y respaldados con actividades tales como el manejo de sistemas de información geográfica, análisis de datos poblacionales, estimación de energía a través de un modelo hidráulico, identificación de ríos y las características en sus gastos.

El diagnóstico se presenta en una matriz FODA.

El trabajo concluye con la propuesta de una estrategia que tiene como objetivo, promover el desarrollo de las TGEH en ríos, que se centre en dos ejes de trabajo: *Evaluación de Recursos y Desarrollo de tecnología*. Como parte de la estrategia, se establecen actividades específicas, resultados esperados y así como a los actores involucrados.

Las Tecnologías de Generación de Energía Hidrocinética en ríos satisfacen diferentes necesidades que aquellas que satisface la hidroeléctrica convencional, razón por la cual, ambas tecnologías deben visualizarse como complementarias y no sustitutas.

CONTENIDO

TABLAS	11
FIGURAS	12
1. INTRODUCCIÓN	15
1.1 PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	15
1.2 JUSTIFICACIÓN Y ALCANCE DEL ESTUDIO	16
1.3 ESTRUCTURA DEL TRABAJO	17
2. APROVECHAMIENTOS HIDRÁULICOS CON FINES DE GENERACIÓN DE ENERGÍA HIDROCINÉTICA EN RÍOS	18
2.1 ASPECTOS GENERALES DE LA TECNOLOGÍA	18
2.1.1 Definición	18
2.1.2 Principio de su funcionamiento	19
2.1.3 Estatus de la Tecnología	21
2.2 ASPECTOS PARTICULARES DE LA TECNOLOGÍA	22
2.2.1 Elementos que componen al aprovechamiento hidráulico	22
2.2.2 Turbinas a flujo libre	22
2.2.3 Turbinas en ducto	24
2.2.4 Anclaje y sujeción de las máquinas	25
2.3 ESTADO ACTUAL DE LA TECNOLOGÍA Y SUS DISPOSITIVOS	27
2.3.1 Verdant Power	28
2.3.2 RER Hydro	28
2.3.3 Rivgen	29
2.3.4 Hydro Green Energy LLC	29
2.3.5 Tocardo	30
2.3.6 Smart Hydro	30
2.3.7 Hydroquest	31
2.3.8 Guinard Energies	31
2.3.9 EnCurrent turbine	32
2.4 ENFOQUES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA ENERGÍA APROVECHABLE	32
2.4.1 Por nivel de estudio	33
2.4.2 Por área de estudio	33
2.5 EJEMPLO DE ESTIMACIÓN DE ENERGÍA APROVECHABLE	33
2.5.1 Construcción de modelo hidráulico y calibración	33
2.5.2 Origen del parámetro de densidad de potencia	39
2.5.3 Estimación del parámetro de potencia y sus resultados	40
2.5.4 Energía aprovechable bajo consideraciones de las máquinas	51
3. METODOLOGÍA	57
3.1 DIAGNÓSTICO A TRAVÉS DEL ANÁLISIS PEST Y FODA	57
4. ANÁLISIS PEST	59
4.1 POLÍTICO	59
4.1.1 Ley de Transición Energética (LTE)	59
4.1.2 La Reforma Energética	62
4.1.3 Ley de la Industria Eléctrica (LIE)	63
4.1.4 Principios del funcionamiento del Mercado Eléctrico Mayorista	63
4.1.5 Sistema Eléctrico Nacional y su funcionamiento	67
4.1.6 Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Medio Ambiente (LGEEP)	71
4.1.7 Ley General de Cambio Climático (LGCC)	75
4.1.8 Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable(LGDFS)	76

4.1.9	<i>Mecanismos para impulsar el mercado de una gran variedad de tecnologías de energías limpias</i>	76
4.1.10	<i>Ley de Aguas Nacionales y su relación con los aprovechamientos hidráulicos</i>	77
4.1.11	<i>Compromisos adquiridos en política energética</i>	80
4.2	ECONÓMICO	80
4.2.1	<i>Economía de escala en aprovechamientos hidroeléctricos</i>	80
4.2.2	<i>Aspectos económicos de turbinas de baja carga al hilo de corriente</i>	81
4.2.3	<i>Escenario de precios de energía hidroeléctrica frente a diferentes tecnologías renovables y no renovables</i>	84
4.3	SOCIAL	88
4.3.1	<i>Situación del agua en México</i>	88
4.3.2	<i>Situación de la energía eléctrica en el país</i>	90
4.3.3	<i>Marginación, pobreza, y su relación con la falta de energía eléctrica</i>	91
4.3.4	<i>Conflictos sociales en proyectos de energía</i>	92
4.4	TECNOLÓGICO	94
4.4.1	<i>Planta hidroeléctrica convencional</i>	95
4.4.2	<i>Turbina</i>	99
4.4.3	<i>Aspectos particulares de las turbinas de baja carga en aprovechamientos al hilo de corriente</i>	106
4.4.4	<i>Fundamento y razón de ser de los aprovechamientos hidráulicos en México y sus diferentes tipos.</i>	111
4.4.5	<i>La Hidroelectricidad en México</i>	114
4.4.6	<i>Aspectos generales de la energía fotovoltaica</i>	117
4.4.7	<i>Aspectos generales de la energía eólica</i>	120
5.	ANÁLISIS FODA	123
5.1	FORTALEZAS	123
5.1.1	<i>Generación de energía eléctrica sin embalse</i>	123
5.1.2	<i>Manejo y transporte accesible</i>	124
5.1.3	<i>Generación de energía eléctrica renovable y limpia</i>	126
5.1.4	<i>Inversión menor en obra civil</i>	126
5.1.5	<i>Mayor certidumbre en la energía generada, que fuentes como la solar y eólica</i>	127
5.1.6	<i>Mayor energía que una turbina eólica de dimensiones similares</i>	129
5.1.7	<i>Precios competitivos en sistemas no conectados a la red, que sustituyan generadores diésel</i>	131
5.1.8	<i>Menor impacto ambiental que centrales hidroeléctricas convencionales</i>	131
5.1.9	<i>No requiere de infraestructura adicional para su funcionamiento</i>	132
5.2	OPORTUNIDADES	132
5.2.1	<i>La competencia dentro del mercado en México es inexistente</i>	132
5.2.2	<i>Chiapas como el tercer estado con mayor carencia de energía, mayor agua renovable del país, mayor generación hidroeléctrica</i>	133
5.2.3	<i>Legislación favorable para las energías renovables y limpias</i>	135
5.2.4	<i>Legislación ambiental y de cambio climático favorable para su desarrollo.</i>	135
5.2.5	<i>Mejorar la calidad de vida de poblaciones a través de un aprovechamiento hidrocínético</i>	136
5.2.6	<i>Oportunidades ante las turbinas de baja carga al hilo de corriente</i>	140
5.2.7	<i>Aprovechamiento de los gastos turbinados de centrales hidroeléctricas, y Chiapas como el estado que posee el sistema hidroeléctrico más grande de México</i>	141
5.2.8	<i>Aprovechamiento de grandes canales de riego</i>	142
5.2.9	<i>Chiapas cuenta con ríos con existencia del recurso para generar energía, y carece de la misma</i>	142
5.2.10	<i>Existencia de comunidades cercanas a ríos, sin acceso a energía eléctrica.</i>	151
5.2.11	<i>Posición de los aprovechamientos hidrocínéticos ante la Ley de Aguas Nacionales</i>	155
5.2.12	<i>Condiciones climatológicas permiten la complementación de la generación de energía hidrocínética con otras fuentes de generación de energía renovable</i>	157

5.2.13	<i>Herramienta de gestión social para proyectos hidroeléctricos</i>	159
5.2.14	<i>Colaborar con los compromisos adquiridos del país en reducción de emisiones y generación de energía limpia</i>	159
5.3	DEBILIDADES	160
5.3.1	<i>Potencias instalables pequeñas, en la clasificación de microcentrales hidroeléctricas</i>	160
5.3.2	<i>Requiere de constante mantenimiento y operación</i>	161
5.3.3	<i>Implicaciones del medio en el que opera</i>	161
5.3.4	<i>Energía menos predecible que una central hidroeléctrica convencional</i>	162
5.3.5	<i>Tecnología desarrollada y fabricada en el extranjero, asociado al escaso conocimiento del funcionamiento de las máquinas en ríos mexicanos</i>	162
5.3.6	<i>Eficiencia alcanzable inferior a 0.5</i>	162
5.3.7	<i>Costos de kilowatt nivelado altos frente a otras fuentes de generación energía renovable</i>	163
5.3.8	<i>Baja competitividad frente a las fuentes de energía que satisfacen la base de la curva de demanda de energía</i>	164
5.4	AMENAZAS	164
5.4.1	<i>Proyectos de baja carga al hilo de corriente pueden ser más atractivos</i>	164
5.4.2	<i>Susceptibilidad a ser vandalizada</i>	165
5.4.3	<i>Generación fotovoltaica y eólica a baja escala, como principal competencia</i>	165
5.4.4	<i>Desconocimiento de sitios propensos a ser instalados</i>	165
5.4.5	<i>Requiere del conocimiento de características específicas del sitio para determinar su viabilidad técnica</i>	165
5.4.6	<i>Inexistencia de un marco legal que proporcione certidumbre a interesados en invertir en investigación y desarrollo de la tecnología</i>	167
5.4.7	<i>Falta de cooperación interinstitucional para la obtención de información</i>	168
5.4.8	<i>Escombros flotantes</i>	168
6.	DIAGNÓSTICO	169
6.1	INTERPRETACIÓN Y RESULTADOS DEL ANÁLISIS FODA	169
7.	ESTRATEGIAS	172
7.1	ESTIMACIÓN DEL RECURSO	174
7.1.1	<i>Potencial Teórico Convencional</i>	174
7.1.2	<i>Potencial Recuperable</i>	175
7.1.3	<i>Potencial teórico hidrocínético</i>	177
7.1.4	<i>Potencial Técnico Aprovechable</i>	179
7.1.5	<i>Potencial práctico</i>	180
7.2	TECNOLOGÍA	184
7.2.1	<i>Diseño y optimización de la tecnología para extracción de energía</i>	184
7.2.2	<i>Aspectos legales</i>	185
7.2.3	<i>Aspectos ambientales</i>	186
8.	CONCLUSIÓN	189
	APÉNDICE	190
	DEFINICIONES Y CONCEPTOS GENERALES ASOCIADOS A LA ENERGÍA	190
	<i>Trabajo</i>	190
	<i>Energía</i>	190
	<i>Energía eléctrica</i>	192
	<i>Energía potencial</i>	192
	<i>Energía cinética</i>	192
	<i>Energía mecánica</i>	193
	<i>Energía renovable</i>	193
	<i>Potencia y Capacidad instalada</i>	193
	<i>Generación</i>	194
	<i>Factor de planta</i>	195
	<i>Energía media anual</i>	195

<i>Energía media anual generada en el pico</i>	195
<i>Energía media anual generada en base</i>	195
<i>Energía firme</i>	196
<i>Energía secundaria</i>	196
<i>Matrices de factores de conversión</i>	196
BIBLIOGRAFÍA	197

Tablas

TABLA 2.1 PRIORIDADES Y CARACTERÍSTICAS EN EL CICLO DE VIDA DE UNA TECNOLOGÍA (UTTERBACK, 1994)	21
TABLA 2.2 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES. VERDANT POWER	28
TABLA 2.3 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES. RER HYDRO POWER	28
TABLA 2.4 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES. RIVGEN	29
TABLA 2.5 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES. HYDRO GREEN ENERGY LLC	29
TABLA 2.6 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES. TOCARD	30
TABLA 2.7 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES. SMART HYDRO	30
TABLA 2.8 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES. HYDROQUEST	31
TABLA 2.9 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES. GUINARD ENERGIES	31
TABLA 2.10 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES. ENCURRENT TURBINE	32
TABLA 2.11 ERROR CUADRÁTICO DE LOS VALORES DE N MANNING MODELADOS	36
TABLA 2.12 GASTOS CORRESPONDIENTES AL NÚMERO DE UNIDADES PUESTAS EN OPERACIÓN	40
TABLA 2.13 % DE SECCIONES TRANSVERSALES CON DETERMINADA DENSIDAD DE POTENCIA Y VELOCIDAD POR UNIDAD DE OPERACIÓN	41
TABLA 2.14 UMBRALES DE APLICACIÓN DE ECUACIONES PARA LA FUNCIÓN QUE MODELA LA CURVA DE GASTOS VS DENSIDAD DE POTENCIA	52
TABLA 2.15 UMBRALES DE APLICACIÓN DE ECUACIONES PARA LA FUNCIÓN QUE MODELA LA CURVA DE GASTOS VS TIRANTE.	52
TABLA 2.16 EJEMPLO DE MEMORIA DE CÁLCULO DE ENERGÍA GENERADA POR MÁQUINAS DE DIFERENTE DIÁMETRO.	53
TABLA 2.17 % DEL AÑO OPERADO PARA LOS DIÁMETROS ANALIZADOS.	54
TABLA 4.1 POLÍTICAS OBLIGATORIAS DE LA ESTRATEGIA DE TRANSICIÓN PARA PROMOVER EL USO DE TECNOLOGÍAS Y COMBUSTIBLES MÁS LIMPIO	60
TABLA 4.2 ACTIVIDADES COMPRENDIDAS EN LA INDUSTRIA ELÉCTRICA	63
TABLA 4.3 RESUMEN DE LAS TRANSACCIONES INTEGRADAS EN EL MERCADO ELÉCTRICO MAYORISTA	65
TABLA 4.4 ACTIVIDADES QUE REQUIEREN MANIFESTACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL Y SUS EXCEPCIONES	73
TABLA 4.5 ACTIVIDADES QUE REQUIEREN MIA REGIONAL Y PARTICULAR	74
TABLA 4.6 INFORMACIÓN CONTENIDA EN UNA MIA REGIONAL Y PARTICULAR	75
TABLA 4.7 MECANISMOS PARA IMPULSAR EL MERCADO DE ENERGÍAS LIMPIAS Y SUS ELEMENTOS	77
TABLA 4.8 DIFERENCIAS ENTRE USO, EXPLOTACIÓN Y APROVECHAMIENTO	78
TABLA 4.9 COMPROMISOS PARA REDUCCIÓN DE EMISIONES Y METAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍAS LIMPIAS (CONGRESO DE LA UNIÓN, 2016)	80
TABLA 4.10 RANGO DE COSTOS ASOCIADOS A TAMAÑOS DE CENTRALES HIDROELÉCTRICAS	81
TABLA 4.11 AHORRO EN COSTO DE CASA DE MÁQUINAS. (CHAPUS & HADDAD)	82
TABLA 4.12 COSTOS INDICATIVOS PARA DIFERENTES TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA, ASOCIADO A POTENCIAS INSTALADAS. (HATCH ENERGY, 2008)	87
TABLA 4.13 CLASIFICACIÓN DE TAMAÑO DE CORTINAS POR ALMACENAMIENTO Y ALTURA. USACE	106
TABLA 4.14 CAPACIDAD INSTALADA PARA PAÍSES	114
TABLA 4.15 CENTRALES HIDROELÉCTRICAS UBICADAS EN MÉXICO, CON CARACTERÍSTICAS DE ALMACENAMIENTO-ALTURA CORRESPONDIENTES A APROVECHAMIENTOS AL HILO DE CORRIENTE.	116
TABLA 5.1 POSTURA DE LA LEGISLACIÓN ACTUAL SOBRE LA ENERGÍA RENOVABLE	126

TABLA 5.2 CLASIFICACIÓN DE CENTRALES HIDROELÉCTRICAS EN FUNCIÓN DE SU POTENCIA INSTALADA (SENER, BOLETÍN DE ENERGÍAS LIMPIAS VOLUMEN 3, 2017)	160
TABLA 5.3 RESUMEN DE POTENCIAS INSTALABLES DE APROVECHAMIENTOS HIDROKINÉTICOS EN FASE PRECOMERCIAL Y COMERCIAL	161
TABLA 5.4 VARIABLES DE INFLUENCIA EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA HIDROKINÉTICA Y SUS VALORES	162
TABLA 5.5 VELOCIDAD ASOCIADA AL GASTO MEDIO DE EEHH SALTO DEL AGUA, OXOLOTLÁN Y PIJIJAPAN	167
TABLA 6.1 DIAGNÓSTICO A TRAVÉS DE UNA MATRIZ FODA	170
TABLA 7.1 MATRIZ INTEGRADORA DE LA ESTRATEGIA	173
TABLA 7.2 MATRIZ DE ACTORES INVOLUCRADOS Y SUS RESPONSABILIDADES EN EL EJE ESTRATÉGICO DE LA ESTIMACIÓN DEL RECURSO	183
TABLA 7.3 MATRIZ DE ACTORES INVOLUCRADOS Y SUS RESPONSABILIDADES EN EL EJE ESTRATÉGICO DEL ESTUDIO DE LA TECNOLOGÍA	188

Figuras

FIGURA 2.1 FUERZAS RESULTANTES EN UNA SECCIÓN TIPO DE UN ALABE	19
FIGURA 2.2 CURVA DE POTENCIA TÍPICA DE TURBINAS HIDROKINÉTICAS (ISHAK & MURATOGLU, 2013)	20
FIGURA 2.3 TURBINA DE EJE HORIZONTAL	23
FIGURA 2.4 TURBINA DE EJE VERTICAL	24
FIGURA 2.5 TURBINA HELICOIDAL	24
FIGURA 2.6 TURBINA EN DUCTO	25
FIGURA 2.7 EJEMPLO DE ANCLAJE DE PESO MUERTO	25
FIGURA 2.8 EJEMPLO DE ANCLAJE AL MATERIAL AL FONDO DEL RÍO	26
FIGURA 2.9 EJEMPLO DE ANCLAJE DE EMPOTRAMIENTO	26
FIGURA 2.10 EJEMPLO DE ANCLAJE DE EMPOTRAMIENTO	27
FIGURA 2.11 EJEMPLO DE ANCLAJE POR PESO PROPIO DE LA MÁQUINA	27
FIGURA 2.12 TRABAJO DE LA BATIMETRÍA DEL CAUCE EN HEGRAS 5.0.1	34
FIGURA 2.13 REGISTROS DE ELEVACIONES ASOCIADAS A GASTOS EN LA E.H GRIJALVA	35
FIGURA 2.14 CURVAS MODELADAS POR HEGRAS	35
FIGURA 2.15 CURVAS MODELADAS CADENAMIENTO 5+700	37
FIGURA 2.16 CURVAS MODELADAS CADENAMIENTO 3+100	37
FIGURA 2.17 CURVAS MODELADAS CADENAMIENTO 0+350	38
FIGURA 2.18 DOMINIO DEL MODELO Y PUNTOS DE VALIDACIÓN	38
FIGURA 2.19 PERFILES DE LOS DIFERENTES ESCENARIOS DE UNIDADES EN OPERACIÓN, E INFLUENCIA DEL EMBALSE DE LA C.H MALPASO	39
FIGURA 2.20 % DE SECCIONES TRANSVERSALES CON DETERMINADA POTENCIA Y VELOCIDAD POR UNIDAD DE OPERACIÓN	41
FIGURA 2.21 TIRANTES VS DENSIDAD DE POTENCIA. 1 UNIDAD EN OPERACIÓN	42
FIGURA 2.22 TIRANTES VS DENSIDAD DE POTENCIA. 2 UNIDADES EN OPERACIÓN	42
FIGURA 2.23 TIRANTES VS DENSIDAD DE POTENCIA. 3 UNIDADES EN OPERACIÓN	43
FIGURA 2.24 TIRANTES VS DENSIDAD DE POTENCIA. 4 UNIDADES EN OPERACIÓN	43
FIGURA 2.25 TIRANTES VS DENSIDAD DE POTENCIA. 5 UNIDADES EN OPERACIÓN	44
FIGURA 2.26 TIRANTES VS DENSIDAD DE POTENCIA. 6 UNIDADES EN OPERACIÓN	44
FIGURA 2.27 TIRANTES VS DENSIDAD DE POTENCIA. 7 UNIDADES EN OPERACIÓN	45
FIGURA 2.28 TIRANTES VS DENSIDAD DE POTENCIA. 8 UNIDADES EN OPERACIÓN	45
FIGURA 2.29 PERFIL DE LÁMINA DE AGUA Y DENSIDAD DE POTENCIA 1 UNIDAD EN OPERACIÓN	46
FIGURA 2.30 PERFIL DE LÁMINA DE AGUA Y DENSIDAD DE POTENCIA 2 UNIDADES EN OPERACIÓN	46
FIGURA 2.31 PERFIL DE LÁMINA DE AGUA Y DENSIDAD DE POTENCIA 3 UNIDADES EN OPERACIÓN	47
FIGURA 2.32 PERFIL DE LÁMINA DE AGUA Y DENSIDAD DE POTENCIA 4 UNIDADES EN OPERACIÓN	47
FIGURA 2.33 PERFIL DE LÁMINA DE AGUA Y DENSIDAD DE POTENCIA 5 UNIDADES EN OPERACIÓN	48
FIGURA 2.34 PERFIL DE LÁMINA DE AGUA Y DENSIDAD DE POTENCIA 6 UNIDADES EN OPERACIÓN	48
FIGURA 2.35 PERFIL DE LÁMINA DE AGUA Y DENSIDAD DE POTENCIA 7 UNIDADES EN OPERACIÓN	49

FIGURA 2.36 PERFIL DE LÁMINA DE AGUA Y DENSIDAD DE POTENCIA 8 UNIDADES EN OPERACIÓN	49
FIGURA 2.37 SECCIÓN TRANSVERSAL DEL CADENAMIENTO 6+300 Y COMPORTAMIENTO DE SU VELOCIDAD PARA DIFERENTES GASTOS	50
FIGURA 2.38 CURVA DE GASTOS VS DENSIDAD DE POTENCIA	51
FIGURA 2.39 CURVAS GASTOS VS TIRANTES	52
FIGURA 2.40 GENERACIÓN ANUAL EN KW·H Y HORAS DE OPERACIÓN PARA EFICIENCIA DEL 30 Y 45%	54
FIGURA 2.41 PERMANENCIA DE GASTOS TURBINADOS DE LA C.H CHICOASÉN	55
FIGURA 4.1 PORCENTAJE DE CAPACIDAD INSTALADA DE ENERGÍAS RENOVABLES EN MÉXICO, (IRENA, 2016)	61
FIGURA 4.2 GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE POR TECNOLOGÍAS (SENER, SISTEMA DE INFORMACIÓN DE ENERGÍA, 2016)	61
FIGURA 4.3 REGIONES DE CONTROL DEL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL (SENER, PRODESEN, 2016)	67
FIGURA 4.4 PLATAFORMA WEB DE CONSULTA EN TIEMPO REAL, DE GENERACIÓN Y DEMANDA DE ENERGÍA DEL SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL (CENACE, 2016)	68
FIGURA 4.5 VARIACIÓN DE DEMANDA Y GENERACIÓN DE ENERGÍA POR REGIONES.	69
FIGURA 4.6 CURVA DE PRONÓSTICO DE DEMANDA, DEMANDA Y GENERACIÓN REAL.	70
FIGURA 4.7 DEMANDA DE ENERGÍA Y TIPOS DE TECNOLOGÍA UTILIZADAS PARA SATISFACERLA	71
FIGURA 4.8 INVERSIÓN POR KW INSTALADO POR CARGA Y POTENCIA (KALDELLIS & KONDILLI , 2011)	83
FIGURA 4.9 COSTO DE KW·H POR FUENTES DE ENERGÍA Y ZONAS ALREDEDOR DEL MUNDO.	85
FIGURA 4.10 COSTOS INDICATIVOS PARA DIFERENTES TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA, ASOCIADO A POTENCIAS INSTALADAS	88
FIGURA 4.11 AGUA RENOVABLE POR ENTIDAD FEDERATIVA	90
FIGURA 4.12 NÚMERO DE VIVIENDAS SIN ENERGÍA ELÉCTRICA POR ENTIDAD FEDERATIVA	91
FIGURA 4.13 PORCENTAJE DE VIVIENDAS SIN ENERGÍA VS ÍNDICE DE DESARROLLO HUMANO POR ENTIDAD FEDERATIVA	92
FIGURA 4.14 PERFIL DE OBRA DE GENERACIÓN EN CAVERNA	95
FIGURA 4.15 ESQUEMA EN PERFIL CON CASA DE MÁQUINAS EXTERIOR	97
FIGURA 4.16 ESQUEMA DE CONDUCCIÓN CON PANTALÓN	98
FIGURA 4.17 ENCAMISADO DE ACERO. SECCIÓN X-X´ Y VISTA ISOMÉTRICA	99
FIGURA 4.18 ESQUEMA EN PERFIL DE CASA DE MÁQUINAS PARA TURBINA FRANCIS	101
FIGURA 4.19 ESQUEMA EN PERFIL DE CASA DE MÁQUINAS PARA TURBINA PELTON	102
FIGURA 4.20 ESQUEMA EN PERFIL DE CASA DE MÁQUINAS PARA TURBINA KAPLAN	103
FIGURA 4.21 ESQUEMA EN PERFIL DE CASA DE MÁQUINAS PARA TURBINA BULBO	104
FIGURA 4.22 GRÁFICO DE SELECCIÓN PRELIMINAR DE TURBINA	105
FIGURA 4.23 POTENCIA INSTALADA EN PAÍSES 1980-2014	114
FIGURA 4.24 CELDA, MÓDULO Y ARREGLO. GENERACIÓN FOTOVOLTAICA	117
FIGURA 4.25 VARIACIÓN HORARIA DE LA IRRADIANCIA PARA LA GENERACIÓN FOTOVOLTAICA	118
FIGURA 4.26 VARIACIÓN GEOGRÁFICA DE LA IRRADIACIÓN PARA LA GENERACIÓN FOTOVOLTAICA	118
FIGURA 4.27 IRRADIACIÓN PARA EL MES DE MAYO	119
FIGURA 4.28 IRRADIACIÓN PARA EL MES DE NOVIEMBRE	119
FIGURA 4.29 EVOLUCIÓN DE LOS AEROGENERADORES	120
FIGURA 4.30 VARIACIÓN GEOGRÁFICA DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO.	121
FIGURA 4.31 VARIACIÓN HORARIA DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO.	122
FIGURA 4.32 VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO.	122
FIGURA 5.1 DIÁMETROS DE MÁQUINAS POR FABRICANTE	124
FIGURA 5.2 TRANSPORTE DE MÁQUINA AL SITIO	125
FIGURA 5.3 INSTALACIÓN CON EL APOYO DE LUGAREÑOS	125
FIGURA 5.4 GASTO MEDIO MENSUAL, SUBCUENCA RÍO LACANTÚN	127
FIGURA 5.5 GASTO MEDIO MENSUAL, SUBCUENCA RÍO EUSEBA	128
FIGURA 5.6 GASTO MEDIO MENSUAL, SUBCUENCA RÍO SECO	128
FIGURA 5.7 GASTO MEDIO MENSUAL, SUBCUENCA RÍO TZACONEJA	129
FIGURA 5.8 POTENCIA EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DE AGUA Y DIÁMETRO. TURBINA HIDROCINÉTICA	130
FIGURA 5.9 POTENCIA EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO Y DIÁMETRO. TURBINA EÓLICA	130

FIGURA 5.10 RANGO DE COSTOS NIVELADOS DE LA ENERGÍA. TURBINA HIDROKINÉTICA VS GENERADOR A BASE DE DIÉSEL	131
FIGURA 5.11 CANTIDAD DE AGUA RENOVABLE Y CARENCIA DE ENERGÍA POR ENTIDAD FEDERATIVA.	133
FIGURA 5.12 CARENCIA DE ENERGÍA POR ÁREA GEOESTADÍSTICA BÁSICA. ESTADO DE CHIAPAS	134
FIGURA 5.13 CARENCIA DE ENERGÍA POR MUNICIPIO. ESTADO DE CHIAPAS.	134
FIGURA 5.14 ÍNDICE DE MARGINACIÓN VS CARENCIA DE ENERGÍA. ESTADO DE CHIAPAS.	137
FIGURA 5.15 ÍNDICE DE DESARROLLO HUMANO VS CARENCIA DE ENERGÍA. ESTADO DE CHIAPAS.	138
FIGURA 5.16 ÍNDICE DE EDUCACIÓN VS CARENCIA DE ENERGÍA. ESTADO DE CHIAPAS.	138
FIGURA 5.17 ÍNDICE DE INGRESOS VS CARENCIA DE ENERGÍA. ESTADO DE CHIAPAS.	139
FIGURA 5.18 ÍNDICE DE SALUD VS CARENCIA DE ENERGÍA. ESTADO DE CHIAPAS.	139
FIGURA 5.19 PANORAMA DE LA CARENCIA DE ENERGÍA ASOCIADA A ESTACIONES HIDROMÉTRICAS	143
FIGURA 5.20 CURVAS DE PERMANENCIA PARA 24 SITIOS	150
FIGURA 5.21 IMAGEN SATELITAL LOCALIDAD PLAN DE GUADALUPE	151
FIGURA 5.22 IMAGEN SATELITAL LOCALIDADES HERMOSILLO Y CANDELARIA	152
FIGURA 5.23 IMAGEN SATELITAL LOCALIDADES AMADOR HERNÁNDEZ Y BENITO JUÁREZ	153
FIGURA 5.24 IMAGEN SATELITAL LOCALIDAD EL CARACOLITO	154
FIGURA 5.25 IMAGEN SATELITAL LOCALIDADES NUEVA LIBERTAD, LA PROVIDENCIA, SAN PEDRO Y SAN LUIS	154
FIGURA 5.26 APROVECHAMIENTOS HIDROKINÉTICOS EN LA LEY DE AGUAS NACIONALES	156
FIGURA 5.27 GASTOS MEDIOS MENSUALES VS IRRADIANCIA MEDIAMENSUAL SOBRE SITIO EN EL RÍO CAHUATÁN	157
FIGURA 5.28 GASTOS MEDIOS MENSUALES VS IRRADIANCIA MEDIAMENSUAL SOBRE SITIO EN EL RÍO NOVILLERO	158
FIGURA 5.29 GASTOS MEDIOS MENSUALES VS IRRADIANCIA MEDIA MENSUAL SOBRE SITIO EN EL RÍO HUEHUETÁN	158
FIGURA 5.30 GASTOS MEDIOS MENSUALES VS IRRADIANCIA MEDIA MENSUAL SOBRE SITIO EN EL RÍO HUEHUETÁN	159
FIGURA 5.31 COSTOS NIVELADOS DE LA ENERGÍA DE DIFERENTES TECNOLOGÍAS VS TURBINAS HIDROKINÉTICAS	163
FIGURA 5.32 CURVA DE GASTOS-VELOCIDADES DE LA EH SALTO DE AGUA (GRIJALVA-USUMACINTA)	166
FIGURA 5.33 CURVA DE GASTOS-VELOCIDADES DE LA EH OXOLOTLÁN (GRIJALVA-USUMACINTA)	166
FIGURA 5.34 CURVA DE GASTOS-VELOCIDADES DE LA EH PIJIAPAN (COSTA DE CHIAPAS)	167
FIGURA 6.1 ESTRUCTURA Y CONTENIDO DE LA MATRIZ FODA	169

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del estudio

Existe energía contenida en el movimiento natural del agua de los ríos, que por medio de la tecnología adecuada, una parte de ella podría ser convertida en energía eléctrica. Sin embargo, actualmente no se cuenta con la suficiente información y estudios sobre las posibilidades de este tipo de aprovechamientos en México.

La generación de energía hidrocínética, como se le llama esta tecnología, tiene como principal ventaja que:

- No necesita de una obra de contención (presa).
- No modifica sustancialmente el régimen del río.
- No genera afectaciones significativas al medio ambiente.

El objetivo del presente trabajo es estudiar y comprender el papel que desempeña la utilización de esta tecnología.

Para alcanzar dicho objetivo se presentan las siguientes preguntas

- ¿Cuál es el escenario político, económico, social y tecnológico del macro-entorno de la tecnología de generación de energía hidrocínética?
- ¿Cuáles son las fortalezas, las oportunidades, debilidades y amenazas de la tecnología?

Con base en los resultados obtenidos, se plantean también estas cuestiones

- ¿Cuál es el diagnóstico?
- ¿Qué estrategias se deben seguir para llevar a la realidad un aprovechamiento hidráulico con fines de generación de energía hidrocínética en ríos?
- ¿Qué ejes de acción se deben atender?
- ¿Qué actividades concretas?
- ¿Quiénes son los actores responsables de llevar a la ejecución estas acciones?

En este trabajo se formula un diagnóstico de los aprovechamientos hidráulicos con fines de generación hidrocínética para aquellos ríos, que permitan proponer las estrategias a seguir en determinados ejes de acción, y así favorecer el estudio y la eventual puesta en marcha de la tecnología propuesta

Se pretende alcanzar los objetivos, con la aplicación de las herramientas que analicen el macro-entorno de la tecnología desde la perspectiva Política, Económica, Social y Tecnológico de la tecnología, y posteriormente, estudiar de manera concreta las Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas

1.2 Justificación y alcance del estudio

Las razones que dan origen al desarrollo del presente trabajo de investigación, se fundamentan en que el estudio de temas concernientes a los aprovechamientos de energía hidrocínética en México es reducido, y actualmente existe una mayor cantidad de incertidumbre que certezas sobre la utilidad de la tecnología, su funcionamiento, y posibilidades de aplicación en el país.

El trabajo de investigación busca construir un diagnóstico multidisciplinario sobre la situación de la tecnología en México, y que a su vez motive a profesionistas interesados en el tema a profundizar el conocimiento sobre aquellos aspectos que favorezcan su estudio e implementación, a través de la propuesta de estrategias.

Para reducir la cantidad de energía generada por medios no renovables y contaminantes, la energía contenida en el movimiento de los ríos no debería ser desaprovechada. Sin embargo, los aprovechamientos hidráulicos para generación de energía hidrocínética en ríos son reducidos alrededor del mundo, en México son nulos. La principal razón obedece a que la tecnología asociada a estos aprovechamientos es emergente y la evaluación del recurso disponible para su funcionamiento actualmente es escasa. Países como Estados Unidos, Canadá, Alemania, Francia y Holanda se encuentran realizando esfuerzos respecto al aprovechamiento de este tipo de energía en sus ríos, en miras de incrementar la matriz de energía renovable en ellos.

El trabajo demuestra que las herramientas de análisis PEST (Político, Económico, Social y Tecnológico) y FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas) son útiles en la construcción de un diagnóstico para tecnologías de generación de energía emergente, lo que motivó a su utilización en el trabajo, ya que estas herramientas organizan desde una perspectiva multidisciplinaria, aquellos aspectos internos y externos a la tecnología, que favorecen y perjudican su estudio e implementación.

1.3 Estructura del trabajo

Se presenta a continuación, la estructura del trabajo y su contenido por capítulo.

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN: Se establece la necesidad del trabajo, y se fundamenta la situación actual sobre el conocimiento de la tecnología en México. Se plantean las preguntas a las cuales se buscará dar respuesta a lo largo del trabajo.

Capítulo 2 APROVECHAMIENTOS HIDRÁULICOS CON FINES DE GENERACIÓN DE ENERGÍA HIDROKINÉTICA: Se definen este tipo de aprovechamientos. Se describen las principales características propias de la tecnología. Se presenta el procedimiento realizado para la estimación de la energía aprovechable, a través de un ejemplo de aplicación.

Capítulo 3 METODOLOGÍA: Se definen los análisis PEST y FODA, y se fundamenta su utilización como una herramienta útil para la construcción del diagnóstico de una tecnología emergente, en este caso, los aprovechamientos hidráulicos con fines de generación de energía hidrocínética en ríos.

Capítulo 4 ANÁLISIS PEST: Se realiza el análisis Político, Económico, Social y Tecnológico del macro-entorno de la tecnología

Capítulo 5 ANÁLISIS FODA: Se realiza el análisis de las Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas de la tecnología, fundamentado en el análisis PEST y en las características propias de la tecnología, estudiadas en el Capítulo 2

Capítulo 6 DIAGNÓSTICO: Se presenta el diagnóstico de la tecnología, en un formato de matriz FODA que sintetiza los resultados, para una consulta práctica y dinámica de parte del lector, y con el entendido de que su fundamento se encuentra, para su consulta, en los capítulos anteriores.

Capítulo 7 ESTRATEGIAS: En base al diagnóstico obtenido, se propone ejes de acción con actividades concretas, resultados y actores responsables, que en conjunto conforman una estrategia para impulsar el estudio e implementación de la tecnología en el país.

Capítulo 8 CONCLUSIÓN: Se realiza el comentario final del trabajo, indicando la situación favorable o no, de los elementos del análisis PEST.

Capítulo Apéndice: En donde se establecen conceptos básicos, definiciones y unidades, las cuales son utilizadas a lo largo del trabajo.

2. APROVECHAMIENTOS HIDRÁULICOS CON FINES DE GENERACIÓN DE ENERGÍA HIDROKINÉTICA EN RÍOS

2.1 Aspectos generales de la tecnología

2.1.1 Definición

La Comisión Federal Reguladora de Energía de los Estados Unidos (FERC, por sus siglas en inglés) define a los aprovechamientos hidrocineéticos como “Proyectos que generan electricidad proveniente del movimiento de las olas, o directamente del flujo de agua en corrientes oceánicas, mareas y cursos de agua tierra adentro” (FERC, 2016).

Otra definición de un aprovechamiento hidrocineético, es aquella que establece que son “proyectos que producen energía eléctrica renovable, extrayendo la energía cinética generada por el movimiento de los cuerpos de agua” (Union of Concerned Scientists, 2016).

Con las definiciones anteriormente establecidas, es claro que la energía se extrae del movimiento del fluido a cierta velocidad, y no de la carga que pueda proporcionar el fluido. Esta es la más importante diferencia que existe entre los aprovechamientos hidroeléctricos convencionales, y los aprovechamientos hidrocineéticos: La ausencia en estos últimos de una cortina que proporcione carga para aprovechar su energía potencial.

El objetivo del presente trabajo es enfocarse en el “**Aprovechamiento Hidráulico con fines de generación de energía hidrocineética en ríos**”, a lo que en lo sucesivo también se le llamara “**Aprovechamiento Hidrocineético**” o “**La Tecnología**” y la que se definirá como el conjunto de infraestructura necesaria para producir energía eléctrica, extrayendo la energía cinética generada por el movimiento de los cuerpos de agua en ríos y canales.

2.1.2 Principio de su funcionamiento

El principio en el cual se basan los **Aprovechamiento Hidráulico con fines de generación de energía hidrocínética en ríos o aprovechamientos hidrocínicos**, es similar al que rige a los sistemas que aprovecha la energía eólica. La energía cinética contenida en la corriente del fluido, es utilizada para hacer rotar un convertidor de energía electromecánica y de esta forma, generar energía eléctrica. Estas máquinas se componen de un sistema de propelas con álabes las cuales rotan alrededor de un eje, debido a los efectos de las fuerzas hidrodinámicas generadas por el flujo de la corriente.

Cuando el fluido entra en contacto con la superficie del álabes, crea dos tipos de fuerzas aerodinámicas. Arrastre (*drag*) la cual se presenta en la dirección y sentido del fluido, y la de sustentación (*lift*) en dirección perpendicular a la del fluido. La interacción de ambas fuerzas, o la acción de una de ellas, son utilizadas para generar fuerzas necesarias que hagan rotar los álabes de una turbina. (Boston University College of Engineering, 2016). En la Figura 2.1 se muestra de manera esquemática, las fuerzas involucradas en el movimiento de un álabes.

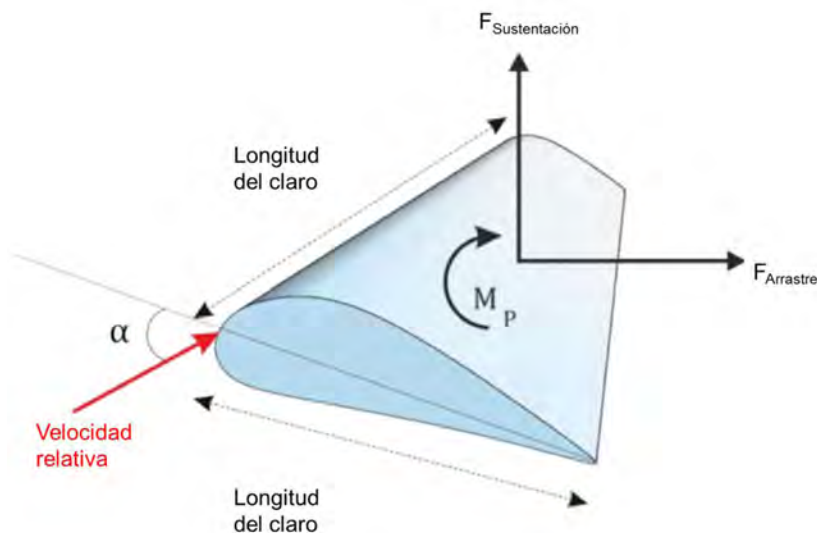


Figura 2.1 Fuerzas resultantes en una sección tipo de un álabes

Finalmente, la energía extraída del sistema será proporcional a la velocidad relativa, que es la suma de los vectores de velocidad axial y tangencial a las palas.

En la Figura 2.2 se muestra una curva tipo del comportamiento de la potencia alcanzada por las turbinas hidrocínicas, contra los valores de velocidad por medio de los cuales operan este tipo de máquinas.

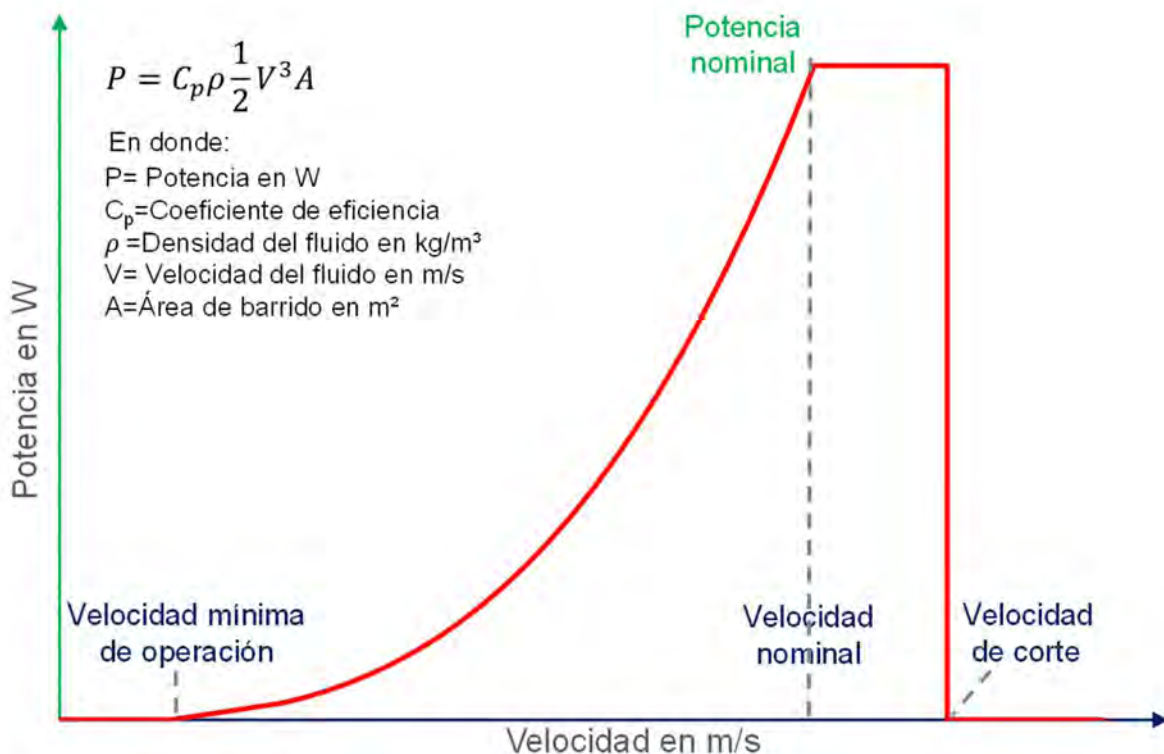


Figura 2.2 Curva de potencia típica de turbinas hidrocinéticas (Ishak & Muratoglu, 2013)

De la Figura 2.2 se destacan los siguientes valores característicos de la máquina:

- *Velocidad mínima de operación*

Velocidad a la que se desplaza el agua, a partir de la cual, la turbina hidrocinética comienza a producir energía. Cualquier velocidad menor a esta, no proporcionará las condiciones necesarias para que el sistema de propulsión gire, por lo que no hay generación.

- *Velocidad nominal*

Velocidad a la que se desplaza el agua, a partir de la cual no existirá incremento de potencia suministrada por la máquina.

- *Potencial nominal*

Potencia máxima suministrable por la turbina, alcanzada en valores iguales y superiores a la velocidad nominal del fluido.

El comportamiento teórico de las curvas de desempeño pertenecientes a turbinas hidrocinéticas, se derivan del estudio de la cantidad de movimiento aplicado a los álabes o palas (Blade Element Momentum Theory, BEM por sus siglas en inglés.)

La ecuación que describe la potencia alcanzada por el sistema es la siguiente:

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \tag{Ecn 1}$$

donde

P potencia, en W

A área de barrido abarcado por los álabes, en m²

V velocidad del flujo, en m/s




C_p coeficiente de eficiencia de la turbina, adimensional

La *Ecn 1* es aplicable para turbinas hidráulicas y eólicas, y relaciona la velocidad y densidad del fluido y las dimensiones de la turbina, con la potencia eléctrica que la máquina es capaz de suministrar

2.1.3 Estatus de la Tecnología

Utterback establece el ciclo de vida en cuatro fases: Tecnología Emergente, Transición, Madura y Obsoleta. En cada una de las fases, establece sus prioridades así como las características que presenta la tecnología para cada fase. La integración del análisis realizado por Utterback se muestra en la Tabla 2.1. (Utterback, 1994)

Tabla 2.1 Prioridades y características en el ciclo de vida de una tecnología (Utterback, 1994)

			
Características de la tecnología en la fase	<ul style="list-style-type: none"> • Incertidumbre en el producto y en su mercado • Gran ritmo de innovación en el productos, y un alto nivel de flexibilidad en el proceso • Volúmenes bajos de producción • Gran importancia en la funcionalidad de la tecnología, • Baja importancia en lo que respecta a la marca • Competencia directa muy baja 	<ul style="list-style-type: none"> • Algunos diseños comienzan a dominar el mercado • Incrementa la claridad sobre las necesidades de los clientes • Se incrementa la innovación en los procesos • La competencia se basa en la calidad y la disponibilidad 	<ul style="list-style-type: none"> • Se le da una mayor importancia al margen de utilidad • Existen más similitudes que diferencias en los productos finales
Prioridades de la tecnología	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo y preservación de la tecnología 	<ul style="list-style-type: none"> • Exploración de oportunidades de mejora en la tecnología • Relación cercana con clientes y proveedores • Establecimiento de una estrategia de crecimiento 	<ul style="list-style-type: none"> • Control de costos • Gestión de clientes • Eficiencia en la organización

Se observa que los aprovechamientos hidrocinéticos se encuentran en la fase de tecnología emergente, por lo que es necesario atender las necesidades indicadas por la Tabla 2.1

2.2 Aspectos particulares de la tecnología

2.2.1 Elementos que componen al aprovechamiento hidráulico

Por medio de la un aprovechamiento hidráulico se encuentra fundamentalmente compuesto por los siguientes elementos (Khan, Iqbal, & Quaicoe, 2007)

- *Sistema de propulsión*

Se trata de los elementos tales que motivan el movimiento del sistema por medio del aprovechamiento del movimiento del fluido, y de las fuerzas de arrastre y sustentación. Se extiende mas no se limita, a los álabes.

- *Generador*

Dispositivo compuesto por un estator y un rotor, que mediante el movimiento del rotor respecto al estator motivado por el sistema de propulsión, provoca una inducción electromagnética con el fin de convertir la energía mecánica a eléctrica.

- *Estructura de soporte*

Elementos estructurales que hacen posible la estabilidad del sistema de propulsión y el generador. Dependiendo de la máquina, la estructura de soporte puede ser parte del sistema de anclaje.

- *Sistema de anclaje*

Elementos que permiten la sujeción del sistema de propulsión y generador, de tal forma que la fuerza ejercida por el movimiento del agua no provoque desplazamientos que causen la falla del sistema. Se profundiza sobre el tema en la Sección 2.2.4

- *Sistemas de control*

Elementos que permiten el adecuado manejo y cuantificación de la energía generada, además de posibilitar el monitoreo del sistema

- *Sistemas de transmisión*

Elementos que permiten el movimiento de la energía desde el aprovechamiento, hasta el centro de consumo.

2.2.2 Turbinas a flujo libre

Se trata de aquellas turbinas que extraen la energía del fluido, reduciendo la velocidad y con una mínima o ninguna reducción en la presión a medida que el fluido atraviesa el rotor de la turbina. Las líneas de corriente deben, en consecuencia, expandirse para mantener el principio de la continuidad. Como no es posible que estas líneas se expandan indefinidamente, existe un límite teórico sobre el porcentaje de la energía cinética que puede ser extraída de un fluido. A

este límite se le conoce como el límite de Betz, y fue definido como un 59.3%. El límite de Betz gobierna la eficiencia de este tipo de turbinas. Se muestran a continuación los tipos de turbinas que obedecen a este funcionamiento (Kirke, 2005)

- *Turbinas de eje horizontal*

El eje de rotación del rotor, es paralelo a la dirección del agua. Un ejemplo de este tipo de máquinas, se aprecia en la Figura 2.3.



Figura 2.3 Turbina de eje horizontal

- *Turbina de eje vertical*

El eje de rotación del rotor, es paralelo a la dirección del agua. Un ejemplo de este tipo de máquinas, se aprecia en la Figura 2.4. Son las menos comunes para su aplicación en ríos y canales, pues su eficiencia puede ser menor que las turbinas de eje horizontal, sin embargo, son las que mejor desempeño demuestran ante escombros y objetos flotantes.

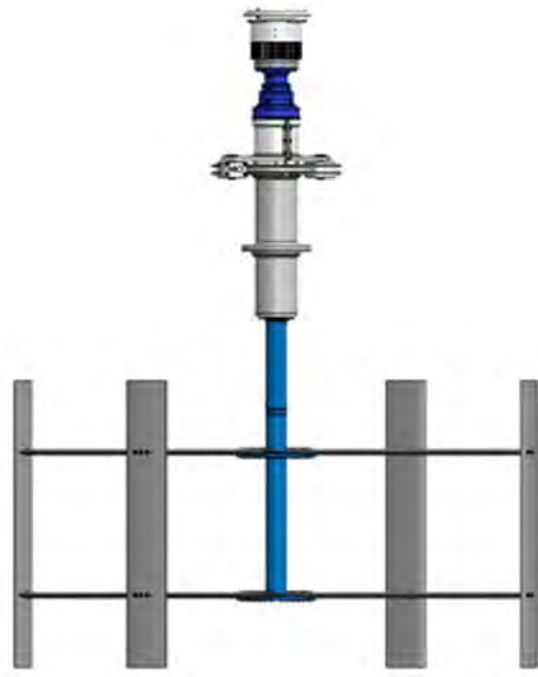


Figura 2.4 Turbina de eje vertical

- *Turbinas Helicoidales*

El eje de rotación es paralelo a la superficie del agua, pero perpendicular a la dirección del flujo. Destacan por su versatilidad para operar en rangos de velocidad que incluyen velocidades bajas. Un ejemplo de este tipo de máquinas, se aprecia en la Figura 2.5.



Figura 2.5 Turbina Helicoidal

2.2.3 Turbinas en ducto

Cuando las fronteras se restringen por medio de un ducto, las líneas de corriente se ven limitadas en su expansión, a diferencia de las turbinas a flujo libre, y de esta forma la energía que es posible extraer se debe a un diferencial de presión existe entre la entrada y la salida del ducto. (Kirke, 2005) Esto trae como consecuencia que el límite de Betz no aplique a este tipo de turbinas, y la eficiencia pueda ser mayor. El límite teórico de las turbinas en ducto depende más bien de la diferencia de presiones que sea posible crear entre la entrada y

salida del ducto, y el volumen de agua que entra por el ducto. Un ejemplo de este tipo de turbinas se muestra en la Figura 2.6.

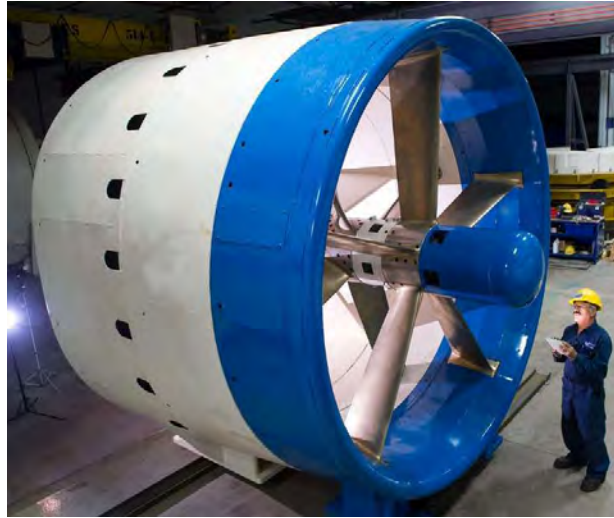


Figura 2.6 Turbina en ducto

2.2.4 Anclaje y sujeción de las máquinas

Existen diferentes métodos para sostener turbinas hidrocínicas en su lugar. Esto dependerá si la instalación de la turbina es flotante o fija. Así como los materiales que se encuentran en las márgenes, el material que se encuentra en el fondo del río, así como la geometría de la sección transversal. (Laws & Epps, 2016). Se muestra a continuación algunos ejemplos de anclaje.

- Anclaje de peso muerto

Elementos de gran peso las cuales que pueden ser colocadas tanto en el fondo del río como en la margen del río, a la cual le es asegurada la turbina (Figura 2.7).



Figura 2.7 Ejemplo de anclaje de peso muerto

- *Anclaje al material en el fondo del río*

Existen diferentes tipos. Algunos funcionan en superficies cuyo material está compuesto por limo y arcilla, puesto que tiene la habilidad de perforar el suelo a medida que las fuerzas se dirigen hacia aguas abajo, lo que refuerza el anclaje, tal y como se indica en la Figura 2.8.

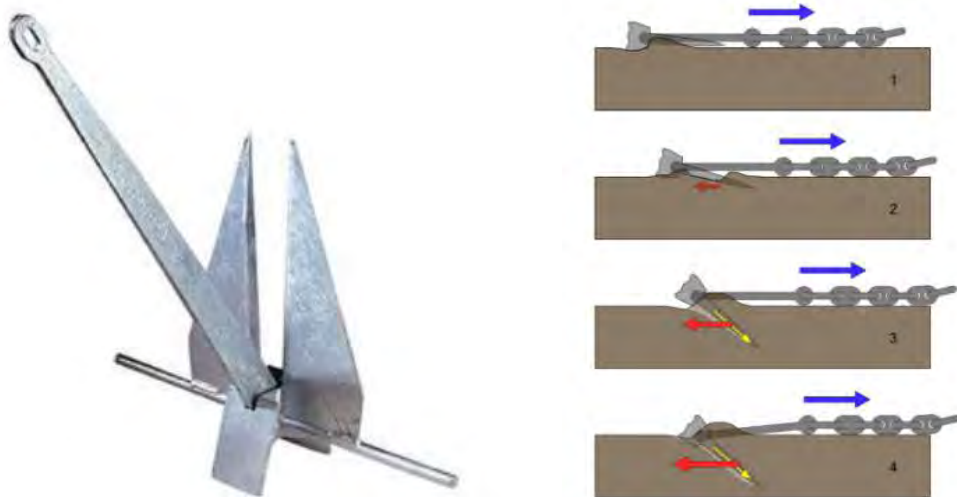


Figura 2.8 Ejemplo de anclaje al material en el fondo del río

- *Anclaje de empotramiento*

Se encuentran también aquellos anclajes que requieren de una previa perforación, en la cual se instala a manera de pilote la torre que sostiene la turbina. Este tipo de anclaje es similar al de los aerogeneradores.



Figura 2.9 Ejemplo de anclaje de empotramiento

El caso de anclaje indicado en la Figura 2.9 es el menos común en ríos, debido a la complejidad que presenta la perforación en el lecho del río, además de que es necesario tener altamente controlado el comportamiento del río para su adecuado funcionamiento

- *Anclaje al material en las márgenes*

Ideal para sitios en los que existe la suficiente roca en las márgenes. Su practicidad y alta efectividad la hacen el anclaje más conveniente para la instalación de turbinas hidrocínéticas.

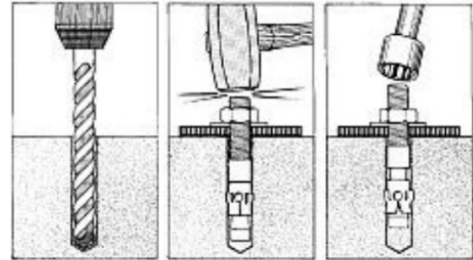


Figura 2.10 Ejemplo de anclaje de empotramiento

- *Anclaje por peso propio de la máquina*

En lo que respecta a las turbinas en ducto, la literatura indica que el anclaje puede llevarse a cabo por el peso propio de la turbina, puesto que es más pesada que las turbinas a flujo libre, sin embargo, es necesario tener apoyos para que la máquina no esté en contacto directo con el lecho del río, además de favorecer a la nivelación de la máquina.

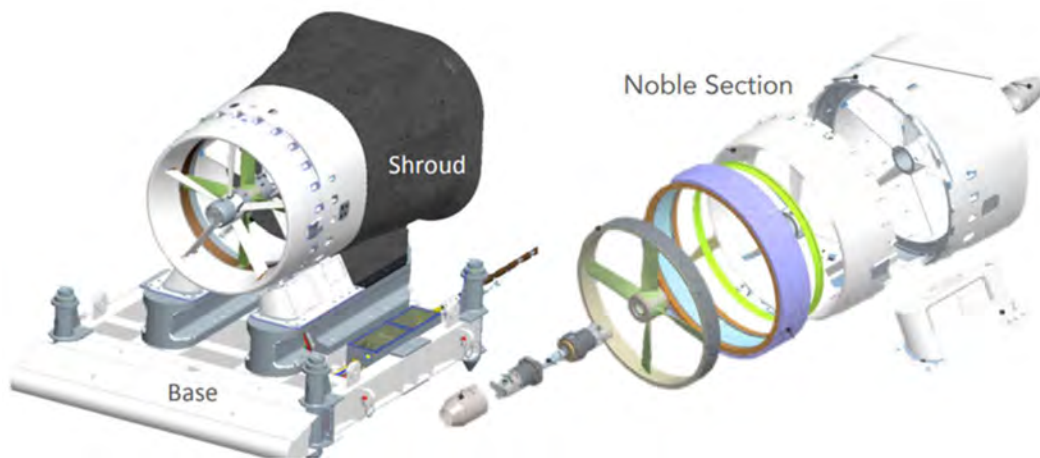


Figura 2.11 Ejemplo de anclaje por peso propio de la máquina

2.3 Estado actual de la tecnología y sus dispositivos

Los aprovechamientos hidráulicos con fines de generación de energía hidrocínética en ríos utilizan tecnología emergente para su funcionamiento. Esto implica que la mayoría de máquinas que permiten convertir la energía cinética del agua, en energía eléctrica, se encuentren en fases tempranas de su desarrollo. A continuación se presentan aquellas turbinas con un mayor avance en su diseño, operación y comercialización, así como los datos de mayor importancia. Algunas máquinas se encuentran en proceso de patentar su tecnología y sus elementos que la componen, además de la obtención de permisos. Esto trae como consecuencia que gran parte de su información no sea pública.

2.3.1 Verdant Power

Tabla 2.2 Características principales. Verdant Power

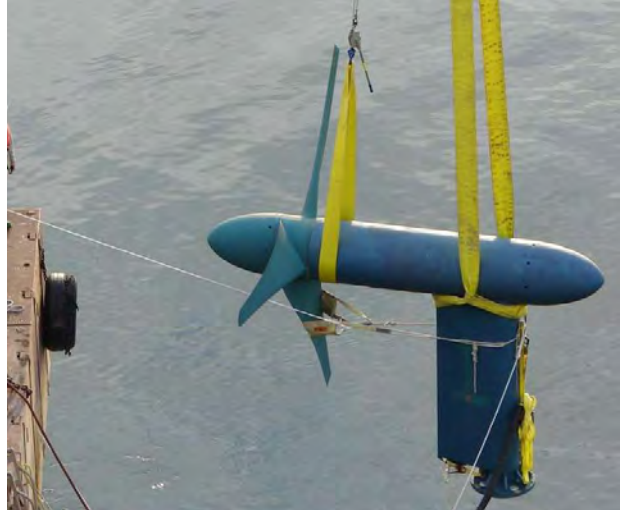
Potencia
35 kW

Velocidad nominal
2.2 m/s

Velocidad mínima de operación
0.7 m/s

Diámetro del rotor
5 m

País de origen
Estados Unidos



2.3.2 RER Hydro

Tabla 2.3 Características principales. RER Hydro Power

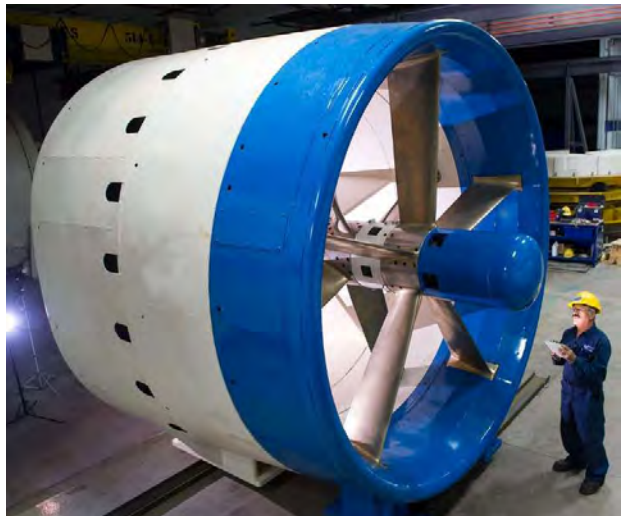
Potencia
340 kW

Velocidad nominal
4 m/s

Velocidad mínima de operación
1.5 m/s

Diámetro del rotor
3.6 m

País de origen
Canadá



2.3.3 Rivgen

Tabla 2.4 Características principales. Rivgen

Potencia
30-55 kW

Velocidad nominal
3 m/s

Velocidad mínima de operación
1.5 m/s

Diámetro del rotor
1.5 m

País de origen
Estados Unidos



2.3.4 Hydro Green Energy LLC

Tabla 2.5 Características principales. Hydro Green Energy LLC

Potencia
98 kW

Velocidad nominal
3.5 m/s

Velocidad mínima de operación
1.5 m/s

Diámetro del rotor
3.66 m

País de origen
Estados Unidos



2.3.5 Tocardo

Tabla 2.6 Características principales. Tocardo

Potencia
42-98 kW

Velocidad nominal
2-4.5

Velocidad mínima de operación
0.4-0.9

Diámetro del rotor
2.8-4.5

País de origen
Holanda



2.3.6 Smart Hydro

Tabla 2.7 Características principales. Smart Hydro

Potencia
5 kW

Velocidad nominal
2.7 m/s

Velocidad mínima de operación
0.7 m/s

Diámetro del rotor
2 m

País de origen
Alemania



2.3.7 Hydroquest

Tabla 2.8 Características principales. Hydroquest

Potencia
40 y 80 kW

Velocidad nominal
3.1 m/s

Velocidad mínima de operación
1 m/s

Dimensión de la máquina
3.6x5.9m, 1.8x5.9m

País de origen
Francia



2.3.8 Guinard Energies

Tabla 2.9 Características principales. Guinard Energies

Potencia
19 KW

Velocidad nominal
3 m/s

Velocidad mínima de operación
1 m/s

Diámetro del rotor
1.54 m

País de origen
Francia



2.3.9 EnCurrent turbine

Tabla 2.10 Características principales. EnCurrent Turbine

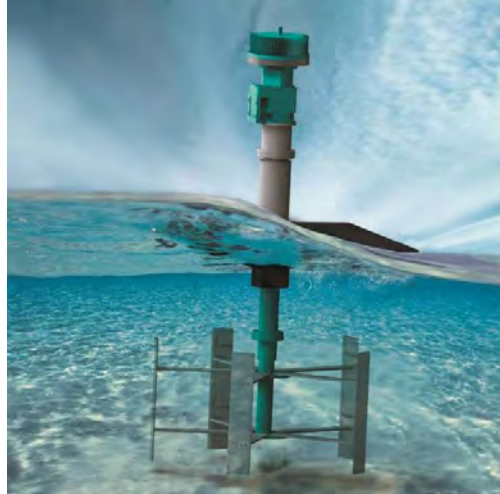
Potencia
5-10 KW

Velocidad nominal
2.5-3 m/s

Velocidad mínima de operación
1.5 m/s

Diámetro del rotor
1.5 m

País de origen
Canadá



2.4 Enfoques para la estimación de la energía aprovechable

La evaluación del recurso disponible para generar energía por medio de turbinas hidrocínéticas, requiere determinados insumos para su adecuada elaboración. El nivel de detalle y la certidumbre en la estimación del recurso, y en consecuencia, la estimación de la energía extraíble de los diferentes sitios, se encontrará en función de la cantidad y calidad de información con la que se cuente. Actualmente, existen diversas metodologías para la estimación del recurso e identificación de sitios a nivel gran visión, susceptibles a instalar centrales hidroeléctricas convencionales. Al ser una tecnología emergente, ese no es el caso de generación de energía hidrocínética. Adicional a esta situación, la teoría existente detrás de la generación de energía hidroeléctrica convencional, y la generación de energía hidrocínética es diferente, además que obedecen a necesidades distintas, razón por la cual no son directamente aplicables los criterios de identificación que obedece una tecnología frente a otra. Se identifica dentro de la literatura, las siguientes clasificaciones de potencial, los cuales aplican para la tecnología hidroeléctrica convencional, fotovoltaica, eólica e hidrocínética.

2.4.1 Por nivel de estudio

- **Potencial teórico:** Cantidad media anual de energía física que se encuentra hipotéticamente disponible.
- **Potencial técnico:** Cantidad de energía teórica que puede ser aprovechada, utilizando cierto tipo de energía en específico.
- **Potencial práctico:** Parte del potencial técnico que se encuentra disponible después de involucrar aspectos económicos, ambientales, sociales y regulatorios en el análisis.

2.4.2 Por área de estudio

En lo que respecta al área de estudio, se observa en la literatura las siguientes clasificaciones y esfuerzos realizados en lo que respecta a los aprovechamientos hidrocinéticos

- **Regional:** Se trata de la estimación teórica del recurso, lo cual puede ser a nivel cuenca, región hidrológica, estado y país. Como ejemplo de ello se tienen el estudio que lleva por título *Evaluación y Mapeo del Recurso Hidrocinético contenido en los ríos en los Estados Unidos* (Electric Power Reserach Institute, 2012) así como el estudio realizado por Canadá, de nombre *Estimación del Potencial Hidrocinético de Canadá Fase I: Reporte, Metodología y Revisión de datos* (Natural Resources Canadá, 2010)

Local: Se enfoca en la estimación teórica, técnica o práctica de un río en específico o uno de sus tramos. Como ejemplo de ello, se tiene el trabajo realizado por la *Evaluación del Recurso Hidrocinético. Caso de Estudio en un río de Planicie en Lituania* (Punys, y otros, 2015) *Caracterización y Estudio del río Tananá, Alaska*. (Alaska Center for Energy and Power, 2010) Para la estimación a nivel local, es necesaria información mas específica y estudios de campo, dependiendo de la precisión con la que se quiere realizar la estimación.

2.5 Ejemplo de estimación de energía aprovechable

A continuación se describe el desarrollo propuesto para la estimación de energía aprovechable de un tramo de río aguas abajo de la Central Hidroeléctrica Chicoasén

2.5.1 Construcción de modelo hidráulico y calibración

- Dominio y geometría del modelo

Se construyó un modelo hidráulico unidimensional por medio del software HEC-RAS 5.0.1. El dominio del modelo comprende desde el desfogue de la central Chicoasén, hasta 12 kilómetros aguas abajo. Las secciones transversales se ubicaron a cada 50 metros, y fueron generadas con la manipulación de la batimetría utilizada para el diseño de las obras de la P.H Chicoasén II, y la cual

fue proporcionada por Comisión Federal de Electricidad. La manipulación se realizó por medio de un Sistema de Información Geográfica, generando una malla con celdas de 2x2 metros. Esta malla fue exportada de ArcGIS al HEC-RAS, que en su versión 5.0.1 permite generar las secciones transversales a partir de una malla en el mismo software. Parte del proceso y de la herramienta se observa en la Figura 2.12

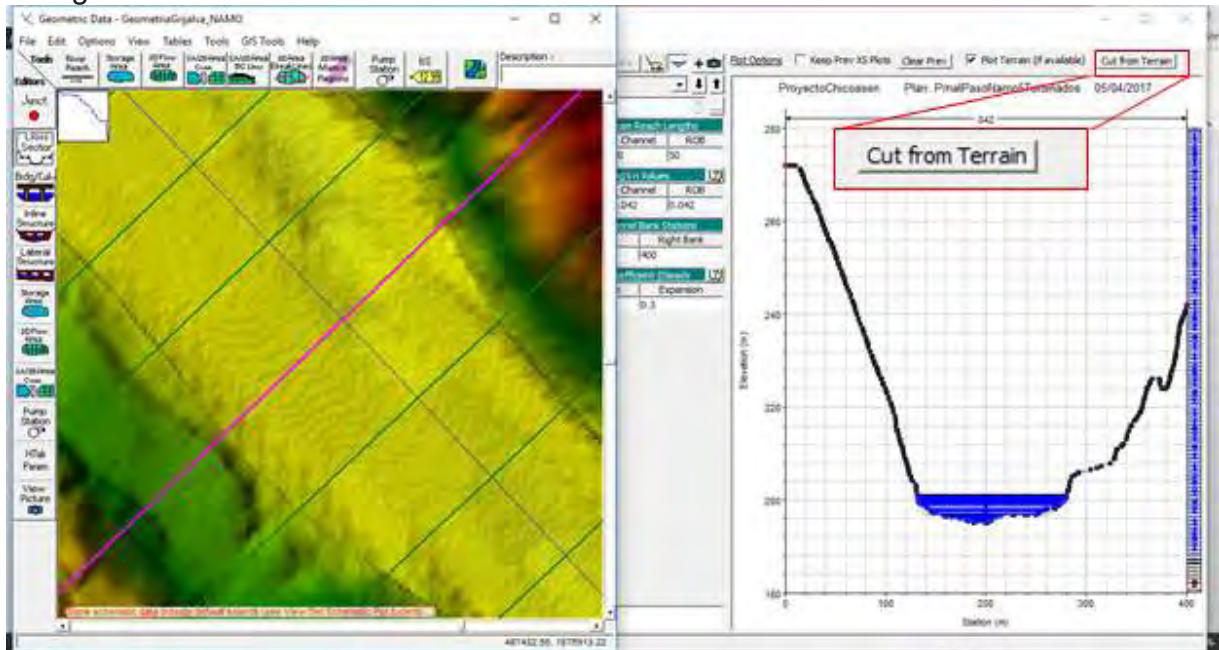


Figura 2.12 Trabajo de la batimetría del cauce en HecRAS 5.0.1

- **Calibración del modelo y obtención de la n de manning**

Para la calibración del modelo, se construyó una curva elevaciones-gastos en el sitio de la estación hidrométrica. La curva se compuso de datos de elevaciones registradas para diferentes gastos presentados en la estación en conjunto con elevaciones registradas durante el día 31 de mayo de 2013 asociado a los gastos turbinados por la central a nivel horario. Dichos gastos fueron desfasados una hora considerando su tránsito a través del cauce. La sucesión de puntos resultante en el sitio se muestra en la Figura 2.13.

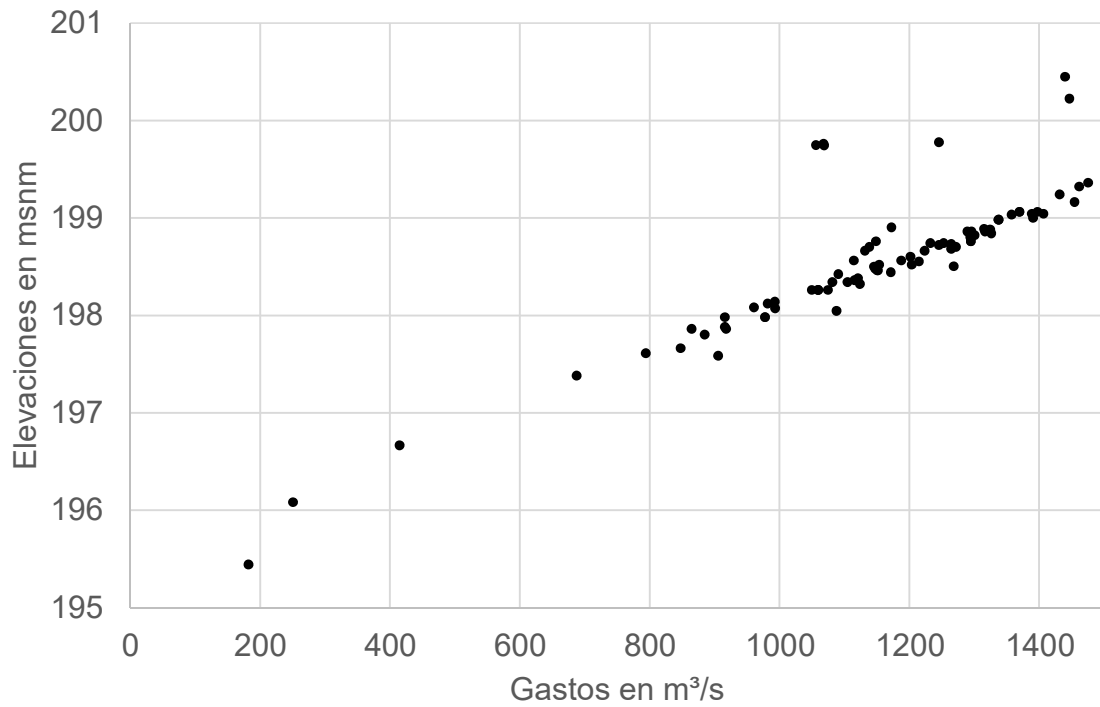


Figura 2.13 Registros de elevaciones asociadas a gastos en la E.H Grijalva

El proceso de calibración fue iterativo, en donde se establecieron valores de n de Manning propuestos por la literatura, y cuya descripción se apega a las características del río. Se realizaron corridas con los valores de n de Manning de 0.038, 0.040, 0.042, 0.045 y 0.047. Las curvas resultantes de las modelaciones se muestran en la Figura 2.14

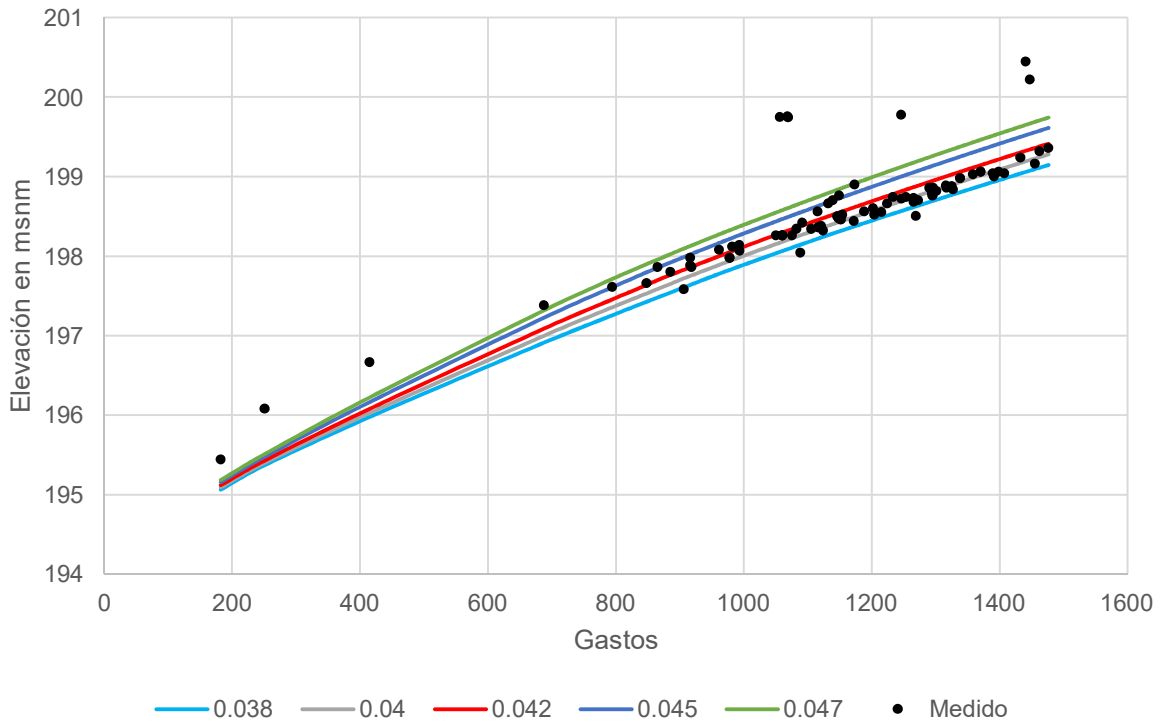


Figura 2.14 Curvas modeladas por HecRAS

Se determinó el error cuadrático de cada una de las curvas correspondientes a los diferentes valores de n de Manning modelados

Tabla 2.11 Error cuadrático de los valores de n Manning modelados

N de Manning	Error cuadrático
0.038	17.51
0.04	13.32
0.042	11.50
0.045	13.11
0.048	16.99

De la Tabla 2.11 se observa que el valor mínimo del error cuadrático se presenta cuando la n de Manning es de 0.042. La determinación del error cuadrático, en conjunto con la inspección visual del ajuste gráfico de los datos, condujo a la conclusión de que el valor que mejor se ajusta a los valores de gasto-elevación medidos en el sitio es el de 0.042.

- *Condiciones de frontera*

Se identificó la elevación al NAMO del embalse de la central hidroeléctrica Malpaso, la cual se ubica aguas abajo de Chicoasén, es la de 182.50 msnm. Analizando la topografía y batimetría del modelo, se observa el embalse al NAMO tiene influencia y se extiende al dominio del modelo. Las condiciones aguas abajo del modelo fueron ajustadas a este hecho.

- *Validación*

Se contó con información de elevaciones proveniente de celdas de medición en tres diferentes cadenamientos aguas abajo de la EH Grijalva. Se relacionaron estas elevaciones con los datos de gastos horarios turbinados para el día correspondiente. De esta forma fue posible construir relaciones de elevaciones-gasto para estos tres puntos. Con las consideraciones anteriormente descritas, se muestran en la Figura 2.15, Figura 2.16 y Figura 2.17 las curvas de elevaciones-gastos en estos tres sitios de control, mediante las cuales se confirma que el modelo describe adecuadamente el comportamiento del río aguas abajo de la cortina de Chicoasén.

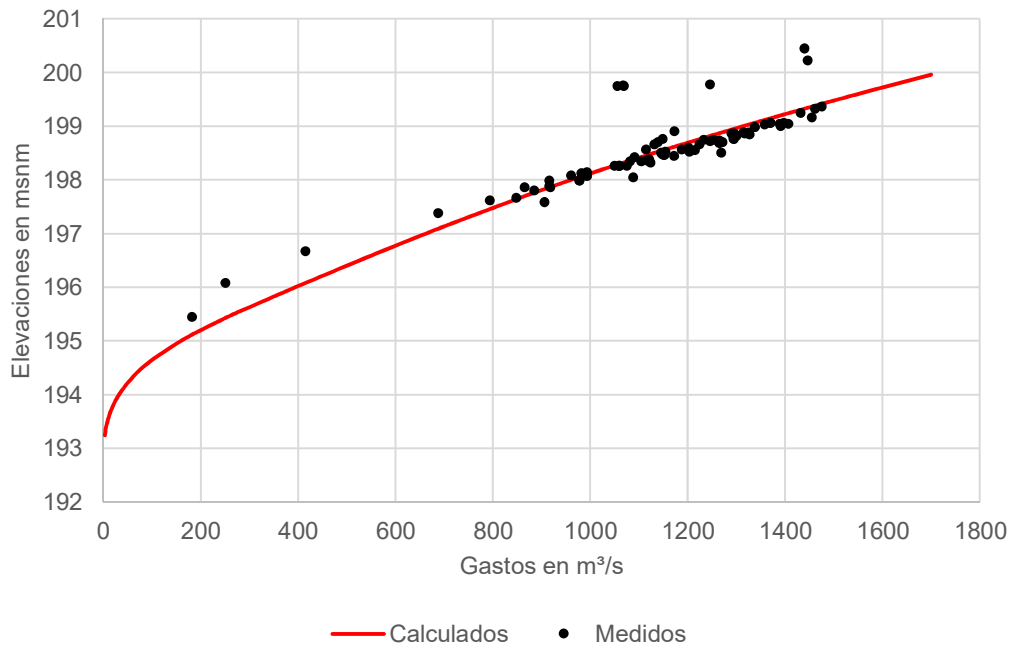


Figura 2.15 Curvas modeladas cadenamiento 5+700

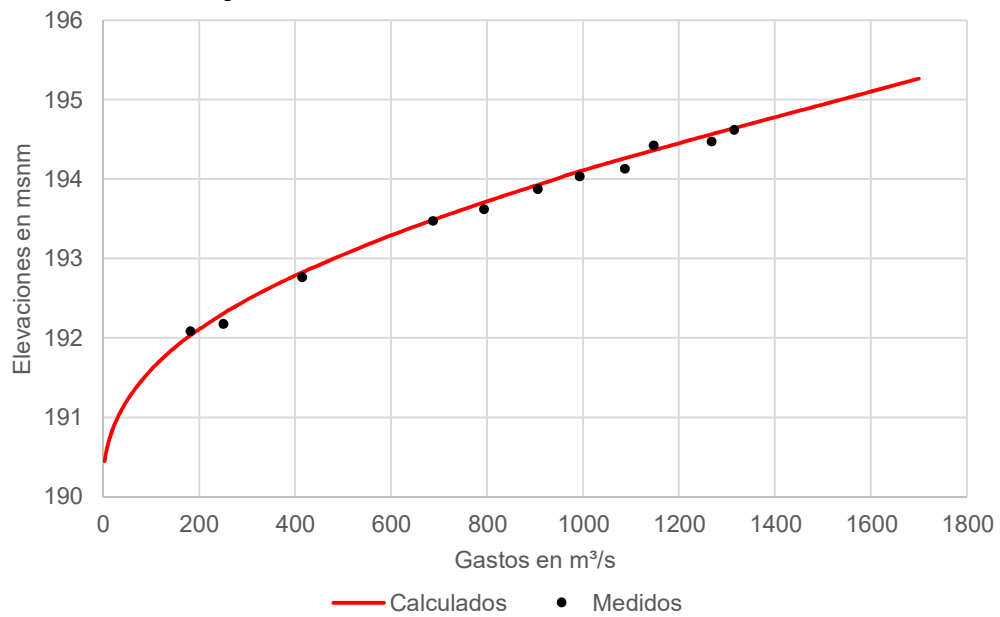


Figura 2.16 Curvas modeladas cadenamiento 3+100

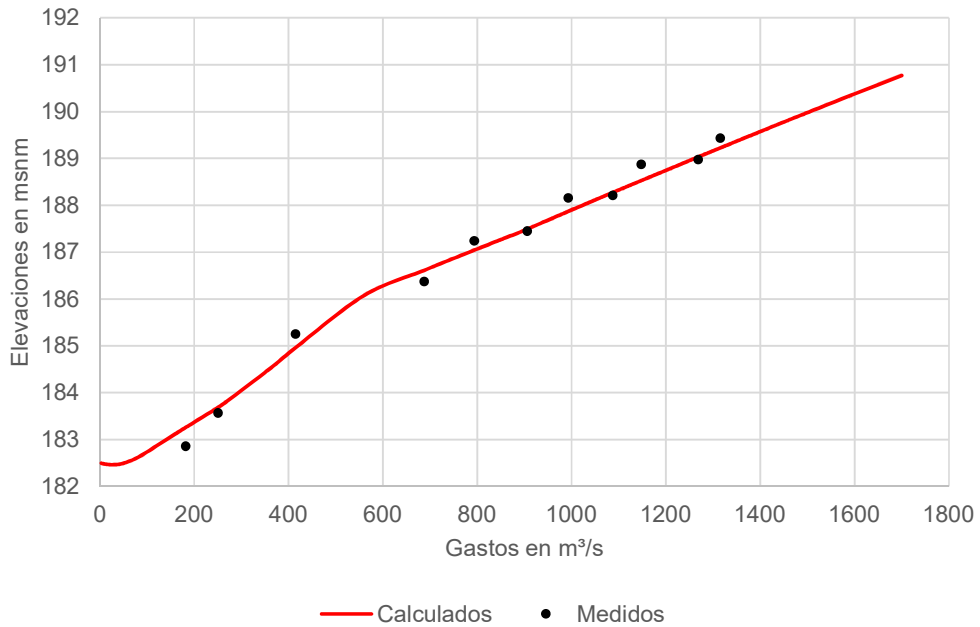


Figura 2.17 Curvas modeladas cadenamiento 0+350

Se muestra en la Figura 2.18 el dominio del modelo, así como los sitios de control por medio de los cuáles, fue posible validar el adecuado comportamiento del modelo hidráulico.

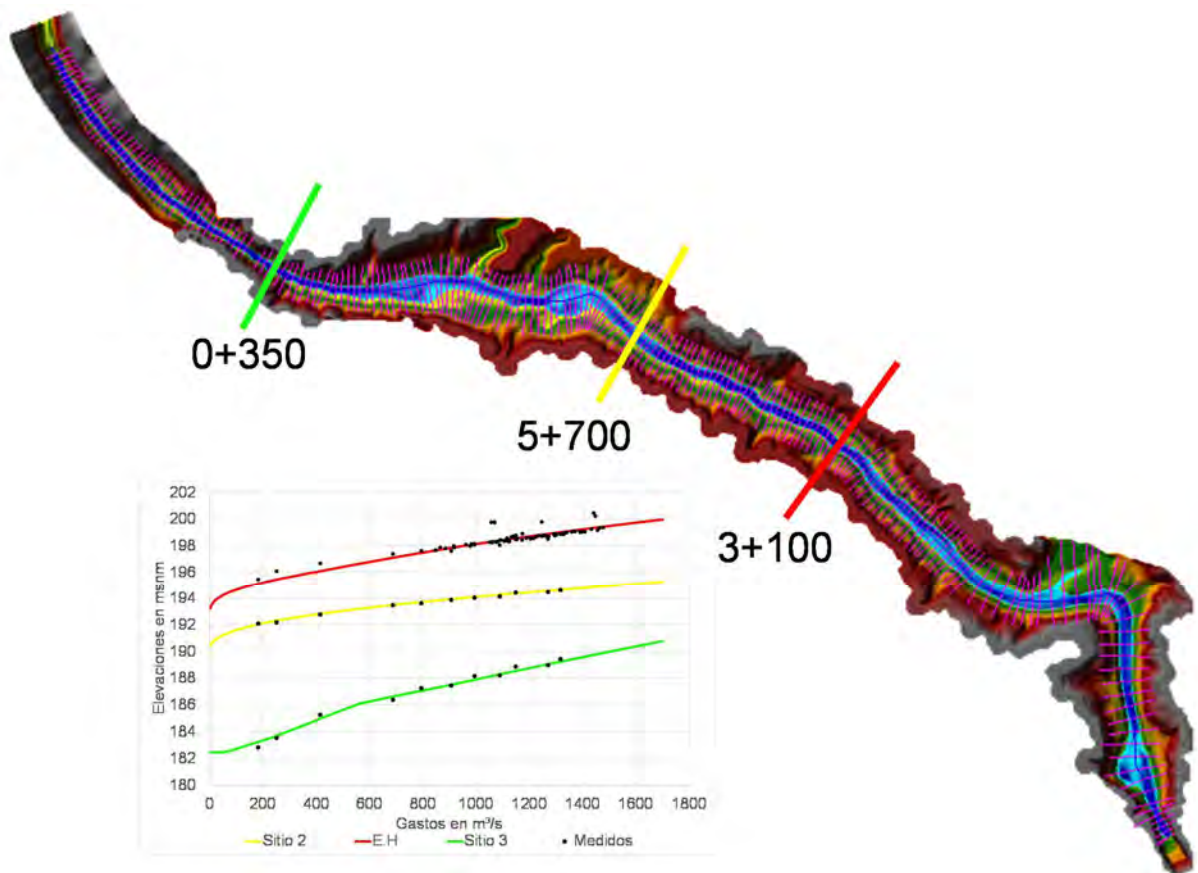


Figura 2.18 Dominio del modelo y puntos de validación

En base en los resultados obtenidos del modelo, fue importante definir la ubicación a la cual se extiende el embalse de la C.H Malpaso al NAMO, debido a que, a partir de ahí, para cierta cantidad de gastos, es la velocidad a la que se mueve el embalse la que gobernará y no la del gasto que transite por el cauce. Por el contrario, a partir, de cierto gasto turbinado, se observó que el gasto conducido por el cauce genera influencia en la velocidad, situación que fue mostrada por el modelo.

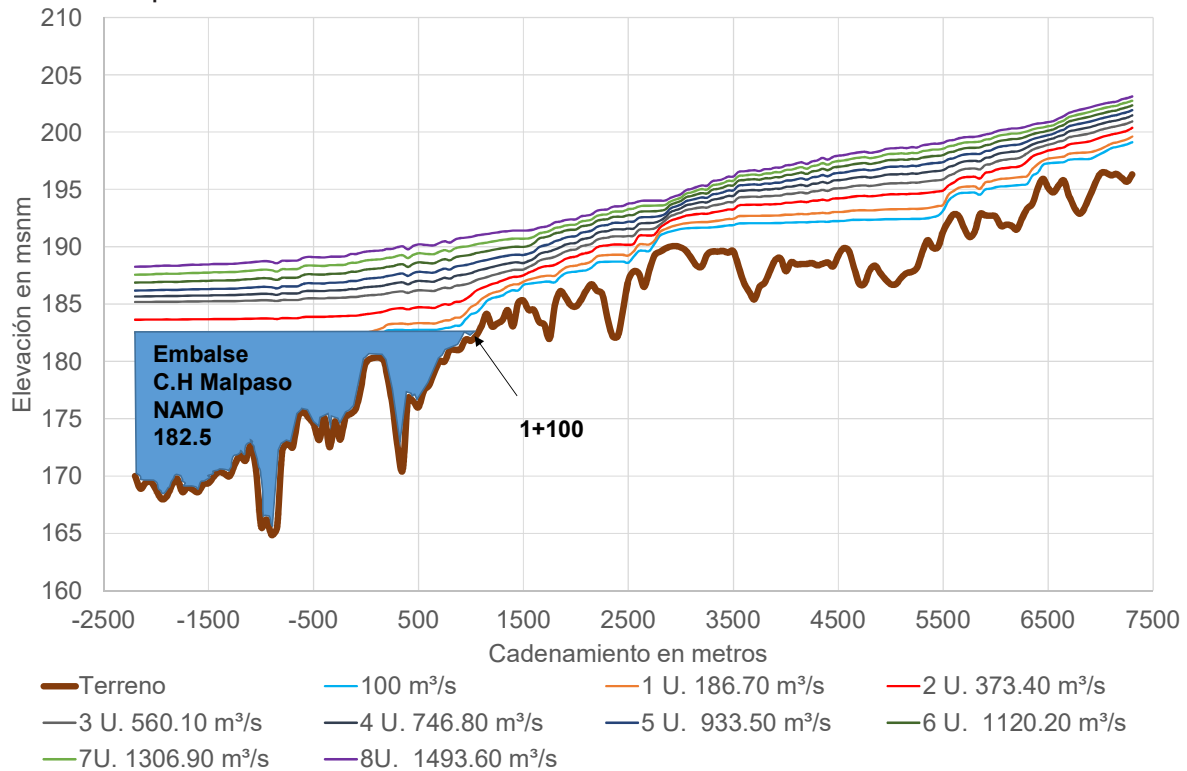


Figura 2.19 Perfiles de los diferentes escenarios de unidades en operación, e influencia del embalse de la C.H Malpaso

De la Figura 2.19, se observa que para un gasto inferior a los 100 m³/s, la influencia del embalse de la C.H Malpaso se extiende 3,3 km dentro del dominio del modelo.

Con la previa calibración del modelo, se procedió a extraer la información necesaria del mismo para la estimación de la densidad de potencia, entre otras características hidráulicas como la elevación alcanzada por la lámina de agua así como el tirante de las secciones.

2.5.2 Origen del parámetro de densidad de potencia

De la Ecn 1 se tiene que la expresión que calcula la potencia de una turbina hidrocínética es:

$$P = \frac{1}{2} Qv^2 = \frac{1}{2} Av^3$$

Haciendo las adecuaciones necesarias a la expresión, se tiene que:

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} V^3 \tag{Ecn 2}$$

donde

$\frac{P}{A}$ densidad de potencia, en kW/m²

V velocidad del flujo, en m/s

En la práctica, este valor de potencia no es alcanzable debido a los coeficientes de eficiencia que actualmente manejan las turbinas hidrocinéticas que se encuentran en desarrollo y en el mercado, tal y como se indicó en la Sección 2.2.2, sin embargo, este parámetro permite identificar aquellas zonas cuyos altos valores de densidad de potencia favorecen la instalación de máquinas que puedan extraer una mayor cantidad de energía.

2.5.3 Estimación del parámetro de potencia y sus resultados

Para la estimación del parámetro de densidad de potencia por sección, se plantearon los escenarios posibles establecidos por la operación de la central aguas arriba. Para ello, se estableció el gasto que corresponde al número de máquinas en operación. La C.H Chicoasén se encuentra equipada por 8 máquinas tipo Francis, con una capacidad de 186,7 m³/s por cada una. Los gastos correspondientes a las ocho máquinas se muestran en la Tabla 2.12

Tabla 2.12 Gastos correspondientes al número de unidades puestas en operación

Número de unidades	1	2	3	4	5	6	7	8
Gasto en m ³ /s	186.7	373.4	560.1	746.8	933.5	1,120.2	1,306.9	1,493.6

Se calculó la densidad de potencia para cada una de las secciones del tramo en estudio, para los ocho escenarios respectivamente. Se obtuvo el porcentaje de secciones con determinada cantidad de velocidad y densidad de potencia, por unidad puesta en operación. Como era de esperarse, se observa el incremento de la potencia teórica hidrocinética a medida que una mayor cantidad de unidades entra en operación. El porcentaje asociado a la densidad de potencia, se observa en la Figura 2.20.

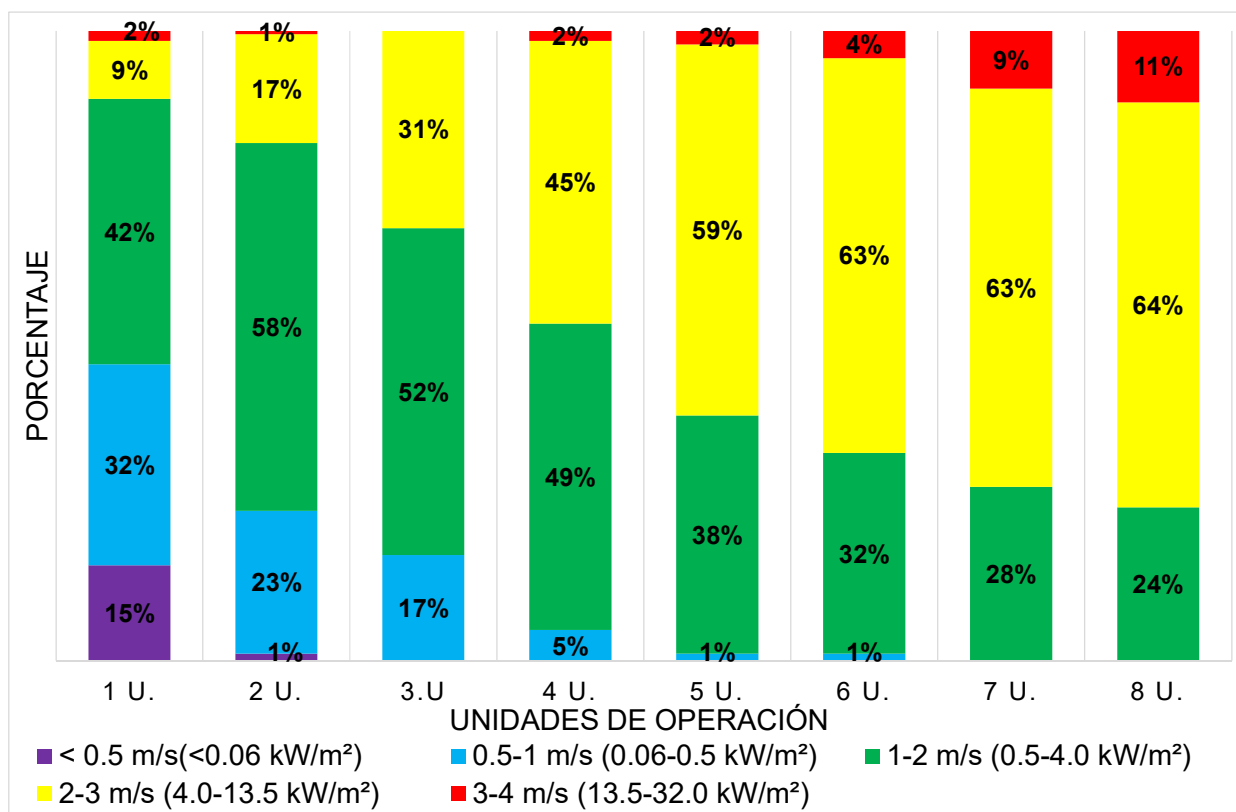


Figura 2.20 % de secciones transversales con determinada potencia y velocidad por unidad de operación

Tabla 2.13 % de secciones transversales con determinada densidad de potencia y velocidad por unidad de operación

Densidad de potencia y velocidad	Porcentaje de secciones transversales							
	1 U.	2 U.	3 U.	4 U.	5 U.	6 U.	7 U.	8 U.
< 0.5 m/s (<0.06 kW/m²)	15%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0.5-1 m/s (0.06-0.5 kW/m²)	32%	23%	17%	5%	1%	1%	0%	0%
1-2 m/s (0.5-4.0 kW/m²)	42%	58%	52%	49%	38%	32%	28%	24%
2-3 m/s (4.0-13.5 kW/m²)	9%	17%	31%	45%	59%	63%	63%	64%
3-4 m/s (13.5-32.0 kW/m²)	2%	1%	0%	2%	2%	4%	9%	11%
Total de secciones transversales: 185 (100%)								

- *Relación de del parámetro de densidad de potencia con tirante, por unidad en operación*

El parámetro de densidad de potencia no proporciona información sobre los tirantes que se presentan para cada valor. De esta forma, se corre el riesgo de que una alta densidad de potencia se encuentre asociada a tirantes en régimen supercrítico cuya profundidad no proporciona las condiciones mínimas para la instalación de turbinas hidrocinéticas. En razón de conocer el comportamiento de los tirantes de las secciones asociados a su densidad de potencia, se construyó una relación entre ambos parámetros para los escenarios de operación de las ocho unidades. Los resultados se muestran en las Figura 2.21 a la Figura 2.28.

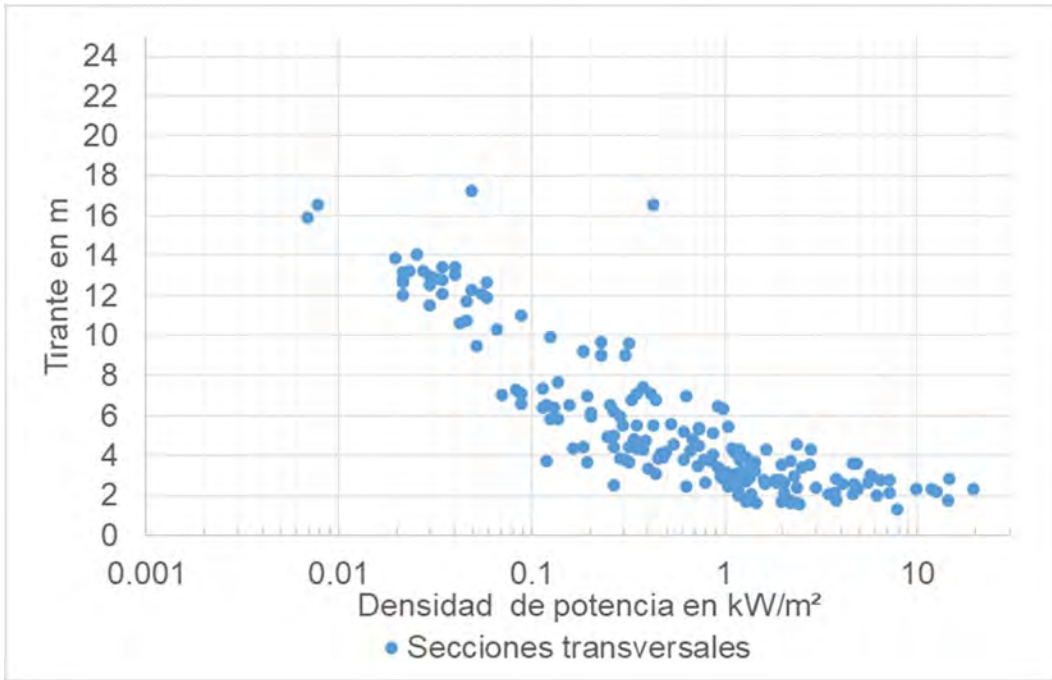


Figura 2.21 Tirantes vs Densidad de potencia. 1 Unidad en operación

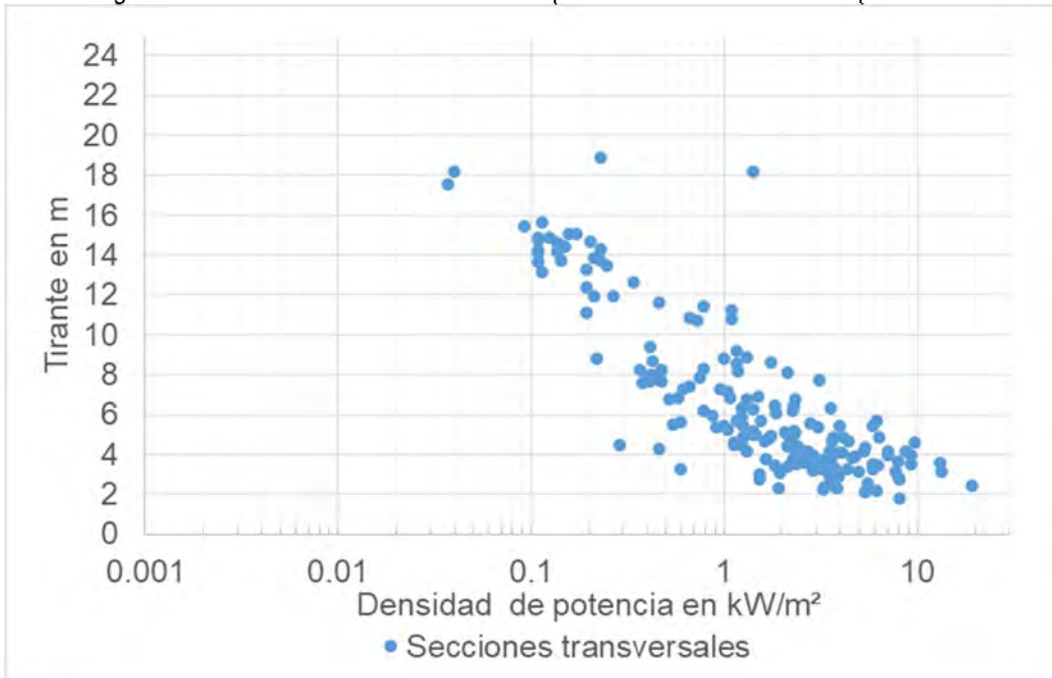


Figura 2.22 Tirantes vs Densidad de potencia. 2 Unidades en operación

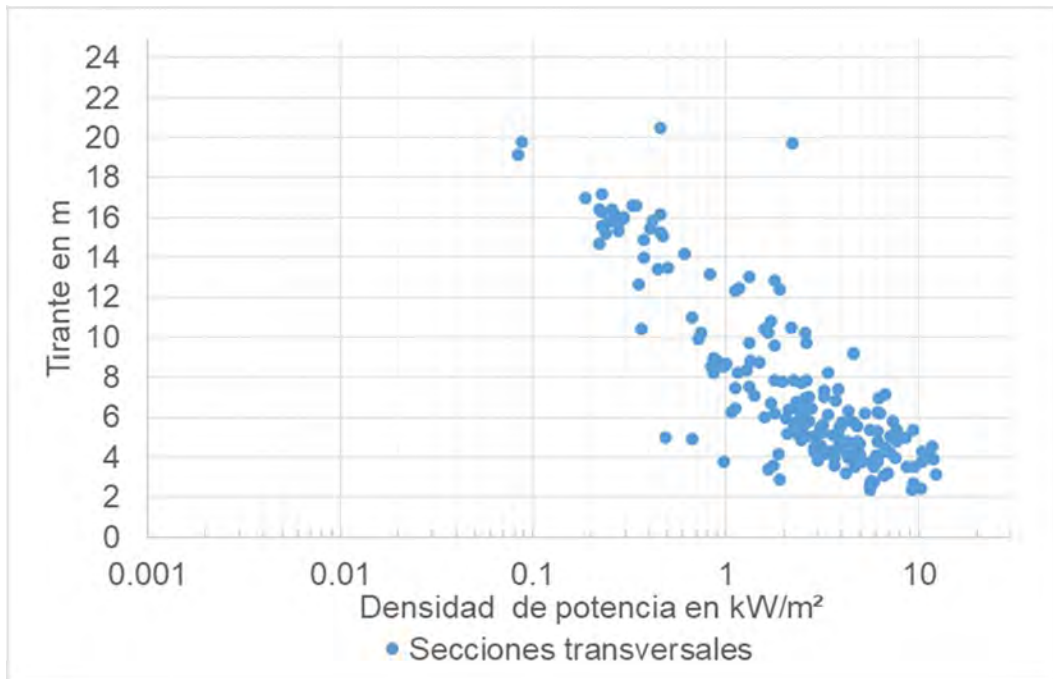


Figura 2.23 Tirantes vs Densidad de potencia. 3 Unidades en operación

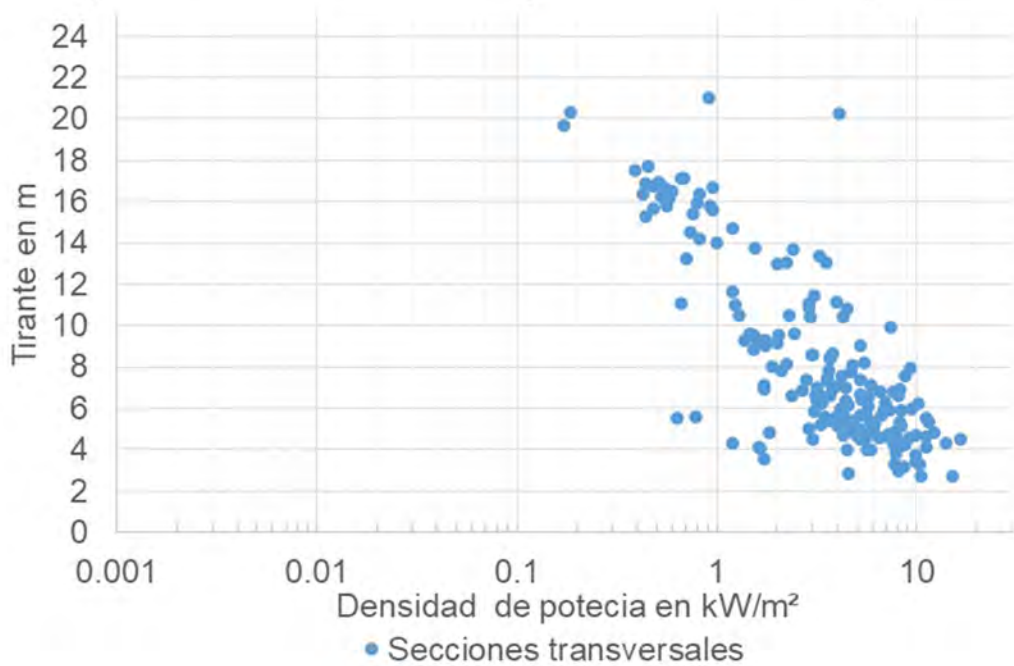


Figura 2.24 Tirantes vs Densidad de potencia. 4 Unidades en operación

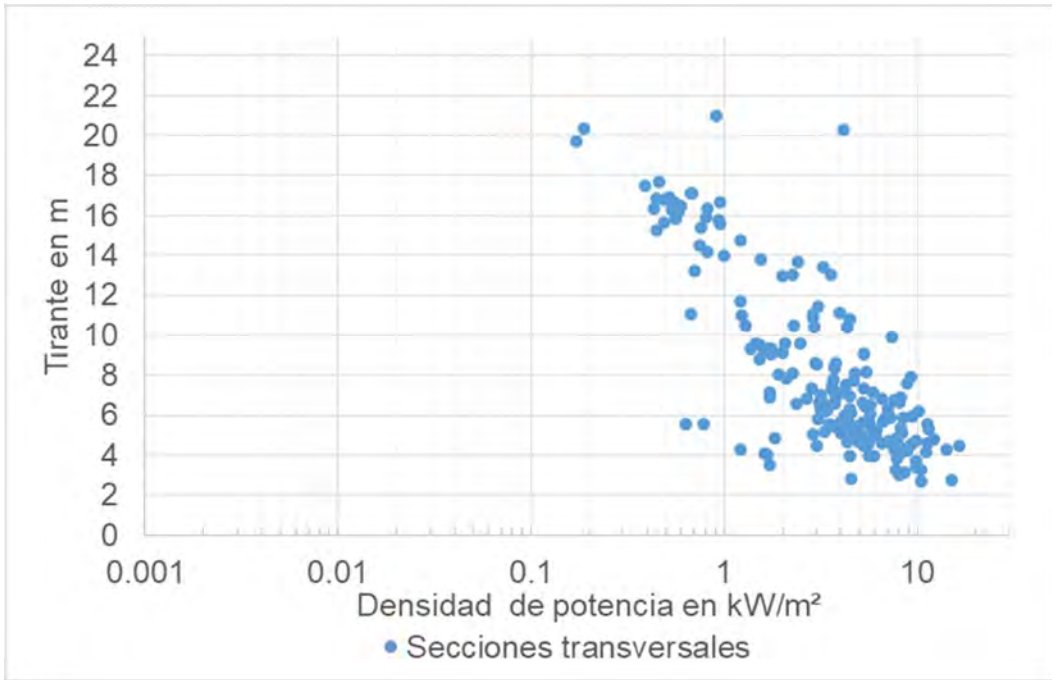


Figura 2.25 Tirantes vs Densidad de potencia. 5 Unidades en operación

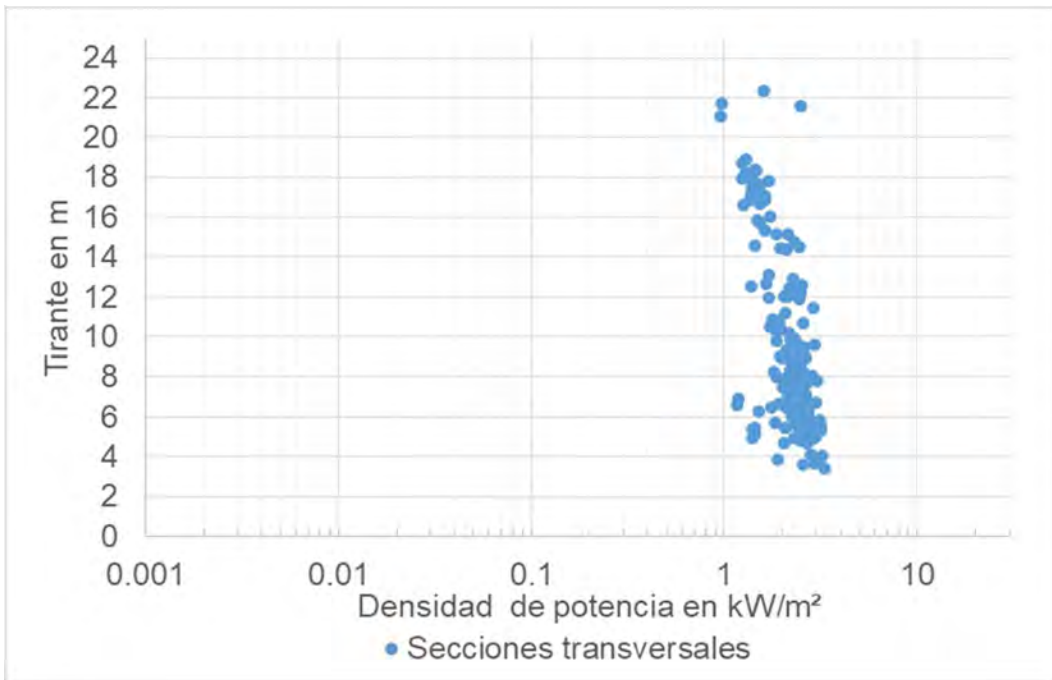


Figura 2.26 Tirantes vs Densidad de potencia. 6 Unidades en operación

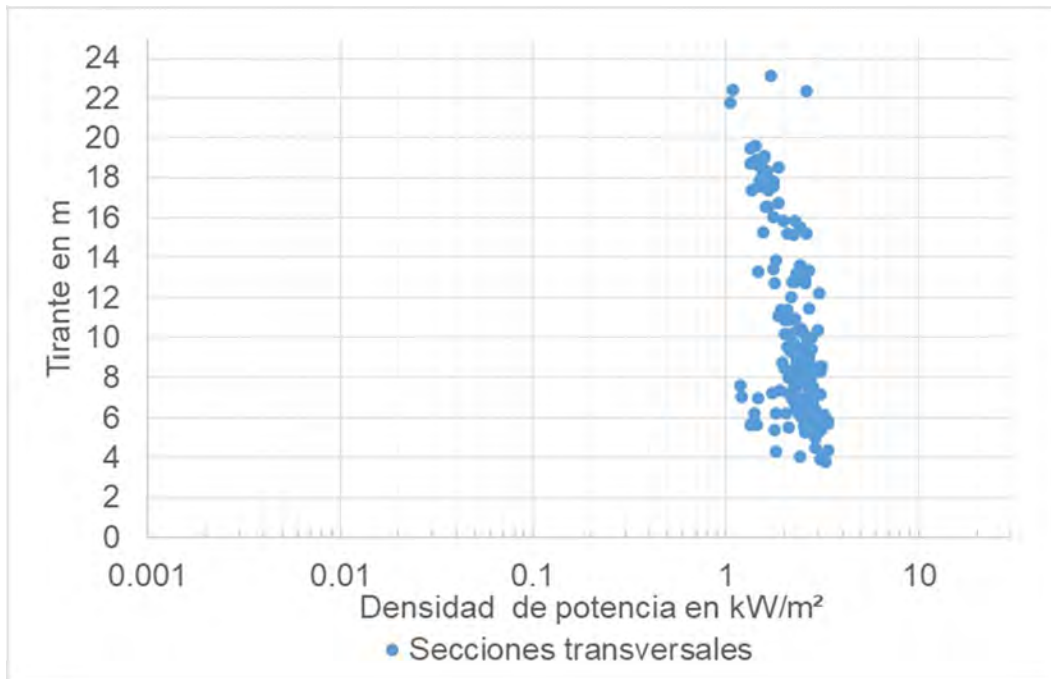


Figura 2.27 Tirantes vs Densidad de potencia. 7 Unidades en operación

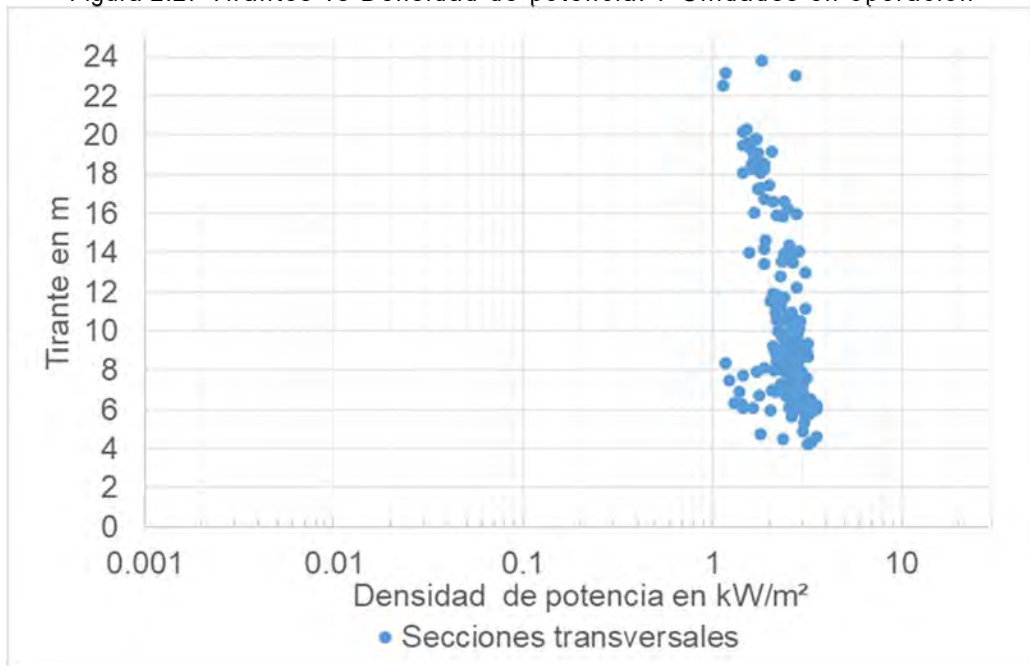


Figura 2.28 Tirantes vs Densidad de potencia. 8 Unidades en operación

De las Figura 2.21 a la Figura 2.28 se aprecia una menor dispersión de los valores alcanzados de densidad de potencia, a medida que se incrementa el número de unidades que se ponen en operación. Se puede observar que para la condición en la que opera una máquina, existen valores de densidad de potencia que rondan desde los 0.001 hasta los 20 kW/m². Este rango se reduce significativamente para la condición en la que operan 8 unidades en donde los valores rondan desde 1 kW/m² hasta 4 kW/m².

En el caso de los tirantes mínimos presentados, estos se incrementan del orden de 2 metros.

Finalmente se generó un gráfico que integra la elevación de la lámina del agua, el comportamiento del terreno y la densidad de potencia. Estos se muestran en las Figura 2.29 a la Figura 2.36.

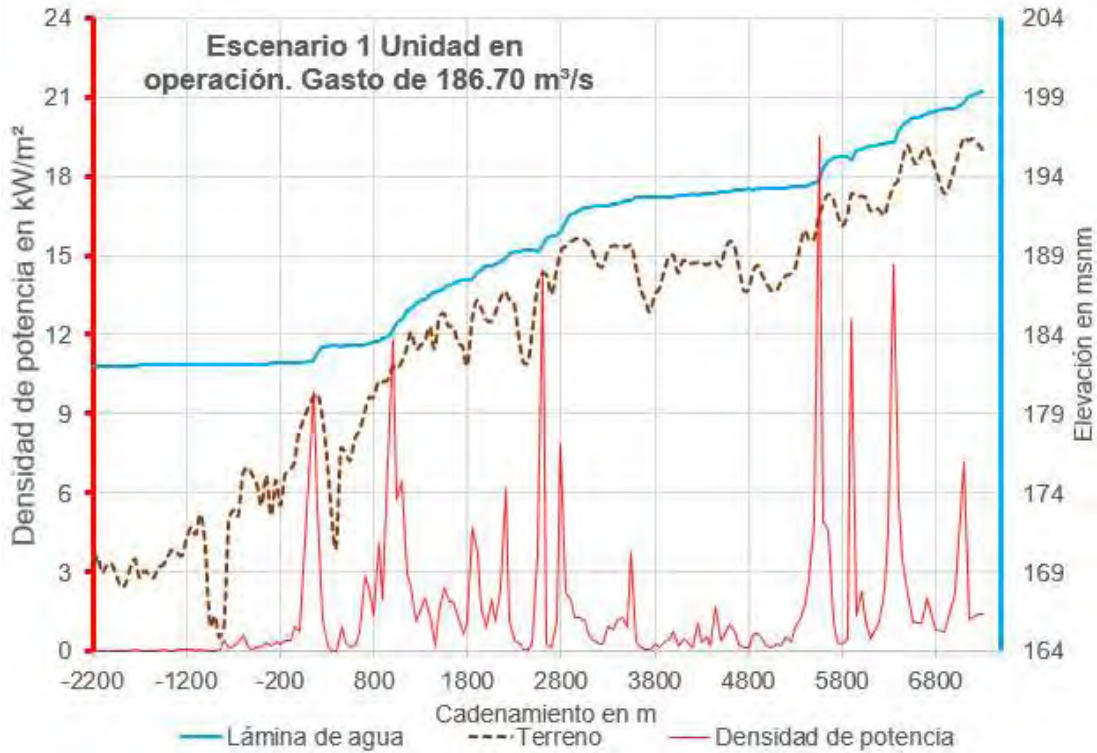


Figura 2.29 Perfil de lámina de agua y densidad de potencia 1 Unidad en operación

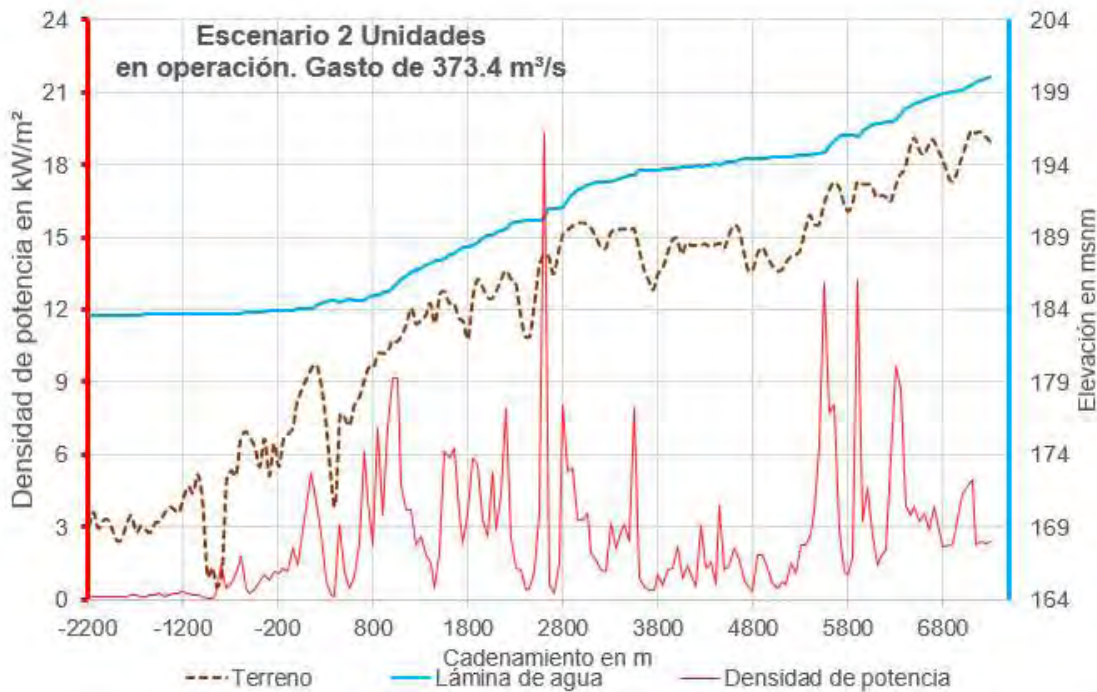


Figura 2.30 Perfil de lámina de agua y densidad de potencia 2 Unidades en operación

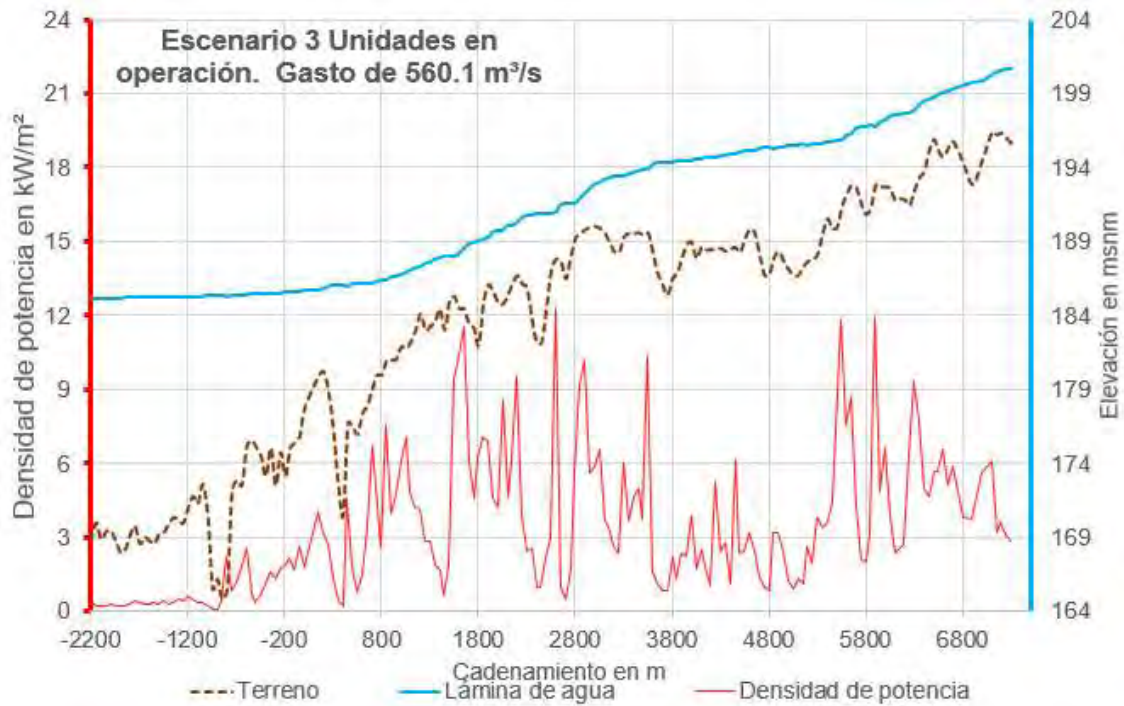


Figura 2.31 Perfil de lámina de agua y densidad de potencia 3 Unidades en operación

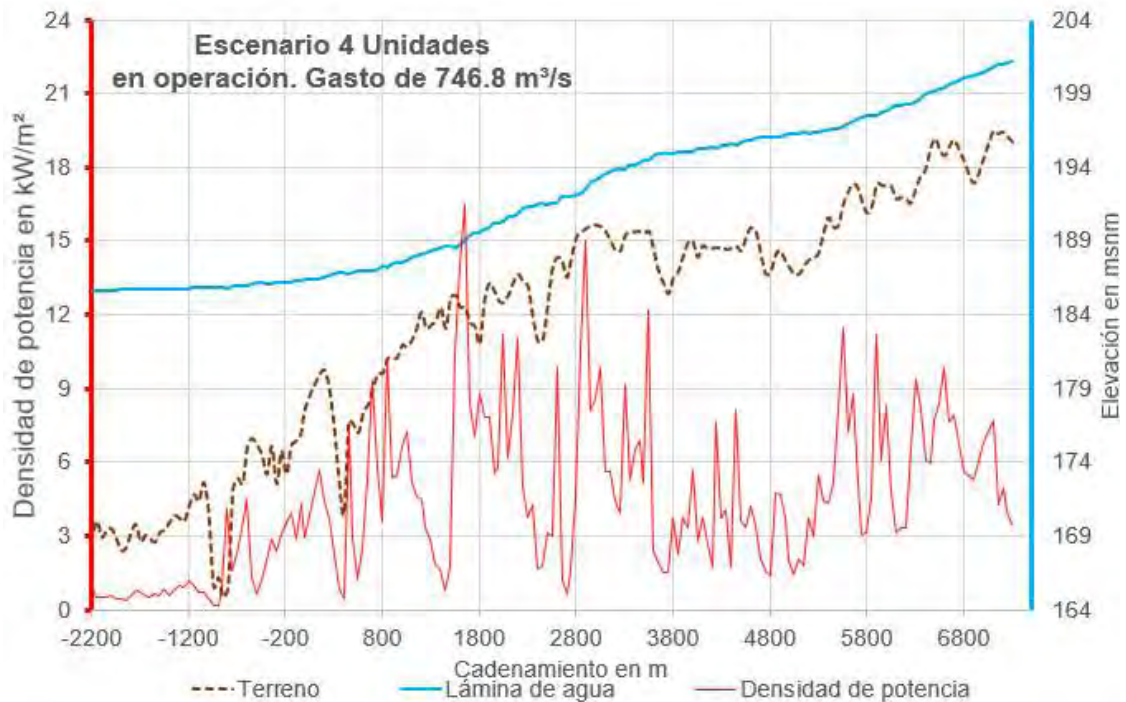


Figura 2.32 Perfil de lámina de agua y densidad de potencia 4 Unidades en operación

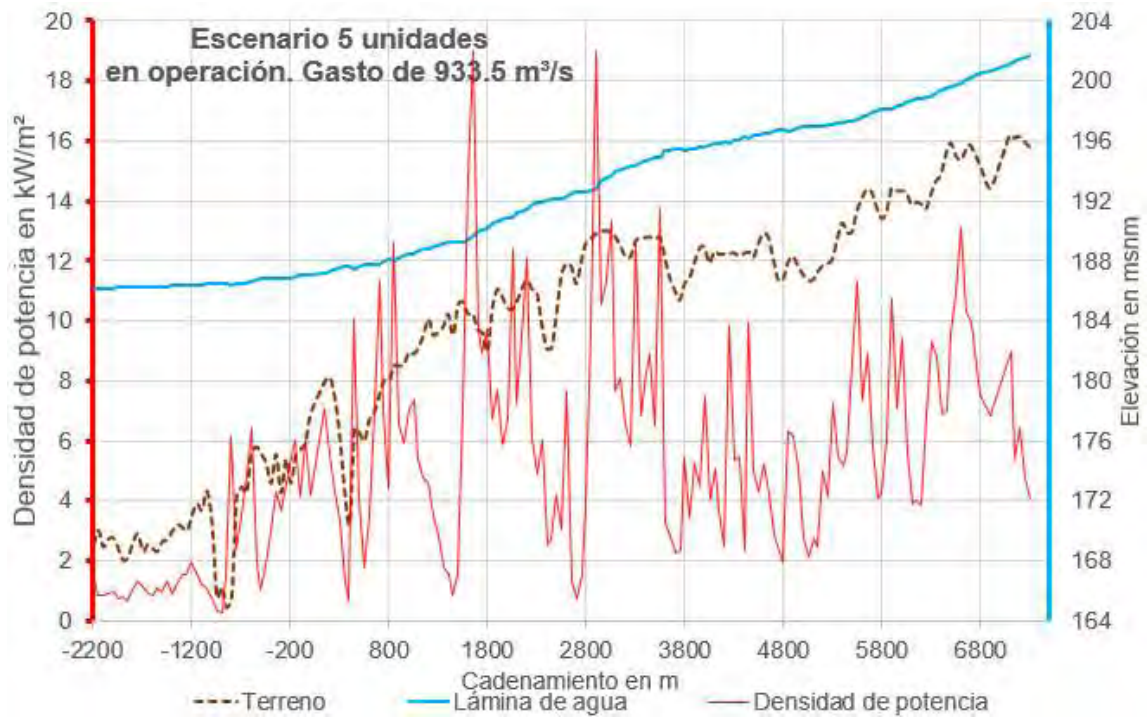


Figura 2.33 Perfil de lámina de agua y densidad de potencia 5 Unidades en operación

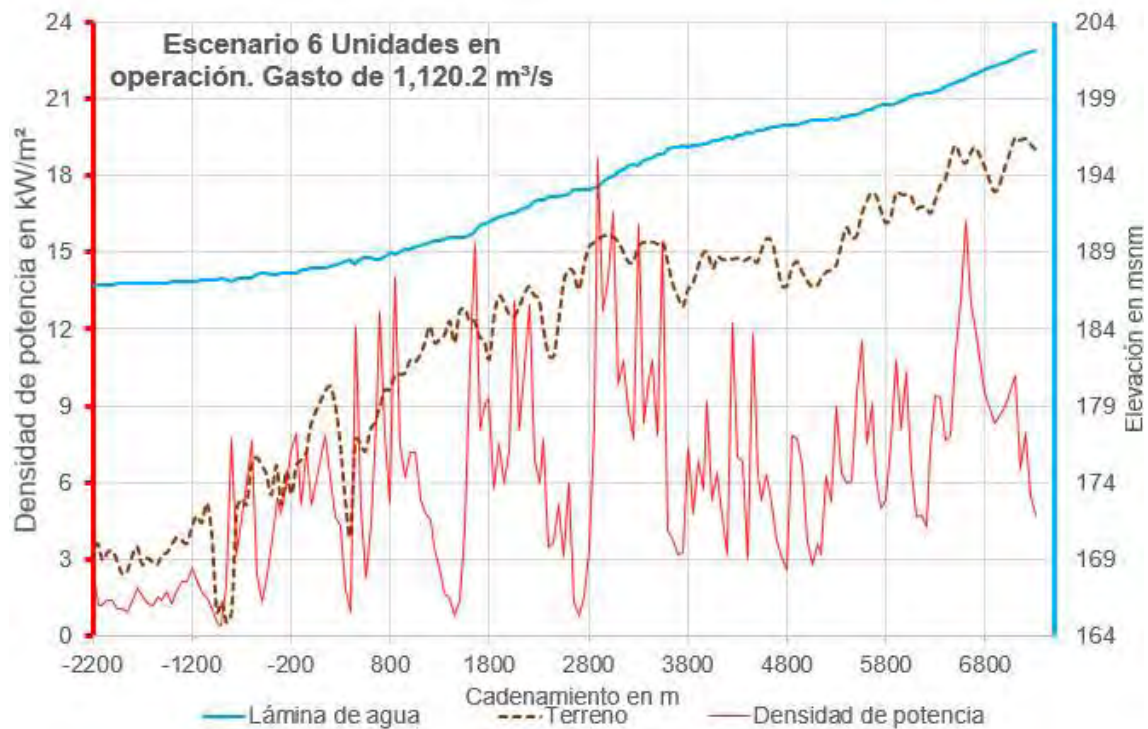


Figura 2.34 Perfil de lámina de agua y densidad de potencia 6 Unidades en operación

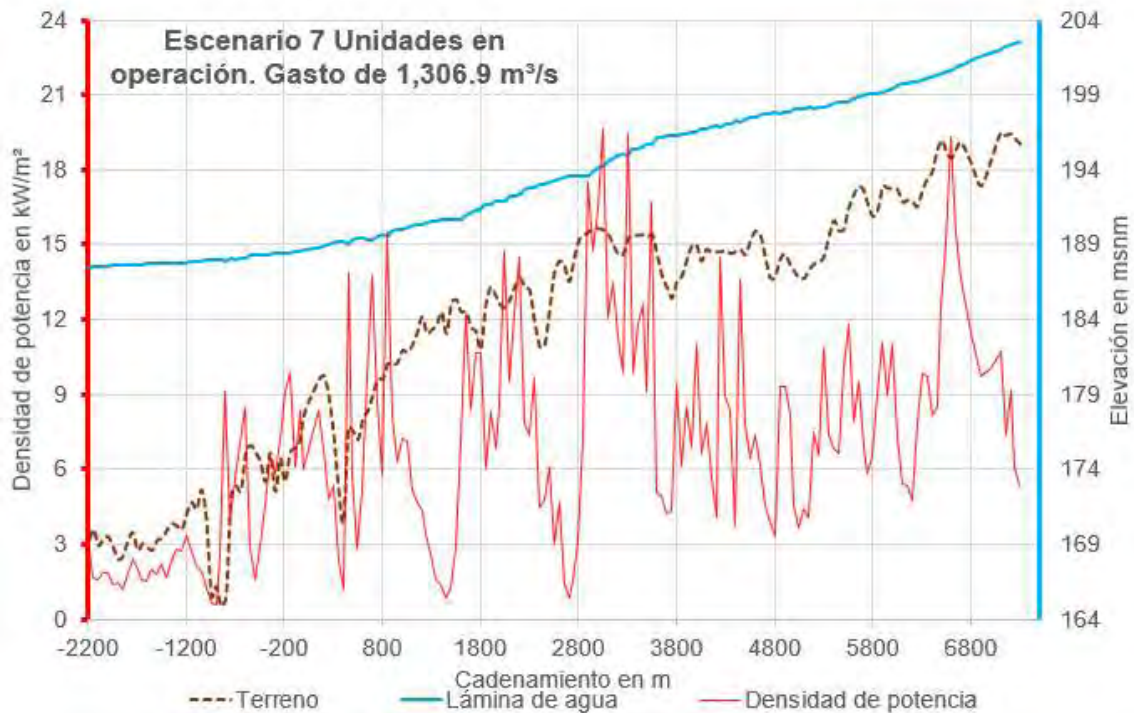


Figura 2.35 Perfil de lámina de agua y densidad de potencia 7 Unidades en operación

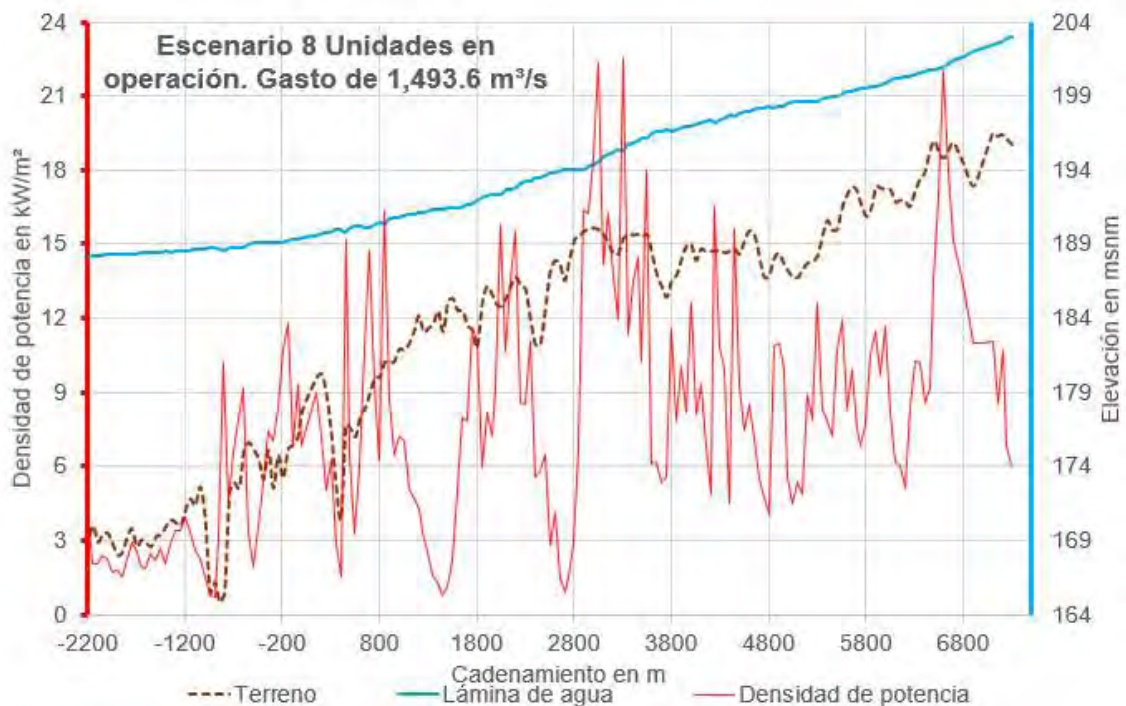


Figura 2.36 Perfil de lámina de agua y densidad de potencia 8 Unidades en operación

De las Figura 2.29 a la Figura 2.36, se observa que en algunos casos, ciertas secciones transversales en específico, el parámetro de densidad de potencia no se incrementa a medida que el gasto es mayor, esto se debe entre otras razones, a la relación existente entre el área hidráulica, velocidad, y el régimen al que

transita cada gasto. En la Figura 2.37 se observa el caso de la sección transversal ubicada en el cadenamamiento 6+300.

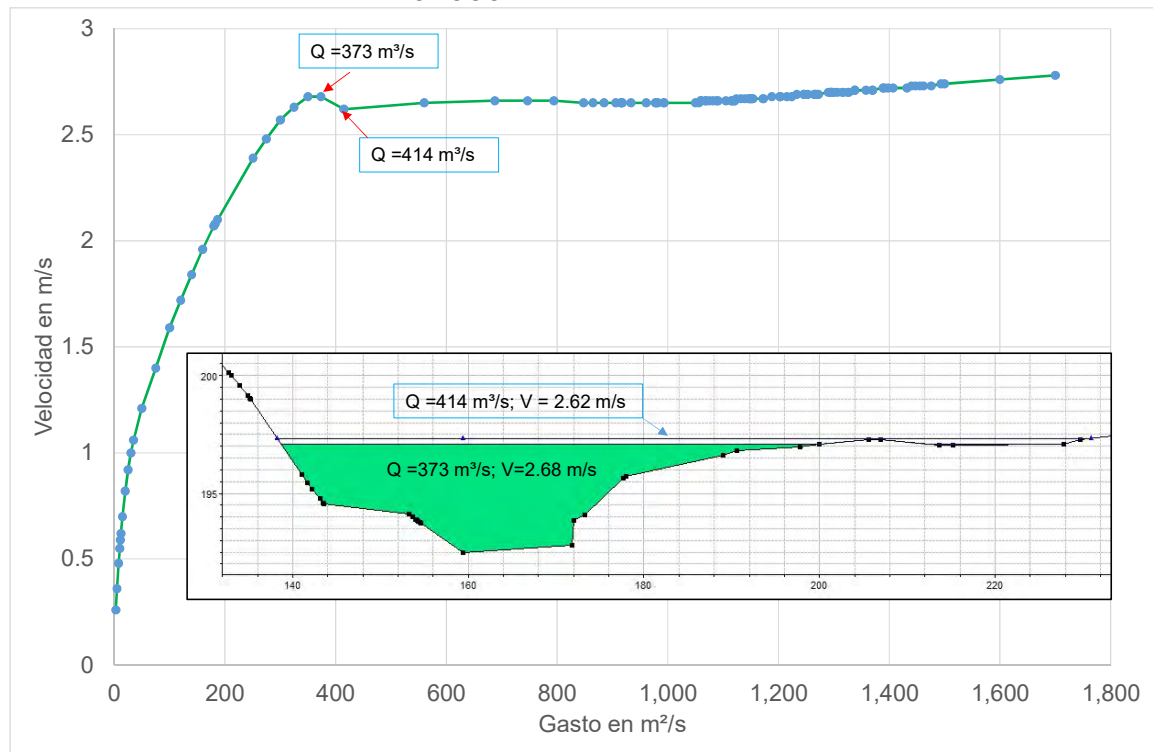


Figura 2.37 Sección transversal del cadenamamiento 6+300 y comportamiento de su velocidad para diferentes gastos

La sección transversal indicada en la Figura 2.37 es un claro ejemplo de la forma en la que se incrementa el área hidráulica y por lo tanto, aun cuando existe un incremento en el gasto, la velocidad decrece ligeramente, lo que se refleja en la densidad de potencia.

El concepto de densidad de potencia se asocia al potencial teórico hidrocínético de la sección, y se encuentra en función de la velocidad del agua. Es de gran utilidad para el estudio del aprovechamiento de energía hidrocínética, debido a que permite comparar, entre secciones que componen el tramo de un cauce en estudio, la cantidad de potencia que en condiciones ideales se podría alcanzar en cada sección.

El parámetro de densidad de energía cuenta con los siguientes aspectos limitantes:

- No hace diferencia alguna entre la distribución de velocidades que se presentan en una sección transversal
- No considera aspectos relacionados con la turbulencia
- No proporciona información sobre el tirante que se presenta en la sección
- No proporciona información sobre régimen del gasto.
- No hace consideración alguna sobre ubicación de la máquina

A pesar de las limitantes mencionadas, es un parámetro que permite evaluar bajo un mismo criterio, la energía teórica contenida entre un grupo de secciones transversales, razón por la cual, el presente estudio le ha asignado el nombre de

Potencial Teórico Hidrocinético a la estimación del parámetro de densidad de potencia a lo largo de un tramo de río. Los resultados de la evaluación del Potencial Teórico Hidrocinético permiten, posteriormente, hacer un estudio con más detalle de aquellas secciones transversales que presentaron resultados favorables, tomando en cuenta aspectos como un aprovechamiento en arreglo, dimensiones de la máquina, distancia que debe existir entre ellas, mecanismo de anclaje y energía generada. Algunos de estos aspectos se mencionan en la sección de Potencial Técnico Aprovechable.

2.5.4 Energía aprovechable bajo consideraciones de las máquinas

Para la estimación de la energía aprovechable considerando aspectos de las máquinas, se eligió la sección ubicada en el cadenamamiento 6+300 a manera de ilustración, considerando que el proceso que a continuación se describe puede ser replicado para el resto de secciones que muestren una densidad de potencia aceptable.

Se eligió una sección transversal, y se obtuvieron los valores gasto-velocidad y gasto-tirante provenientes de la modelación. Con la velocidad correspondiente a cada gasto, se calculó el parámetro de densidad de potencia. Con estos valores, se ajustó una función que modelara adecuadamente el parámetro de densidad de potencia para cada gasto, Figura 2.38, y por otro lado, una función que modelara el tirante para cada gasto, Figura 2.39. Ambas funciones se componen de diferentes ecuaciones las cuales se aplicaron a diversos rangos de gastos. La Tabla 2.14 y Tabla 2.15 establece los umbrales de gasto en los cuales son aplicadas las diferentes ecuaciones.

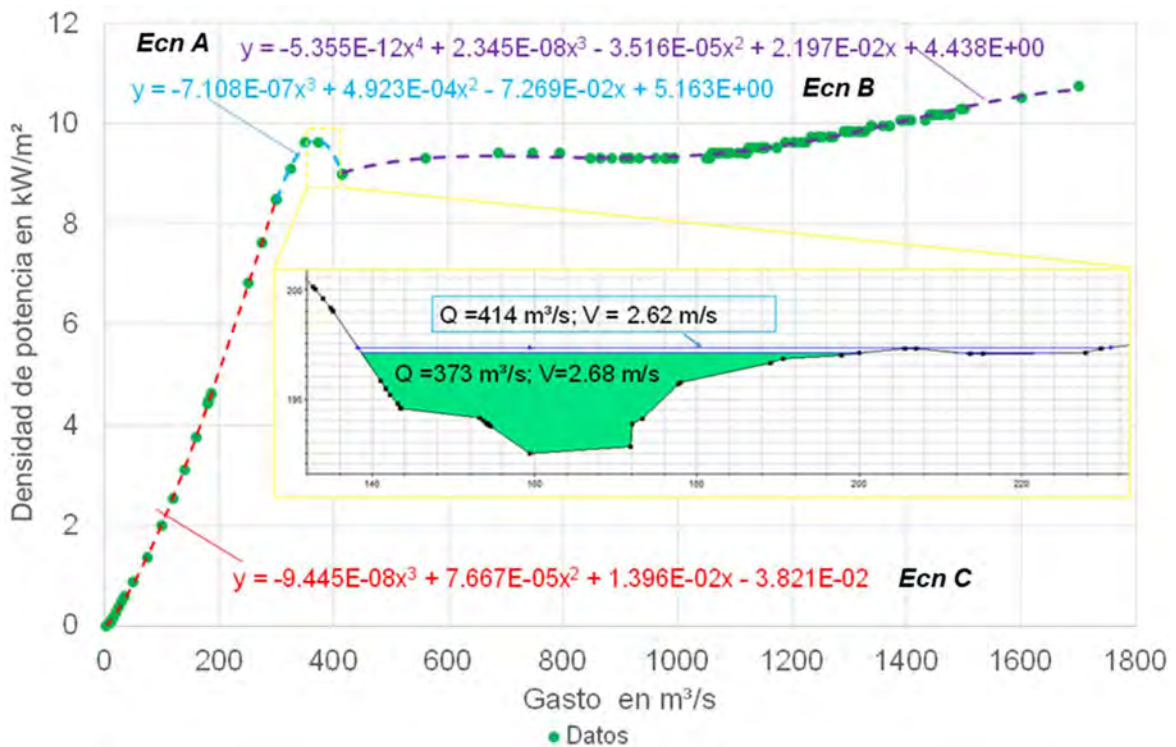


Figura 2.38 Curva de gastos vs densidad de potencia

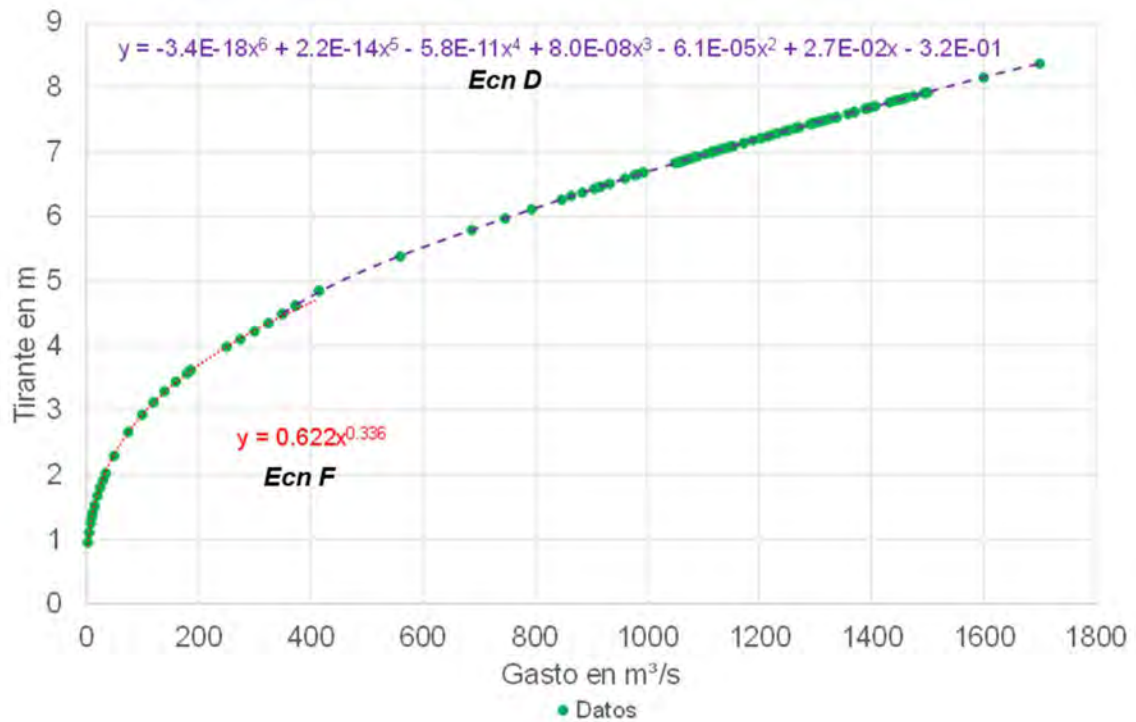


Figura 2.39 Curvas gastos vs tirantes

Tabla 2.14 Umbrales de aplicación de ecuaciones para la función que modela la curva de gastos vs densidad de potencia

Ecuación	Umbral de aplicación
Ecn A	Gastos menores a 300 m³/s
Ecn B	Gastos entre 300 y 415 m³/s
Ecn C	Gastos superiores a 415 m³/s

Tabla 2.15 Umbrales de aplicación de ecuaciones para la función que modela la curva de gastos vs tirante.

Ecuación	Umbral de aplicación
Ecn D	Gastos menores a 350 m³/s
Ecn E	Gastos iguales y superiores a 350 m³/s

Se observa una disminución de la velocidad, entre los 373 y 414 m³/s debido a que el área hidráulica se incrementa como se indica en la Figura 2.38.

Para la estimación del potencial técnico aprovechable, se recopiló, proceso y utilizó un año de la operación horaria de la Central Chicoasén. La calidad de la información permitió únicamente obtener 8,212 h de las 8,760 que originalmente tiene el año. Debido a que las 548 horas faltantes se distribuyeron uniformemente en los 365 días del año, se consideraron las 8,212 horas lo suficientemente representativas para ilustrar la energía que se podría generar en un año.

Se tuvo registro del gasto turbinado para cada una de las 8,212 horas, por lo que fue posible, a cada valor de gasto turbinado, calcular el tirante correspondiente y su densidad de potencia por medio de la aplicación de las ecuaciones ilustradas en la Figura 2.39. Se hizo el ejercicio de calcular, para la eficiencia de 0.30 y 0.45, y para diferentes diámetros, la potencia suministrada por cada hora, de la forma

$$\text{Potencia suministrada} = \rho \frac{P}{A} * A * C_p \quad \text{Ecn 3}$$

donde

$\frac{P}{A}$ densidad de potencia, en kW/m²

A área de barrido abarcado por los álabes, en m². Se determinaron diámetros desde 0.8 hasta 5.6 m con incrementos de 0.20 m.

C_p coeficiente de eficiencia de la turbina, adimensional. Se supuso 0.30 y 0.45 como límite bajo y alto respectivamente, de acuerdo a lo indicado por la literatura.

Por medio de una hoja de cálculo con condicionales aplicadas, se realizó el análisis anteriormente descrito, como se ejemplifica en la Tabla 2.16

Tabla 2.16 Ejemplo de memoria de cálculo de energía generada por máquinas de diferente diámetro.

Hora	Gastos turbinados en m ² /s	Densidad de potencia kW/m ²	Tirante en m	D=2 m	D=3.6 m	D _n = ...	D= 4.0 m	D= 5.4 m
				Área = 3.14	Área=10.17	Área _n =...	Área=12.56	Área=22.90
				Generación en kW·h	Generación en kW·h	Generación en kW·h	Generación en kW·h	Generación en kW·h
1	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	...	0.0	0.0
2	118.95	2.55	3.10	3.6	0.0	...	0.0	0.0
3	227.08	5.98	3.86	8.5	0.0	...	0.0	0.0
4	334.62	9.34	4.39	13.2	42.8	...	0.0	0.0
5	334.23	9.33	4.39	13.2	42.7	...	0.0	0.0
6	309.56	8.76	4.28	12.4	40.1	...	0.0	0.0
7	323.79	9.12	4.34	12.9	41.8	...	0.0	0.0
8	332.70	9.30	4.38	13.1	42.6	...	0.0	0.0
n	...	...	...	...	...	...	...	...
16	330.49	9.26	4.37	13.1	42.4	...	0.0	0.0
17	314.44	8.89	4.30	12.6	40.7	...	0.0	0.0
18	305.76	8.65	4.26	12.2	39.6	...	0.0	0.0
19	....	....	....	....	....	....	....	....

Debido a que los valores se calcularon en diferenciales de tiempo de una hora, la potencia suministrada por hora representa la generación, conforme a lo estudiado en los antecedentes. De esta forma, se calculó la cantidad de generación en un año de acuerdo a la operación de la Central Hidroeléctrica Chicoasén, y se vinculó con el número de horas en la que la máquina operó en ese año, para la sección transversal de estudio. El resumen de resultados se muestra en la Tabla 2.17, para una eficiencia del sistema del 30%

Tabla 2.17 % del año operado para los diámetros analizados.

Diámetro en m	% del año en operación	Generación anual en kW·h	Diámetro en m	% del año en operación	Generación anual en kW·h	Diámetro en m	% del año en operación	Generación anual en kW·h
0.8	62	5,878	2.6	55	61,392	4.2	29	97,602
1.0	62	9,184	2.8	53	70,725	4.4	27	99,446
1.2	62	13,224	3.0	45	80,243	4.6	23	92,120
1.4	61	17,998	3.2	43	84,676	4.8	19	84,777
1.8	60	29,729	3.4	41	93,305	5.0	17	81,439
2.0	60	36,664	3.6	58	100,793	5.2	14	71,767
2.2	59	44,277	3.8	39	107,051	5.4	12	66,221
2.4	56	52,532	4.0	32	97,761			

De la Tabla 2.17 se hacen las siguientes observaciones:

- Se aprecia la mayor cantidad de horas de operación a medida que el diámetro es menor, esto debido a que el tirante es el suficiente para que opere la máquina.
- A medida que el diámetro es mayor, la energía es mayor por concepto del área de barrido, pero las horas de operación son menores, debido a que los tirantes no proporcionan las condiciones mínimas para la operación de la máquina
- La energía generada será máxima para cierto diámetro el cuál presente un equilibrio entre la generación por concepto del área de barrido y las horas que opera.

Las observaciones anteriormente descritas se ilustran en la Figura 2.40

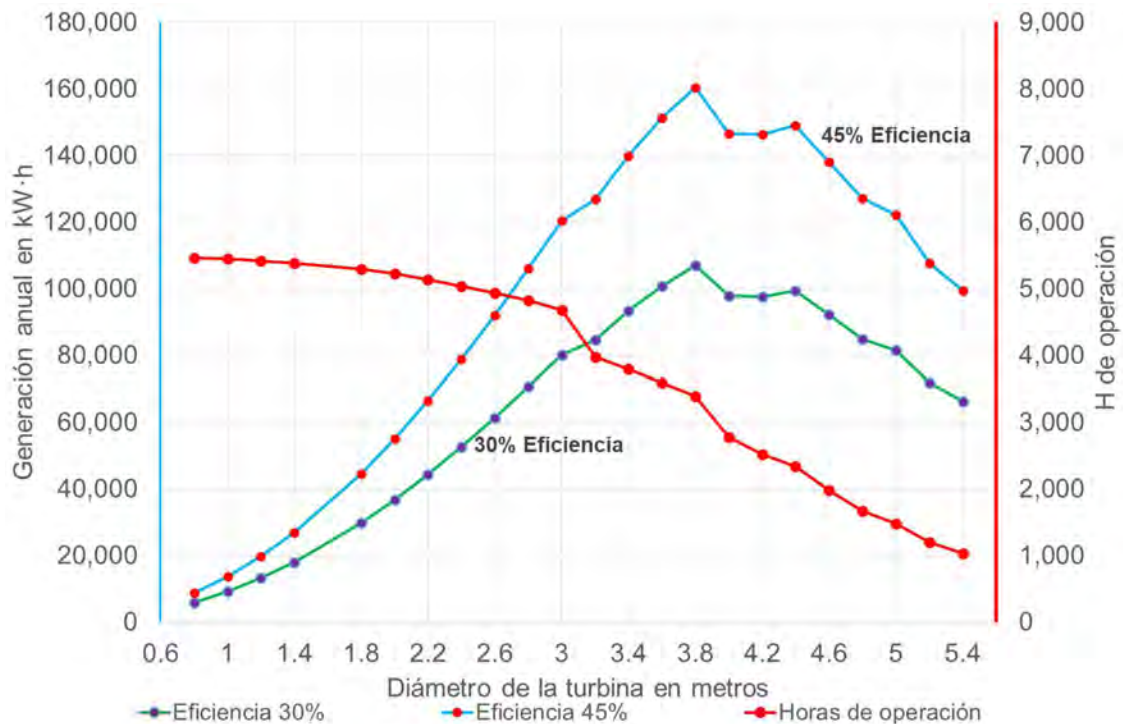


Figura 2.40 Generación anual en kW·h y horas de operación para eficiencia del 30 y 45%

Para la sección transversal estudiada, se concluye de la Tabla 2.17 y Figura 2.40 que la mayor cantidad de generación se presenta con un diámetro de 3.8 m, operando un 39% del tiempo.

Para una eficiencia en el sistema del 30%, la energía generada es de 107,051 kW·h, que haciendo las conversiones pertinentes, resulta proporcional a

- 9.2 toneladas equivalentes de petróleo (toe)
- 107 toneladas de CO₂ generado utilizando carbón
- 92 toneladas de CO₂ por medio que utilizan combustóleo
- Energía consumida durante un año de alrededor de 100 viviendas rurales

El presente estudio le asignó la denominación de **Potencial Técnico Aprovechable** a la energía estimada.

Del caso práctico anterior, se aprecia que la cantidad de energía generada parecer ser baja, considerando una máquina de 3.8 metros de diámetro, por lo que se espera que no sea un proyecto económicamente atractivo. Una de las razones se debe a la permanencia de gastos turbinados por la C.H Chicoasén como se explica a continuación.

Con el procesamiento de la información horaria de gastos turbinados de la C.H Chicoasén, se construyó una curva de permanencia de gastos turbinados. El resultado se observa en la Figura 2.41

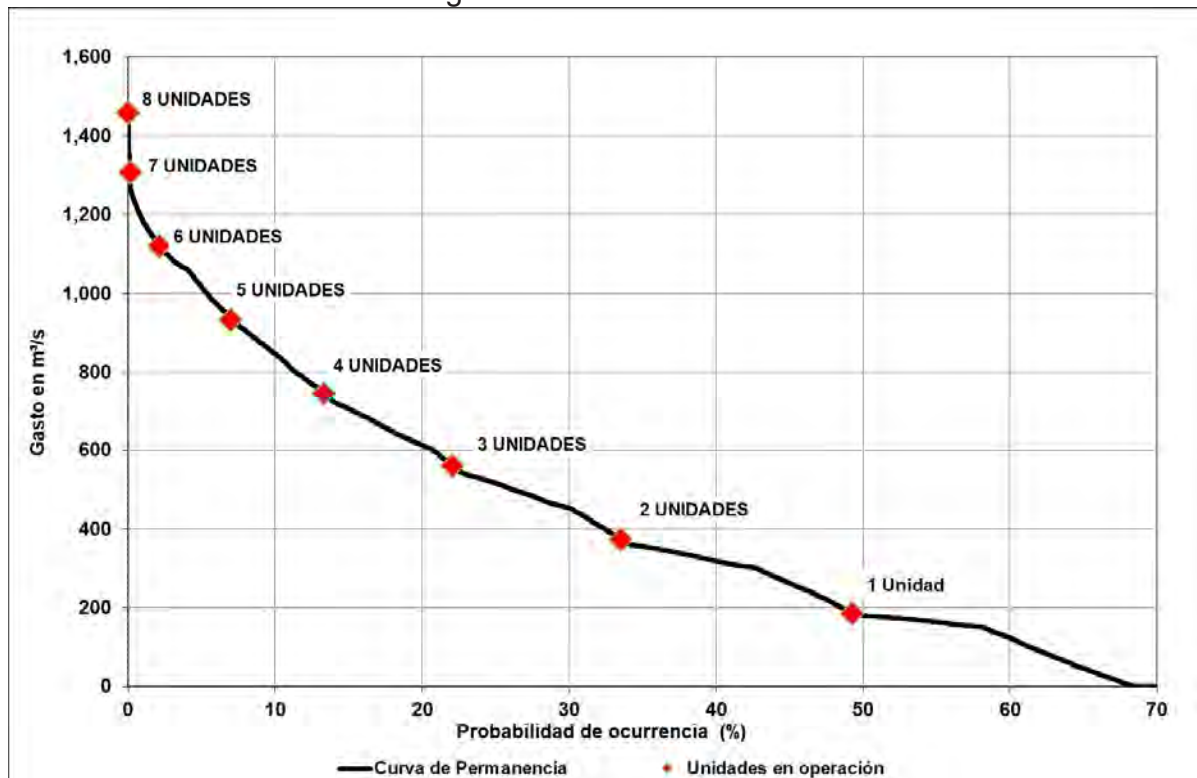


Figura 2.41 Permanencia de gastos turbinados de la C.H Chicoasén

Se observa de la Figura 2.41, que la C.H Chicoasén no turbinan gasto alguno poco más del 30% del tiempo. Por otro lado, de la interpretación de la curva de

permanencia, se concluye que poco más del 50% del tiempo, se turbinan un gasto menor al equivalente al de una unidad.

Esto significa que el aprovechamiento hidrocínético no genera energía alguna gran parte del tiempo, debido a la política de operación de la C.H Chicoasén, razón por la cual la cantidad de energía es reducida. Una Central Hidroeléctrica con una alta permanencia de gastos turbinados representaría una opción más atractiva para su estudio. Se identifica la zona aguas debajo de la C.H Peñitas, como una opción atractiva para su estudio, debido a que turbinan los mayores gastos la mayor parte del tiempo.

Importante recalcar que el estudio recién descrito, hace referencia a una corriente regulada debido a la existencia de una presa aguas arriba del tramo estudiado, y cuya política de operación obedece a la generación de energía eléctrica, es decir, no son las condiciones naturales de un río.

En lo que respecta a turbinas hidrocínéticas, en México, Robaldi Vázquez estudió el comportamiento, así como los efectos de la inclusión de una turbina hidrocínética dentro de un canal rectangular con flujo a superficie libre en régimen subcrítico y concluyó que es posible extraer energía hidrocínética de canales, siempre que se mejoren tanto como sean posible las condiciones de rugosidad de las paredes, y se garantice una operación totalmente ahogada del dispositivo. (Robaldi Vázquez, 2011).

3. METODOLOGÍA

3.1 DIAGNÓSTICO A TRAVÉS DEL ANÁLISIS PEST Y FODA

Se define a un **diagnóstico** como el resultado del análisis que se realiza en una primera instancia y que tiene como fin permitir conocer las características específicas de una situación determinada para así poder actuar en consecuencia, sugiriendo estrategias o no. La Real Academia de la Lengua Española define diagnóstico como la acción de recoger y analizar datos para evaluar problemas de diversa naturaleza

El análisis PEST realiza una valoración del macro-entorno de la tecnología, desde una perspectiva que abarca aspectos Políticos, Económicos, Sociales y Tecnológicos.

El análisis PEST realiza una **valoración del macro-entorno de la tecnología**, desde una perspectiva que abarca aspectos Políticos, Económicos, Sociales y Tecnológicos. Considerando la naturaleza que rige a los aprovechamientos hidrocínicos, se analiza el aspecto **Político, Económico, Social y Técnico** del macro-entorno de los aprovechamientos hidráulicos con fines de generación de energía eléctrica, valorando e identificando aquellos factores que mayor influencia pueden tener sobre la tecnología.

La elección del análisis PEST como herramienta, se basa en el hecho de que proporciona una base sólida para evaluar el potencial de una tecnología de acuerdo a los aspectos externos a ella. Esto gracias a que se responden preguntas como:

¿Qué postura del ambiente político sobre la tecnología?

¿Qué aspectos económicos ajenos a la tecnología podrían beneficiar o perjudicarla?

¿Cuál es escenario social y su influencia sobre la tecnología?

¿Cuál es el escenario tecnológico y cómo influye sobre la tecnología?

El análisis FODA realiza una **valoración de la tecnología** desde una perspectiva que abarca los aspectos internos y externos a la misma con el fin de identificar las Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas obedeciendo al siguiente criterio:

Fortalezas: Características de la tecnología, que la coloca en una posición de ventaja sobre otras

Debilidades: Características de la tecnología que la pone en una posición de desventaja sobre otras.

Oportunidades: Elementos externos a la tecnología, que la tecnología puede aprovechar para su beneficio

Amenazas: Elementos externos a la tecnología, que pueden causar problemas a la tecnología.

Se trata de una herramienta de análisis que favorece la toma de decisiones y cuya ejecución permite tener una mayor claridad hacia donde se deben dirigir esfuerzos para lograr un objetivo.

La elección de la herramienta PEST y FODA se fundamenta en ser la adecuada para el estudio, análisis y determinación de las posibilidades de una nueva tecnología de incursionar en el mercado

La construcción del diagnóstico permite concluir el desarrollo del trabajo con la propuesta de estrategias dirigidas a impulsar a los aprovechamientos hidrocinéticos.

4. ANÁLISIS PEST

El análisis PEST permite estudiar el macro-entorno respecto a una tecnología, valorando e identificando aquellos factores que mayor influencia generan en el sector. Para el presente estudio, teniendo en cuenta que los aprovechamientos hidrocinéticos tienen como objetivo proveer de energía eléctrica por medio el agua se analizó el aspecto Político, Económico, Social y Técnico de la generación de energía eléctrica a través del agua.

4.1 POLÍTICO

4.1.1 Ley de Transición Energética (LTE)

Ley que tiene como objetivo regular el aprovechamiento sustentable de la energía, así como las obligaciones en materia de energías limpias y de reducción de emisiones contaminantes de la Industria Eléctrica, manteniendo la competitividad de los sectores productivos, esto a través de las siguientes acciones:

- Prever el incremento gradual de la participación de las Energías Limpias en la Industria Eléctrica con el objetivo de cumplir las metas establecidas en materia de generación de energías limpias y de reducción de emisiones.
- Facilitar el cumplimiento de las metas de Energías Limpias y Eficiencia Energética referidas en esta Ley de una manera económicamente viable.
- Incorporar las externalidades en la evaluación de los costos asociados a la operación y expansión de la Industria Eléctrica, incluidos aquellos sobre la salud y el medio ambiente.
- Determinar las obligaciones en materia de aprovechamiento sustentable de la energía y eficiencia energética.
- Establecer mecanismos de promoción de energías limpias y reducción de emisiones contaminantes.
- Reducir, bajo condiciones de viabilidad económica, la generación de emisiones contaminantes en la generación de energía eléctrica.
- Promover el aprovechamiento energético de recursos renovables y de los residuos.
- Regular el aprovechamiento sustentable de la energía
- Establece las obligaciones en materia de energías limpias y de reducción de emisiones contaminantes de la Industria Eléctrica
- Definir las bases legales para impulsar una transformación hacia un modelo energético y económico sustentable en el largo plazo.

De esta ley, se derivan documentos que funcionan como directrices para sus objetivos. Se citan aquellos de mayor relevancia, para el análisis del macro-

entorno político de los aprovechamientos hidráulicos con fines de generación de energía hidrocinética en ríos.

La LTE en su artículo 3o. define como instrumento de planeación a la Estrategia y al Programa Especial de la Transición Energética (PETE) y al PRONASE, como políticas obligatorias en materia de energías limpias y eficiencia energética como se indica en la Tabla 4.1

Tabla 4.1 Políticas obligatorias de la Estrategia de Transición para promover el uso de Tecnologías y Combustibles más Limpio

Instrumento de planeación	Políticas obligatorias	
ESTRATEGIA DE TRANSICIÓN PARA PROMOVER EL USO DE TECNOLOGÍAS Y COMBUSTIBLES MÁS LIMPIOS	<i>Programa Especial de la Transición Energética (PETE)</i>	Establecerá las acciones, proyectos y actividades derivadas de la Estrategia, que permitan alcanzar las metas en materia de eficiencia energética en el corto plazo
	<i>Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía (PRONASE):</i>	Instrumentar las acciones establecidas en la propia Estrategia para la Administración Pública Federal, asegurando su viabilidad económica

La Estrategia tiene un componente de planeación de 15 años que se considera de mediano plazo y otro de 30 de largo plazo, así mismo constituye el instrumento rector de la política nacional en el mediano y largo plazos, en materia de obligaciones de energías limpias y aprovechamiento sustentable de la energía.

De acuerdo al Artículo 3, Sección XVI, se definen como energías renovables aquellas cuya fuente reside en fenómenos de la naturaleza, procesos o materiales susceptibles de ser transformados en energía aprovechable por el ser humano, que se regeneran naturalmente, por lo que se encuentran disponibles de forma continua o periódica, y que al ser generadas no liberan emisiones contaminantes. Se consideran fuentes de energías renovables las siguientes:

- a) El viento;
- b) La radiación solar, en todas sus formas;
- c) El movimiento del agua en cauces naturales o en aquellos artificiales con embalses ya existentes, con sistemas de generación de capacidad menor o igual a 30 MW o una densidad de potencia, definida como la relación entre capacidad de generación y superficie del embalse, superior a 10 watts/m²;
- d) La energía oceánica en sus distintas formas, a saber: de las mareas, del gradiente térmico marino, de las corrientes marinas y del gradiente de concentración de sal;
- e) El calor de los yacimientos geotérmicos, y

f) Los bioenergéticos que determine la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos. (SENER, Ley de Transición Energética, 2016)

En la Figura 4.1 se observa la capacidad instalada de energías renovables en la república mexicana, con datos al año 2015, y en la Figura 4.2 la generación de energía renovable por tipo de tecnología.

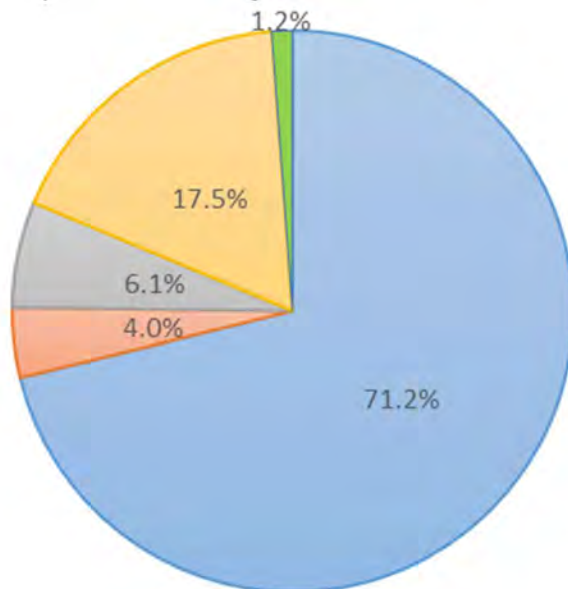


Figura 4.1 Porcentaje de capacidad instalada de energías renovables en México, (IRENA, 2016)

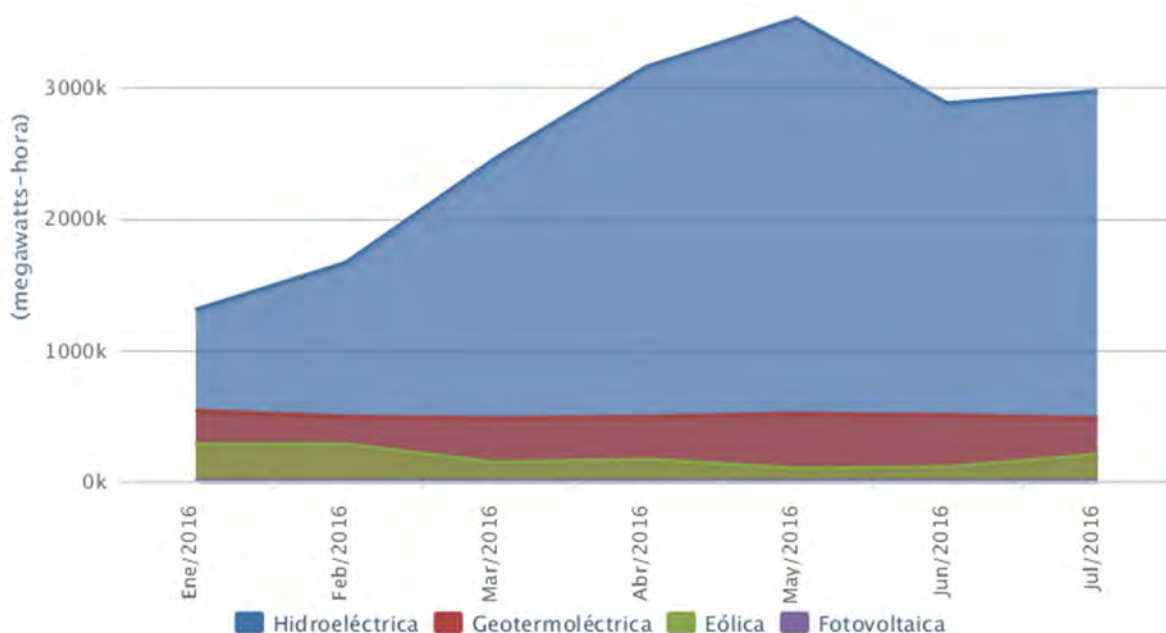


Figura 4.2 Generación de energía renovable por tecnologías (SENER, Sistema de Información de Energía, 2016)

4.1.2 La Reforma Energética

Se trata de la creación de un nuevo marco jurídico e institucional, y cuyo objetivo central fue el de crear mercados de competencia en áreas donde antes únicamente podían participar empresas propiedad del estado, y en donde se permite que las empresas privadas inviertan de manera individual o se asocien con las empresas productivas del Estado para diversificar riesgos, compartir inversiones y **asimilar nuevas tecnologías**.

Se espera que por medio de la reforma energética se alcancen los siguientes objetivos:

- Atraer mayor inversión al sector energético mexicano para impulsar el desarrollo del país.
- Contar con un mayor abasto de energéticos ofrecidos a mejores precios.
- Impulsar el desarrollo del sector procurando la sostenibilidad social y la protección al medio ambiente
- Elimina barreras de entrada y simplifica los trámites de interconexión, con lo que incentiva la inversión privada.
- Incorpora instrumentos que permiten realizar consultas y evaluaciones del impacto social de los proyectos.
- Promueve la comercialización de energía bajo condiciones de competencia, mediante el nuevo mercado eléctrico.
- Incentiva las inversiones con mecanismos como los Certificados de Energías Limpias (CEL) y apoyos fiscales.
- Crea un marco regulatorio favorable para impulsar la generación limpia distribuida.
- Incorporar infraestructura de transmisión para transportar la electricidad generada. (DOF, 2016)

4.1.3 Ley de la Industria Eléctrica (LIE)

Ley que tiene como objetivo regular la planeación y el control del Sistema Eléctrico Nacional, el Servicio Público de Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica y las demás actividades de la industria eléctrica, misma que comprende las actividades indicadas en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Actividades comprendidas en la Industria Eléctrica

Industria Eléctrica	
Generación	Energía
Transmisión	
Distribución	
Comercialización	
Planeación	Sistema Eléctrico Nacional
Control	
Operación	Mercado Eléctrico Mayorista

Aun cuando la energía hidroeléctrica se relaciona directa o indirectamente con las actividades de la industria eléctrica indicadas en la Tabla 4.2, se identifica una relación directa en las actividades de Generación y el Mercado Eléctrico Mayorista. Con la generación debido a que la LIE establece las pautas sobre el tipo de generador que se puede llegar a ser, y con el Mercado Eléctrico Mayorista debido a la participación que la generación de la energía en su venta a través de dicho mercado.

4.1.4 Principios del funcionamiento del Mercado Eléctrico Mayorista

Se trata de un Mercado operado por el Centro Nacional de Control de Energía, en el que los participantes podrán realizar transacciones de Energía, o bien, productos asociados con ella, los cuales pueden ser: Potencia, Certificados de Energías Limpias, Derechos financieros de transmisión y servicios conexos.

Se identifican a los siguientes actores involucrados, así como sus respectivos roles:

- *Centro Nacional de Control de Energía (CENACE)*

Responsable de analizar la demanda de energía, y ejercer el control del Sistema Eléctrico Nacional, de tal forma que la interconexión de las centrales de generación pueda funcionar adecuadamente, y de esta forma satisfacer la demanda de energía en una zona, la operación del Mercado Eléctrico Mayorista y garantizar imparcialidad en el acceso a la Red Nacional de Transmisión y a las Redes Generales de Distribución, formular los programas de ampliación y modernización de la Red Nacional de Transmisión y de las Redes Generales de

Distribución, los cuales en caso de ser autorizados por la SENER se incorporan al Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN).

- *Comisión Reguladora de Energía (CRE)*

Regula las actividades de la industria energética que a su cargo, y de esta forma, dar certidumbre en la inversión, orientar intereses de los usuarios y sujetos regulados al desarrollo de un mercado energético competitivo y sostenible.

- *Generador*

Titular de uno o varios permisos de la Comisión Reguladora de Energía, para generar electricidad y que cuenta con una o varias centrales eléctricas con una potencia instalada igual o superior a 0.5 MW. Puede participar directamente en el Mercado Eléctrico Mayorista y en subastas a largo plazo, así como realizar contratos con Usuarios Calificados y Suministradores de Servicios Calificados para vender su electricidad y Productos Asociados.

- *Generador Exento*

Titular de una o varias pequeñas centrales eléctricas, las cuáles, al tener una potencia instalada inferior a 0.5 MW, por lo que no requieren permiso de parte de la Comisión Reguladora de Energía para operar. Pueden vender su electricidad y Productos Asociados a un Suministrador de Servicios Básicos, y participar en el Mercado Eléctrico Mayorista pero a través de un Suministrador de Servicios Calificados, o bien, dedicar su producción al abasto aislado.

- *Usuario Calificado*

Usuario cuyo centro de carga es superior a 1 MW.

- *Usuario de Suministro Básico*

Usuario que no sea considerado calificado, y cuya tarifa se encuentra sujeta a regulación.

- *Suministrador de Servicios Básicos*

Permisionario que ofrece el Suministro Básico a los Usuarios de Suministro Básico y representa en el Mercado Eléctrico Mayorista a los Generadores Exentos que lo soliciten, para que puedan participar en el mismo.

- *Suministrador de Servicios Calificados*

Proveedor de servicios de comercialización de energía, que compra energía en el Mercado Eléctrico Mayorista para proporcionársela a los Usuarios Calificados.

- *Abasto aislado*

Es la generación o importación de energía eléctrica para cubrir parte o la totalidad de las necesidades propias, sin que esta electricidad se transmita por la Red Nacional de Transmisión o las Redes Generales de Distribución. Sin embargo, esto no implica que bajo la modalidad de Abasto Aislado no se pueda interconectar a la red con la finalidad de vender energía sobrante o de adquirir energía faltante a través del Mercado Eléctrico Mayorista. Las Centrales Eléctricas podrán destinar toda o parte de su producción para fines de abasto aislado.

Se muestra en la Tabla 4.3 las principales transacciones relacionadas con el Mercado Eléctrico Mayorista.

Tabla 4.3 Resumen de las transacciones integradas en el Mercado Eléctrico Mayorista

Venden	Mercado Eléctrico Mayorista	Compran	
<ul style="list-style-type: none"> • Generador (>0.5 MW) • Generador exento (Potencia <0.5 MW) representado por un Suministrador de Servicios Calificados (SSC) 	Energía	<ul style="list-style-type: none"> • Usuario calificado • Suministrador de Servicios Básicos • Suministrador de Servicios Calificados 	
	Productos Asociados		Potencia
			Certificados de Energías Limpias
			Derechos Financieros de Transmisión
			Servicios Conexos
	Demanda Controlable		

Dentro del Mercado Eléctrico Mayorista, es posible realizar Contratos de Cobertura Eléctrica, en donde se compromete a la compra-venta de energía y sus productos asociados en fechas específicas y respetando cierto precio. (Congreso de la Unión, 2014).

- *Certificado de Energías Limpias*

Títulos que acreditan la producción de energía eléctrica limpia en donde la figura de los Generadores recibirán un CEL por cada megawatt-hora de energía limpia generado para vender en el mercado. Para el caso en el que se utilicen energías limpias y fósiles, sólo se otorgará CEL por el porcentaje de energía generado libre de combustible. La ley de la Industria Eléctrica define como energía limpia, aquellas fuentes de energía y procesos de generación de electricidad cuyas emisiones o residuos, cuando los haya, no rebasen los umbrales establecidos en las disposiciones reglamentarias que para tal efecto se expidan. En su inciso h, declara como energía limpia a la energía proveniente de centrales hidroeléctricas. Los participantes que tienen obligación de adquirir CEL's debido a que un porcentaje de la energía eléctrica que consumen debe provenir de fuentes limpias, son los siguientes:

- Suministradores de Servicios Básicos (entre ellos CFE);
- Suministradores de Servicios Calificados (entre ellos CFE);
- Usuarios Calificados que participan directamente en el Mercado Eléctrico Mayorista;
- Usuarios finales que se suministren por Abasto Aislado
- Titulares de los contratos de Interconexión Legados que incluyan Centros de Carga o Puntos de Carga cuya energía eléctrica no provenga en su totalidad de una Central Eléctrica Limpia.

Para comprobar que están consumiendo este porcentaje, tienen que comprar CEL por el monto requerido por la Secretaría de Energía. De esta forma se crea una oferta y demanda por CEL, los cuales se pueden intercambiar a través de contratos, en el *mercado de CEL*, en *subastas mensuales* organizadas por el CENACE o en una liquidación anual.

El precio de los CEL's no es fijo pues es un instrumento de mercado que depende de la oferta y la demanda, en donde los Participantes del Mercado pueden presentar ofertas para vender CEL a cualquier precio, así como presentar ofertas para comprar CEL a cualquier precio. La compra-venta podrá realizarse a través del Mercado de CEL que organizará por lo menos una vez al año el CENACE, de igual manera también podrán comercializarse libremente mediante Contratos Bilaterales o Subastas de Largo Plazo.

Se muestra a continuación un ejemplo del funcionamiento de los CEL's.

- Suponiendo que el consumo de determinado centro de carga para el 2018 es de 100,000 MWh y que el requisito establecido por SENER para el 2018 es del 5% de generación en energía limpia, la obligación del centro de carga para el 2018 es de: $100,000 \text{ MWh} * (0.05) = 5,000 \text{ MWh}$. Bajo el entendido que 1 CEL = 1 MWh, el participante obligado tendría que adquirir y en su momento liquidar 5,00 CEL para el 2018.

- *Fondo de Servicio Universal Eléctrico*

Tiene como objetivo, financiar acciones e instrumentar programas de apoyo para la electrificación en las comunidades rurales y zonas urbanas marginadas que aún no tienen acceso a este servicio y están alejadas de las redes existentes, promoviendo el uso de las Energías Limpias.

Los recursos de este Fondo dependerán de todos los participantes del Mercado Eléctrico Mayorista y aportaciones de la CFE. Para ser candidato a recibir financiamiento, es necesario cumplir con los siguientes requerimientos:

- Que los potenciales beneficiarios no reciben ni hayan recibido recursos similares o idénticos a los que financia el Fondo de Servicio Universal Eléctrico por parte de programas federales;
- Que algún representante de la Localidad haya manifestado por escrito la intención de contar con el Suministro de Energía Eléctrica y cooperar con el desarrollo del Proyecto de Electrificación, además que confirme por escrito la disposición de cumplir un esquema de corresponsabilidad en el proyecto
- Que la Localidad no cuente con acceso al suministro eléctrico
- Que el costo del proyecto sea menor que el máximo valor total a partir del Catálogo de Precios para al componente de Extensión de Redes Generales de Distribución aplicable a la invitación y el máximo valor unitario [\$/vivienda] para el componente de Sistemas aislados de electrificación aplicable a la Convocatoria.
- Que la solución tecnológica de los Proyectos corresponda con la que señale la Invitación o la Convocatoria.

En mayo de 2017, se anunció la primer Convocatoria del Fondo de Servicio Universal Eléctrico, se concentra en la gestión de sistemas aislados, indicando como solución tecnológica a los paneles fotovoltaicos, sin embargo, se espera que futuras convocatorias contemplen el uso de otras tecnologías.

4.1.5 Sistema Eléctrico Nacional y su funcionamiento

- *Sistema Eléctrico Nacional*

Se define como el conjunto de instalaciones destinadas a la generación, transmisión, distribución y venta de energía eléctrica de servicio público en toda la República, estén o no interconectadas. (SENER, Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables, 2013). Se integra por 10 regiones de control tal y como se indica en la Figura 4.3. Debido a que la energía no puede ser almacenada en grandes cantidades, el Sistema Eléctrico Nacional debe suministrar energía en tiempo real, lo que significa, que la energía es generada, transmitida y suministrada a medida que la demanda del país así lo exige.



Figura 4.3 Regiones de control del Sistema Eléctrico Nacional (SENER, PRODESEN, 2016)

Las regiones 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 se encuentran interconectadas, y conforman el Sistema Eléctrico Nacional. Las regiones 8, 9 y 10 se encuentran eléctricamente aisladas del resto de regiones

- *Curva de demanda de energía:*

Se define como un gráfico que representa la variación secuencial de la demanda de potencia horaria en un intervalo de un día. La cantidad de demanda de energía se encuentra asociada a la ubicación geográfica, temporada del año, y a las actividades productivas que se desarrollan en la región.

Es responsabilidad del CENACE analizar la demanda de energía, y organizar el Sistema Eléctrico Nacional, de tal forma que la interconexión de las centrales de generación pueda funcionar adecuadamente, y de esta forma satisfacer la demanda de energía en una zona. (SENER, PRODESEN, 2016)

El CENACE permite por medio de su portal, observar a un nivel horario, los pronósticos de energía que demandará el sistema, la demanda en tiempo real del Sistema Interconectado Nacional y las regiones de las que está compuesto como se ilustra en la Figura 4.4.

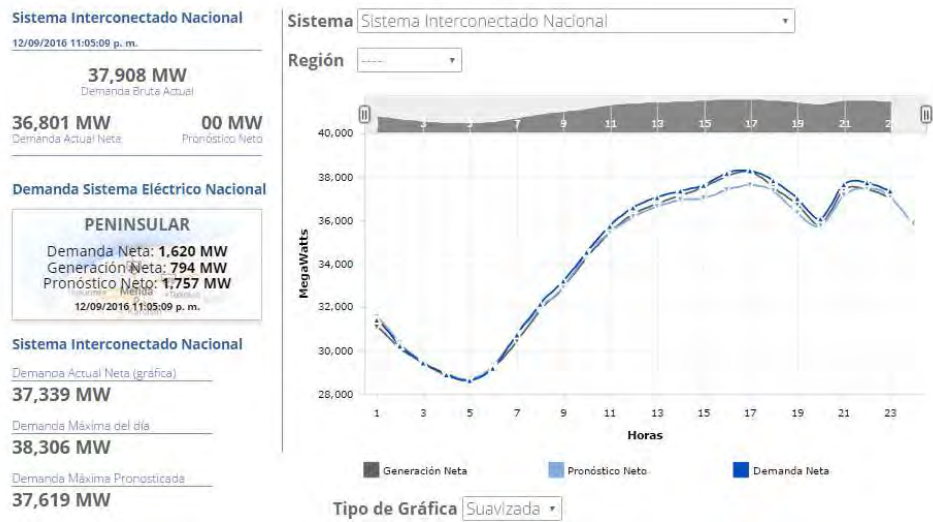


Figura 4.4 Plataforma web de consulta en tiempo real, de generación y demanda de energía del Sistema Interconectado Nacional (CENACE, 2016)

El portal también permite observar la cantidad de energía generada en el Sistema Eléctrico Nacional, y por regiones, obedeciendo a las diferentes centrales de generación y su localización. A través de la consulta del portal, es posible extraer los datos mediante los cuales se construye la curva de demanda diaria. Se descargó la información de un día y se construyeron los gráficos que dan origen a las siguientes observaciones.

- *Variación de demanda y generación de energía entre regiones del Sistema*

La demanda de energía entre estados es diferente en todo el año, entre estados con un importante desarrollo económico como los es el Estado de México y la Ciudad de México, frente a estados con poco desarrollo en ese sentido como lo es Chiapas.

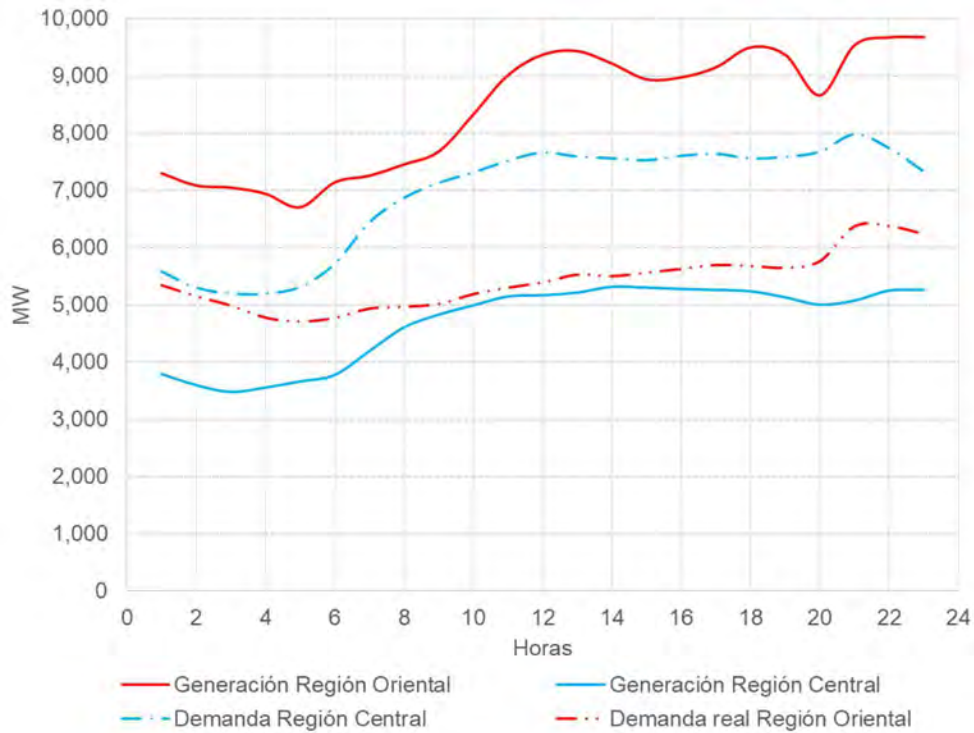


Figura 4.5 Variación de demanda y generación de energía por regiones.

De la Figura 4.5 se puede concluir que, para el caso de comparación entre la región oriental que integra estados como Chiapas, y la Región Central donde se ubica la Ciudad de México, la región Oriental genera una mayor cantidad de energía que la que demanda, caso contrario en la Región Central, en donde existe una evidente mayor demanda de energía que la que se consume.

-
- *Variación de demanda y generación de energía entre horas de un mismo día.*

El consumo de energía por concepto de iluminación y uso de electrodomésticos oscila en función de las horas del día y de las épocas del año, el consumo por uso industrial suele ser más constante debido a que existe una relación directa con los procesos productivos a los que está asociado (González, 2004). Se observa en la Figura 4.6 la variación de demanda y generación a medida que el día avanza.

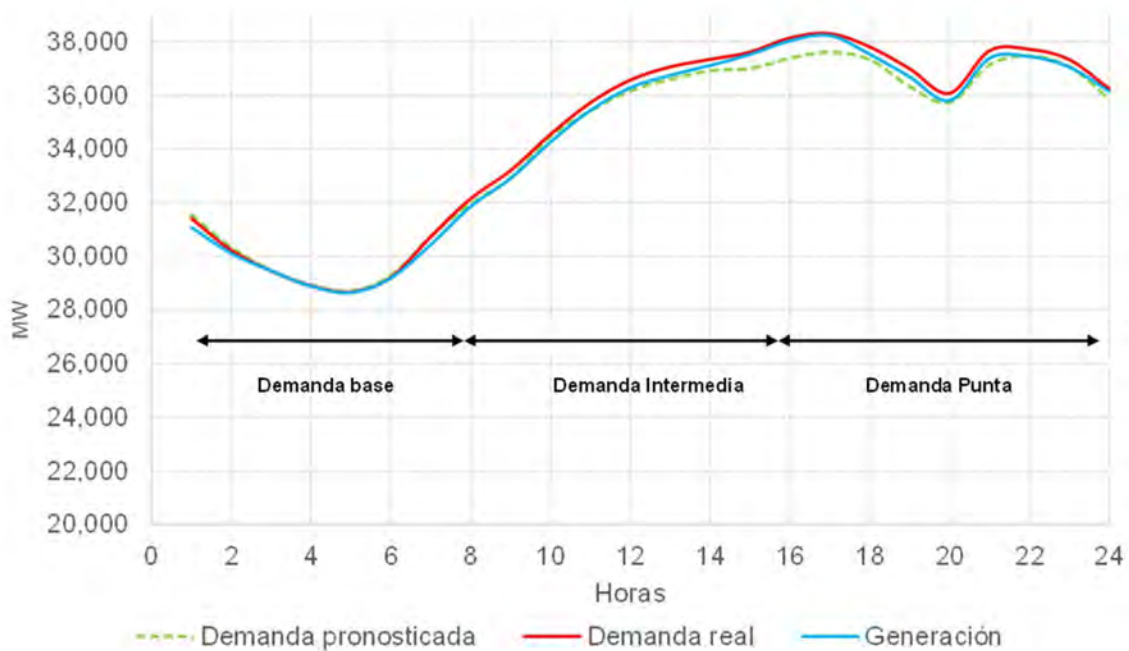


Figura 4.6 Curva de pronóstico de demanda, demanda y generación real.

La temporada del año influye en la energía demandada por el Sistema Eléctrico Nacional. De esta forma, se demanda mayor energía en la temporada de verano en los estados del norte del país, debido a que las altas temperaturas conducen a la utilización de equipos de aire acondicionado, por otro lado, en temporada de invierno, la demanda máxima de energía eléctrica se presenta en los estados del centro, por las bajas temperaturas y el uso de sistemas de calefacción.

- *Satisfacción de la demanda de energía*

Para satisfacer la demanda de energía, es necesario hacer uso de las plantas de generación, ubicadas a lo largo y ancho del país, y de sus respectivas tecnologías. Estas centrales entran en operación de acuerdo a su forma de operar, y las características de la demanda de energía.

Para satisfacer esa demanda variable de la manera más económicamente factible, los órganos reguladores de energía establecen como energía prioritaria aquella que proviene de centrales generadoras de bajo costo como lo son las térmicas, nucleares y de combustibles fósiles, ubicándolas en la base de la curva de la demanda, por lo que comúnmente se les llama Centrales de Base.

Las centrales que tienen un costo más elevado por kW·h se asocian normalmente con una rápida puesta en operación, por lo que son ideales para satisfacer las puntas en la curva de la demanda. Es por eso que se les conoce como Centrales de Punta.

En la Figura 4.7 se observa la curva de demanda de energía para un día lunes del mes de septiembre, y el tipo de central de generación asociada a satisfacer la demanda.

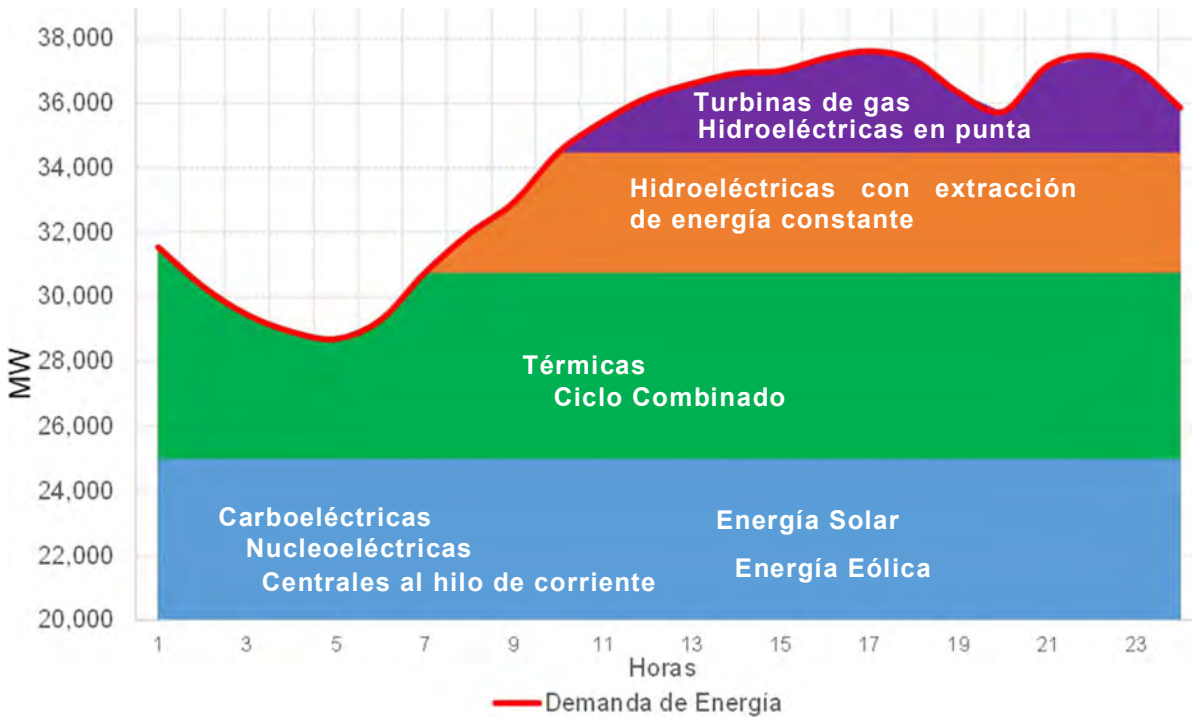


Figura 4.7 Demanda de energía y tipos de tecnología utilizadas para satisfacerla

Las tecnologías que proveen de energía de manera intermitente como los parques eólicos y solares, deben ser respaldadas con fuentes de energía como centrales de rebombeo, de tal forma que se pueda proveer de estabilidad al sistema eléctrico cuando la demanda de energía sea baja, y la oferta de energía por concepto de operación de energías intermitentes sea alta.

4.1.6 Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Medio Ambiente (LGEEA)

Tiene como objetivo establecer la política referente a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección al ambiente. (Congreso de la Unión, 2016) Esto por medio del 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. Se trata de una ley de gran influencia e importancia en la generación de energía por medio del agua, debido a que está dentro de sus responsabilidades el control de acciones para la protección, preservación y

restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente en la zona federal marítimo terrestre, así como en la zona federal de los cuerpos de agua considerados como nacionales.

La LGEEP establece las disposiciones que deberán observarse para el aprovechamiento sustentable de los energéticos y sostiene que el aprovechamiento de los recursos naturales renovables debe realizarse de manera que se asegure el mantenimiento de su diversidad y su condición renovable. Estas disposiciones dan origen a la creación de instrumentos que colaboren en ese sentido, como el Programa Nacional Hidráulico, otorgamiento de concesiones, permisos, autorizaciones para el desvío, extracción de aguas, los cuales se encuentran descrito a mayor detalle en la Ley de Aguas Nacionales. Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Medio Ambiente establece que la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) será la institución responsable de otorgar la autorización en materia de impacto ambiental, por medio de lo que indica en su Reglamento. El artículo 28 de la LGEEP menciona que es posible realizar ante la Dirección General de Impacto y Riesgo Ambiental una consulta previa, con el fin de que se le proporcione a la parte interesada, una determinación sobre si es necesario realizar una Manifestación de Impacto Ambiental o no, siendo el criterio en función de la ubicación, dimensiones, características y alcances del proyecto no produzcan impactos ambientales significativos, no causen o puedan causar desequilibrios ecológicos, ni rebasen los límites y condiciones establecidos en las disposiciones jurídicas referidas a la preservación del equilibrio ecológico y la protección al ambiente, así como la prevención y control de la contaminación ambiental originada por ruido y vibraciones.

- *Reglamento de la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Medio Ambiente*

La LGEEP a través de su Reglamento, especifica las características que reúnen aquellos proyectos que requieren de una Manifestación de Impacto Ambiental (MIA) y sus excepciones. Se muestran en la Tabla 4.4, aquellas de competencia a la generación de energía hidroeléctrica.

Tabla 4.4 Actividades que requieren Manifestación de Impacto Ambiental y sus excepciones

Requiere de Manifestación de Impacto Ambiental	Con excepción
Presas de almacenamiento, derivadoras y de control de avenidas con capacidad mayor de 1 hectómetro cúbico	-Capacidad igual o menor a 1 hectómetro cúbico
Canales y cárcamos de bombeo	-Se ubiquen fuera de ecosistemas frágiles, Áreas Naturales Protegidas y regiones consideradas prioritarias por su biodiversidad -No impliquen la inundación o remoción de vegetación arbórea o de asentamientos humanos, la -No afecten el hábitat de especies incluidas en alguna categoría de protección, el -No afecten el desabasto de agua a las comunidades aledañas o la limitación al libre tránsito de poblaciones naturales, locales o migratorias;
Obras de conducción para el abastecimiento de agua nacional	-Menores a 10 kilómetros de longitud -Gasto menor a 15 litros por segundo -Diámetro de conducción menor o igual a 15 cm.
Plantas hidroeléctricas	-Plantas de generación con una capacidad menor o igual a 500 Kilowatts.
Plantas de cogeneración y autoabastecimiento de energía eléctrica	-Menores a 3 MW
Cualquier tipo de obra civil en ríos	
Cualquier actividad que tenga fines u objetivos comerciales	Actividades pesqueras
Obras en áreas naturales protegidas	-Actividades de autoconsumo y uso doméstico -Obras que no requieran autorización en materia de impacto ambiental, siempre que se lleven a cabo por las comunidades asentadas en el área y su realización se alinee al reglamento.

Para el caso en el que sea necesaria la realización de una Manifestación de Impacto Ambiental, las modalidades que existen son la Particular y Regional.

La Tabla 4.5 clasifica el tipo de modalidad que corresponde de acuerdo al tipo de proyecto.

Tabla 4.5 Actividades que requieren MIA Regional y Particular

Modalidad Regional	Modalidad Particular
Parques industriales y acuícolas granjas acuícolas de más de 500 hectáreas,	Proyectos que no se encuentren contemplados en la modalidad regional.
Carreteras y vías férreas	
Proyectos de generación de energía nuclear, presas y, en general,	
Proyectos que alteren las cuencas hidrológicas,	
Conjunto de obras o actividades que se encuentren incluidas en un plan o programa parcial de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico a consideración de la SEMARNAT	
Conjunto de proyectos de obras y actividades que pretendan realizarse en una región ecológica determinada	
Proyectos que pretendan desarrollarse en sitios en los que por su interacción con los diferentes componentes ambientales regionales impactos acumulativos, sinérgicos o residuales que pudieran ocasionar la destrucción, el aislamiento o la fragmentación de los ecosistemas.	

En la Tabla 4.6 se muestra de manera general, el contenido que integra tanto la modalidad particular como regional, siendo ambas de un contenido similar, pero de alcances diferentes.

Tabla 4.6 Información contenida en una MIA Regional y Particular

Contenido	Regional	Particular
Datos generales del proyecto, del promovente y del responsable del estudio de impacto ambiental;	✓	✓
Descripción del proyecto		✓
Descripción de las obras o actividades y, en su caso, de los programas o planes parciales de desarrollo;	✓	
Vinculación con los ordenamientos jurídicos aplicables en materia ambiental y, en su caso, con la regulación sobre uso del suelo;	✓	✓
Descripción del sistema ambiental y señalamiento de la problemática ambiental detectada en el área de influencia del proyecto		✓
Descripción del sistema ambiental regional y señalamiento de tendencias del desarrollo y deterioro de la región	✓	
Identificación, descripción y evaluación de los impactos ambientales;		✓
Identificación, descripción y evaluación de los impactos ambientales, acumulativos y residuales, del sistema ambiental regional;	✓	
Medidas preventivas y de mitigación de los impactos ambientales;		✓
Estrategias para la prevención y mitigación de impactos ambientales, acumulativos y residuales, del sistema ambiental regional;	✓	
Pronósticos ambientales y, en su caso, evaluación de alternativas		✓
Pronósticos ambientales regionales y, en su caso, evaluación de alternativas	✓	
Identificación de los instrumentos metodológicos y elementos técnicos que sustentan los resultados de la manifestación de impacto ambiental.	✓	✓

4.1.7 Ley General de Cambio Climático (LGCC)

Ley que tiene como objetivo garantizar el derecho a un medio ambiente sano, promoviendo la aplicación de políticas y acciones destinadas a reducir las emisiones de las fuentes de gases y compuestos que favorecen el efecto invernadero. (Congreso de la Unión, 2016). Las acciones que se toman dentro de esta ley, favorecen a la adaptación y mitigación en torno al cambio climático. En lo que respecta a la descripción del entorno político de la generación de energía a través del agua, son las actividades de mitigación aquellas que mayor afinidad tienen con el tema.

La LGCC define la mitigación como la aplicación de políticas y acciones destinadas a reducir las emisiones de las fuentes, o mejorar los sumideros de gases y compuestos de efecto invernadero. (Congreso de la Unión, 2016).

Con el fin de fomentar la mitigación, la ley busca promover de manera gradual la sustitución del uso y consumo de los combustibles fósiles por fuentes renovables de energía, así como la generación de electricidad a través del uso de fuentes renovables de energía así como su desarrollo y transferencia de tecnología. Debido a que la inclusión de fuentes renovables no es un tema exclusivamente económico, la ley instruye a incluir los costos de las externalidades sociales y ambientales, así como los costos de las emisiones en la selección y evaluación de las fuentes para la generación de energía eléctrica.

Para la reducción de emisiones en la generación y uso de energía, se promueve el desarrollo de programas que promuevan patrones de producción y consumo sustentables en los sectores público, social y privado a través de incentivos económicos; fundamentalmente en áreas como la generación y consumo de energía. Para esto, la federación y los estados diseñarán, desarrollarán y aplicarán instrumentos económicos que incentiven el cumplimiento de los objetivos de la política nacional en materia de cambio climático, Para efectos del otorgamiento de los estímulos, se considera prioritario el desarrollo de energías renovables y tecnologías de bajas emisiones en carbono.

Para el año 2020, acorde con la meta-país en materia de reducción de emisiones, la Secretaría de Hacienda y Crédito Público en coordinación con la Secretaría de Economía, la Secretaría de Energía, la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación y la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, deberán haber generado en forma gradual un sistema de subsidios que promueva las mayores ventajas del uso de combustibles no fósiles, la eficiencia energética y el transporte público sustentable con relación al uso de los combustibles fósiles.

4.1.8 Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable(LGDFS)

La LGDF establece que la Comisión Nacional Forestal se coordinará con las Secretarías y entidades de la Federación que tengan a su cargo las funciones de impulsar los programas de electrificación, desarrollo hidráulico, conservación de suelos y aguas, infraestructura vial y de ampliación de la comunicación rural, para que la promoción de acciones y obras respondan a conceptos de desarrollo integral. (Congreso de la Unión, 2016) Las autoridades competentes vigilarán que la construcción de redes de electricidad, obras hidráulicas y caminos en terrenos forestales cause el menor daño a los ecosistemas forestales, respetando la densidad de la red de caminos y brechas forestales.

4.1.9 Mecanismos para impulsar el mercado de una gran variedad de tecnologías de energías limpias

La actual legislación en materia energética, tiene como objetivo que el país avance de manera más acelerada hacia una economía de bajo carbono, por lo que se han puesto en práctica mecanismos para impulsar la entrada al mercado de una gran variedad de tecnologías de energías limpias y de ahorro y uso eficiente de la energía. Estos mecanismos se pueden clasificar en las categorías indicadas en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7 Mecanismos para impulsar el mercado de energías limpias y sus elementos

Mecanismos para impulsar el mercado de tecnologías de energías limpias.	Económicos	Impuestos Incentivos Inversiones públicas.
	Regulatorios	Regulación económica Regulaciones técnicas Obligaciones de metas a mediano y largo plazo
	De mercado	Subastas de proyectos Contratos de desempeño Asociaciones público-privadas
	Información	Sistemas de información al público Reconocimiento de empresas
	Investigación y Desarrollo	Equipos, sistemas y materiales Conocimiento de mercados Comportamiento de usuarios
	Institucionales	Creación de organizaciones Facilitadoras de procesos Sistema de gobernanza
	Desarrollo capacidades	Programas de formación de técnicos y profesionistas para operar y diseñar nuevas tecnologías

Actualmente, México tiene suscritos 70 acuerdos de cooperación internacional en materia de energía con 23 países, 3 organismos/ organizaciones de energía, la Agencia Internacional de Energía, 3 iniciativas internacionales, 3 institutos de energía, entre otros. (SENER, Estrategia de transición para promover el uso de tecnologías y combustibles mas limpios, 2016)

Los temas de cooperación en materia energética incluyen entre otros, las energías renovables y otras tecnologías limpias.

4.1.10 Ley de Aguas Nacionales y su relación con los aprovechamientos hidráulicos

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en su artículo 4, establece que todas las personas tienen derecho a acceder y disponer de agua para su consumo personal y doméstico. En su artículo 27, establece que el agua es propiedad de la Nación, y que en consecuencia, la Nación tiene la facultad de transmitir su dominio a particulares (Diputados, Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, 2013). Tiene también la facultad de regular en beneficio social, el aprovechamiento del agua con el fin de promover la distribución equitativa de la riqueza pública. Derivado de esta situación, surge la Ley de Aguas Nacionales, cuyo principal objetivo es el de regular el aprovechamiento de las aguas pertenecientes a la nación, por medio de la definición de conceptos, la pronunciación de las leyes y sus reglamentos.

A continuación se hace un breve recorrido sobre lo que la Ley de Aguas Nacionales indica sobre el aprovechamiento de las aguas, junto al artículo en el que se menciona el concepto, o su correspondiente reglamento a la ley.

La Ley de Aguas Nacionales, define la palabra Aprovechamiento como la *Aplicación del agua en actividades que no impliquen consumo de la misma*, (Art. 3 Fracción VII) y complementa estableciendo que es un aprovechamiento de paso, *aquel que no implique consumo de volúmenes de agua, y sus alteraciones no excedan los parámetros que establecen las normas oficiales mexicanas*, (Art. 3 Fracc. VII Bis) que son las reglas y lineamientos que se aseguran de que el aprovechamiento cuente con seguridad, calidad y conservación. (Art. 3 Fracc. XXXVIII)

En la Tabla 4.8 se describen las diferencias entre los conceptos de Uso, Explotación y Aprovechamiento que maneja la Ley de Aguas Nacionales.

Tabla 4.8 Diferencias entre Uso, Explotación y Aprovechamiento

Uso	Explotación	Aprovechamiento
Se consume parcial o totalmente volumen de agua en la aplicación de una actividad. Art. 3 Fracc. LII	El agua se utiliza en actividades de extracción de elementos químicos u orgánicos disueltos en la misma, después de las cuales es retornada a su fuente original sin consumo significativo. Art. 3 Fracc. XXVII	Se utiliza el agua, sin realizar consumo de volumen alguno. Art. 3 Fracc. VII y VII Bis

Estableciendo las diferencias entre los conceptos de la Tabla 4.8 se excluyen del alcance de un aprovechamiento aquellas actividades de uso consuntivo, puesto que las actividades esta naturaleza implican una diferencia de volumen antes y después de la actividad ejercida (Art. 3, Fracc. XL).

La ley indica que el aprovechamiento de las aguas nacionales debe ser realizado con eficiencia y debe buscar promover el reúso y recirculación del recurso (Art. 14 Bis 5 Fracc. XII). Se debe también, procurar el desarrollo sustentable del aprovechamiento, (Art. 3 Fracc. XXI) mismo que se lleva a cabo por medio de la Gestión del Agua que realizan en conjunto, el Estado, los usuarios del agua y las organizaciones de la sociedad para beneficiar el medio social, económico y ambiental. (Art. 3 Fracc. XVIII). El Programa Nacional Hídrico, a través del Programa Hídrico de la Cuenca, propuesto por la Comisión Nacional del agua (Art. 9 Fracc. III) y aprobado por el Ejecutivo Federal (Art. 6 Fracc. VII) es el documento rector que define el aprovechamiento de las respectivas cuencas, y de esta forma se lleve a cabo la gestión integral del recurso hídrico por medio de la implementación de estrategias y prioridades. (Art.3 Fracc. XLII).

Para el aprovechamiento de las aguas nacionales, es necesario contar con una asignación o concesión (Art. 20), siendo una asignación aquella que se le otorga a los municipios y estados, a través del Organismo de Cuenca y la CONAGUA, y una concesión a personas físicas y morales de carácter público y privado (Art. 3 Fracc. VIII y XIII). Para ser candidato a recibir la concesión o asignación de

aguas, es necesario cumplir con los requerimientos necesarios que se describen en el Art. 21, bajo el entendido de que la obtención de concesiones y asignaciones crean derechos y obligaciones a favor de los beneficiarios (Art. 20). Dentro de los derechos que se obtiene, destaca el hecho de que los usuarios de las aguas nacionales tienen la facultad de realizar las obras de infraestructura hidráulica necesaria para el aprovechamiento del agua, lo que conduce a obligaciones como el hecho de que el beneficiario tendrá la responsabilidad de administrar y operar dicha infraestructura hidráulica (Art. 97). Si se afecta el régimen hidráulico o hidrológico de los cauces, se requerirá de los permisos necesarios mencionados en los artículos 23 y 42 del reglamento, y a las Normas Oficiales Mexicanas que correspondan. (Art. 98). Como una obligación adicional, se señala el pago de derechos fiscales por el aprovechamiento del agua, además de que el usuario se compromete a hacer uso responsable del recurso hídrico.

Es el Ejecutivo Federal por medio de la Comisión Nacional del Agua, el encargado de establecer las reglas por cuenca hidrológica para que se lleve a cabo el aprovechamiento de las aguas nacionales, o impedirlo de ser necesario. El impedimento de aprovechamiento se logra por medio de la declaración de dos tipos de zonas. La zona de reserva, y la zona de veda. Las zonas de reserva son aquellas en las que se establecen limitantes para el aprovechamiento de una parte o del total del agua, debido a que el Estado decide conservar o restaurar la zona, o hacer uso del recurso hídrico para el bien público. (Art. 3 Fracción LXIV). Por su parte, en la Zona de Veda no se autoriza aprovechamiento adicional alguno, debido a que el agua puede estar en deterioro de cantidad o calidad, o bien porque se afecta a la sustentabilidad hidrológica de la zona. (Art. 3 Fracción LX) (Diputados, Ley de Aguas Nacionales, 2016).

- *Aprovechamiento de aguas nacionales con fines de generación de energía eléctrica.*

El aprovechamiento de aguas nacionales para generar energía eléctrica destinada a servicios públicos es de utilidad pública (Art. 7 Fracc. X). Cuando una persona física o moral está interesada en aprovechar las aguas nacionales con fines de generación de energía eléctrica, deberán solicitar concesión a la CONAGUA, siendo éste el órgano facultado para hacer la reserva necesaria y posteriormente concesionar el volumen. (Reglamento de Ley. Art. 118) Los beneficiarios que se hagan acreedores de las concesiones y asignaciones necesarias para el aprovechamiento con fines de generación de energía, tendrán la obligación de hacer el pago puntual y oportuno de los derechos fiscales por las descargas volumétricas que se realicen (Art. 29 Fracc. IV).

Es necesario presentar ante la CONAGUA, el proyecto constructivo por medio del cual, se pretende realizar el aprovechamiento para la producción de fuerza motriz o energía eléctricas, junto con las acciones a realizar en materia de control y preservación de la calidad del agua y en materia de impacto ambiental, prevención y control de avenidas, y la no afectación de los flujos de las corrientes. Reglamento de Ley de Aguas Nacionales. Art. 119).

La Ley de Aguas Nacionales establece que no se requerirá la solicitud de una concesión de parte de los interesados, para el aprovechamiento de aguas

nacionales en lo que respecta a la generación de energía hidroeléctrica a pequeña escala (Art. 80). El Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales es más específico, estableciendo las condiciones en las que:

- Se trata del aprovechamiento de ríos y canales
- No se desvían las aguas
- No se afecta la cantidad del agua
- No se afecta la calidad del agua
- La capacidad de generación no exceda los 30 MW.
(Reglamento, Art. 120)

Sea el caso en el que el aprovechamiento con fines de generación de energía eléctrica requiera una concesión o no, la construcción de las obras de infraestructura que se necesiten, requerirán permiso de la CONAGUA.

4.1.11 Compromisos adquiridos en política energética

México ha adquirido compromisos nacionales e internacionales para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para el año 2021, la meta del gobierno mexicano es que las energías renovables representen el 30% de la totalidad de la energía eléctrica generada.

Se muestran en la Tabla 4.9 los compromisos en materia de reducción de emisiones y metas de generación de energías limpias para diferentes horizontes en el tiempo.

Tabla 4.9 Compromisos para reducción de emisiones y metas de generación de Energías Limpias (Congreso de la Unión, 2016)

Reducción de emisiones respecto a las del año 2000		
2020	2050	
30%	50%	

Metas de generación de Energías Limpias		
2024	2030	2050
35% de la generación eléctrica total	37.7% de la generación eléctrica total	50% de la generación eléctrica total

4.2 ECONÓMICO

4.2.1 Economía de escala en aprovechamientos hidroeléctricos

La infraestructura para generación de energía eléctrica es rígida, en la gran mayoría de casos, por *economía de escala* la cual dicta que a medida que la capacidad de la planta se incrementa, el costo por unidad de potencia instalada se reducirá. En la Tabla 4.10 se presentan los principales costos asociados a diferentes tamaños de plantas hidroeléctricas.

Tabla 4.10 Rango de costos asociados a tamaños de centrales hidroeléctricas

Concepto	Tamaño de la central hidroeléctrica		
	Grande (> 10 MW)	Pequeña (1 MW – 10 MW)	Muy pequeña (< 1 MW)
Costo por kilowatt instalado en dólares	1,050 – 7,650	1,300 – 8,000	3 400 – 10 000
Costo nivelado de energía en dólares/kW·h	0,02 – 0,19	0,02-0,27	> 0,27
Operación y mantenimiento en Dólares/kW/año	45	40-50	45-250

De la Tabla 4.10 se observa que los costos asociados se incrementan sustancialmente en plantas hidroeléctricas muy pequeñas, con potencias instaladas menores a 1 MW. Esta situación afecta la rentabilidad de pequeñas centrales hidroeléctricas que operan al hilo del agua.

4.2.2 Aspectos económicos de turbinas de baja carga al hilo de corriente

Dentro del macro-entorno de generación de energía a través del aprovechamiento del agua, las turbinas de baja carga que funcionan al hilo de corriente son las que mayor comparación reciben con las tecnologías de aprovechamiento hidrocínético, esto debido a la condición de baja o nula carga con la que ambas tecnologías funcionan, sin embargo, es importante recalcar que se trata de tecnologías cuyo principio de funcionamiento es totalmente diferente. Sobre los detalles del funcionamiento de este tipo de aprovechamientos, se profundiza en la Sección 4.4.3.

- *Tipo de energía que son capaces de vender*

Un problema al cual se enfrentan las hidroeléctricas al hilo de corriente es la forma en la que sirven su energía al sistema. En el caso de una central hidroeléctrica convencional, estas tienen la posibilidad de almacenar, dar forma y transmitir la energía a un centro de consumo cuando así se desea. En los aprovechamientos al hilo de corriente no es así, y se debe obedecer al comportamiento del río para generar, por lo que es complicado asignarles cierta prioridad para servir la energía de este tipo de centrales. Una de las soluciones que se han planteado radica en el hecho de que los grandes sistemas hidroeléctricos permitan que la energía que se despacha primero sea la de las centrales al hilo de corriente, sin embargo, esto representaría un problema cuando el número de centrales al hilo de corriente aumente.

Otra alternativa de solución con el fin de impulsar la comercialización de este tipo de proyectos es el ofrecer la energía al mercado industrial, en donde la tarifa que se asigne pueda ser competitiva. En vista de lo anteriormente planteado, y en consecuencia de que un aprovechamiento al hilo de corriente no tiene la facultad

de adaptarse al patrón de la demanda de energía durante el día, este tipo de centrales deben de colocarse en la base de la generación, lo que implica que es necesario estimar la capacidad confiable o asegurada de la central, para este fin. La capacidad confiable o asegurada de una central hidroeléctrica al hilo de será aquella que permita garantizar extracción de energía del proyecto hidroeléctrico aún en las condiciones en la que la cantidad de gasto que llegue al proyecto sea la más desfavorable (Vásquez, 2013).

Representa un reto para las autoridades energéticas del país, trabajar en esquemas y estrategias que permitan que los proyectos hidroeléctricos al hilo de corriente puedan vender su energía, y ésta compita con sus fuentes alternativas.

- *Influencia de la transmisión de energía en el costo del proyecto*

Otro aspecto a tomar en cuenta, es la forma en la que es transportada la energía que proviene de este tipo de centrales. Es importante considerar la distancia que existe entre el nodo más cercano al cual es posible subir la energía al sistema, o bien, algún centro de consumo. Esto debido a que una central al hilo de corriente es particularmente sensible a los costos asociados a la línea de transmisión. El costo de construir una línea de transmisión, para distancias menores a 15 km puede ser aproximadamente el 10% del costo de un proyecto de 10 MW de potencia instalada y se incrementa considerablemente a medida que se cubren distancias más largas. Para una distancia de 200 km, una línea de transmisión puede incrementar hasta un 60% el costo de un proyecto de 10 MW de potencia instalada. (Hatch Energy, 2008)

- *Aspectos relacionados con el equipo electromecánico*

En los aprovechamientos al hilo de corriente, el equipo electromecánico representa un menor porcentaje del costo total del proyecto que el que representa la obra civil, a medida que la central es de menor tamaño, el porcentaje del costo total que representa el equipo electromecánico aumenta. Los modelos que dominan el mercado son las máquinas Kaplan y Bulbo.

Una de las ventajas que ofrecen las máquinas bulbo sobre las Kaplan de orientación vertical, es el hecho de que la casa de máquinas es de menor tamaño y con un diseño más simple, gracias a la eliminación de una carcasa espiral. Esto se refleja en menor cantidad de obra civil y significativamente en los costos. En la Tabla 4.11 se observa en porcentaje, el costo de la obra civil y electromecánica para un proyecto con carga inferior a 20 metros.

Tabla 4.11 Ahorro en costo de casa de máquinas. (Chapus & Haddad)

Precio índice de la casa de máquinas	% de costo		
	Kaplan Vertical	Turbina Bulbo Ajustable	Turbina Bulbo no ajustable
Obra civil	100	85	72
Equipo electromecánico	100	77	52

De la Tabla 4.11 se concluye que es posible reducir hasta en un 28% el costo de la obra civil, y un 48% el costo de la obra electromecánica, utilizando la máquina

adecuada que se ajuste a las condiciones de gasto y carga proporcionada por los proyectos.

El precio de una turbina de baja carga se encuentra relacionado inminentemente con sus dimensiones y peso. Esto se debe a que los álabes de las turbinas así como los conductos son optimizados para ciertas velocidades, lo cuál que para gastos de mayor magnitud, las dimensiones de la turbina deberán incrementar. Las máquinas bulbo contemplan compuertas dentro de su operación, esto trae una importante ventaja pues permiten que se descargue hasta un 70% del gasto de diseño de la máquina sin generar o estar conectado a la red, protegiendo los equipos en caso de que se desconecte súbitamente.

- *Influencia de la carga y el gasto en el precio de la energía de los aprovechamientos de baja carga al hilo de corriente*

En las centrales al hilo de corriente, el costo de inversión por kilowatt instalado es menor si la central tiene una mayor carga y capacidad instalada, lo cual se refleja con un mayor detalle en la Figura 4.8 en donde se muestra que para las potencias instaladas descritas, el costo de inversión cambia de manera sensible en los primeros 30 metros de carga. (Kaldellis & Kondilli , 2011).

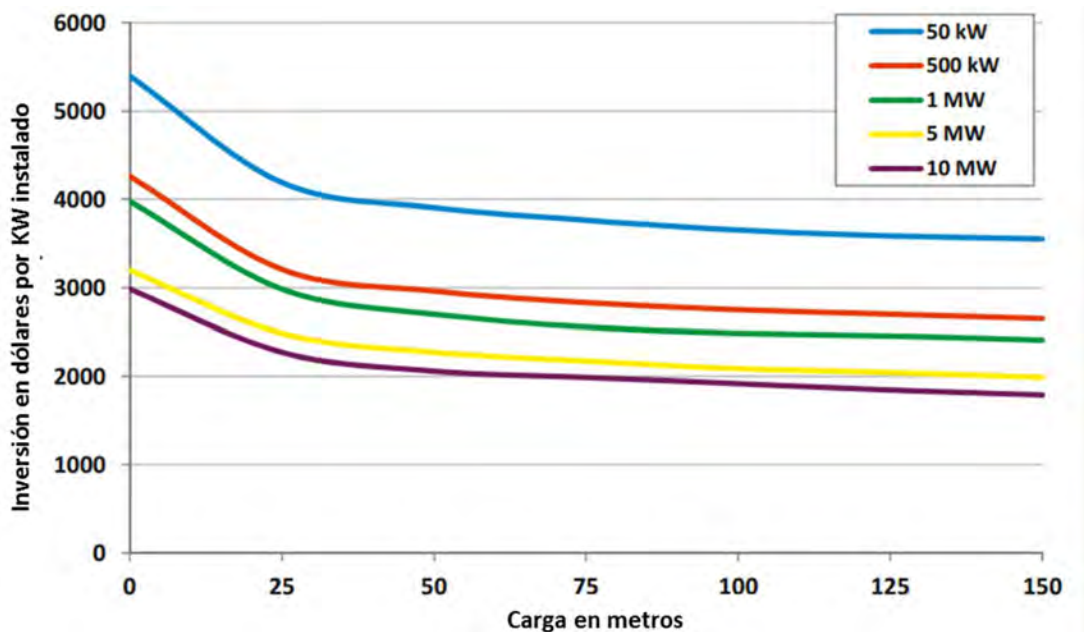


Figura 4.8 Inversión por KW instalado por carga y potencia (Kaldellis & Kondilli , 2011)

La potencia de la turbina se incrementa en una relación que obedece al cuadrado del diámetro del rodete (D^2), mientras que el peso de la turbina se incrementa aproximadamente en una razón al cubo del diámetro del rodete (D^3). Bajo el entendido de que el costo de una turbina es generalmente proporcional a su peso, la razón que describe la relación potencia/peso y por ende, potencia/costo se muestra a continuación

$$\begin{aligned}
 \text{Potencia}(f(D)) &= D^2 \\
 \text{Costo}(f(D)) &= D^3 \\
 \frac{\text{Potencia}}{\text{Costo}} &= \frac{D^2}{D^3} = \frac{1}{D}
 \end{aligned}$$

De la observación anterior, se concluye que a medida que el rango de gastos se incrementa, la relación potencia/costo se reduce. Por medio de esta relación se explica que compensar las bajas cargas aprovechables de un proyecto al hilo de corriente, con grandes gastos que disminuyan la relación potencia costo, puede no ser viable económicamente.

Adicional al hecho de que el costo relativo de las turbinas es mayor cuando funciona a bajas cargas, el costo del generador también lo es. Esto se debe a que las turbinas de baja carga están asociadas a bajas velocidades de rotación, lo que trae como consecuencia que el equipo electromecánico otorgue menos potencia por unidad de peso del generador, lo que eleva su costo.

En un proyecto al hilo de corriente, es importante considerar que una mayor cantidad de gasto no representa necesariamente una mayor cantidad de energía generada. Esto se debe a la fluctuación de los niveles. La generación de energía de la planta comienza a incrementar hasta llegar al punto en el que se alcanza la capacidad de generación. A medida que el gasto incrementa, el nivel de desfogue aumenta y la generación disminuye. Finalmente, si los gastos continúan incrementando, la diferencia entre los niveles aguas arriba y aguas abajo de la presa es cada vez menos, al punto en el que la carga neta es mínima y no se puede continuar operando. Esta situación conduce a la necesidad de estimar adecuadamente la potencia instalable y la energía aprovechable de la central en cuestión.

Representa una decisión importante para el proyecto al hilo de corriente definir la potencia instalada que económicamente resultará más atractiva. A medida que se tenga una mayor potencia instalada, el costo por equipamiento y obra civil aumenta, pero también aumenta la capacidad de generar energía con los gastos que llegan a la central, dada la situación que son estos los que se han de turbinar, y no un almacenamiento del cual se tenga un control. Una menor potencia instalada se asocia a una mayor cantidad de derrames por vertedor y que en consecuencia se trata de agua que no es aprovechada para generación, pero implica también una menor cantidad de equipo electromecánico y obra civil.

Es necesario el estudio, desarrollo e implementación de tecnologías menos costosas para el aprovechamiento de potencias pequeñas y de baja carga, con el fin de que sea rentable explotar la energía contenida en el agua a baja escala.

4.2.3 Escenario de precios de energía hidroeléctrica frente a diferentes tecnologías renovables y no renovables

La energía hidroeléctrica es un tipo de tecnología madura y que es conocida e implementada alrededor del mundo, en algunas zonas más que en otras. Se trata de energía limpia que tiene un precio competitivo frente a otras alternativas de fuente de energías renovables. En la Figura 4.1 se observan los costos por kW·h para las principales fuentes de energía renovable, asociado a las zonas en las que se encuentran instaladas.

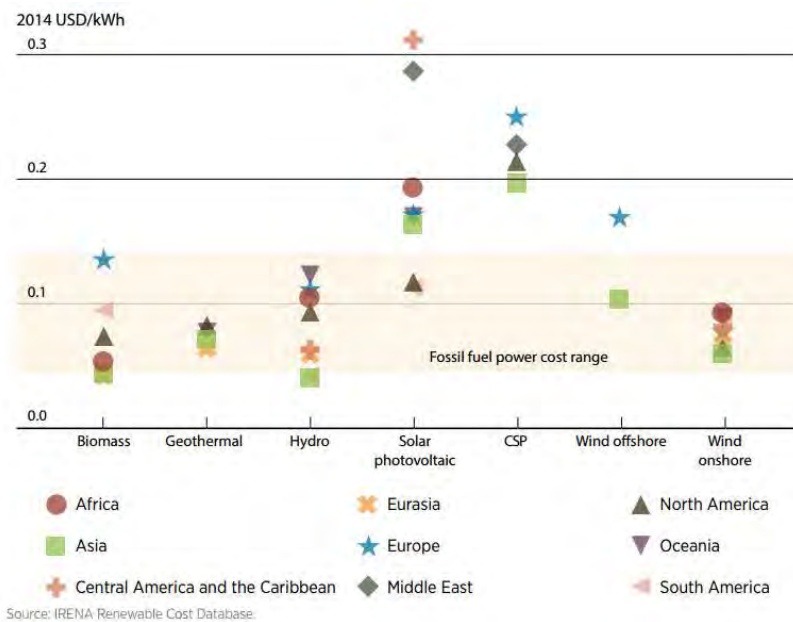


Figura 4.9 Costo de kW·h por fuentes de energía y zonas alrededor del mundo.

Se observa de la Figura 4.1 que el precio por kilowatt nivelado es diferente en las regiones en el que el potencial hidroeléctrico ya ha sido explotado en gran manera, frente a las regiones en los cuales la tecnología aún no ha sido profundamente explotada. Tal es el caso de Asia, Africa y Sudamérica, en donde el costo por kW·h se encuentra en un promedio de 0,05 dólares/kW·h, mientras que en zonas en donde la tecnología es más común y ha sido mayormente explotada como Europa, Norteamérica, Eurasia y Oceanía el costo por kW·h tiene un promedio de 0,10 dólares/kW·h. (IRENA, International Renewable Energy Agency, 2014).

La economía de cualquier tipo de generación de energía por medio de fuentes renovables es principalmente sensible a aspectos como:

- El costo de su utilización obedece a la economía de escala, lo que implica que a mayor cantidad de potencia instalada, el costo de la energía producida será menor, que se debe principalmente a que algunos costos asociados a la instalación, mantenimiento y elementos externos a la máquina, permanecen sin cambios significativos, incluso cuando las máquinas incrementan de tamaño.
- El costo asociado con la adquisición de tierras
- Distancia existente entre el centro de generación a la subestación más cercana
- Adecuación de la topografía del sitio para la construcción de la central
- Tipo de terreno y en consecuencia, la cimentación a ocuparse para el establecimiento de la infraestructura.

Para el caso de la energía eólica

- La velocidad del viento en el sitio es decisiva en el costo de la energía. Se tiene información de que, en un incremento de velocidad de 7 a 9.5 m/s, el costo por kilowatt hora nivelada se puede reducir hasta en un 50%.
- A medida que la turbina se encuentra a una distancia mayor de la tierra, la velocidad del viento aumenta y consigo la potencia suministrable, sin embargo, aumentan también los costos asociados a la torre.
- Una mayor turbulencia requiere poner más atención en el comportamiento del rotor.
- La existencia de un ambiente corrosivo reduce la vida útil de las aspas.

Para el caso de la energía fotovoltaica

- La irradiancia solar existente en el sitio, la cual al incrementarse, se incrementa también la generación.
- La temperatura en el sitio, la cual, al incrementarse, resta eficiencia a los paneles fotovoltaico

La factibilidad económica de un proyecto hidroeléctrico se basa en tres factores: El costo que implica la construcción del proyecto, los ingresos gracias a la venta de la energía generada, y retorno de la inversión realizada. Con el fin de que estos tres factores sean alcanzados es necesario considerar en la planeación, aspectos como la demanda de energía del mercado local, las alternativas de generación de la zona en la que se ubica, la capacidad del sistema de transmisión y las limitantes de mismo.

De acuerdo a los costos indicativos por kilowatt hora que se que se presentan en la Tabla 4.12 y en la Figura 4.10 para diferentes tecnologías de generación, se aprecia que la generación a base de diesel puede costar 0,3216 dólares/kW·h, mientras que una central de baja carga al hilo de corriente entre 0 y 5 MW alcanza costos de energía nivelado de 0,1405 dólares/kW·h. De esta forma se concluye que es posible hacer uso de energía que puede ser hasta un 43% mas barata en lugares remotos por medio de la implementación de centrales al hilo del agua.

Tabla 4.12 Costos indicativos para diferentes tecnologías de generación de energía, asociado a potencias instaladas. (Hatch Energy, 2008)

Tecnología	Potencia en MW	Costo del kilowatt nivelado en dólares\$/kW·h
Carbón	500	0,0624
Gas natural	580	0,0681
Nuclear	703	0,0471
Ciclo combinado gas-carbón	550	0,0562
Ciclo combinado gas petróleo	250	0,0982
Ciclo combinado con absorción de carbón	400	0,1253
Turbina de combustión	160	0,1059
Hidroeléctrica convencional	500	0,053
Biomasa	80	0,0386
Geotérmica	50	0,0509
Eólica	50	0,1088
Solar térmica	100	0,1557
Fotovoltaica	5	0,6366
Diesel en lugares remotos	1	0,3216
Pequeñas hidroeléctricas convencionales	10	0,0776
Centrales de baja carga al hilo de corriente		
0 a 5 MW	2,5	0,1405
5 a 10 MW	7,5	0,1211
10 a 20 MW	15	0,1091
20 a 50 MW	30	0,097

*CBCHC= Central de baja carga al hilo de corriente

Se concluye de la Tabla 4.12 que las centrales al hilo de corriente, aun cuando pueden ser mas caras que otras tecnologías como la Nuclear, Ciclo Combinado, Gas Natural e incluso centrales hidroeléctricas convencionales, permanecen en un rango altamente competitivo frente a otras tecnologías. Se aprecia también la forma en la que el precio del kW·h se incrementa a medida que la potencia instalada es mas pequeña.

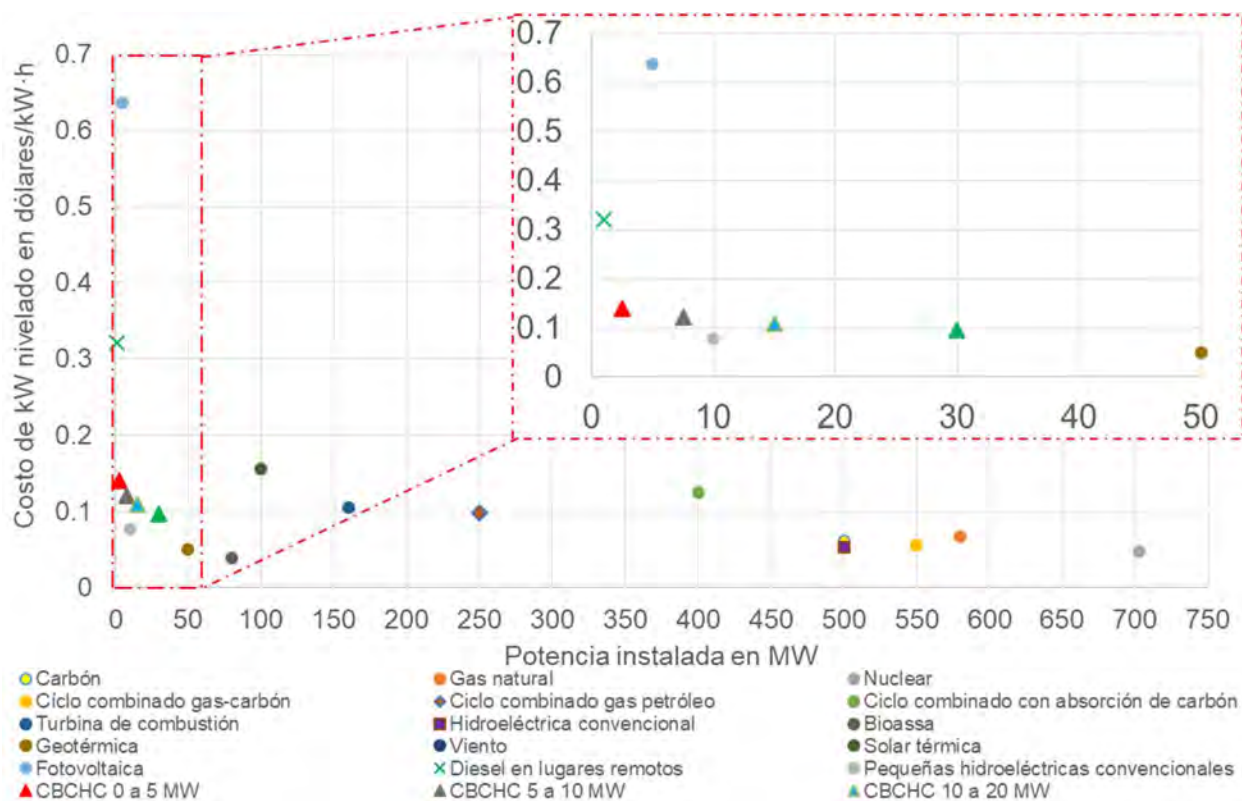


Figura 4.10 Costos indicativos para diferentes tecnologías de generación de energía, asociado a potencias instaladas

En la Tabla 4.12 y la Figura 4.10 se puede observar la posición en la que se encuentra el costo del kilowatt nivelado de las centrales hidroeléctricas al hilo de corriente, frente a otras tecnologías de generación. Se observa el aumento de costo por energía generada en hidroeléctricas, a medida que la carga aumenta. Se trata de una amenaza para las hidrocinéticas pues al no tener carga, lo convierte en un sistema con menor eficiencia. Importante mencionar que la información integrada en la Tabla 4.12 y Figura 4.10 corresponde a precios obtenidos en el 2008, los cuales pueden variar de los actuales, especialmente en la generación fotovoltaica la cual se ha disminuido su costo de manera dramática en los últimos años.

4.3 SOCIAL

4.3.1 Situación del agua en México

El agua es uno de los recursos naturales de mayor valor, su existencia o ausencia, influye en gran manera en el desarrollo y sustentabilidad de una sociedad. Participa activamente en sectores como el de los alimentos, salud e higiene, industrial, transporte, generación de energía eléctrica entre otros, sin embargo, su uso obedece al siguiente orden de prioridades:

- Uso público para la distribución de agua potable
- Uso de riego para la producción de alimentos
- Generación de energía eléctrica

Al ser un recurso tan valioso, la disponibilidad y acceso del total de la población y de los sectores interesados a este recurso no está garantizado. La razón se debe, a tres importantes factores:

- *Distribución espacial de la precipitación*

Dentro del territorio nacional, dos terceras partes se consideran áridas o semiáridas, con precipitaciones pluviales anuales menores a los 500 mm, mientras que el sureste es húmedo con precipitaciones promedio que superan los dos mil mm por año. (CONAGUA, Estadísticas del Agua en México, 2014). Esta situación trae como consecuencia que la mayor cantidad de agua se concentre en el sur del país, adicional al hecho de que es esta zona de la república en la que se concentran los ríos de mayor tamaño.

- *Distribución temporal de la precipitación*

Los meses de menor precipitación en el país comprenden las estaciones de otoño, invierno y primavera, mientras que verano suele ser una estación con importantes valores de precipitación.

- *Distribución demográfica*

La distribución de la población es un fenómeno que obedece a factores geográficos, económicos y sociales, que llevan a poblar de manera diferente los estados del país.

La situación que presenta la República Mexicana, indica que la mayor cantidad de agua no se encuentra en la zona del país en la que hay mayor desarrollo industrial y poblacional. De esta forma, estados como Chiapas, en donde existe una gran cantidad de agua, se tiene una densidad de población de 65.0 hab/km² mientras que en la Ciudad de México en donde el recurso hídrico es limitado, la densidad de población es de 5,920 hab/km². (INEGI, 2010)

La Comisión Nacional del Agua, a través del documento emitido anualmente de nombre "Estadísticas del agua en México" define al agua renovable como la cantidad de agua máxima que es factible explotar anualmente en una región, es decir, la cantidad de agua que es renovada por la lluvia. (Gleick, 2002). En la Figura 4.11 se observa la cantidad de agua renovable existente por estado, siendo Chiapas, Oaxaca y Tabasco, aquellos con una mayor cantidad de agua renovable.

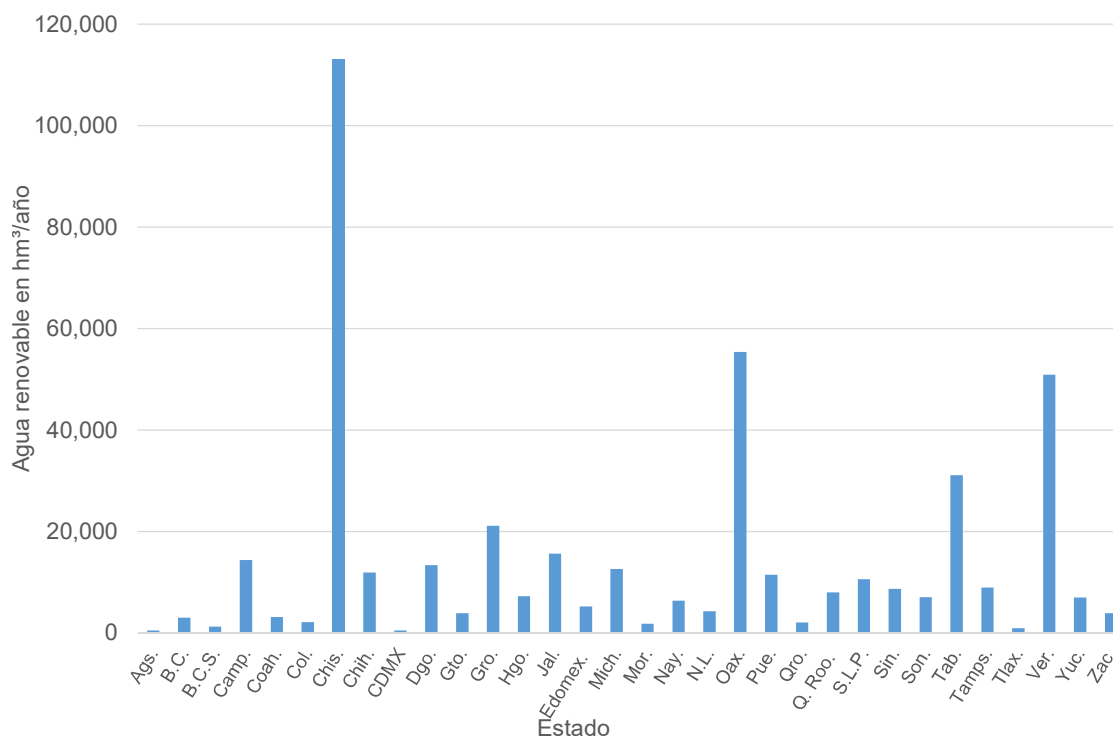


Figura 4.11 Agua renovable por entidad federativa

4.3.2 Situación de la energía eléctrica en el país

El acceso a la energía eléctrica, es una herramienta fundamental para el desarrollo de las actividades humanas. Trae consigo servicios de salud, educación, alimentación, y de tener los mecanismos apropiados, facilita las actividades productivas de una región.

De acuerdo a la información censal del año 2010 emitida por INEGI, el 5 % de la población en México no cuenta con acceso a la energía eléctrica. Para el análisis del macro-entorno relacionado con la falta de energía eléctrica, se utilizaron los datos del censo poblacional 2010, debido a que es el que mayor detalle ofrece en términos de la falta de energía eléctrica por entidad federativa, municipio y localidades. La Figura 4.12 indica la cantidad de viviendas sin energía eléctrica por entidad federativa, posicionando a Veracruz, Oaxaca y Chiapas como los estados con una mayor cantidad de viviendas sin energía eléctrica.

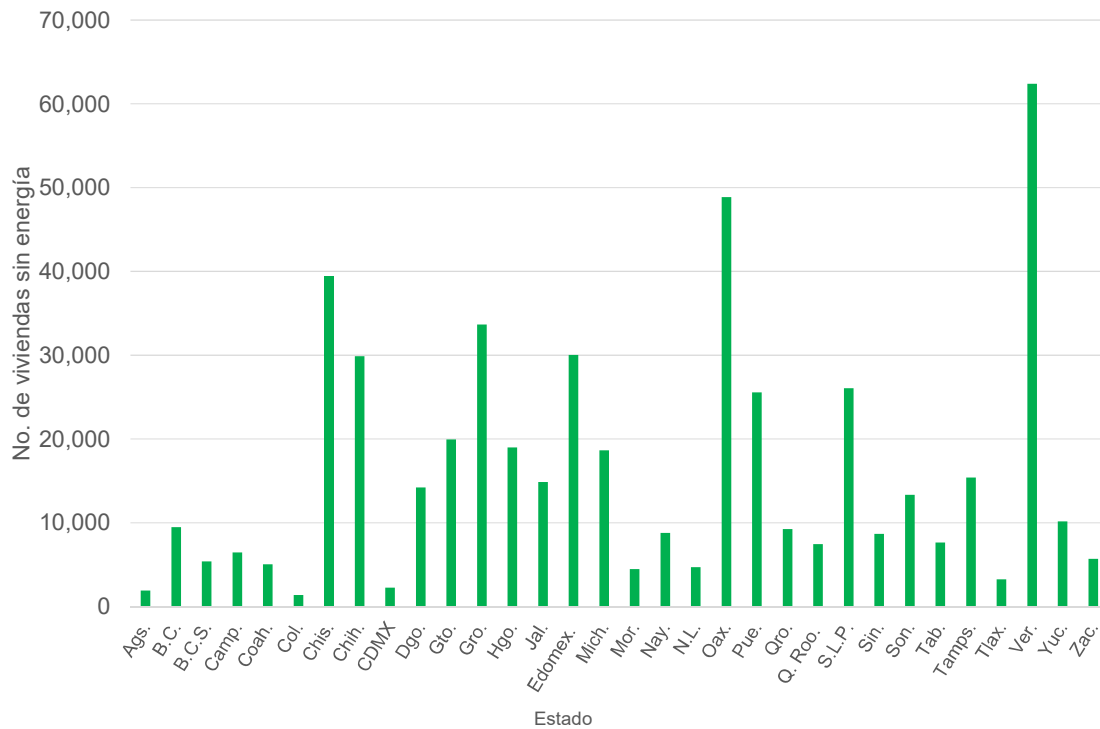


Figura 4.12 Número de viviendas sin energía eléctrica por entidad federativa

De acuerdo a información generada por el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL) el estado de Chiapas es el tercer estado con un mayor índice de rezago social, solo superado por el estado de Oaxaca y Guerrero. (CONEVAL, 2015)

4.3.3 Marginación, pobreza, y su relación con la falta de energía eléctrica

La energía es un aspecto fundamental en el desarrollo de la sociedad. Gracias a ella es posible tener iluminación, comunicación, salud, actividades productivas entre otros aspectos. Para sustentar esta idea, se decidió relacionar el porcentaje de viviendas sin energía por entidad federativa, con el Índice de Desarrollo Humano, indicador que sintetiza el avance obtenido en tres dimensiones básicas para el desarrollo de las personas: la posibilidad de gozar de una vida larga y saludable, la educación y el acceso a recursos para gozar de una vida digna (Programa Nacional de las Naciones Unidas, 2015) El resultado se aprecia en la Figura 4.13.

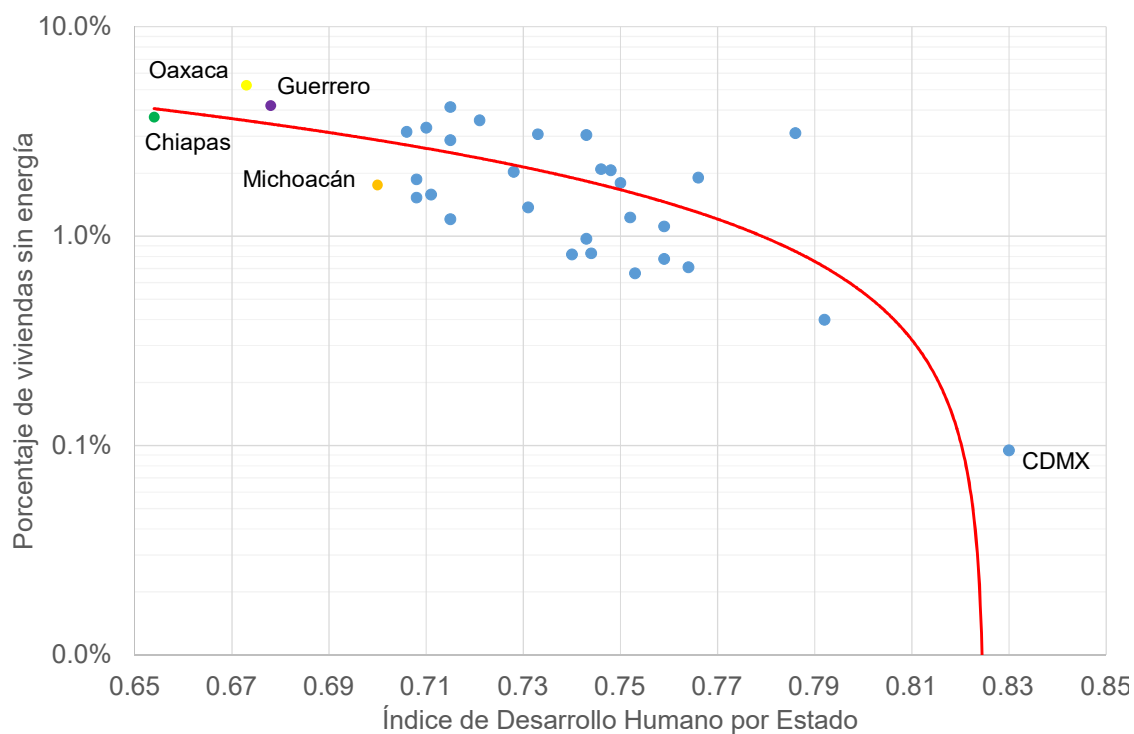


Figura 4.13 Porcentaje de viviendas sin energía vs Índice de Desarrollo humano por entidad federativa

De la Figura 4.13 se puede concluir que existe una tendencia la cual indica que a mayor porcentaje de viviendas sin energía eléctrica, se aprecia un menor Índice de Desarrollo Humano y por ende, una menor calidad de vida.

4.3.4 Conflictos sociales en proyectos de energía

El desarrollo de proyectos de generación de energías renovables en México tiene como uno de los grandes retos a superar, el adecuado manejo de los aspectos sociales que implican la utilización de recursos naturales, y la adecuada ubicación de los proyectos para el desarrollo de esta actividad.

A febrero de 2017, de acuerdo a investigación de El Economista, existen 110 proyectos de infraestructura en el país se encuentran en riesgo por conflictos sociales; siendo al menos 54 del sector energético. (El Economista, 2017).

El caso de las centrales hidroeléctricas es particularmente sensible, esto debido a la interacción de la tecnología con un recurso tan delicado como lo es el agua, y factores como la ocupación de tierras producto del embalse, cambio del régimen natural del río, ocupación de terrenos para la extracción de materiales y construcción de caminos, por mencionar algunos. Proyectos como La Parota, en Guerrero, Paso de la Reina, en Oaxaca, y Chicoasén II en Chiapas, muestran que, de no existir una conformidad social con el proyecto, esto puede llevar a un retraso en su puesta en operación, o en su cancelación temporal o absoluta.

Los proyectos de energía, especialmente las centrales hidroeléctricas enfrentan problemas sociales, debido a la existencia de los siguientes factores

- Desalojo y desplazamiento de población
- Incorrecto manejo de los mecanismos de información hacia los pobladores,
- Ausencia o mal manejo de consulta de los pueblos indígenas
- Desinformación sobre las oportunidades de desarrollo social y humano en la zona afectada
- Ausencia de poder de decisión y colaboración de comunidades y núcleos agrarios involucrados.
- Localización de diversos grupos culturales y existencia de diferencias entre los mismos
- Vinculación de proyectos de energía a personajes políticos, líderes sociales, religiosos
- Corrupción e incumplimiento por parte de los promoventes
- Existencia de actores ajenos al proceso y al territorio involucrado.

En los aspectos sociales para el desarrollo de proyectos de energía, se identifican los siguientes actores:

- *Actores directos*

Actores las cuales, la construcción o no del proyecto de energía renovable, provoca un efecto directo sobre su forma de vivir

Habitantes, autoridades municipales, de localidades, ejidales, núcleos agrarios,

- *Detractores*

Actores ajenos al proceso y al territorio involucrado que contaminan y obstaculizan al diálogo, y afectan el juicio y decisión de los involucrados directos, Políticos, líderes y medios de comunicación ajenos a la región, así como actividad y organizaciones que

- *Promoventes*

Empresas o particulares cuyo objetivo es la utilización de los recursos naturales para la generación de energía eléctrica.

La Ley de la Industria Eléctrica y su Reglamento, indica a los organismos promoventes de proyectos de energía, la necesidad de realizar de presentar ante la SENER una Evaluación de Impacto Social (EVIS) la cual tiene como fin identificar e implementar acciones necesarias para garantizar la sostenibilidad del proyecto y el respeto a los derechos humanos durante su vida útil.

La Evaluación de Impacto Social debe contener lo siguiente:

- Descripción del Proyecto y de su área de influencia
- Identificación y caracterización de comunidades y pueblos que se ubican en el área de influencia del Proyecto

-
- La identificación, caracterización, predicción y valoración de los Impactos Sociales positivos y negativos que podrían derivarse del Proyecto
 - Las medidas de prevención y mitigación, y los planes de Gestión Social

Los aspectos particulares relacionados con el contenido de la Evaluación de Impacto Social, se pueden consultar en el documento de nombre *Disposiciones administrativas de carácter general sobre la Evaluación de Impacto Social en el sector energético*. La realización de una Evaluación de Impacto Social permite a los inversionistas identificar riesgos y así, reducir gastos en la solución de futuros problemas como demandas legales, protestas sociales y retrasos en la construcción del proyecto.

4.4 TECNOLÓGICO

Se enumeran a continuación aquellos aspectos que ayudan a comprender la situación del escenario tecnológico que rodea a los aprovechamientos hidrocínéticos, y que se considera relevante tomar en cuenta para el desarrollo de la tecnología. Por medio del estudio de los aspectos que se han de enumerar a continuación se espera comprender la forma en la cual funcionan aquellas tecnologías que podrían, aparentemente, ser una competencia para los aprovechamientos hidrocínéticos, cual es el estado de desarrollo de las mismas.

De esta forma se describen los elementos que de mayor importancia que integran una planta hidroeléctrica convencional, los tipos de turbinas de mayor uso, así como los elementos auxiliares para su funcionamiento. Esto para comprender de mejor forma los diferentes requerimientos de infraestructura entre los aprovechamientos hidrocínéticos y la hidroeléctrica convencional.

Se estudian también, aquellos aspectos generales y particulares de las turbinas de baja carga al hilo de corriente, puesto que se trata, dentro de la generación de energía a través del agua, de la tecnología que una mayor similitud presenta con los aprovechamientos hidrocínéticos debido a las bajas cargas que se manejan. Profundizar en el conocimiento de su operación, los tipos existentes en el mercado, permitirá aclarar las diferencias fundamentales que existen entre ambas tecnologías.

Se discuten las razones que dan sustento a la existencia de aprovechamientos hidráulicos y sus diferentes tipos, esto para contemplar las posibilidades que tienen los aprovechamientos hidrocínéticos de ser instalados en alguno de ellos.

Finalmente, se estudia la manera de operar de tecnologías de generación de energía de fuentes renovables como la solar y eólica, en miras de reconocer su potencial competencia ante los aprovechamientos hidrocínéticos, o en su defecto, la posibilidad de que exista una interacción entre estas fuentes de generación de energía a través de sistemas híbridos.

La importancia del estudio del escenario tecnológico de los aprovechamientos hidrocínéticos, será fundamental en la construcción del análisis **FODA**, especialmente en aquellos aspectos externos a la tecnología que pueden ser utilizados a favor o en contra de la misma. (Oportunidades y Amenazas)

4.4.1 Planta hidroeléctrica convencional

Instalación que captura la energía del agua en movimiento, para su conversión en energía eléctrica a través de la interacción de obras civiles y electromecánicas diseñadas y construidas para dicho propósito. Los principales elementos que la integran son:

1. Obra de toma
2. Galería de conducción
3. Pozo de Oscilación aguas arriba y aguas debajo de casa de máquinas
4. Tubería a presión:
5. Casa de máquinas
6. Turbina
7. Generador
8. Desfogue
9. Subestación Eléctrica



Figura 4.14 Perfil de obra de generación en caverna

- *Obra de Toma*

Estructura que tiene como función, permitir y controlar la extracción del agua de una presa o de un río, en la cantidad y momento en que se requiera y conducirla a la planta hidroeléctrica. (CFE, 1983). Por medio de la correcta selección y diseño de obra de toma, se busca el gasto admitido sea el adecuado para el funcionamiento de las máquinas, además de que las pérdidas sean las menores posibles, y no se presente el ingreso de cuerpos extraños y flotantes a la conducción.

- *Galería de conducción*

Conducción inmediata a la obra de toma que se caracterizan por poseer pendientes pequeñas y transportar el agua con velocidades bajas hasta la tubería a presión. Comienza en la rejilla y finaliza en la tubería a presión.

- *Pozo de oscilación*

Se definen como estructuras unidas a conducciones de agua, y cuya principal función es la de aliviar y neutralizar cambios súbitos de presión por medio de su llenado y vaciado. Los pozos de oscilación se encuentran conectados en uno de sus extremos a la conducción que se desea proteger, y por el otro se encuentran condiciones a superficie libre, también llamados cámaras de oscilación o amortiguamiento, son estructuras que representan una solución a fenómenos transitorios presentados por la operación de la central.

En lo que respecta a plantas hidroeléctricas, las diferencias de presión son originadas por razones como los cambios en la demanda de energía del sistema, lo que provoca que las turbinas reduzcan o aumenten su velocidad provocando aceleraciones positivas y negativas del agua en el conducto, lo que trae como consecuencia la variación en las presiones. La onda de presión viaja hasta el sitio donde se encuentra el pozo de oscilación, en donde una parte de la presión es aliviada hacia la superficie libre del pozo y la otra continúa por la conducción.

Se trata de estructuras de concreto armado o de acero, normalmente de sección circular, aunque también puede ser elíptica o compuesta. El diseño final de un pozo de oscilación obedecerá a variables como la carga que se presenta en el almacenamiento, la longitud y diámetro de la conducción, la estimación del tamaño de las oscilaciones y la regulación de la frecuencia en la red. El proceso de diseño involucra la obtención del área transversal mínima y la determinación de niveles máximos y mínimos para soportar las oscilaciones. La ubicación de este tipo de estructuras puede ser tanto aguas arriba como aguas abajo, o en ambos lados de la casa de máquinas.

- *Pozo de oscilación aguas arriba de la casa de máquinas*

Existen diferentes criterios para decidir la existencia de un pozo de oscilación aguas arriba de la casa de máquinas. Como un primer cálculo, se recomienda considerar un pozo de oscilación cuando el tiempo que tarda la columna de agua dentro de la tubería en alcanzar su velocidad normal de operación, partiendo desde una condición de flujo inicial de 0 m³/s es mayor a dos segundos. A este tiempo también se le domina tiempo de inercia de la tubería. El pozo de oscilación debe ser ubicado en la mayor cercanía posible a la casa de máquina, respetando la topografía del lugar, la geología, y con una separación mínima de 1.5 veces el diámetro máximo del pozo.

- *Pozos de oscilación aguas abajo de la casa de máquinas*

Este arreglo se emplea cuando el túnel de desfogue es muy largo y se necesita evitar que las depresiones resultantes del golpe de ariete puedan originar una separación de la columna líquida. (CFE, 1981). Normalmente se construyen en obras de desfogue cuya longitud supera los 100 metros.

- *Pozo de oscilación tanto aguas arriba como aguas abajo de la casa de máquinas*

Se presenta en plantas hidroeléctricas que cuentan con túneles trabajando a presión y desfogues largos (CFE, 1981)

- *Tubería a presión*

Tubería de acero soldado que tiene la función de conducir el agua a presión hasta la casa de máquinas y que puede ser libre al exterior, bloqueada al interior o libre al interior.

- *Casa de Máquinas*

Estructuras donde se alojan las unidades turbina-generator, además de una plataforma de montaje y reparación. Generalmente es de concreto armado y puede ser de tipo exterior Figura 4.15 o caverna. Figura 4.14.

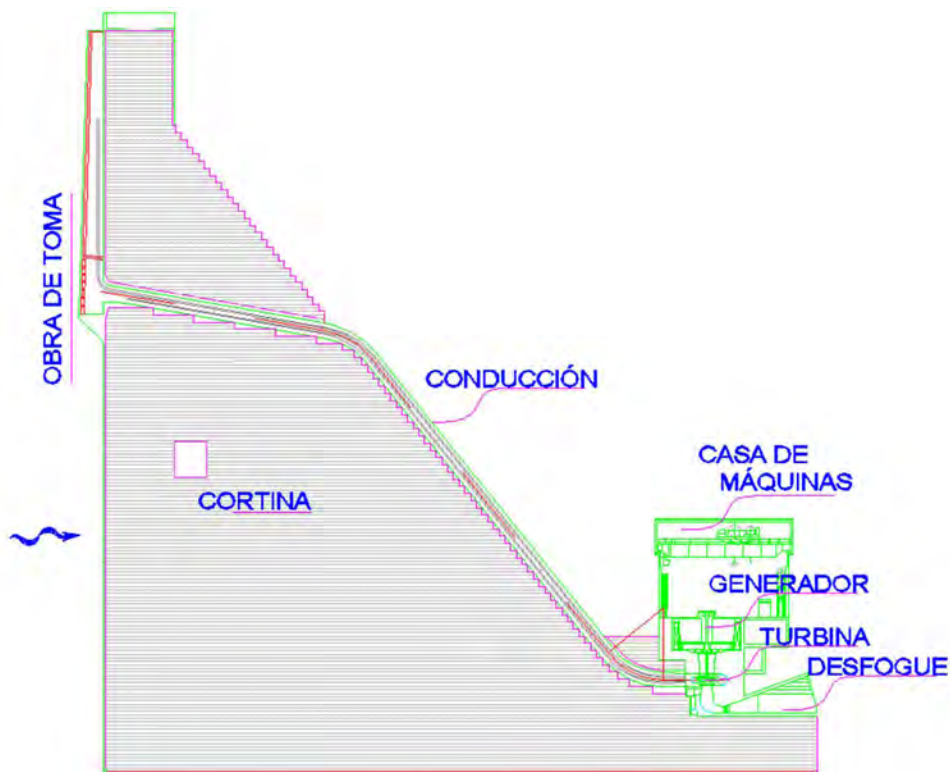


Figura 4.15 Esquema en perfil con casa de máquinas exterior

Su localización estará en función de la disposición de obras del proyecto en cuestión, misma que obedece a diferentes variables como puede ser la topografía de la zona, la geología del lugar, el tipo de boquilla, las características de descarga del río, zonas protegidas, entre otros aspectos.

- *Pantalón*

Se trata de un esquema de conducción en donde se presenta una bifurcación de donde se derivan dos o más tuberías que conducen el caudal admitido por la obra de toma, hacia las respectivas turbinas. Obedeciendo a la ecuación de la continuidad, se tiene que:

$$Q_{OT} = Q_{C1} + Q_{C2}$$

donde

Q_{OT} gasto admitido por la obra de toma

Q_{C1} gasto admitido por la conducción No.1

Q_{C2} gasto admitido por la conducción No.2

El gasto admitido por cada conducción, se encontrará en función de su diámetro y el ángulo de inclinación. Figura 4.16.

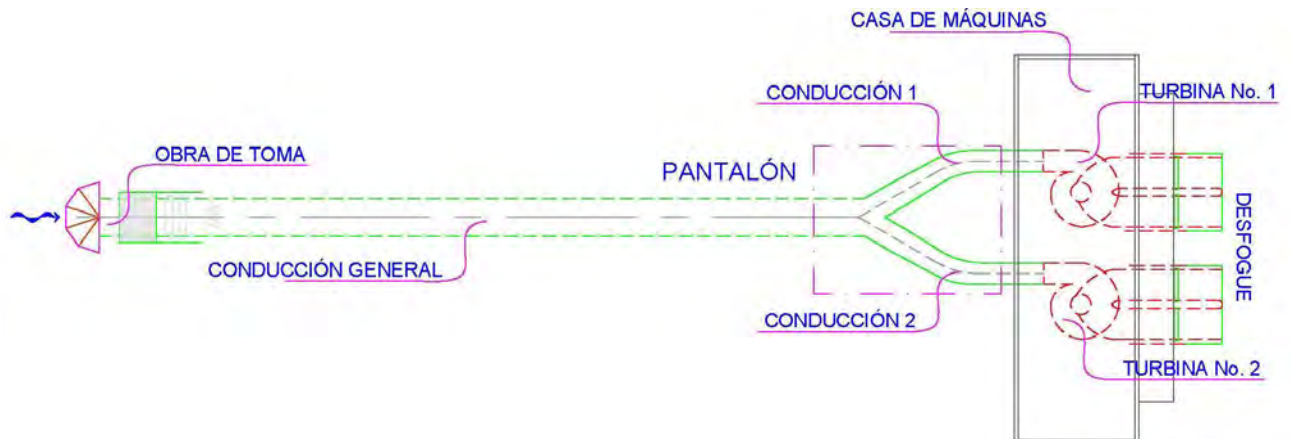


Figura 4.16 Esquema de conducción con pantalón

- *Encamisado o blindaje de conducción*

Tratamiento que se le da a conducciones sometidas a presión, con el fin de que ésta resista a sobrepresiones originadas por efectos transitorios. Se trata de adherencia de acero a una masa de concreto dentro de un macizo rocoso con el fin de que las cargas y esfuerzos producto de los fenómenos transitorios no deformen la sección de la conducción. En la Figura 4.17 se puede apreciar la estructura del encamisado de la sección X-X' de la Figura 4.14.

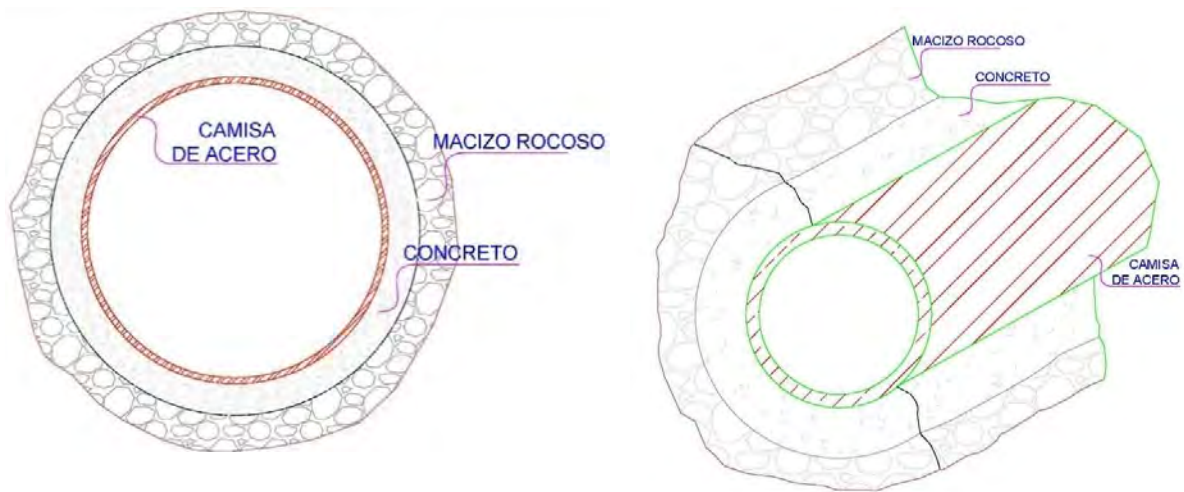


Figura 4.17 Encamisado de acero. Sección X-X' y vista isométrica

- *Subestación eléctrica*

Conjunto de instalaciones que tiene como objetivo, transformar la energía eléctrica generada en la central hidroeléctrica hacia un alto voltaje, con el fin de que pueda ser transportada a través de grandes distancias por medio de líneas de transmisión, sin sufrir una mayor cantidad de pérdidas de energía. La integran elementos como Transformadores, reguladores, dispositivos de control, circuitos entre otros.

4.4.2 Turbina

Dispositivo electromecánico que aprovecha la energía cinética y potencial del agua para producir un movimiento de rotación que transferido mediante un eje al generador produce energía eléctrica. Con el avance de la tecnología, existen en la actualidad diversos tipos de turbinas las cuales tienen su correspondiente particularidad en la forma de operar, sin embargo, las de mayor uso alrededor del mundo son las turbinas Pelton, Francis, Kaplan y Bulbo, debido a que es tecnología ampliamente probada y segura en su funcionamiento.

- *Carcasa espiral*

Armadura de acero que tiene como fin definir y concentrar la dirección que toma el agua en la periferia del rodete, de tal forma que la energía no se disperse. Además protege los elementos internos de la turbina.

- *Carcasa tipo Bulbo*

Alberga los elementos internos de la turbina, al igual que una carcasa espiral, con la diferencia de que tiene la forma de bulbo. Dentro de la carcasa se encuentra también el generador. Aplica en máquinas Bulbo.

- *Inyector*

Elemento exclusivo de las turbinas Pelton que cumple la función de ser el distribuidor de flujo sobre los álabes y regular la cantidad de gasto proyectado hacia los álabes. Consta de una tobera y válvula de aguja.

- *Válvula de aguja*

Elemento exclusivo de las turbinas Pelton Es el encargado de regular la abertura del orificio de salida de chorro del inyector, en función de la velocidad de la máquina.

- *Distribuidor*

Dispositivo que regula el gasto que deberá admitir la turbina para que el sistema permanezca estable en el caso en el que existan variaciones en la demanda de energía.

- *Rodete*

Disco circular el cuál integra los álabes a su alrededor de su circunferencia. El inyector dirige el chorro de manera tangencial hacia la circunferencia para golpear al centro de los álabes. Se encuentra entre el distribuidor y el tubo de aspiración

- *Álabes*

Elementos que reciben el empuje directo del chorro del agua, para así provocar el movimiento del rodete. Son fabricados de materiales que sean resistentes a la corrosión y oxidación.

- *Generador*

Dispositivo compuesto por un estator y un rotor, que mediante el movimiento del rotor respecto al estator, provoca una inducción electromagnética con el fin de convertir la energía mecánica a eléctrica.

- *Tubería de Aspiración*

Tubería por la que sale el agua de la turbina, llevándosela hasta el desfogue de manera ordenada y con cierta trayectoria, después de que se aprovechó la energía contenida en el agua. Su adecuado dimensionamiento permitirá que la conversión de la energía sea realizada de la manera más eficiente posible.

El uso de la palabra “turbina” se le atribuye por primera vez al ingeniero militar Claude Burdin, en su artículo “Hydraulic Turbines or High speed rotating Engines”, y proviene de la palabra en latín *turbo*, que hace alusión a un mecanismo que se mueve de manera giratoria, como un torbellino.

- *Turbina Francis*

Desarrollada por el ingeniero James Francis a mediados del siglo XIX, se trata de la turbina hidráulica más utilizada alrededor del mundo. Un valor cercano al 60% de la capacidad global de hidroelectricidad de grandes aprovechamientos es producido por medio de estas máquinas. (General Electric Hydro, 2016). Trabajan con una eficiencia aceptable para un amplio rango de cargas. El agua entra a la máquina de manera radial, y sale de ella de manera axial, estableciendo contacto con las paletas, las cuales tienen una forma específica que provocan el giro del rodete. Dicho rodete está conectado al generador por medio de un eje rotatorio, lo que permite que el mecanismo genere energía eléctrica. Figura 4.18

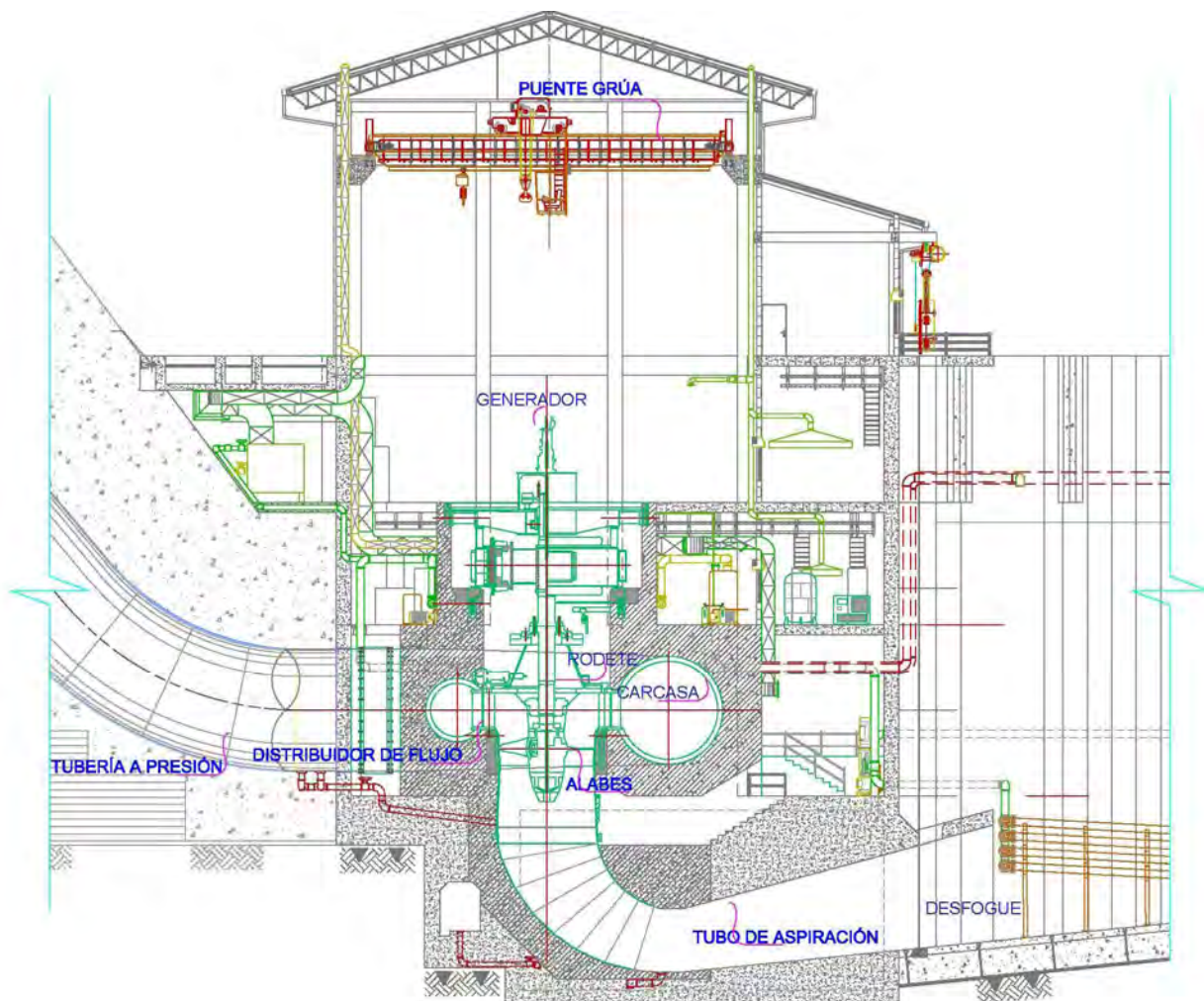


Figura 4.18 Esquema en perfil de casa de máquinas para turbina Francis

- *Turbina Pelton*

Desarrollada por el inventor Lester Allan Pelton en 1879, las turbinas Pelton funcionan por medio de la proyección de chorros de agua hacia un mecanismo compuesto por paletas, que a su vez impulsan un rotor que resulta en un torque en su eje. Después de golpear las paletas, el agua continua su paso por el desfogue una cantidad de energía prácticamente nula. Figura 4.19

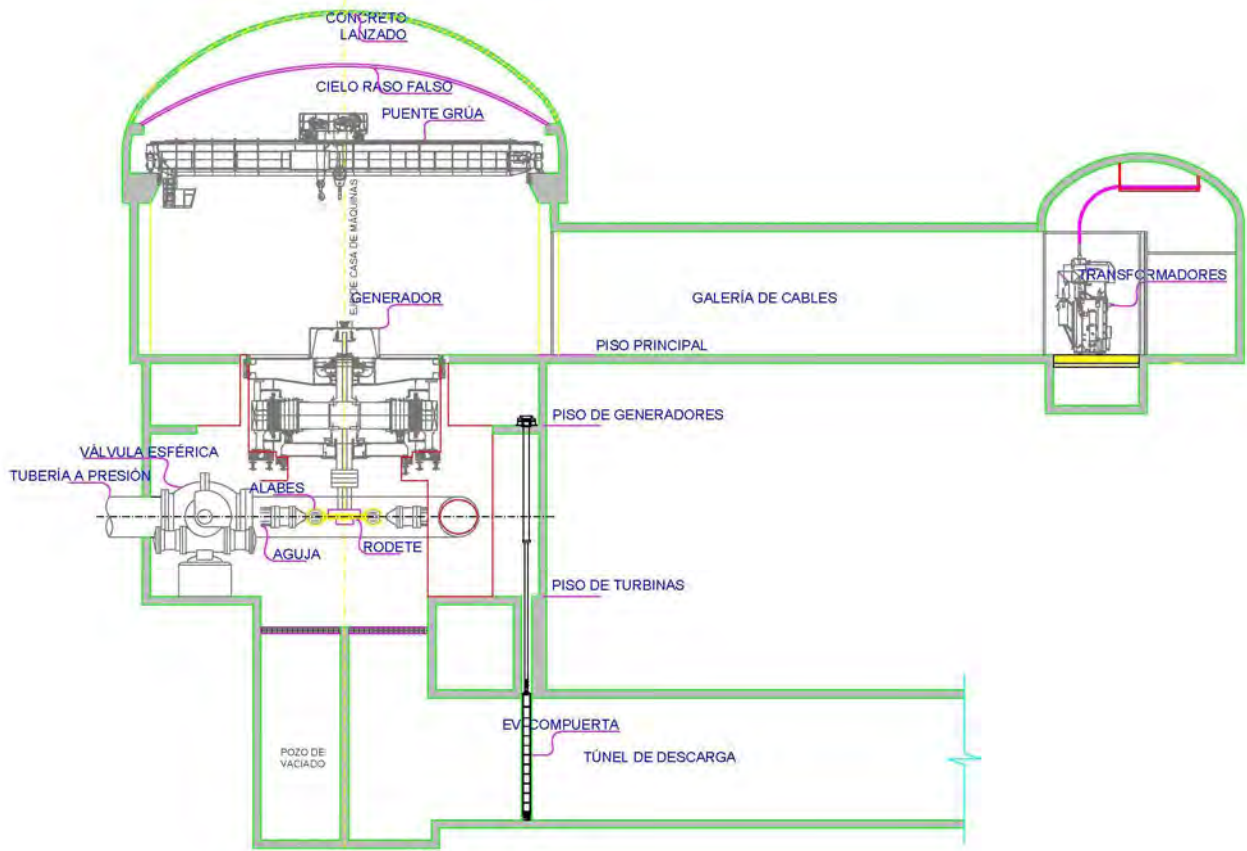


Figura 4.19 Esquema en perfil de casa de máquinas para turbina Pelton

- Turbina Kaplan

Máquina desarrollada por el ingeniero austriaco Víktor Kaplan entre 1910 y 1924, Se trata de un tipo de máquina que se orienta aprovechar gastos importantes y cargas bajas. El agua entra por una carcasa en forma de espiral, y pasa a través del rodete, haciendo que éste gire y transmita energía por medio del eje hacia el generador. El diseño permite que los alabes tengan cierta inclinación de acuerdo a la cantidad de gasto que entre y de la cantidad de energía demandada. Esto permite que la eficiencia sea mayor. Figura 4.20

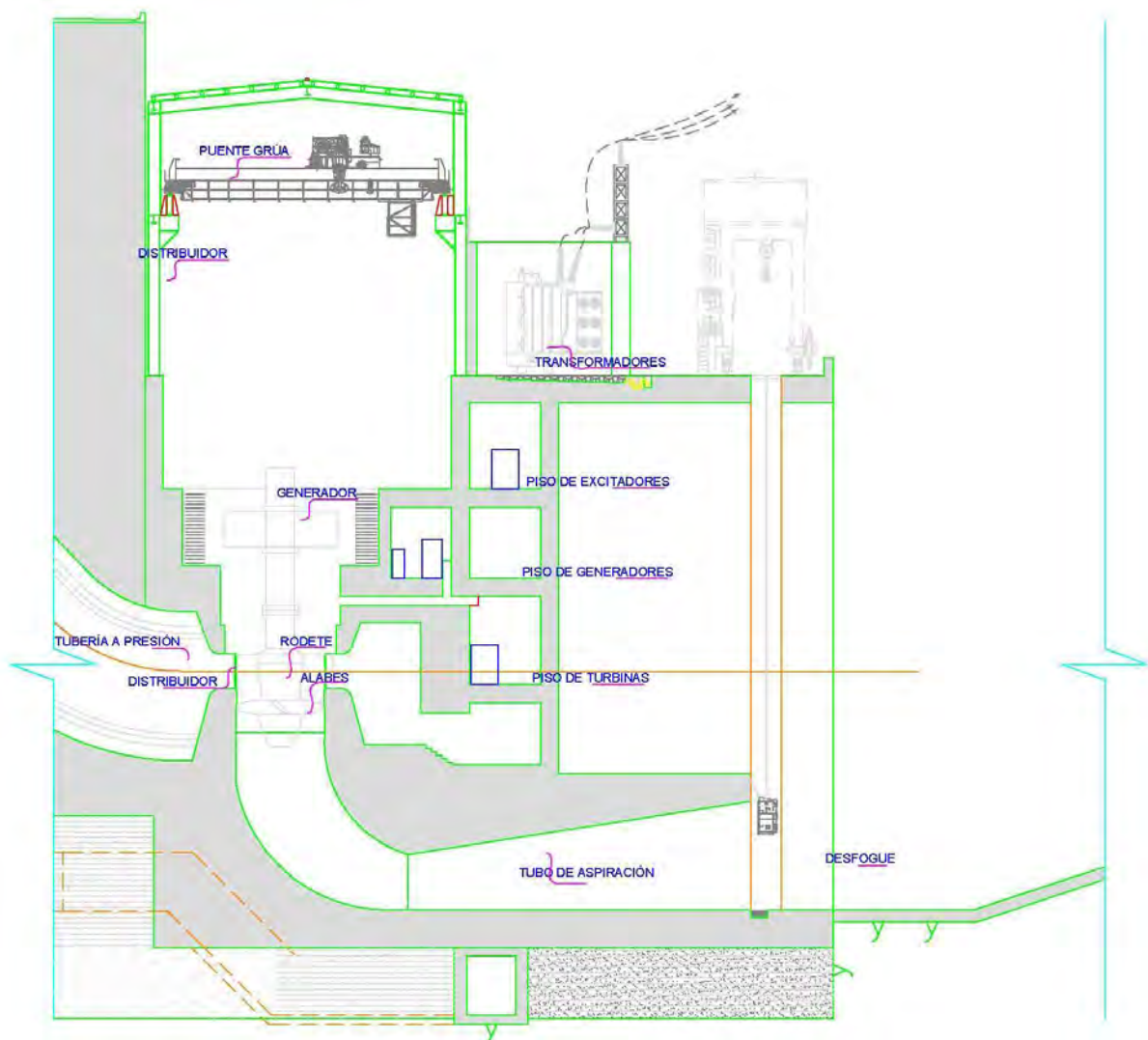


Figura 4.20 Esquema en perfil de casa de máquinas para turbina Kaplan

- *Turbina Bulbo*

Se trata de una variante de las turbinas de propulsión, similar a la turbina Kaplan. En este tipo de turbinas, el generador se encuentra encapsulado y sellado en el lugar en donde pasa el agua. El generador es controlado por propelas que se ajustan. La diferencia más importante que existe entre esta turbina y la Kaplan, es el hecho de que la turbina bulbo no modifica significativamente la trayectoria del flujo. De esta forma el agua entra de forma axial y abandona de la misma forma la máquina. Figura 4.21

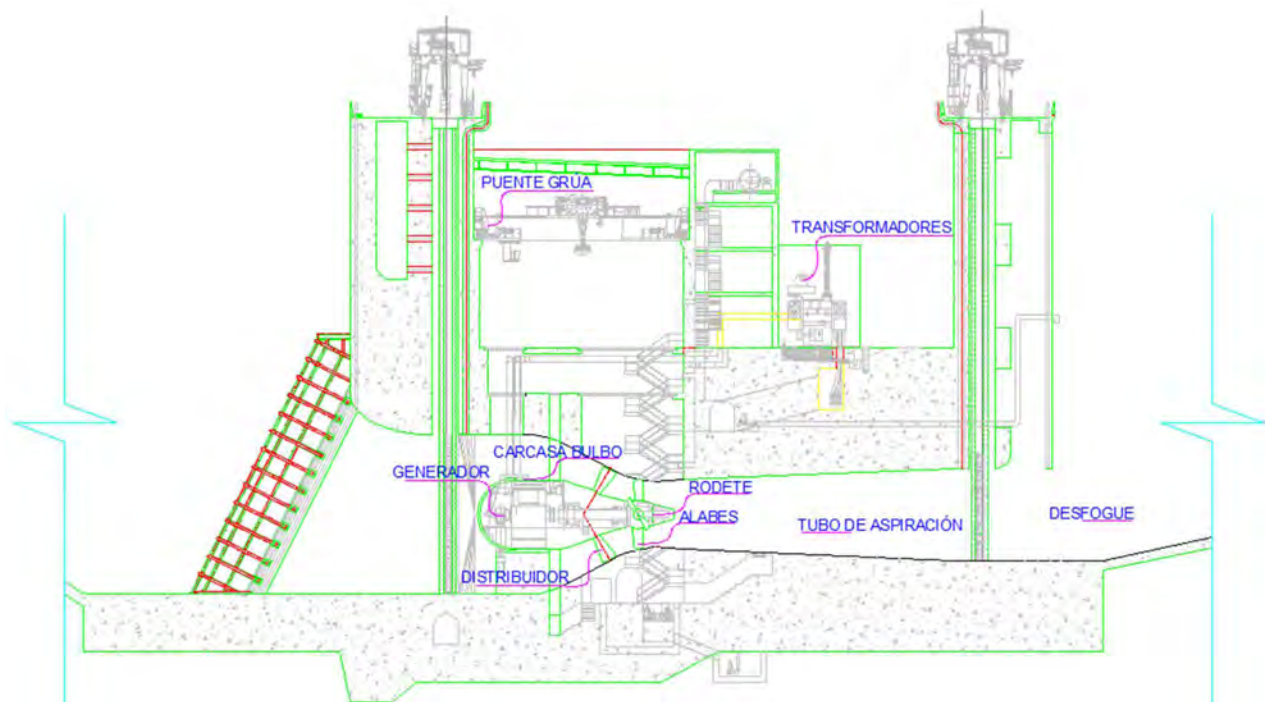


Figura 4.21 Esquema en perfil de casa de máquinas para turbina Bulbo

- Selección preliminar de la turbina

Entre los principales factores a considerar al momento de seleccionar una turbina, se encuentra el registro hidrológico disponible, las características del vaso de almacenamiento y las posibles variaciones de la superficie del agua en el río aguas debajo de la central, las características de la obra de excedencia que, se supone, fue diseñada con un criterio confiable. Con esta información se deberá intentar una producción máxima de energía, vertiendo lo menos posible por la obra de excedencias, tanto para no desperdiciar el agua como para reducir las inundaciones aguas debajo de la obra, sin olvidar que debe haber un libre bordo aceptable cuando el nivel del agua en el vaso resulte muy alto. También debe reducirse a un mínimo la probabilidad de tener que parar la planta y tener en presente, por un lado, la energía de pico demandada y por otro, la energía requerida durante los domingos y las noches. (Sánchez Bibriesca & Fuentes Mariles, 2000).

La selección de la turbina es un proceso importante, puesto que de ello dependerá la eficiencia y capacidad de extracción de energía de la central, debido a que las diferentes turbinas se acoplan de mejor forma a diferentes rangos de carga y gasto. En la Figura 4.22 se muestra un gráfico para la selección preliminar de la turbina a utilizar, que se encuentra en función de la carga y gasto pertenecientes al proyecto. Se muestran los cuatro tipos de turbina de mayor uso alrededor del mundo.

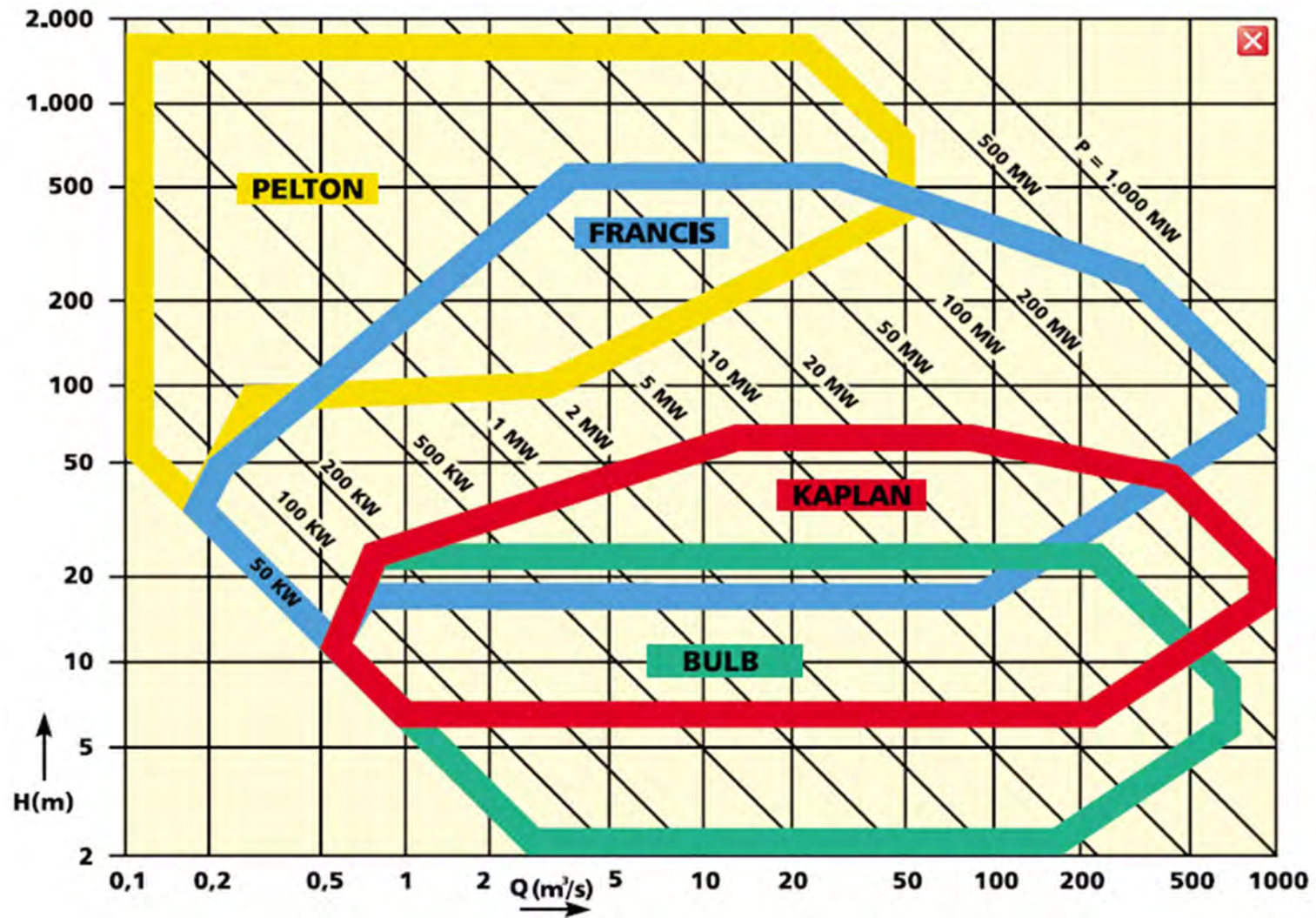


Figura 4.22 Gráfico de selección preliminar de turbina

4.4.3 Aspectos particulares de las turbinas de baja carga en aprovechamientos al hilo de corriente

Como se señaló anteriormente, las turbinas de baja carga al hilo de corriente son las que mayor competencia y similitud presentan frente a las turbinas hidrocinéticas, razón por la cual se profundiza a continuación sobre ellas.

- *Funcionamiento de los aprovechamientos hidroeléctricos al hilo de corriente*

Una central al hilo de corriente, genera electricidad a medida que existe agua disponible y que es provista por el río, a diferencia de un esquema convencional con reservorio, en donde existe un vaso que almacena el agua para utilizarla convenientemente de acuerdo a la demanda de energía. El hecho de que el comportamiento del río sea el que determine la generación de energía implica que ésta se vea reducida en épocas de estiaje. Existen esquemas al hilo de corriente en los cuales se aprovecha una carga alta por medio de las máquinas adecuadas, esto es posible siempre que se cumpla la condición en la que el agua utilizada para la generación, sea provista por el río sin crear un almacenamiento, o que éste sea el mínimo.

Los proyectos de baja carga con operación al hilo de corriente no necesariamente se asocian con pequeños proyectos hidroeléctricos. Se trata más bien de una condición de operación en la que se busca alterar lo menos posible el régimen natural del río. Al no contar con energía almacenada en forma de volumen de agua como lo hacen los esquemas convencionales, resulta primordial definir la forma en la que será vendida e integrada esta energía al sistema eléctrico.

- *Clasificación de los aprovechamientos hidroeléctricos al hilo de corriente*

Los aprovechamientos hidroeléctricos de baja carga que funcionan al hilo de corriente, se caracterizan, más no se limitan, a tener cortinas que sean consideradas de pequeño o mediano tamaño. Esta situación es relativa al río que interesa aprovechar. Por otro lado, se busca que el volumen de almacenamiento no sea significativo. Una clasificación aceptada que considera, tanto la altura de la cortina, como la cantidad de volumen almacenado, es la propuesta por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE) Tabla 4.13

Tabla 4.13 Clasificación de tamaño de cortinas por almacenamiento y altura. USACE

Categoría	Unidades Sistema Imperial		Unidades Sistema Internacional	
	Almacenamiento en acre-pie	Altura de cortina en pie	Almacenamiento en hectómetros cúbicos	Altura de cortina en metros
Pequeña	Entre 50 y 1 000	Entre 25 y 40	Entre 0,061 y 1,23	Entre 7,62 y 12,20
Mediana	Entre 1 000 y 5 000	Entre 40 y 100	Entre 1,23 y 61,67	Entre 12,20 y 30,48
Grande	Mayor a 50 000	Mayor a 100	Mayor a 61,674	Mayor a 30,48

De la Tabla 4.13 se observa que los almacenamientos y alturas pequeñas y medianas se encuentran entre los valores de 0,061 hm³ a 61,67 hm³, y 7,62 m a 30,48 m respectivamente.

La Secretaria de Energía clasifica las centrales hidroeléctricas en dos grandes grupos:

- *Grandes centrales hidroeléctricas*

Aquellas que regulan de forma anual o multianual la capacidad hidráulica almacenada, con la finalidad de maximizar la generación, y permitir el desarrollo de las actividades de otros sectores

- *Centrales hidroeléctricas menores*

Aquellas en las que no se regula o se regula de forma horaria, diaria o semanal las aportaciones hidráulicas por lo que su producción de energía eléctrica suele ser en períodos cortos de tiempo a fin de minimizar la posibilidad de derrames. (SENER, 2016)

Dentro de las estrategias que siguen algunos países para impulsar las centrales al hilo de corriente y convertirlas en proyectos económicamente más atractivos, existen criterios que se establecen con el fin de brindar mejores herramientas a este tipo de centrales. Estas estrategias se basan en la consideración de externalidades, como lo puede ser:

- La central permita conectar a una comunidad que previamente no lo estaba, al sistema eléctrico.
- Construcción de caminos de acceso al proyecto, que permitan la comunicación y el transporte de las comunidades aledañas.
- Activación económica de la región
- Navegación, pesca, recreación.

La cuantificación de los beneficios económicos que brindan las externalidades, permiten observar al proyecto desde una perspectiva que trae progreso y bienestar a la zona.

- *Funcionamiento de las turbinas de baja carga al hilo de corriente*

La selección de las turbinas de baja carga asignadas a un aprovechamiento hidroeléctrico, dependerán fundamentalmente del gasto que han de admitir, y de la carga que se presenta, sin embargo, para la selección de la turbina adecuada, es necesario tomar en consideración las condiciones topográficas, hidrológicas, hidráulicas, ambientales y de generación de energía que establece el proyecto.

Aun cuando existen diferentes las turbinas hidráulicas de baja carga, todas trabajan bajo un principio similar:

El agua entra a través de un conducto a la máquina. Con las adecuadas condiciones de velocidad y presión, entra en contacto con los álabes. Los álabes son elementos diseñados de manera hidrodinámica, encargados de capturar el movimiento del agua. Dependiendo de la máquina en cuestión, pueden o no ser capaces de variar su ángulo. Al transmitir su energía cinética y potencial a los

álabes, estos hacen provocar un movimiento giratorio en el rodete y a su vez en el eje de la máquina, el cual va unido a la unidad generadora de energía eléctrica.

De manera general, es posible clasificar a las turbinas de acuerdo a la forma en la que el agua ejerce su fuerza sobre la máquina y como causan su rotación. Estos dos grupos son las turbinas de *impulso* y de *reacción*.

- *Turbinas de impulso*

El funcionamiento de este tipo de turbinas versa en el hecho de que toda la energía hidráulica es convertida a energía cinética por medio de chorros de agua proyectados para hacer contacto con los alabes.

- *Turbinas de reacción*

Una parte de la energía disponible es convertida en energía cinética, antes de que el agua entre al rotor, asimismo, la presión como la velocidad cambia a medida que el agua atraviesa el mecanismo. De esta forma la presión presentada a la entrada de la máquina es mayor que a la salida. Bajo este funcionamiento.

Adicional a la clasificación que obedece a la forma en la que el agua imprime su fuerza sobre la máquina, es necesario establecer una clasificación que involucre la altura de la carga.

Una clasificación propuesta por European Small Hydropower Association es la siguiente

- Alta carga- Igual o superior a 100 metros.
- Media carga- Entre 30 y 100 metros.
- Baja Carga- Entre 2 y 30 metros.

(ESHA, 2004)

De esta forma, el presente capítulo se concentra en turbinas de baja carga que se operan con cargas inferiores a los 30 metros.

- *Tipos de turbina de baja carga*

Los primeros diseños de máquinas se componían por arreglos de turbinas que usaban carcasas en forma de espiral con distribuidores que controlan el flujo, fue conceptualizado inicialmente para máquinas de mediana y alta carga, y adaptado a la turbina Kaplan para condiciones de baja carga.

Posteriormente se crearon las turbinas tubulares, las cuales fueron diseñadas para reducir los costos de la obra civil, al simplificar la estructura en la cual atraviesa el flujo. La mayoría de este tipo de máquinas se encuentra ubicadas de tal forma que el eje es horizontal. El flujo se orienta axialmente hacia la turbina, no sin antes haber recibido la dirección adecuada para propiciar el movimiento giratorio, por medio del distribuidor.

El movimiento giratorio del agua hace que el eje tenga un torque por medio de los álabes de la turbina, de esta forma el flujo abandona la máquina de forma axial. El generador está contenido en medio del conducto del flujo. El desarrollo de las turbinas tubulares dio paso a las turbinas tipo bulbo tal y como se conocen en la actualidad, las cuales se caracterizan por tener el generador dentro de una carcasa en forma de bulbo, en medio del flujo que ingresa a la máquina

Existe una amplia gama de máquinas que permiten aprovechar bajas cargas, aun así, no es posible compararlas a todas entre sí debido a que cada una obedece a condiciones distintas de operación, escalas de potencia y generación, obras civiles asociadas, complejidad en su instalación entre otras variables. La selección de la máquina adecuada, obedecerá a un estudio técnico económico que asegure que su instalación y operación es viable

Las turbinas de impulso se enfocan al aprovechamiento de grandes cargas, mientras que las turbinas de reacción son utilizadas frecuentemente en aprovechamientos de baja carga. Es importante señalar que aun cuando algunas turbinas son conocidas por ser utilizadas para cargas medianas o altas (Pelton, Francis, etc.) existen fabricantes que adaptaron estos mecanismos a aprovechamientos de baja carga. A continuación se describen brevemente las turbinas de baja carga de mayor popularidad y presencia alrededor del mundo.

- *Pelton*

Funciona por medio de la proyección de chorros de agua hacia un mecanismo compuesto por paletas, que a su vez impulsan un rotor que resulta en un torque en su eje. Después de golpear las paletas, el agua continua su paso por el desfogue una cantidad de energía prácticamente nula. Este tipo de máquinas son frecuentemente utilizadas en aprovechamientos de alta carga, sin embargo, existen fabricantes que han adaptado este diseño para baja carga. (Loots, 2014)

- *Crossflow (Banki)*

Se compone por dos discos unidos, con alabes inclinados. Al entrar el agua por la turbina, atraviesa dos veces sobre los alabes, de esta forma se busca que el total de la energía haya sido aprovechada.

- *Tornillo de Arquímedes*

Utiliza la diferencia de las presiones hidrostáticas entre las paletas que lo componen, y son comúnmente utilizadas en bajas cargas y grandes gastos. Dentro de sus principales ventajas, destaca el hecho de que no causan un mayor daño a los peces.

- *Hidromotor*

Funciona por medio de dos ejes conectados a paletas que se mueven de manera elíptica entre ambos ejes, transfiriendo la energía con un movimiento lineal. Al entrar el agua a la turbina, tiene un primer contacto con la paleta, y a medida que atraviesa la máquina, establece un segundo contacto con la paleta, lo que hace su funcionamiento, similar a la turbina de Flujo Cruzado

- *Francis*

Se trata de la turbina hidráulica más utilizada alrededor del mundo. Un valor cercano al 60% de la capacidad global de hidroelectricidad de grandes aprovechamientos es producido por medio de estas máquinas. (General Electric Hydro, 2016). Trabajan con una eficiencia aceptable para un amplio rango de cargas. El agua entra a la máquina de manera radial, y sale de ella de manera axial, estableciendo contacto con las paletas, las cuales tienen una forma específica que provocan el giro del rodete. Dicho rodete está conectado al

generador por medio de un eje rotatorio, lo que permite que el mecanismo genere energía eléctrica.

- *Kaplan*

Se trata de un tipo de máquina que se orienta aprovechar gastos importantes y cargas bajas. El agua entra por una carcasa en forma de espiral, y pasa a través del rodete, haciendo que éste gire y transmita energía por medio del eje hacia el generador. El diseño permite que los alabes tengan cierta inclinación de acuerdo a la cantidad de gasto que entre y de la cantidad de energía demandada. Esto permite que la eficiencia sea mayor.

- *Bulbo*

Este tipo de máquina es una variación de turbinas de propelas, similar a la turbina Kaplan. En este tipo de turbinas, el generador se encuentra encapsulado y sellado en el lugar en donde pasa el agua. El generador es controlado por propelas que se ajustan. La diferencia más importante que existe entre esta turbina y la Kaplan, es el hecho de que la turbina bulbo no modifica significativamente la trayectoria del flujo. De esta forma el agua entra de forma axial y abandona de la misma forma la máquina.

- *Vortex*

Se conforma por un contenedor redondo con un dren central. El agua atraviesa por un conducto recto antes de llegar tangencialmente al contenedor redondo. De esta forma se crea un importante vórtice sobre el fondo del dren central del contenedor, y una turbina utiliza la energía generada por el vórtice para su transformación en energía eléctrica.

De acuerdo a la ecuación para obtener la potencia aprovechable por una turbina, los dos principales insumos son el gasto y la carga. Al tener reducida carga en un proyecto al hilo de corriente, resulta de suma importancia aprovecharla de la manera más eficiente posible. De esta forma será posible obtener mayores beneficios económicos. Para cargas inferiores a 20 metros, las turbinas orientadas axialmente pueden ser superiores en términos de eficiencia y economía que las que las máquinas tradicionales de eje vertical. (Arms, 1978). Una de las razones se debe a que existe una mejor distribución de velocidades del agua sobre los álabes, permitiendo que el tamaño de ellas sea menores que las de una turbina vertical para una misma potencia, además de que se presenta una reducción de las pérdidas de carga en la entrada y la salida de la máquina, lo que mejora el rendimiento. Se ha comprobado que para una caída y consumo dados se obtiene la misma potencia con un rodete de 6,10 m de diámetro en deslizamiento axial, a una velocidad de 87 rpm, que con un rodete Kaplan de 7 m girando a 71 rpm.

La práctica indica que para aprovechamientos de gran tamaño con gastos altos, una turbina tipo Bulbo puede ser la más eficiente para cargas debajo de los 25 metros, siendo capaz de alcanzar una potencia de hasta 100 MW. Las turbinas tipo Kaplan, alcanzan su mayor eficiencia en cargas que comprenden entre 25 y 60 metros, obteniendo valores de potencia del orden de 250 MW. (Alstom Power, 2015)

El factor de planta de las centrales hidroeléctricas en general varían 0,23 y 0,95, dependiendo del tipo de energía que abastece, pudiendo ser en horas base u horas punta. Las centrales al hilo de corriente se caracterizan por tener factores de planta altos, esto se debe a que se encuentra operando la mayor parte del tiempo con el fin de adaptarse al régimen del río. Las centrales con factores de planta bajos están contempladas para funcionar en horas punta, y normalmente cuentan con un almacenamiento importante, razón por la cuál no son considerados aprovechamientos al hilo de corriente.

4.4.4 Fundamento y razón de ser de los aprovechamientos hidráulicos en México y sus diferentes tipos.

La solución al problema de la incorrecta *distribución espacial* de la precipitación y de la demografía se presenta por medio de la conducción de agua de un sitio en la que la hay en exceso, hacia a otro que carece del mismo.

La solución al *aspecto temporal* se presenta por medio del almacenamiento, construyendo vasos que permitan guardar el agua en épocas de lluvia, con el fin de utilizarla en épocas de sequía.

La interacción de infraestructura hidráulica necesaria para almacenar y conducir el agua con el objetivo de distribuirla de manera más equitativa para la obtención de beneficios se le denomina **aprovechamiento hidráulico**.

Un **aprovechamiento hidráulico** busca modificar el ciclo al que naturalmente obedece el agua, por medio de la planeación, diseño, construcción y puesta en operación de infraestructura que permita la asignación del recurso hídrico de manera responsable, eficiente, otorgando prioridades a su uso, y en el tiempo y espacio necesario, a determinadas actividades enfocadas a maximizar el bienestar social y económico del país.

Las actividades se enfocan, mas no se limitan al:

- Abastecimiento de agua potable
 - Riego
 - Generación de energía eléctrica
 - Procesos Industriales
 - Acuicultura
- *Abastecimiento de agua potable*

Se trata del tipo de aprovechamiento hidráulico que busca satisfacer la demanda de agua para su consumo con fines de alimentación e higiene.

El proceso comienza por la captación del recurso hídrico, que es el proceso fundamental de donde se obtiene el agua directamente de la naturaleza. De este proceso dependerá la cantidad de agua aprovechable. La captación puede presentarse por medio de un almacenamiento producto de la precipitación y escurrimientos, o del aprovechamiento de caudales de paso. Si hay un almacenamiento, la cantidad de agua será mayor que si tan sólo se aprovecha

los escurrimientos de un río. Existen almacenamientos creados artificialmente por medio de presas, diques y perforación de pozos, o naturales como los lagos. A continuación se cuenta con una planta de potabilización la cual se encarga de darle las características físicas y químicas necesarias, de tal forma que su consumo y uso no resulte nocivo para la salud. Finalmente se presentan los sistemas asociados a la regulación, conducción y distribución del agua para los usuarios finales.

- *Riego*

Se trata del proceso artificial por medio del cual se aplica agua a tierras y suelos (Cooper, 2013) para que existan los nutrientes necesarios que lleven a la producción agrícola por medio de la implementación de distritos de riego.

Los distritos de riego, son proyectos de irrigación que incluyen diversas obras, tales como vasos de almacenamiento, derivaciones directas, plantas de bombeo, pozos, canales y caminos, entre otros (CONAGUA, Atlas Digital del Agua en México, 2012), por medio de esta infraestructura, se tiene aprovechamientos hidráulicos que proporcionan el agua necesaria para que el proceso artificial del que habla la definición de riego, se lleve a cabo.

La captación del agua para riego se hace por medio de presas y diques que permitan almacenar volúmenes de agua provenientes de los escurrimientos del río y las aportaciones de sus afluentes, así como las precipitaciones por cuenca propia, a continuación el agua es conducida a los diferentes distritos de riego por medio de derivaciones, canales y tuberías

- *Generación de energía eléctrica*

Los aprovechamientos hidráulicos enfocados hacia la generación de energía eléctrica también son llamados aprovechamientos hidroeléctricos. Su función es utilizar la energía potencial y cinética del agua, y transformarla en energía eléctrica que pueda ser suministrada al Sistema Eléctrico Nacional. La transformación de la energía cinética y potencial, a eléctrica, se da por medio de la construcción de la infraestructura adecuada, como lo es una cortina que almacena el agua para incrementar su energía potencial y disponer de ella cuando así se desee, conducciones que maximizan la energía cinética, y una obra de generación compuesta por turbinas que finalmente realizan la conversión. Adicional a estas obras, se construye infraestructura que de manera indirecta participa en la generación de energía, pero que tienen como objetivo que el funcionamiento del aprovechamiento sea el adecuado en lo que respecta al apropiado manejo y control del agua, como lo es la obra de excedencias, pozos de oscilación, canales de llamada, descargas de fondo, desarenadores, entre desarenadores, entre otros.

- *Procesos Industriales*

Existen sectores industriales, los cuales optan por realizar las gestiones pertinentes para extraer directamente de ríos, arroyos, lagos y acuíferos, el agua que utilizan para sus procesos productivos. La extracción y manejo del agua se lleva a cabo a través de un aprovechamiento hidráulico y su infraestructura

asociada. Dentro de este tipo de industrias, destaca la minería, eléctrica, suministro de gas, alimenticia, construcción y manufacturera.

En lo que respecta a la industria eléctrica, Es importante mencionar que la participación del agua en la generación de energía no se encuentra limitada a las plantas hidroeléctricas, el agua también participa activamente en procesos de control de temperatura para centrales de vapor duales, carboeléctricas, de ciclo combinado, de turbogas y de combustión interna (CONAGUA, Estadísticas del Agua en México, 2014), y en procesos como el de fracturación hidráulica para la obtención de gas no convencional

- *Acuicultura*

La acuicultura es el cultivo de organismos acuáticos tanto en zonas costeras como del interior que implica intervenciones en el proceso de cría para aumentar la producción. (FAO, 2016). De esta forma un aprovechamiento hidráulico enfocado a la acuicultura tiene como objetivo proporcionar las condiciones de almacenamiento necesarias para que exista el cultivo tecnificado y controlado de especies acuáticas para su posterior explotación económica.

- *Aprovechamiento de usos múltiples*

Un aprovechamiento hidráulico de usos múltiples, es aquel en el que la infraestructura permite la utilización del agua para diversos fines, por lo que un aprovechamiento de usos múltiples tendría la infraestructura necesaria para la generación de energía eléctrica y abastecimiento de agua o riego, además de que permitiría la realización de acuicultura. En el marco de eficiencia que plantea la construcción de un aprovechamiento hidráulico, el aprovechamiento de usos múltiples tiene la posibilidad de traer importantes beneficios económicos a diversos sectores, sin embargo, es común que las características de los proyectos y su forma de operar impiden que sea posible el aprovechamiento hidráulico en diferentes actividades económicas, de ahí que no sea posible hacer de todos los aprovechamientos hidráulicos puedas ser proyectados con la versatilidad para que operen de manera múltiple.

4.4.5 La Hidroelectricidad en México

La generación de energía hidroeléctrica en México ha experimentado un lento crecimiento en los 30 años, sobre todo si se compara con países como China y Brasil. Figura 4.23.

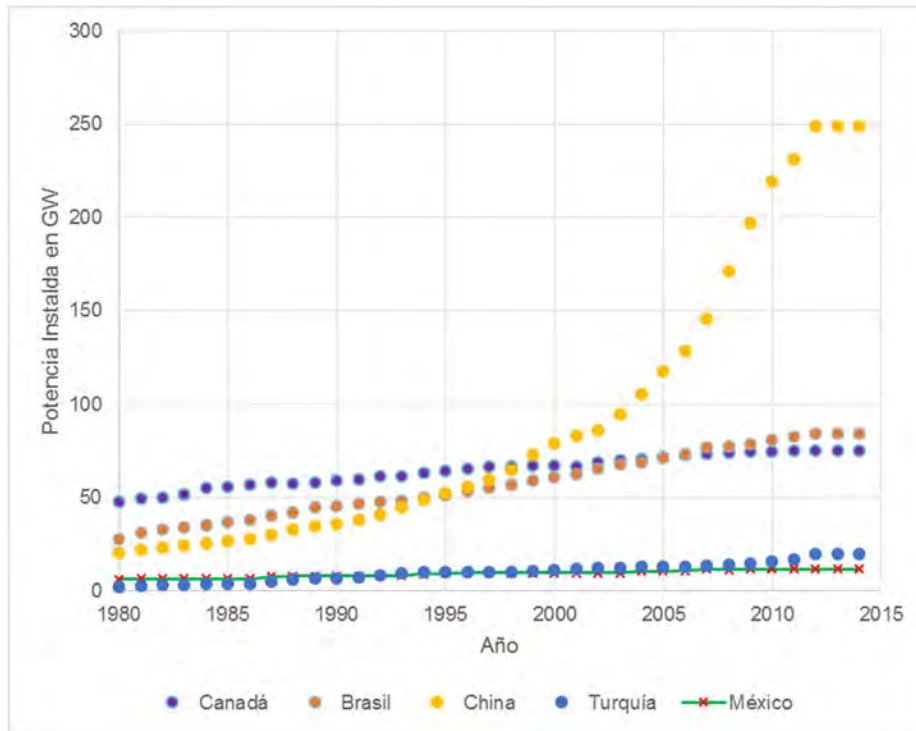


Figura 4.23 Potencia instalada en países 1980-2014

Actualmente, México se encuentra en el lugar No. 17 de capacidad instalada en el mundo. Tabla 4.14.

Tabla 4.14 Capacidad instalada para países

Ranking	País	Capacidad Instalada en GW	Ranking	País	Capacidad Instalada en GW
1	China	249,0	11	Suecia	16,3
2	Brasil	84,3	12	Venezuela	14,6
3	Estados Unidos	78,7	13	Italia	14,3
4	Canadá	75,4	14	Suiza	13,8
5	Rusia	47,3	15	España	13,3
6	India	42,8	16	Vietnam	12,5
7	Noruega	28,6	17	México	11,6
8	Japón	22,2	18	Colombia	9,8
9	Turquía	19,6	19	Irán	9,7
10	Francia	18,4	20	Argentina	9,1

(The Shift Project Data Portal, 2016)

Una de las razones por la cual se ha disminuido la construcción de centrales hidroeléctricas en México, se le atribuye a la cantidad de problemas sociales y ambientales derivados de grandes embalses los cuales se relacionan con afectaciones. Impulsar el desarrollo de proyectos hidroeléctricos al hilo de corriente representar una alternativa que permita el crecimiento de esta fuente de energía en el país.

La información sobre centrales hidroeléctricas al hilo de corriente en México es escasa. No se cuenta con un inventario en forma de este tipo de proyectos, y aquellos que se encuentran en operación deben ser pequeñas centrales. Con el fin de tener un dato preliminar sobre el estatus esta tecnología en el país, se acudió a inventario existente de presas en el Sistema de Seguridad de Presas de la SEMARNAT, con el apoyo de esta herramienta, se realizó una consulta sobre las centrales hidroeléctricas que obedecen a las condiciones de almacenamiento-altura de cortina que corresponden a un aprovechamiento al hilo de corriente, y cuyas características se citaron en la Sección 1.2.1 del presente capítulo.

La consulta mostrada arrojó el listado de la Tabla 4.15 en donde se encuentran las centrales hidroeléctricas operando en la república mexicana, con cortinas inferiores a 30 metros y un almacenamiento inferior a 61,67 hm³. De esta forma se obtuvo un número de 49 presas en la que coinciden con las características de una central hidroeléctrica al hilo de corriente. Se trata de un dato preliminar debido a que el inventario solo comprende aquellas presas de las cuales la SEMARNAT tiene conocimiento, además que de las 49 centrales enunciadas, es necesario conocer su política de operación con el fin de confirmar que éstas efectivamente funcionen bajo un esquema al hilo de corriente.

Tabla 4.15 Centrales hidroeléctricas ubicadas en México, con características de almacenamiento-altura correspondientes a aprovechamientos al hilo de corriente.

CLAVE	NOMBRE	ESTADO	Altura de cortina en m	Volumen al NAMO en hm ²
1	BOMBANÁ	CHIAPAS	5,5	0,1
2	DER. BUENAVISTA	CHIAPAS	9,50	0
3	DER. MADERO	CHIAPAS	5,72	0
4	PH JOSE CECILIO DEL VALLE	CHIAPAS	SIN DATOS	SIN DATOS
5	SCHPOINA	CHIAPAS	5	0,02
6	DER. JOSE CECILIO DEL VALLE	CHIAPAS	7,50	0,075
7	SITURIACHI	CHIHUAHUA	22	9
8	ING. ANDREW WEISS	CHIHUAHUA	20,75	23,67
9	DER. COLOTLIPA	GUERRERO	12	0,98
10	LA LAGUNA	HIDALGO	19	45,52
11	LA AURORA	JALISCO	22	1,54
12	DER. PUENTE GRANDE	JALISCO	-	1,5
13	DER. EL DURAZNO	MEXICO	6	0
14	IXTAPANTONGO	MEXICO	28	1,65
15	PORFIRIO DÍAZ	MEXICO	SIN DATOS	SIN DATOS
16	SAN SIMONITO	MEXICO	SIN DATOS	SIN DATOS
17	TLILAN	MEXICO	SIN DATOS	SIN DATOS
18	ZICTEPEC	MEXICO	SIN DATOS	SIN DATOS
19	ARISTEO MERCADO	MICHOACAN	9,2	19,1
20	EL CÓBANO	MICHOACAN	12	0,1
21	LOMA CALIENTE	MICHOACÁN	9	1,38
22	LOS TANQUES	MICHOACÁN	10	0,2
23	DER. TUXPAN	MICHOACÁN	25	1,2
24	UMÉCUARO	MICHOACÁN	9	0,8
25	CHAPULTEPEC	MORELOS	7	0,28
26	EL PUNTO	NAYARIT	4	0
27	DER C H TAMAZULAPAM	OAXACA	10	0
28	LOS REYES	HIDALGO	30	24,01
29	DER EL SALTO I	SAN LUIS POTOSI	13	0
30	EL SALTO II	SAN LUIS POTOSI	9,9	0,25
31	DER. LAS ÁNIMAS	VERACRUZ	4,25	0
32	DER SUMIDERO	VERACRUZ	8	0
33	CANSECO	VERACRUZ	7,2	163
34	REG. CHILAPAN	VERACRUZ	10	0,03
35	DER EL ENCANTO	VERACRUZ	27,25	0,233
36	LOMA PEDREGOSA	VERACRUZ	9,7	0,27
37	DER ZACAPOAXTLA 2	VERACRUZ	2	0
38	MINAS	VERACRUZ	10	0,016
39	DER EL SUSPIRO	VERACRUZ	1,5	0
40	DER. TEPETAPAN	VERACRUZ	9,95	0
41	EL JOYEL	ZACATECAS	6	4,5
42	VALENTIN GOMEZ FARIAS	JALISCO	14	1,64
43	DER. BORREGOS	VERACRUZ	3,4	0
44	DER. RIO PUERCO	VERACRUZ	13	0
45	DER. EL SAUCE	VERACRUZ	3,1	0
46	DER. TENEXPANOYA	VERACRUZ	3,5	0
47	DER. RIO FRÍO	VERACRUZ	7,5	0
48	DER. ZACAPOAXTLA I	VERACRUZ	2	0
49	DER. ECHEVERRIA	PUEBLA	14,5	0

Actualmente se tiene en construcción el proyecto hidroeléctrico Chicoasén II. Se trata de la primer central de gran tamaño ubicada en México, con una potencia

instalada de 240 MW la cuál operará al hilo de corriente.

4.4.6 Aspectos generales de la energía fotovoltaica

La tecnología fotovoltaica convierte directamente a energía luminosa procedente de los rayos solares, en electricidad, a través de celdas de material semiconductor que normalmente están formadas de silicio. Cuando inciden los rayos solares sobre las celdas origina el movimiento de los electrones a manera de un circuito, generando corriente eléctrica que fluye por convención, de positivo a negativo. La diferencia entre una celda, el módulo y un arreglo, se muestra en la Figura 4.24.

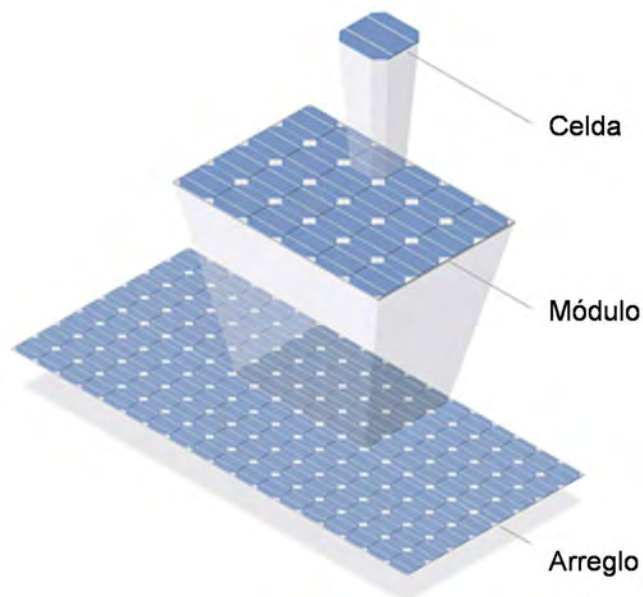


Figura 4.24 Celda, módulo y arreglo. Generación Fotovoltaica

La corriente que durante el día genera el módulo no es constante ya que depende directamente del nivel de radiación solar, por lo que en las mañanas y tardes la producción eléctrica es baja, llegando a su punto de mayor producción al medio día. Las horas solar pico (HSP) es una unidad que mide la irradiación solar, indicando el número de horas al día en las cuales existe una irradiancia de 1,000 watts en un área de un m².

La irradiación solar, y en consecuencia, la producción de energía a través sistemas fotovoltaicos, es intermitente y varía de la siguiente forma.

-
- *De manera horaria.* Figura 4.25.

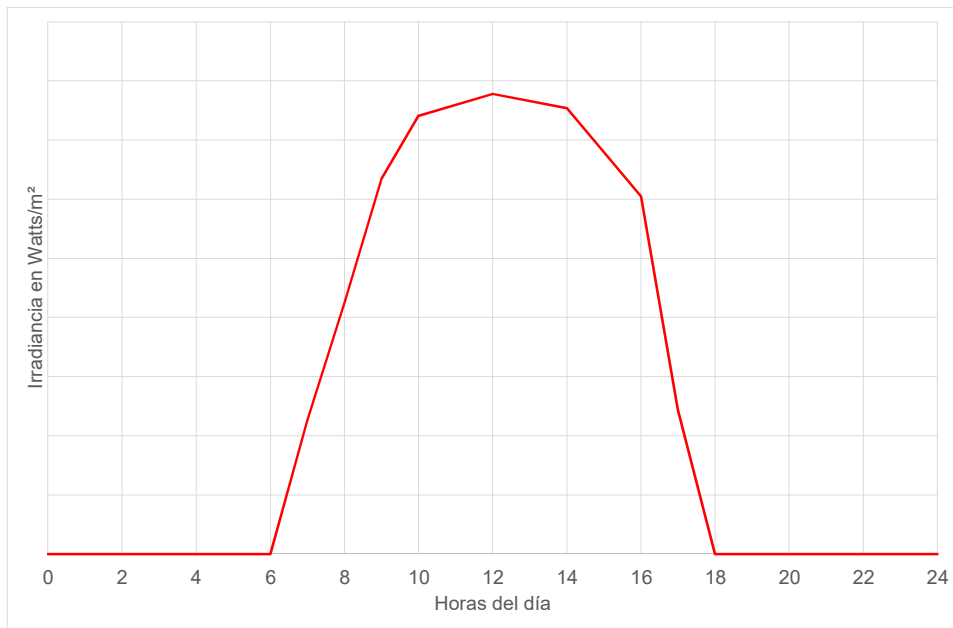


Figura 4.25 Variación horaria de la irradiancia para la generación fotovoltaica

- *Por ubicación geográfica* Figura 4.26.

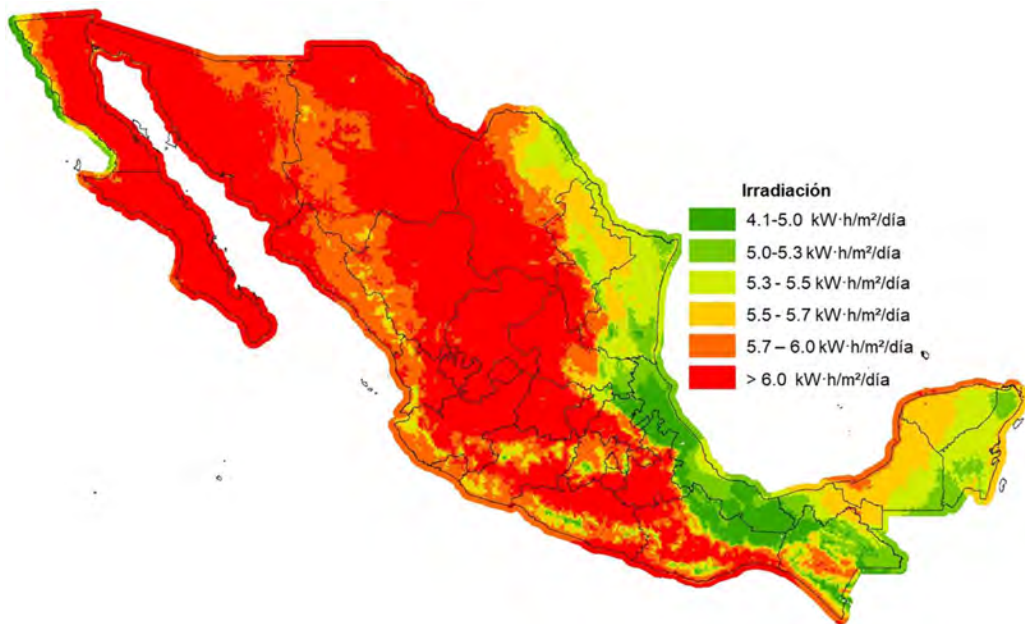


Figura 4.26 Variación geográfica de la irradiancia para la generación fotovoltaica

- *Temporada del año.* Figura 4.27 y Figura 4.28.

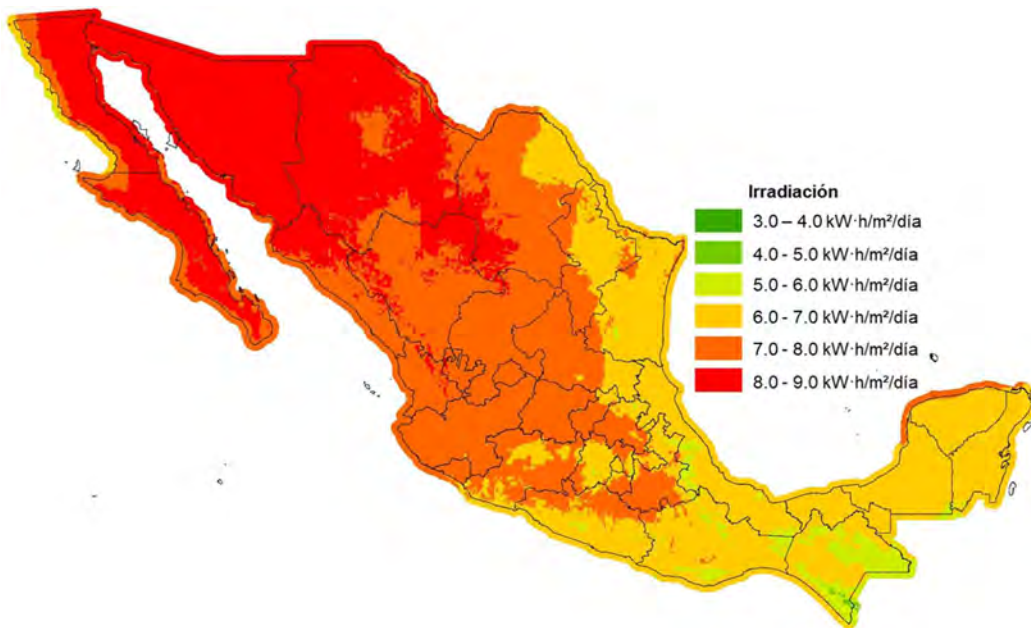


Figura 4.27 Irradiación para el mes de mayo



Figura 4.28 Irradiación para el mes de noviembre

Aspectos como la orientación e inclinación del sistema fotovoltaico es determinante para la producción eléctrica, y esta dependerá de la ubicación geográfica del sistema.

4.4.7 Aspectos generales de la energía eólica

La energía cinética contenida en el viento, es utilizada para hacer rotar un convertidor de energía electromecánica y de esta forma, generar energía eléctrica. De acuerdo a la *Ecn 1* los factores de influencia en la potencia suministrable son la densidad del aire, el área de barrido de la turbina y la velocidad del viento. En lo que respecta a la densidad, esta es menor a medida que la elevación es más alta. La densidad del aire puede ser considerada de 1.225 kg/m^3 . Al ser una densidad baja es necesario compensar este valor con grandes áreas de barrido, para así tener valores significativos de potencia.

Los primeros aerogeneradores, hace 25 años, presentaban capacidades cercanas a los 25 kW, actualmente la gama comercial va típicamente de 0.750 hasta 2.5 MW. La evolución en las dimensiones de las máquinas durante los últimos 20 años se ilustra en la Figura 4.29 (Manwell y colaboradores, 2002).

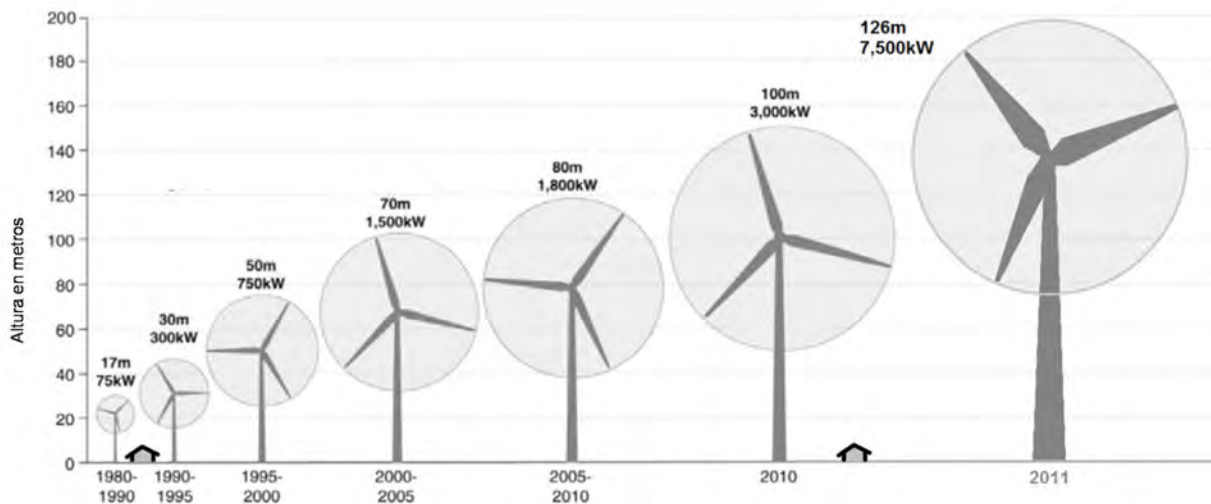


Figura 4.29 Evolución de los aerogeneradores

La ecuación fundamental que rige a los aerogeneradores, es la que se muestra en la *Ecn 1* indicada en la Sección 2.1.2. Como se aprecia, la velocidad es el factor que mayor influencia tiene sobre la potencia alcanzada y su generación debido a su exponente.

La velocidad del viento varía en función de los siguientes aspectos

- *Geográficamente*

Las velocidades alcanzadas son diferentes para determinadas regiones del país. En la Figura 4.30 se observa la distribución de velocidades del viento, para una altura sobre la superficie de 120 m. El mapa fue construido con información de la empresa Vestas.

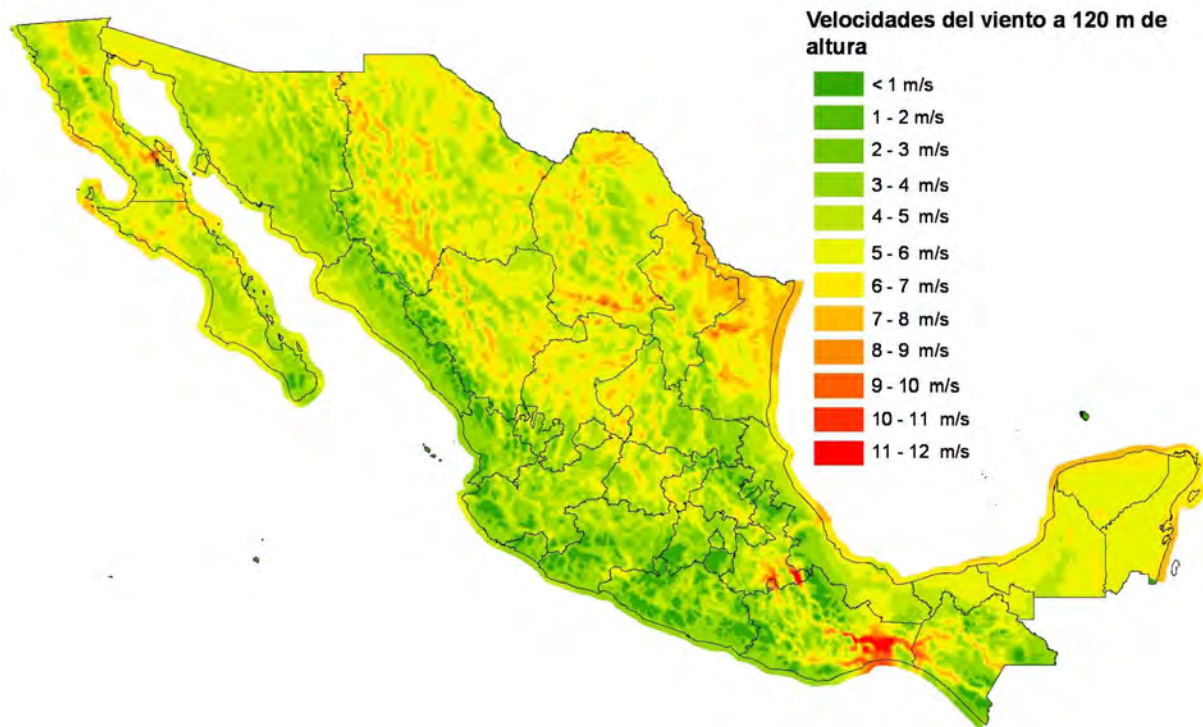


Figura 4.30 Variación geográfica de la velocidad del viento.

- *De manera horaria*

Es común que existan velocidades más altas en el día que durante la noche, debido a la diferencia de las temperaturas existentes entre el mar y la superficie de la tierra. En la Figura 4.31 se muestra el comportamiento horario de la velocidad media el viento para determinado sitio

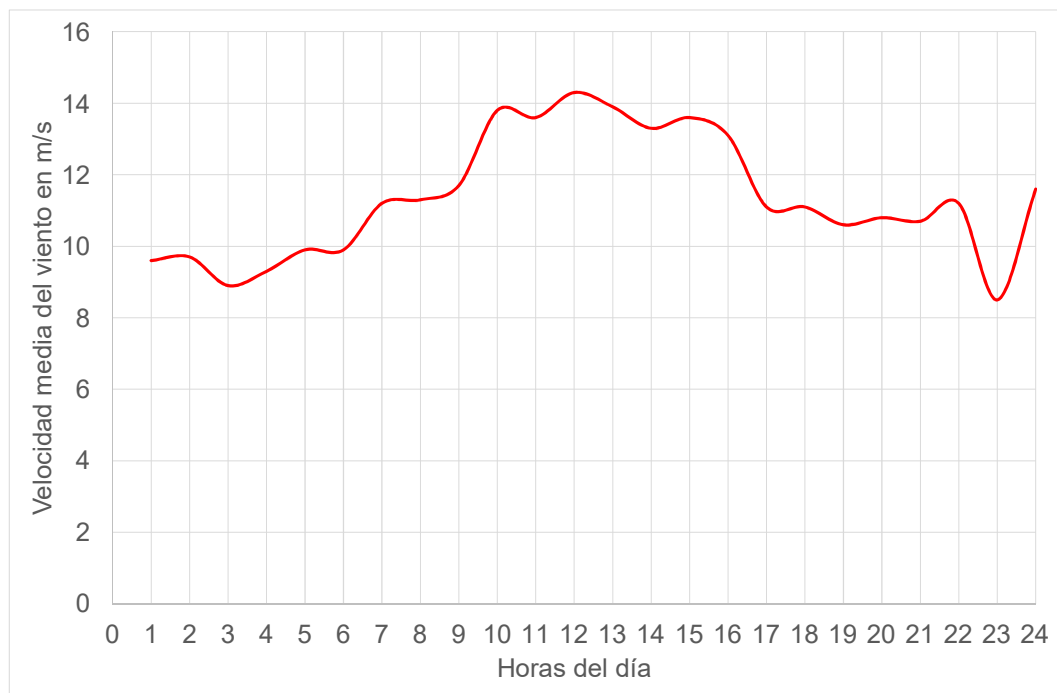


Figura 4.31 Variación horaria de la velocidad del viento.

- *De manera estacional*

Se atribuye a la diferencia en la luz solar que llega a la tierra, debido a la inclinación de la tierra durante los meses como se observa en la Figura 4.32, en donde se ilustran las velocidades medias registradas por tres estaciones climatológicas ubicadas en Chiapas.

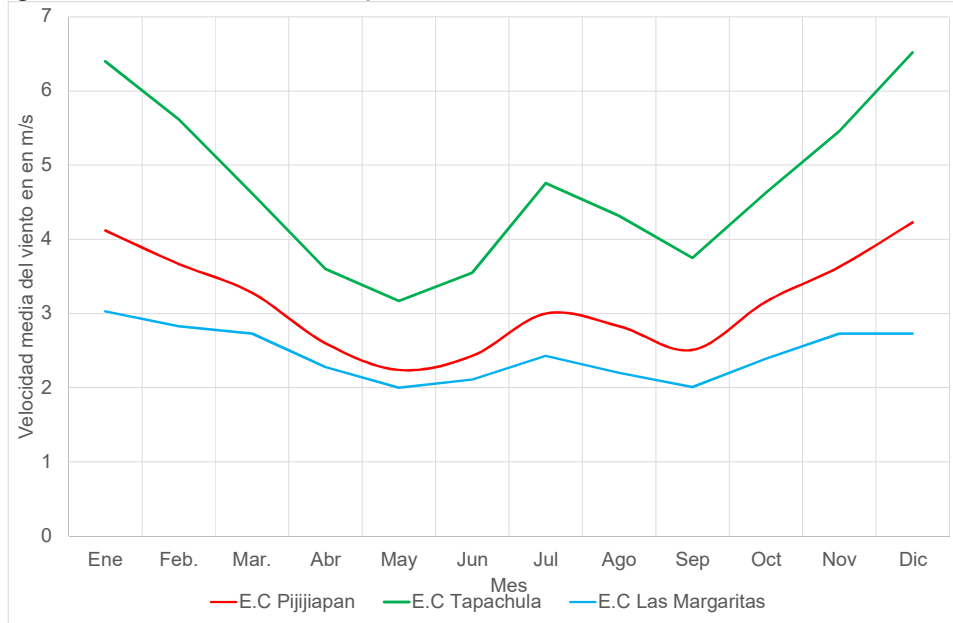


Figura 4.32 Variación estacional de la velocidad del viento.

- *A diferentes alturas de la superficie.*

La rugosidad del terreno influye en el incremento de la velocidad en función de la altura y en su dirección. El factor de rugosidad es un parámetro que describe la facilidad con la cual circula el viento sobre el terreno. La presencia de vegetación densa como cultivos, selva y arbustos provocan un decremento en la velocidad alcanzada. Teóricamente, la velocidad del viento sobre la superficie de la tierra es cero. Se dice que la rugosidad del terreno tiene una gran influencia sobre la velocidad del viento, para distancias inferiores a 100 metros.

Para cualquier proyecto de desarrollo eólico se necesita de la evaluación del recurso disponible. Para hacer esta tarea se emplean anemómetros y veletas, para registrar la rapidez y dirección del viento, respectivamente.

5. ANÁLISIS FODA

El presente capítulo tiene como objetivo realizar el análisis de las Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas.

El área geográfica seleccionada para la realización del análisis FODA fue el estado de Chiapas, debido a que se observa en el análisis PEST que es el

- Tercer estado con mayor carencia de energía eléctrica
- Primer lugar en lo que respecta a la cantidad de agua renovable que posee
- Pertenece a la región oriental, la cual aporta a través de centrales como Angostura, Chicoasén, Malpaso y Peñitas, gran parte de la energía consumida en el país.

Los factores anteriormente descritos, hacen de Chiapas un estado ideal para estudiar las posibilidades que tienen los aprovechamientos hidráulicos con fines de generación hidrocínética en ríos.

5.1 FORTALEZAS

5.1.1 Generación de energía eléctrica sin embalse

Gran parte de los problemas que enfrentan los aprovechamientos hidroeléctricos para llevarlos a su realidad, se caracterizan por ser de índole social debido a la existencia de embalses, los cuales ocupan tierras, además que impactan visualmente en el medio, e involucran a opositores. La posibilidad de generar energía eléctrica a través del movimiento del agua permite que aspectos se minimicen.

De acuerdo a la información observada en la Sección 4.3.4, los proyectos energéticos son de alta sensibilidad social y de no ser gestionados adecuadamente pueden ser detenidos por frentes opositores.

El desarrollo de un aprovechamiento hidroeléctrico que utilice el movimiento del agua para la generación de energía sin un embalse representa una de las más grandes fortalezas de esta tecnología.

5.1.2 Manejo y transporte accesible

En la Figura 5.1 se observan los diámetros de las máquinas identificadas en su etapa comercial

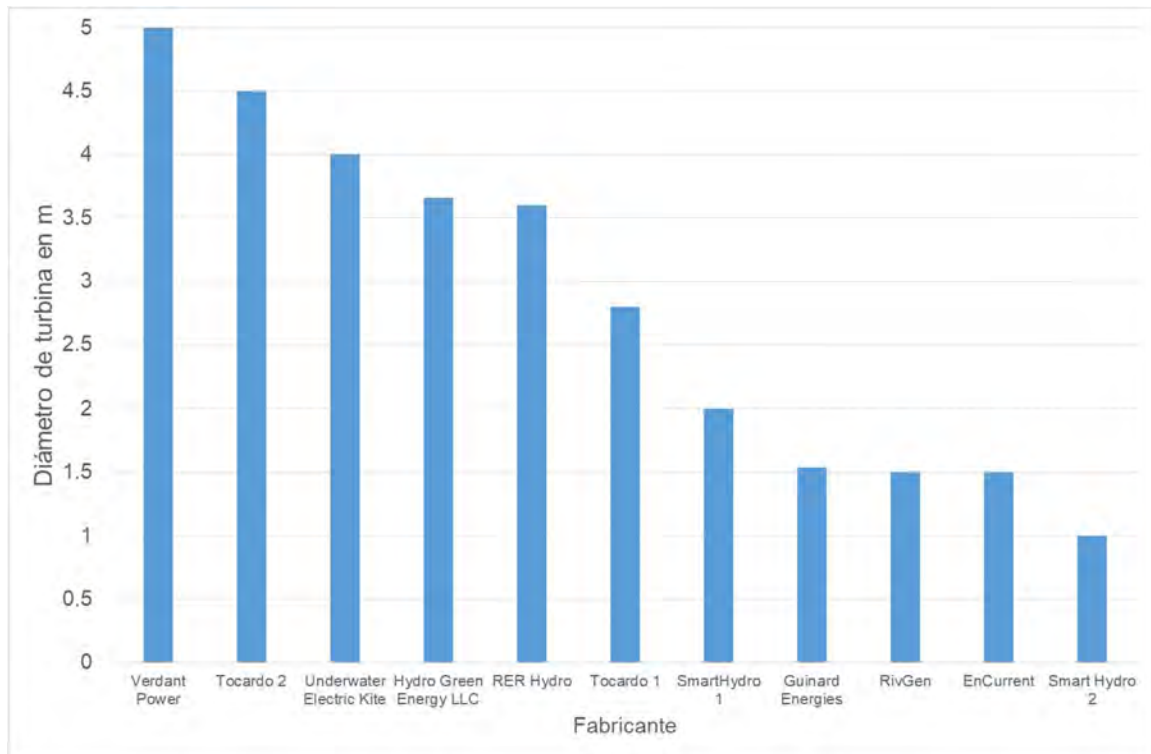


Figura 5.1 Diámetros de máquinas por fabricante

Se observa de la Figura 5.1, que las dimensiones de la turbinas hidrocínéticas en fase comercial, oscilan entre 1 y 5 metros. Esto las hace susceptibles a ser transportadas hacia lugares de difícil acceso, y en donde no existen caminos previos, además de que en algunos casos es posible instalarlas por medio de mano de obra y recursos locales, como se muestra en la Figura 5.2 y Figura 5.3.



Figura 5.2 Transporte de máquina al sitio



Figura 5.3 Instalación con el apoyo de lugareños

5.1.3 Generación de energía eléctrica renovable y limpia

la Tabla 5.1 integra los elementos enunciados por la legislación mexicana, para considerar a un tipo de energía, energía renovable.

Tabla 5.1 Postura de la legislación actual sobre la energía renovable

Condición	Situación de los aprovechamientos hidrocinéticos	Cumplimiento de condición
<ul style="list-style-type: none"> El movimiento del agua en cauces naturales o en aquellos artificiales con embalses ya existentes 	Funcionan a través del movimiento del agua en cauces naturales, como los ríos y artificiales, como canales de riego	✓
<ul style="list-style-type: none"> Sistemas de generación de capacidad menor o igual a 30 MW 	Las capacidades de acuerdo a lo observado en la Sección 5.3.1 individualmente no superan los 350 KW de potencia instalada. Sistemas en arreglo no se encuentran actualmente comercializados.	✓
Densidad de potencia = $\frac{\text{Potencia instalada en Watts}}{\text{*Superficie cubierta por el embalse en m}^2} \geq 10 \frac{\text{watts}}{\text{m}^2}$	La relación no es aplicable, pues no es necesaria la existencia de un embalse	✓

De acuerdo a la Tabla 5.1 se concluye que los aprovechamientos hidráulicos con fines de generación de energía hidrocinética en ríos es una fuente de energía renovable y limpia, puesto que la ley La Ley de la Industria Eléctrica, indica que la energía hidroeléctrica, es considerada energía limpia.

5.1.4 Inversión menor en obra civil

La obra civil requerida por los aprovechamientos hidráulicos con fines de generación de energía hidrocinética en ríos es mínima, y se encuentra asociada casi en su totalidad por el sistema de anclaje, y la infraestructura necesaria para alojar los elementos de control.

- Sistema de anclaje

Como se observa en la Sección 2.2.4, la mayor cantidad de obra civil se puede apreciaren aquellos anclajes fijos, los cuales involucran trabajo de perforación, así como en aquellos anclajes de peso muerto, que involucran la construcción de estructuras masivas a las cuales se ata la turbina

- Infraestructura necesaria para los elementos del control de la energía

Dependiendo del tipo de dispositivo, su ubicación y entorno, es necesario disponer de un sitio cercano a la extracción de energía, para la regulación del voltaje y la inversión de la corriente de corriente directa a alterna, así como la ubicación de los elementos eléctricos y de seguridad del aprovechamiento

hidráulico. Debido a las bajas potencias instaladas que se manejen para este tipo de tecnología, estas casas de operación y de control suelen ser pequeñas, lo que no representa un costo mayor en obra civil.

De acuerdo a lo estudiado en la Sección 4.2.2, el equipo electromecánico en una central hidroeléctrica convencional es un menor porcentaje del costo total del proyecto del que representa la obra civil, situación que es completamente diferente para los aprovechamientos hidráulicos con fines de generación de energía hidrocinética en ríos, en donde la turbina representa casi la totalidad del costo del aprovechamiento.

5.1.5 Mayor certidumbre en la energía generada, que fuentes como la solar y eólica

La energía es tan predecible como las centrales al hilo de corriente, esto significa que la generación de energía se dará obedeciendo al comportamiento natural del río, que se relaciona con su estacionalidad.

Entre zonas geográficas existe cierta variación entre las épocas de estiaje y avenidas, predominando en el estado de Chiapas, los meses de diciembre, enero, febrero, marzo, abril y mayo como meses de estiaje, y junio, julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre como meses de avenidas. Se clasifica como energía predecible, debido a que, a diferencia de otras tecnologías en las que las condiciones climáticas diarias pueden variar e influir en la generación, como lo es la dirección y velocidad del viento, y la radiación solar, el caso de los ríos, las épocas de estiaje y avenida están normalmente bien definidas a nivel cuenca, como se observa en la Figura 5.4, Figura 5.5, Figura 5.6 y Figura 5.7, en donde se muestran cuatro estaciones hidrométricas con sus gastos medios mensuales, y sus épocas de estiaje y avenidas.

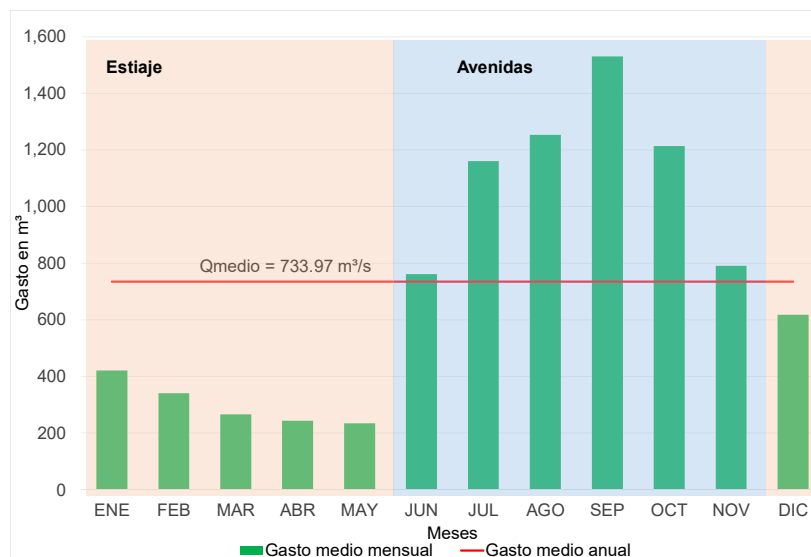


Figura 5.4 Gasto medio mensual, subcuenca río Lacantún

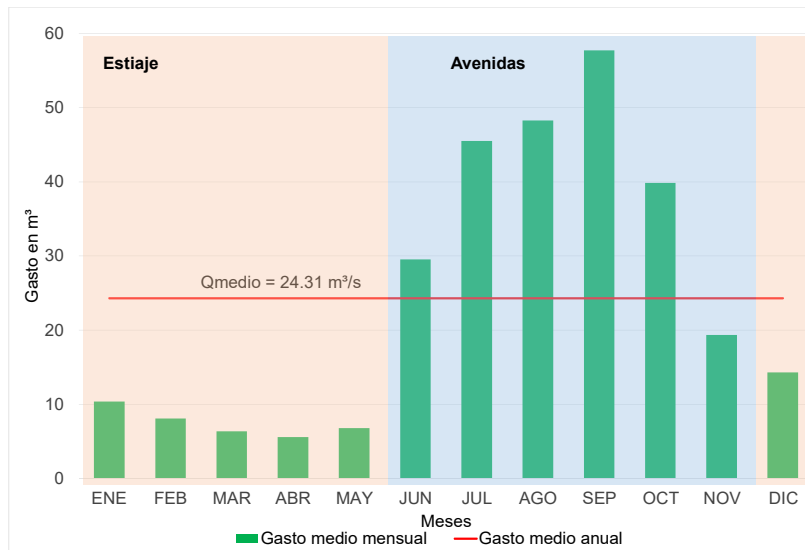


Figura 5.5 Gasto medio mensual, subcuenca río Euseba

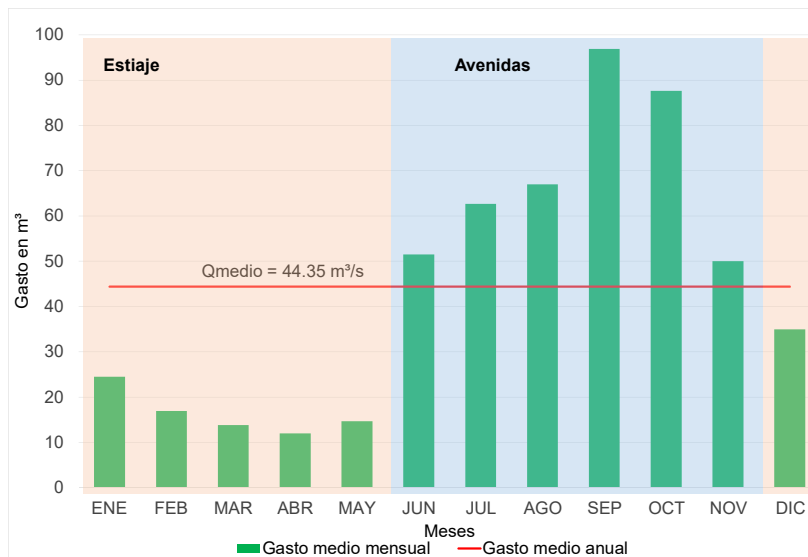


Figura 5.6 Gasto medio mensual, subcuenca río Seco

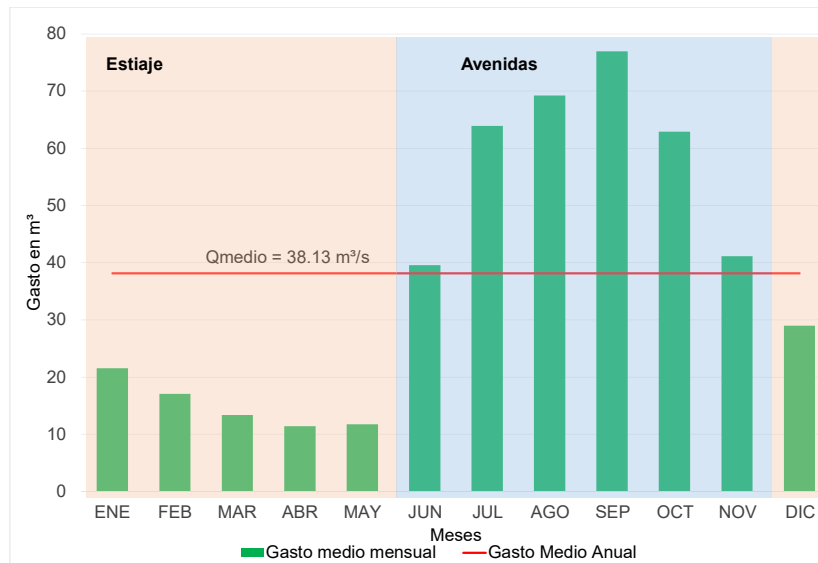


Figura 5.7 Gasto medio mensual, subcuenca río Tzaconeja

Aun cuando pueden existir variaciones de gastos a nivel horario y diario, estas variaciones pueden ser caracterizadas y evaluadas por medio de la adecuada elaboración de un estudio hidrológico. Esto lleva a la conclusión de que la predictibilidad de la energía generada por medio de un aprovechamiento hidráulico con fines de generación de energía hidrocínética en ríos, será más precisa a medida que se tenga un mejor conocimiento de los tirantes y sus velocidades asociadas.

5.1.6 Mayor energía que una turbina eólica de dimensiones similares

Los aprovechamientos hidrocínicos funcionan por medio del movimiento del agua, como se observa en la Ecn1. La densidad del agua, para este caso, es de $1,000 \text{ kg/m}^3$. Considerando que la densidad del viento es 1.223 kg/m^3 , se tiene entonces que el agua es aproximadamente 817 veces más densa que el viento. Esto implica que para una superficie de barrido de igual dimensión accionada por el movimiento del agua, puede extraer una mayor cantidad de energía que por el movimiento del viento, Esta comparación se muestra en la Figura 5.8 y Figura 5.9.

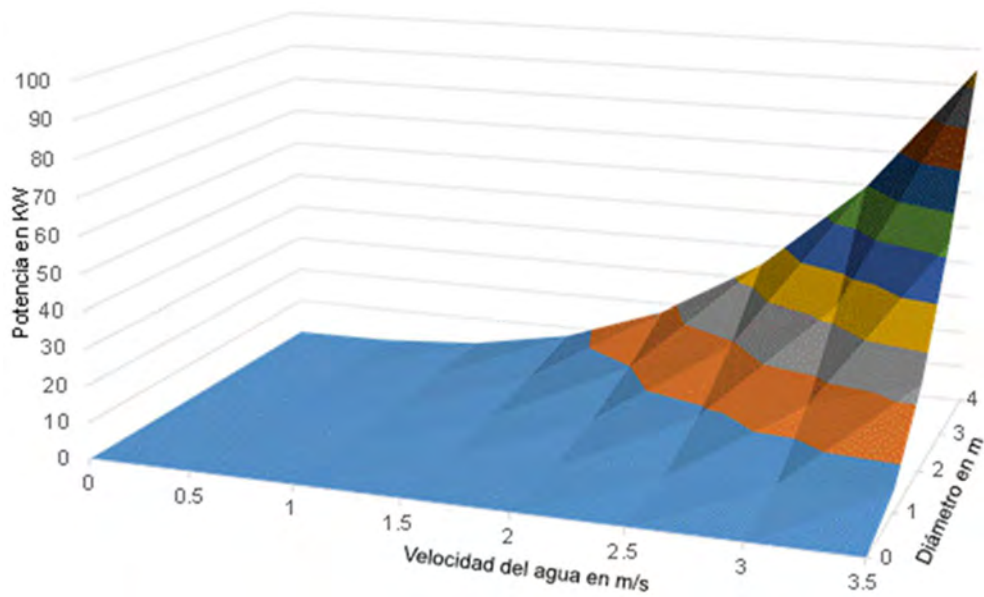


Figura 5.8 Potencia en función de la velocidad de agua y diámetro. Turbina hidrocínética

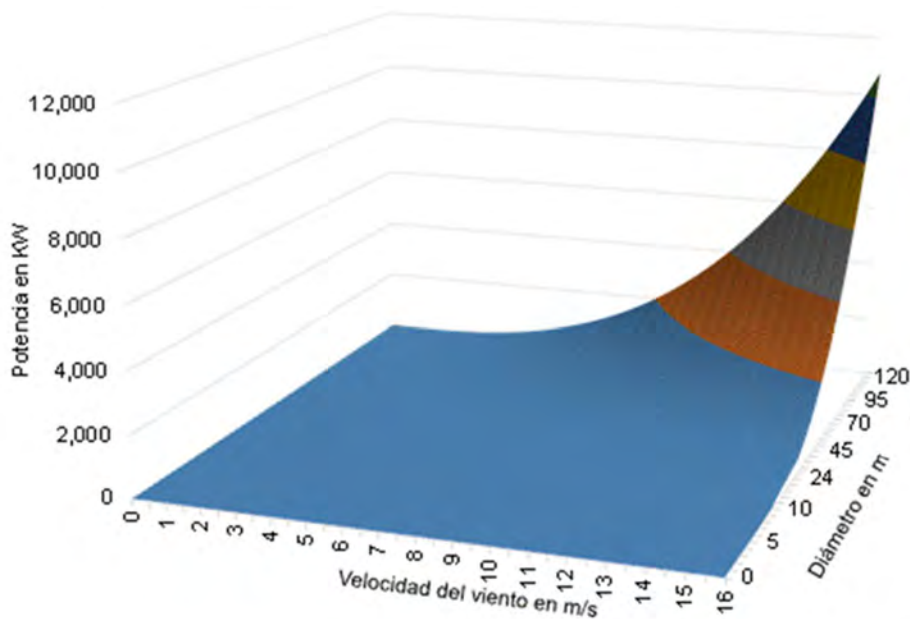


Figura 5.9 Potencia en función de la velocidad del viento y diámetro. Turbina eólica

De la Figura 5.8 y Figura 5.9 se observa que, debido a la densidad del fluido por medio de la cual funciona la tecnología, las turbinas hidrocínéticas desarrollan una potencia superior que una turbina eólica para una misma dimensión. Es importante recalcar que en la práctica, las turbinas eólicas pueden funcionar sin depender de un tirante, y para velocidades más altas que las que se desarrollan en el agua. Esta es una de las razones por las cuales la tecnología eólica se encuentra por mucho más desarrollada que la hidrocínética.

5.1.7 Precios competitivos en sistemas no conectados a la red, que sustituyan generadores diésel

En la Figura 5.10 se muestran los rangos existentes en los costos nivelados de la energía que actualmente se han estimado en aprovechamientos hidrocínéticos, recopilados por diferentes autores, tanto para las turbinas hidrocínéticas como para los generadores que funcionan a base de diésel, y los cuales son comúnmente utilizados para abastecer de energía eléctrica a comunidades no conectados a la red.

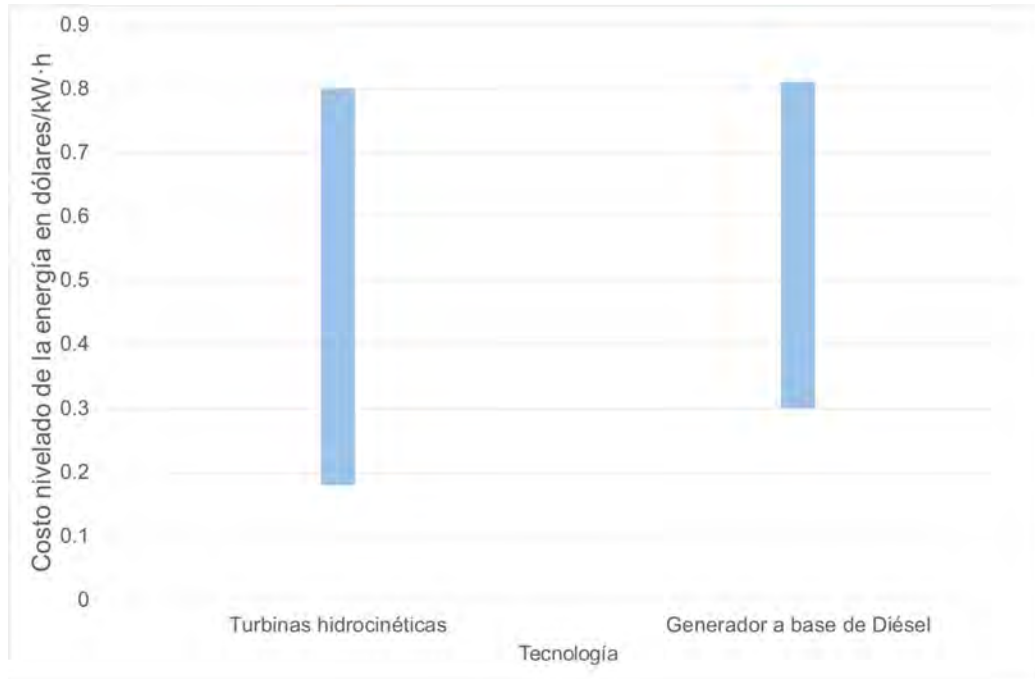


Figura 5.10 Rango de costos nivelados de la energía. Turbina hidrocínética vs generador a base de Diésel

Se observa como una fortaleza de la tecnología, que los costos nivelados de la energía son competitivos ante los generadores a base de diesel. Esto convierte a la tecnología en una opción, para abastecer a comunidades no interconectadas a la red

5.1.8 Menor impacto ambiental que centrales hidroeléctricas convencionales

Al tratarse de una tecnología la cual no necesita de carga para operar por lo que las afectaciones por concepto de la existencia de un embalse son nulas. La influencia más grande que ejerce la tecnología sobre el medio ambiente, se debe a la interacción que tiene con la fauna marina. *Shen y Zydlewski* utilizaron datos empíricos de fuentes hidroacústicas estacionarias y móviles para evaluar la probabilidad de que, en ambientes marinos, determinado número de peces se encuentren a la altura de una turbina hidrocínética y en consecuencia sufran un impacto. De acuerdo a la investigación, la probabilidad de que un pez se encuentre con la turbina utilizada para el ejercicio fue de 43.2%. Por otro lado, la probabilidad de que el pez pueda colisionar con los álabes de la turbina es del

6%. (Shen & Zydlewski, 2015). El estudio por medio de las mediciones hidroacústicas indicó que los peces tienden a percibir la presencia de la máquina, desviando su curso lateralmente con el fin de no colisionar con la turbina y sus elementos. El Departamento de Energía Departamento de Energía de los Estados Unidos, demostró que los peces evitan transitar por el área de barrido de la turbina, toda vez que la ruta por la que ellos atraviesan no sea obstaculizada por la máquina. El estudio demuestra, como era de esperarse, que las posibilidades de que los peces sobrevivan a la operación de la máquina será menor a medida que el tamaño del pez sea mayor, además que la fauna marina sufre una mayor cantidad de daño con la tecnología hidroeléctrica convencional, en relación a la que sufre por la operación de turbinas hidrocinéticas. Las múltiples pruebas demostraron que las posibilidades de sobrevivir excedieron el 98% de las muestras empleadas. (Jacobson, Amaral, Casto-Santos, & Glza, 2012).

Los argumentos anteriormente presentados de ninguna manera significan que el impacto ambiental sea nulo, pero es un claro indicador de que los aprovechamientos hidráulicos con fines de generación de energía hidrocinética en ríos no representan una amenaza para las especies, siempre que exista el área hidráulica suficiente y necesaria para el libre tránsito de las especies.

5.1.9 No requiere de infraestructura adicional para su funcionamiento

No requiere estructuras adicionales para su operación que encarezca el proyecto como una cortina, un vertedor, canal de llamada, pozos de oscilación tanto aguas arriba como aguas abajo del aprovechamiento, galería de conducción, conducciones que impliquen un encamisado o elementos dentro de la máquina como un distribuidor, inyector o válvulas. Las potenciales instalables, las cuales comercialmente son bajas, no requieren de una subestación eléctrica.

5.2 OPORTUNIDADES

Se describen a continuación, aquellos aspectos ajenos a la tecnología, que la tecnología puede aprovechar a su favor.

5.2.1 La competencia dentro del mercado en México es inexistente

En la actualidad, la posibilidad de llevar a la realidad un aprovechamiento hidrocinético no ha sido ampliamente explorada por el sector público y privado. Los estudios relacionados con la energía cinética contenida en el agua, han sido dirigidos hacia las tecnologías que aprovechan las corrientes marinas y mareas, esto en su mayoría, gracias a la creación del Centro Mexicano de Innovación en Energías del Océano (CEMIE-Océano).

De llevar a la realidad un aprovechamiento hidrocinético en ríos, sería el primero en su tipo en México.

5.2.2 Chiapas como el tercer estado con mayor carencia de energía, mayor agua renovable del país, mayor generación hidroeléctrica

De acuerdo a información del Atlas del Agua 2015, Chiapas el estado con una mayor cantidad de agua renovable del país, y es en cambio, de acuerdo a información del Censo 2010 el tercer estado con una mayor carencia de energía eléctrica. Esta situación se observa en la como se observa en la Figura 5.11.

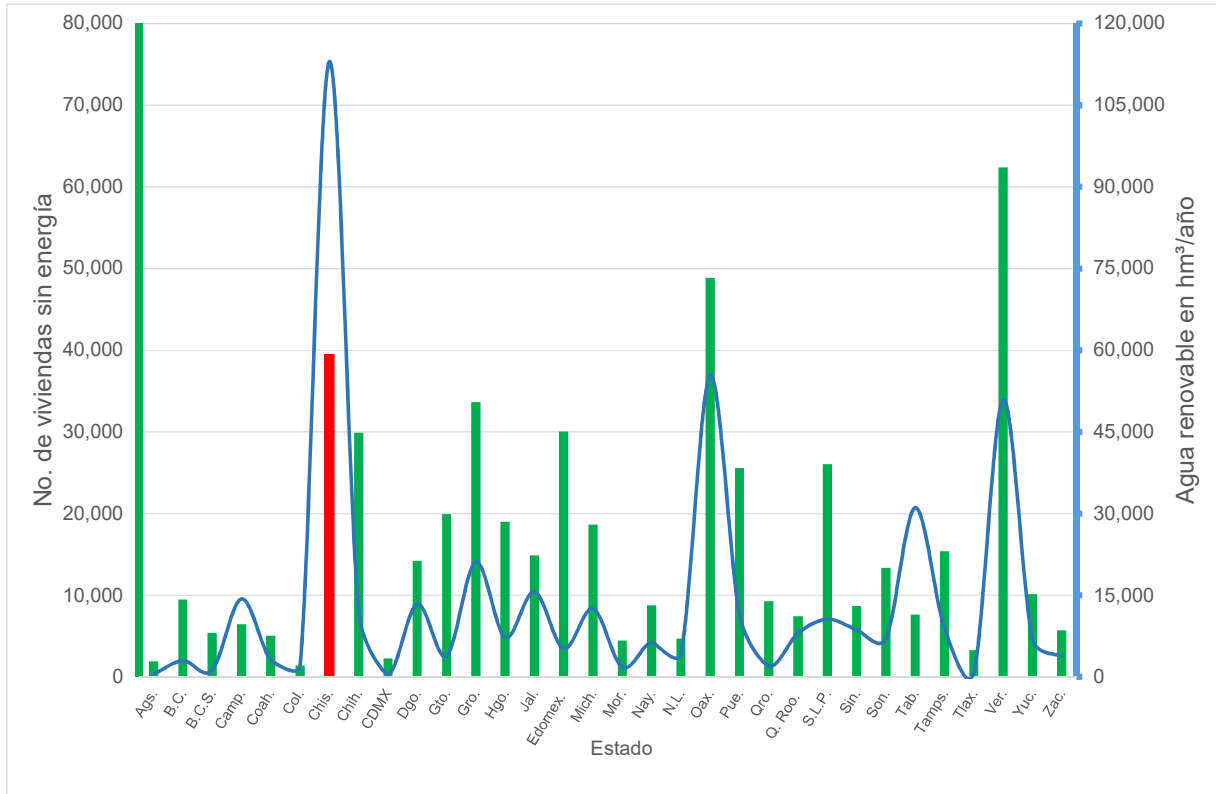


Figura 5.11 Cantidad de agua renovable y carencia de energía por entidad federativa.

Con el fin de conocer aquellas zonas con la mayor carencia de energía eléctrica, se construyó un Sistema de Información Geográfica (SIG) a nivel municipal y Área Geoestadística Básica (AGEB) a través del cual, fue posible identificar aquellas zonas con una mayor carencia de energía. Se construyó la información hidrográfica, presentando los ríos de mayor importancia del estado. El resultado de la interacción de la información relacionada con los ríos de mayor importancia y las zonas con mayor carencia de energía se aprecia en las Figura 5.12 y Figura 5.13.

La representación del territorio de Chiapas que indica el número de viviendas a nivel municipal, cuenta con el inconveniente de no indicar de manera particular las zonas en las que se tiene una mayor cantidad de viviendas sin energía, que posteriormente permitan ser realizadas con ríos cercanos, por lo tanto, se buscó sectorizar el estado a nivel Área Geoestadística Básica (AGEB) rural y urbano, y posteriormente cuantificar el número de viviendas que no cuentan con energía

eléctrica, y posterior mente representar la información a un mapa temático. El resultado del geoproceso se observa en la siguiente figura.

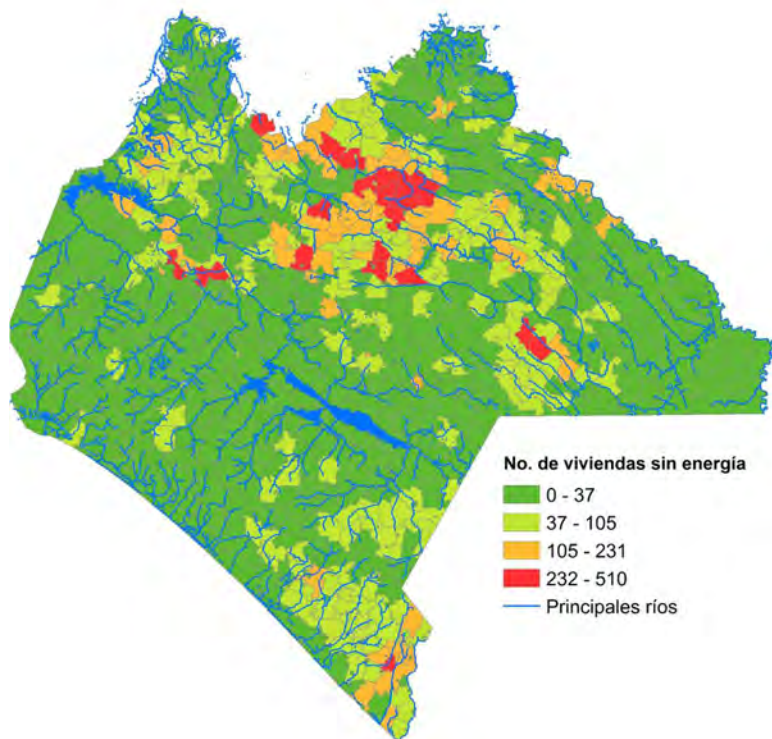


Figura 5.12 Carencia de energía por Área Geoestadística Básica. Estado de Chiapas

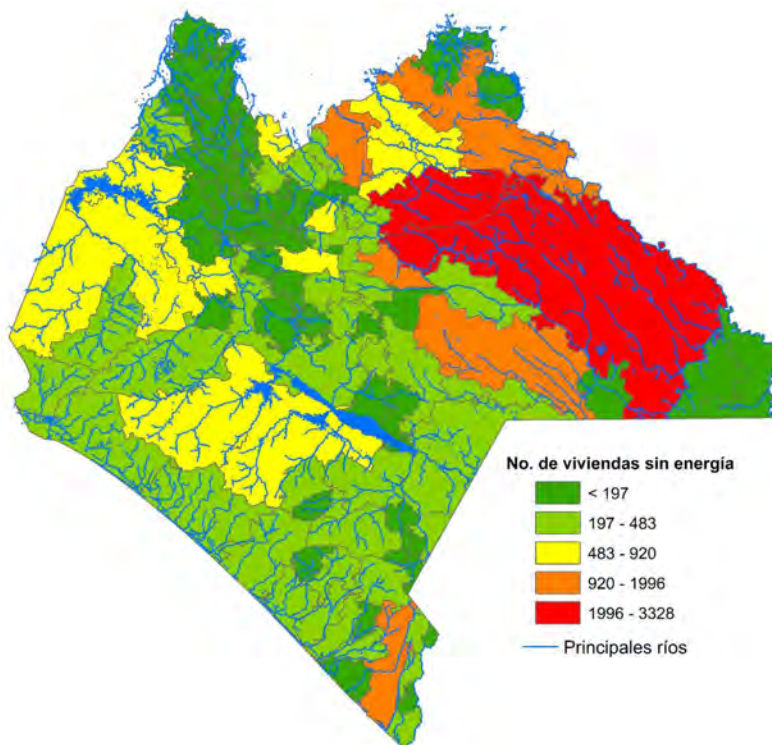


Figura 5.13 Carencia de energía por municipio. Estado de Chiapas.

Del análisis de las Figura 5.12 y Figura 5.13 se identifica como una oportunidad el hecho de que existen zonas con una gran carencia de energía, y a su vez cuentan con ríos de gran caudal, lo que las convierten en sitios idóneos para el desarrollo de aprovechamientos hidráulicos con fines de generación hidrocínética en ríos.

Esto convierte a Chiapas como un estado de amplias posibilidades para el desarrollo de aprovechamientos hidráulicos con fines de generación de energía hidrocínética en ríos.

5.2.3 Legislación favorable para las energías renovables y limpias

El marco jurídico para el impulso de la energía limpia y renovable es amplio y sólido, mismo que establece metas de energías limpias y los escenarios propuestos para su cumplimiento.

- La Ley de la Industria eléctrica la considera una fuente energía renovable y limpia.
- La Reforma Energética tiene como intención la atracción de inversión energética al país, simplificar trámites de interconexión e incentiva las inversiones en energías limpias. De esta forma los aprovechamientos hidrocínicos podrían incursionar en el Mercado Eléctrico Mayorista como un Generador Exento debido rango de potencias instalables de la tecnología, los cuales son bajos e inferiores a 0.5 MW, y posteriormente vender la energía generada a un usuario Calificado o bien, en la modalidad de Abasto Aislado., y la venta de Certificados de Energías Limpias.
- Sus características la hacen una tecnología que eventualmente podría participar en el financiamiento del Fondo del Servicio Universal Eléctrico, para la electrificación de comunidades rurales, para lo que se necesita, sin embargo, una mayor madurez y certidumbre de la tecnología.
- Su funcionamiento e implementación se alinea a la Ley de Transición Energética y sus instrumentos.
- La actual legislación promueve la existencia de mecanismos institucionales, de Investigación y Desarrollo, de Información, de Mercado y Regulatorios y Económicos para el impulso de las energías limpias.

5.2.4 Legislación ambiental y de cambio climático favorable para su desarrollo.

El estudio de la Ley General de Equilibrio Ecológico y su Reglamento, indican que de acuerdo a la clasificación y las características de la tecnología, así como su potencia instalable, no se requeriría una Manifestación de Impacto Ambiental en alguna de sus modalidades, debido a las características de la tecnología hidrocínética siempre que:

- No contempla obra civil en el río
- No requiera la construcción de un canal
- No requiere la construcción de presas de almacenamiento

-
- No se encuentren en áreas naturales protegidas, a menos que se lleven a cabo por las comunidades asentadas en el área y su realización sea con fines como el autoabastecimiento.

Esto conduce a la conclusión de que no requiere obtener los mismos permisos ambientales de una central hidroeléctrica convencional de acuerdo a la actual legislación

Adicional a esto, a ley general de Cambio Climático parece establecer un panorama propicio promover de manera gradual la sustitución del uso y consumo de los combustibles fósiles por fuentes renovables, además de que indica que es necesario considerar, no solo los beneficios derivados de la venta de la energía, sino también los beneficios asociados a externalidades sociales y ambientales. Impulsa, el desarrollo de programas que promuevan patrones de producción de energía sustentable a través de incentivos económicos; fundamentalmente en áreas como la generación, además que indica, la necesidad de un sistema de incentivos que promueva y haga rentable la generación de energía de fuentes renovables como la eólica, solar y minihidráulica.

5.2.5 Mejorar la calidad de vida de poblaciones a través de un aprovechamiento hidrocínético

Como se indicó en la Sección 4.3.3, el acceso a la energía trae consigo implicaciones en aspectos como la educación, salud, ingresos, marginación y pobreza. Con el objetivo de ejemplificar el efecto que tiene el acceso a la energía eléctrica, en relación a variables como el Índice de Marginación, Índice de Desarrollo Humano, Índice de Educación, Índice de Ingresos e Índice de Salud, se graficaron estas variables en torno al porcentaje de viviendas sin energía para cada uno de los 118 municipios de Chiapas.

En lo que respecta al índice de marginación, se observa que el municipio con una menor cantidad de viviendas sin energía eléctrica (Tuxtla Gutiérrez), es también, el municipio con un menor grado de marginación, situación que obedece a una tendencia hasta llegar a los municipios de Chalchiuitán y Sitalá los cuales, al ser los que tienen un mayor porcentaje de viviendas sin energía eléctrica, resultan ser también los municipios con un mayor grado de marginación.

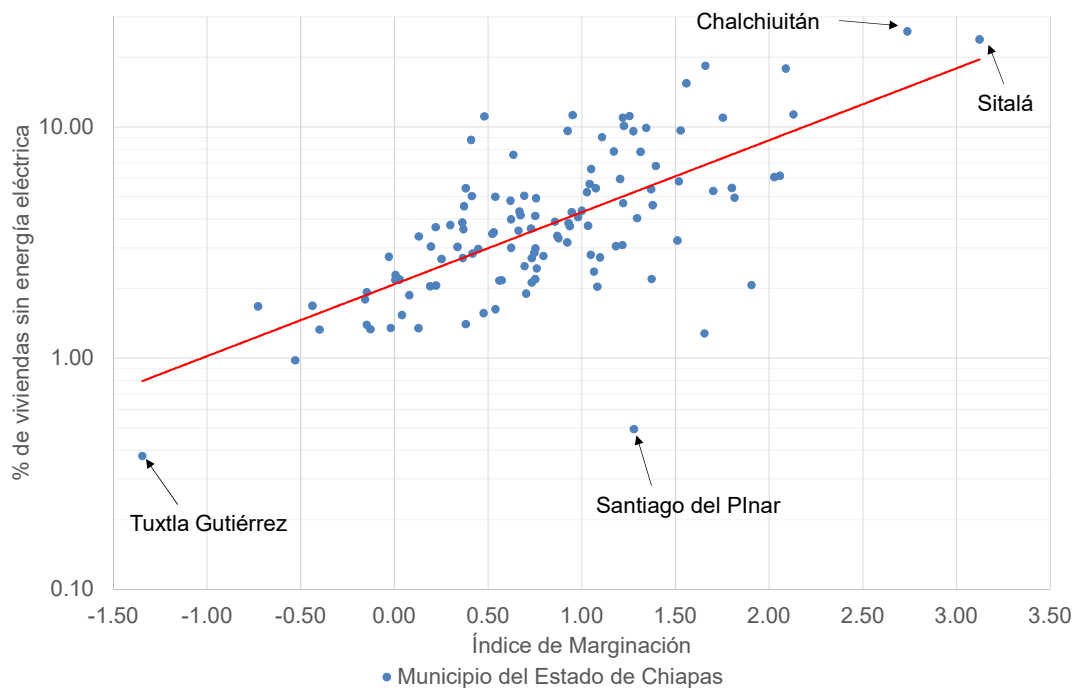


Figura 5.14 Índice de marginación vs Carencia de energía. Estado de Chiapas.

Se observan datos atípicos como lo es el municipio de Santiago del Pinar, en donde, a pesar de tener un porcentaje de viviendas sin energía eléctrica bajo, el índice de marginación es relativamente alto. Esto se debe a que, aun cuando la energía eléctrica influye en disminuir la marginación, existen otros aspectos cuya influencia no permiten que la marginación disminuya.

En la Figura 5.15, Figura 5.16, Figura 5.17 y Figura 5.18, se aprecian los gráficos correspondientes a la correlación existente entre el porcentaje de viviendas sin energía por municipio, y el Índice de Desarrollo Humano, Educación, Ingresos y Salud respectivamente.

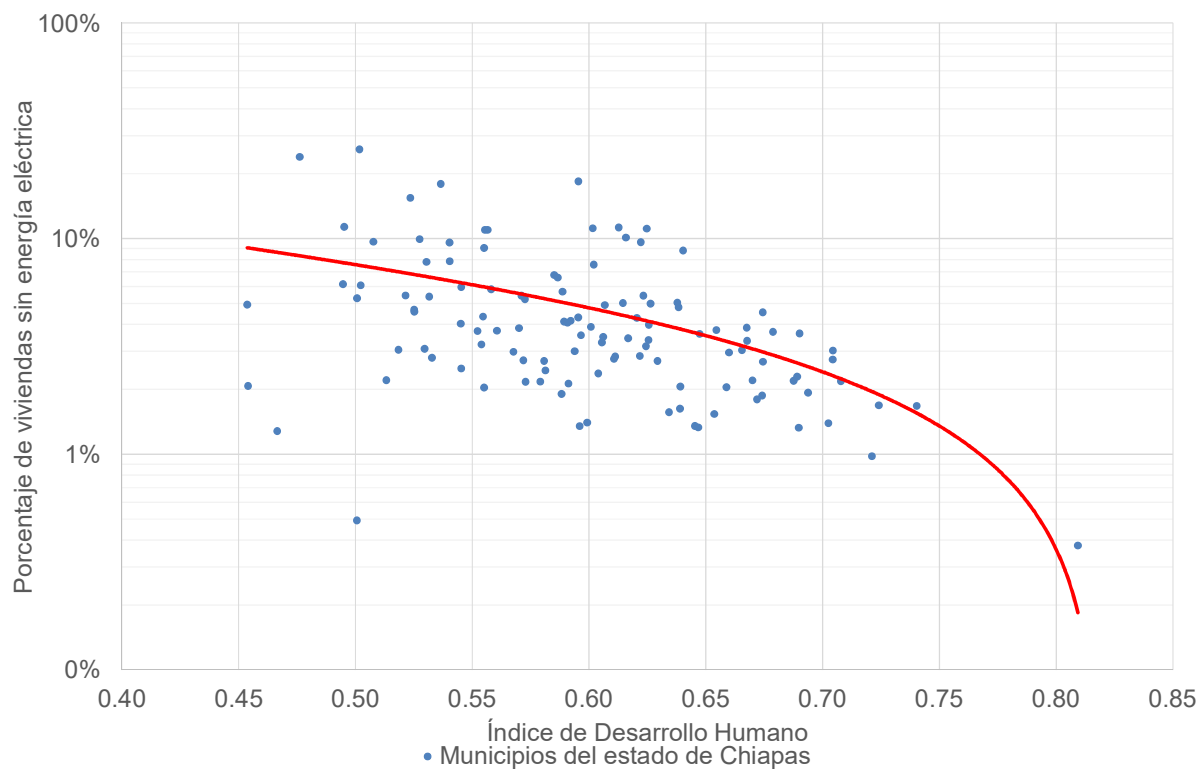


Figura 5.15 Índice de Desarrollo Humano vs Carencia de energía. Estado de Chiapas.

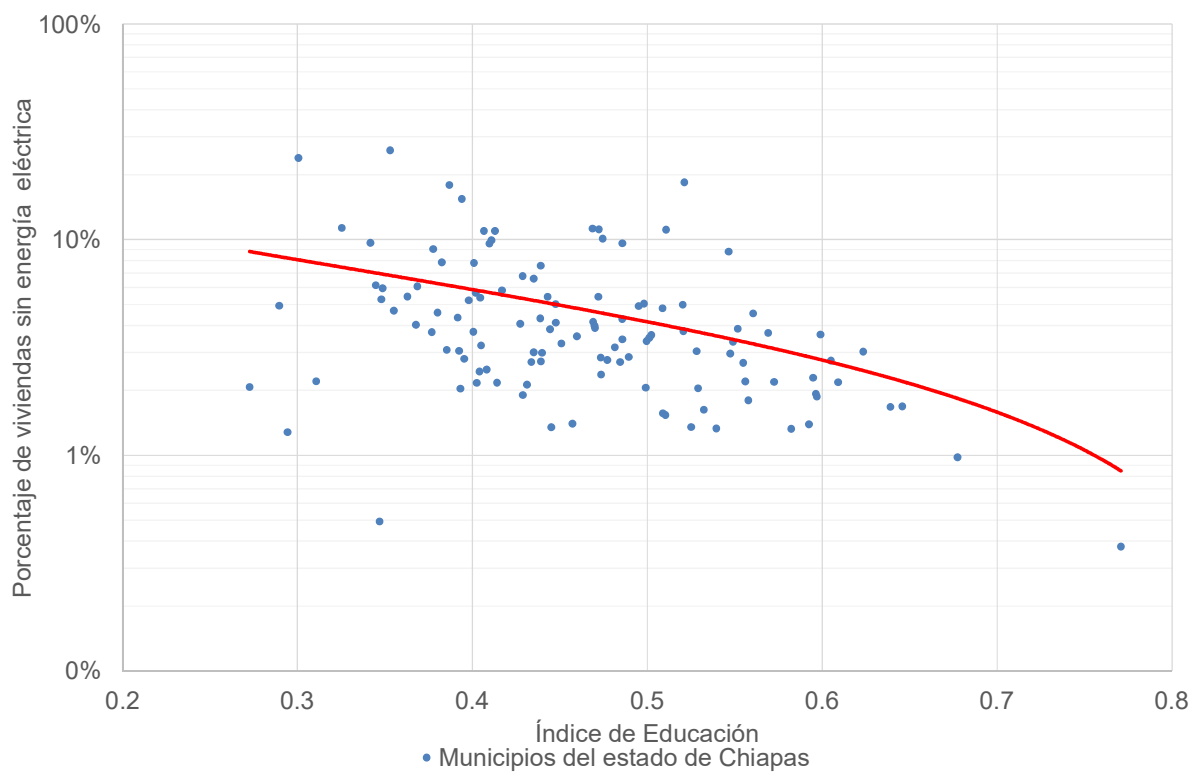


Figura 5.16 Índice de Educación vs Carencia de energía. Estado de Chiapas.

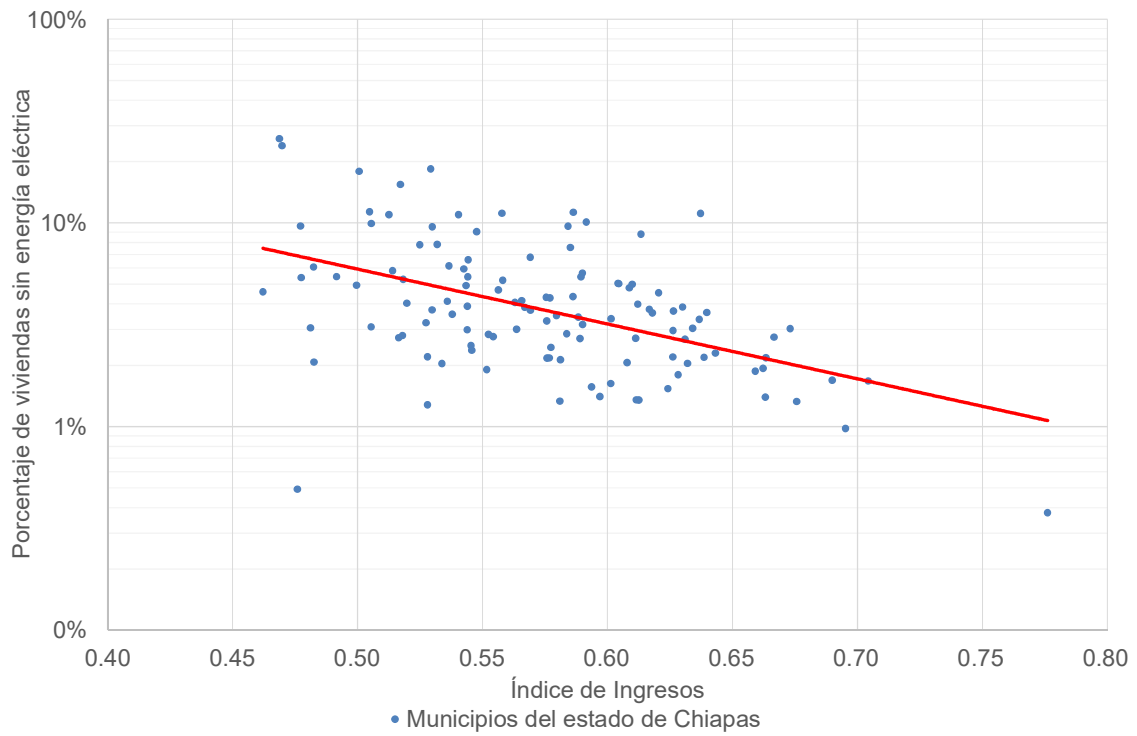


Figura 5.17 Índice de Ingresos vs Carencia de energía. Estado de Chiapas.

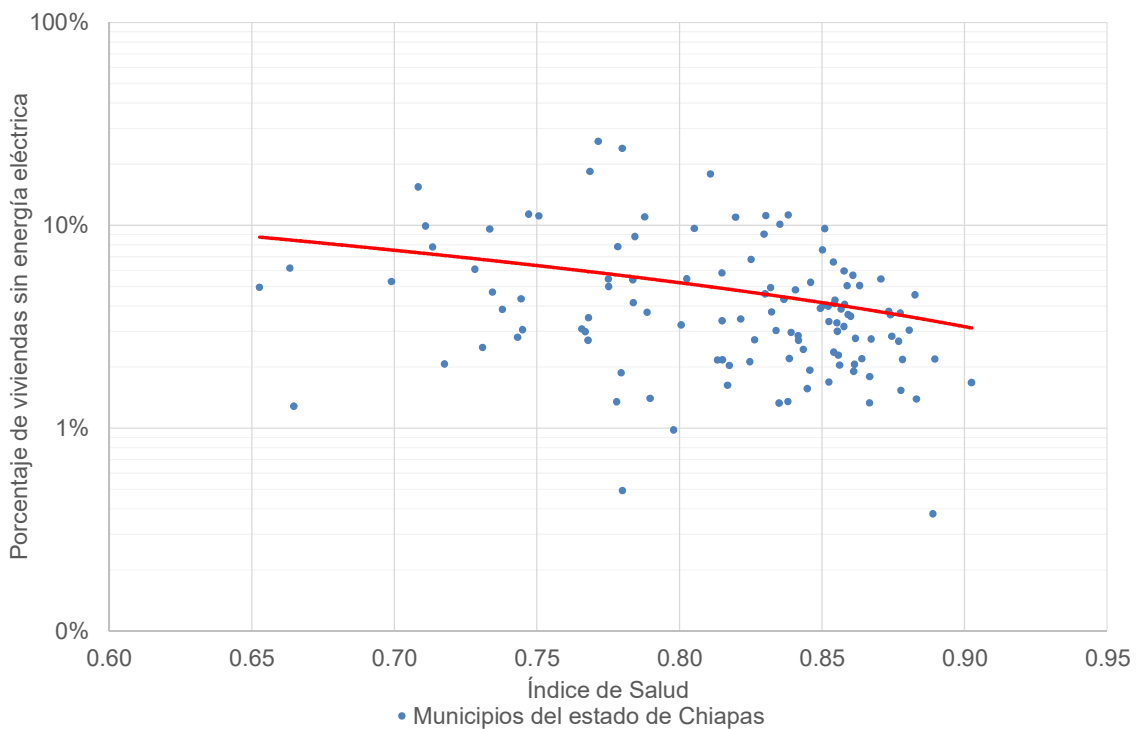


Figura 5.18 Índice de Salud vs Carencia de energía. Estado de Chiapas.

Se aprecia a la variable salud, como aquella con una menor correlación con la variable energía.

Los aprovechamientos hidráulicos con fines de generación de energía hidrocinética en ríos, pueden ser una alternativa para la electrificación rural y el abastecimiento de energía a sitios no interconectados a la red. De esta forma, se observa como una oportunidad, al hecho de poder reducir índices como el de marginación, y aumentar el índice de desarrollo humano en municipios con falta de energía eléctrica, y cuya cercanía a un río puede representar una posibilidad para la instalación de turbinas que aprovechen el movimiento del agua.

5.2.6 Oportunidades ante las turbinas de baja carga al hilo de corriente

En lo que respecta a la generación de energía por medio del agua, son las turbinas de baja carga al hilo de corriente, las que representan una competencia más cercana a los aprovechamientos hidráulicos con fines de generación hidrocinética en ríos, esto debido a la condición de carga reducida por medio de la cual operan estas turbinas. Se comenta a en esta sección, aquellos inconvenientes relacionados con estas máquinas, las cuales pueden representar una oportunidad para las turbinas hidrocinéticas.

- El marco normativo existente en lo que respecta a centrales hidroeléctricas, no se hace una distinción considerable del tamaño de la central y la configuración del proyecto. De esta forma, difícilmente una pequeña central al hilo de corriente es capaz de contemplar los estudios e infraestructura que el gobierno normalmente exige a una central de gran tamaño. Esto se traduce en una gran barrera para el desarrollo de pequeñas centrales hidroeléctricas al hilo de corriente. (National Energy Board, March 2006).
- Los sitios que poseen grandes caudales que pueden ser aprovechados, no se encuentran disponibles o en condiciones de alojar obras hidráulicas que permitan la generación de energía
- Los tiempos de ejecución del proyecto pueden ser largos, considerando dos años para la obtención de permisos y tres años en la construcción
- Existen casos en los que la complejidad de la ubicación y las difíciles características del río, además de la incapacidad de almacenar agua para usarla a conveniencia, obliguen a que el precio por kilowatt nivelado sea muy alto.
- A medida que la carga se reduce para un proyecto al hilo de corriente, la tecnología hidroeléctrica convencional resulta menos eficiente y se encarece, incluso si se compensa con gastos altos como se estudió en la Sección 4.2.2 y se observa en la Figura 4.8.

Poniendo a consideración los aspectos anteriormente mencionados, y que se relacionan con las dificultades que enfrentan las turbinas de baja carga al hilo de corriente, se identifican las siguientes oportunidades para los aprovechamientos hidráulicos con fines de generación hidrocinética en ríos.

- Los estudios de ingeniería relacionados con un aprovechamiento hidrocinético son sensiblemente menores que los de una hidroeléctrica convencional, incluyendo aquellas que utilizan turbinas de baja carga al hilo de corriente.

-
- La legislación puede ser más ligera para estos aprovechamientos, lo que reduce considerablemente el tiempo de puesta en operación.
 - Puede alcanzar costos nivelados de la energía del orden o más bajos, que proyectos al hilo de corriente que operan con cargas muy bajas.
 - Reducidos tiempos de ejecución.
 -

Importante mencionar que las potencias instalables para cada tecnología son diferentes, y que los aprovechamientos hidrocínéticos pueden ofrecer oportunidades respecto a las debilidades de las turbinas de baja carga al hilo de corriente, pero su capacidad de generación es sensiblemente menor, lo que lo convierte en su más grande amenaza. Se comentará esta situación a mayor detalle en la 5.3.1.

5.2.7 Aprovechamiento de los gastos turbinados de centrales hidroeléctricas, y Chiapas como el estado que posee el sistema hidroeléctrico más grande de México

Diversos autores han explorado la posibilidad de generar energía hidrocínética a partir de los gastos turbinados y excedentes de centrales hidroeléctricas.

Liu y Packey discuten la posibilidad que existe en incrementar la generación de energía hidroeléctrica por medio de la instalación de turbinas hidrocínéticas aguas abajo de centrales hidroeléctricas convencionales, y desarrollar, lo que el autor llama *sistemas hidroeléctricos de ciclo combinado*, que capturen energía residual de los desfuegos en presas existentes. A lo largo del trabajo, los autores establecen los retos y las ventajas que traerían consigo la implementación de este tipo de sistemas. Dentro de los retos más importantes, se señala el desconocimiento de la cantidad de recurso aprovechable y sitios susceptibles a ser equipados. Las ventajas se centran en la predictibilidad con la que sería posible generar energía frente a otras fuentes renovables. Aun cuando la tecnología es emergente, se cree que posee un potencial significativo para la generación de energía limpia que colabore en la mitigación del cambio climático. El autor establece de manera ilustrativa, que en el 2020, se estima que la capacidad de generación hidroeléctrica mundial será de 1,195 GW. Si se lograra penetrar 0,1% de esta cifra por medio del equipamiento de turbinas hidrocínéticas que aprovechen la energía residual, la potencia instalada adicional sería de 11.95 GW. (Liu & Packey , 2013).

Considerando que el 71% de la capacidad instalada de la energía renovable del país es energía hidroeléctrica, además de que Chiapas cuenta con el sistema hidroeléctrico de mayor tamaño del país, compuesto por las centrales hidroeléctricas La Angostura, Chicoasén, Malpaso y Peñitas, las cuales aprovechan el río Grijalva, se identifica la oportunidad de estudiar aquellas centrales las cuales proporcionan las características suficientes y necesarias para generar energía por medio de un aprovechamiento hidrocínético de manera rentable por medio de la instalación en la zona aguas abajo de sus desfuegos. En lo que respecta al sistema hidroeléctrico Grijalva, se observa una como oportunidad el aprovechamiento de la zona aguas debajo de la Central

Hidroeléctrica Peñitas, debido a que cuenta con un factor de planta alto, debido a que turbina prácticamente todo el tiempo, a diferencia del resto de las centrales del Sistema Grijalva.

5.2.8 Aprovechamiento de grandes canales de riego

Toda vez que los canales de riego cumplan con las condiciones mínimas de tirante y velocidad necesarias para la operación de un aprovechamiento hidrocínético, es posible su instalación. Para ello, además de conocer las características geométricas del canal, es necesario el conocimiento de la operación del mismo, y del uso al que se le daría a la energía. Dentro de las principales ventajas del aprovechamiento de grandes canales de riego destacan:

- La cantidad de escombros en un canal es por mucho menor que un río no controlado
- Los gastos en un canal pueden ser controlados aguas arriba, por lo que no existe un gran riesgo de que la avenida perjudique a la turbina hidrocínética

5.2.9 Chiapas cuenta con ríos con existencia del recurso para generar energía, y carece de la misma

La Figura 5.19 tiene como fin, ilustrar las zonas con una mayor carencia de energía en el estado, en conjunto con la situación hídrica de la zona. Para ello se construyeron curvas de permanencia para algunas de las estaciones con una mayor consistencia en información, que mejor abarquen la cobertura del estado, y a cuya información hidrométrica diaria fue posible acceder a través de la plataforma BANDAS de acceso público y gratuito. Las curvas de permanencia se integran en Figura 5.20. De esta forma, es posible observar aquellos ríos que cuentan con alta permanencia en gastos, asociado a regiones con falta de energía eléctrica. Se observa como oportunidad, el aprovechamiento de esos ríos con fines de electrificación, y el desarrollo de actividades productivas de la región.

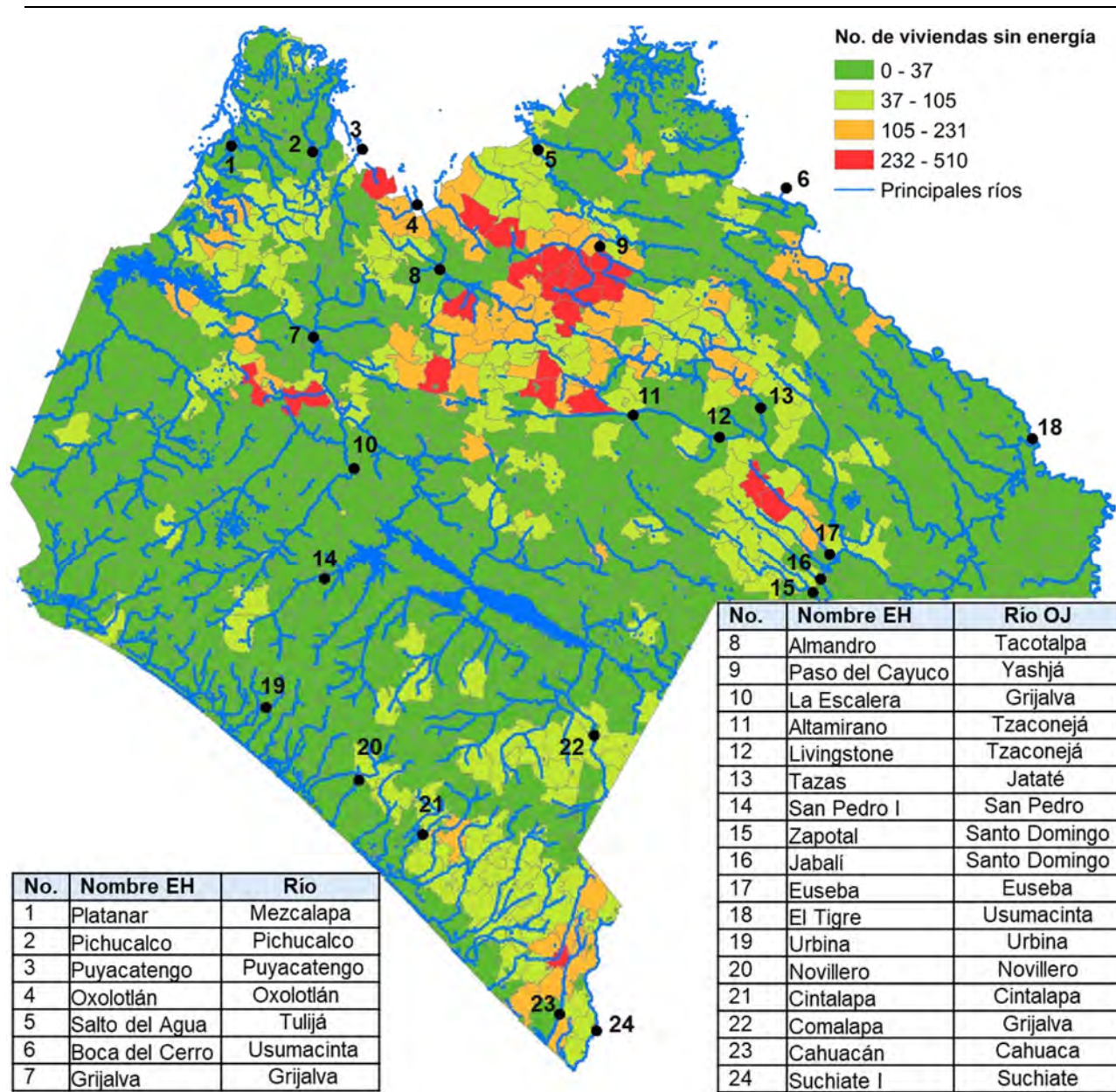
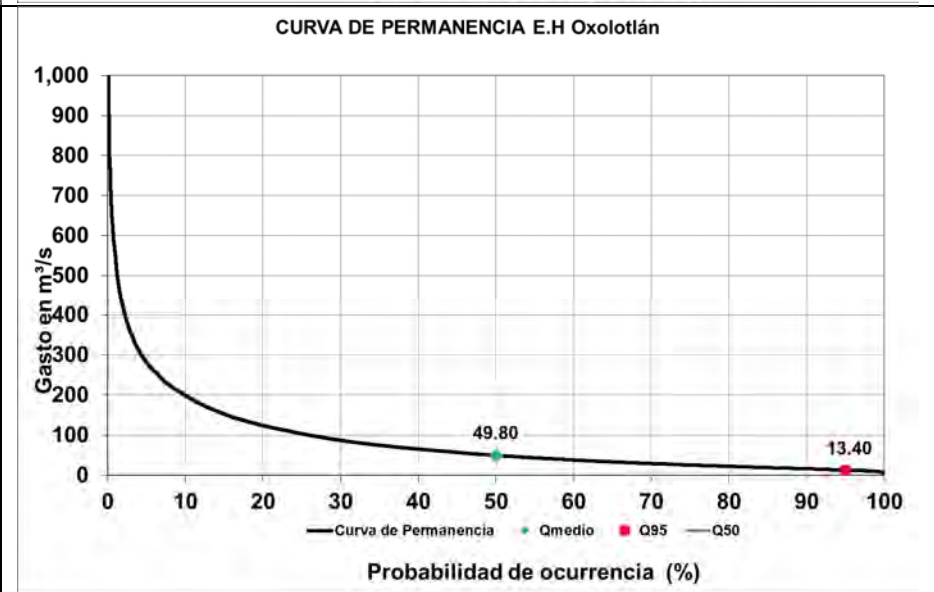
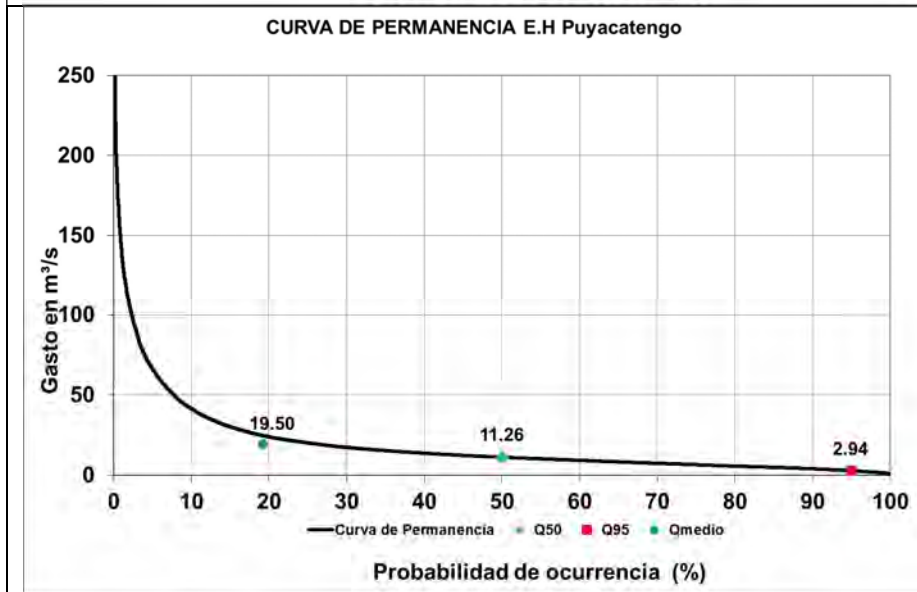
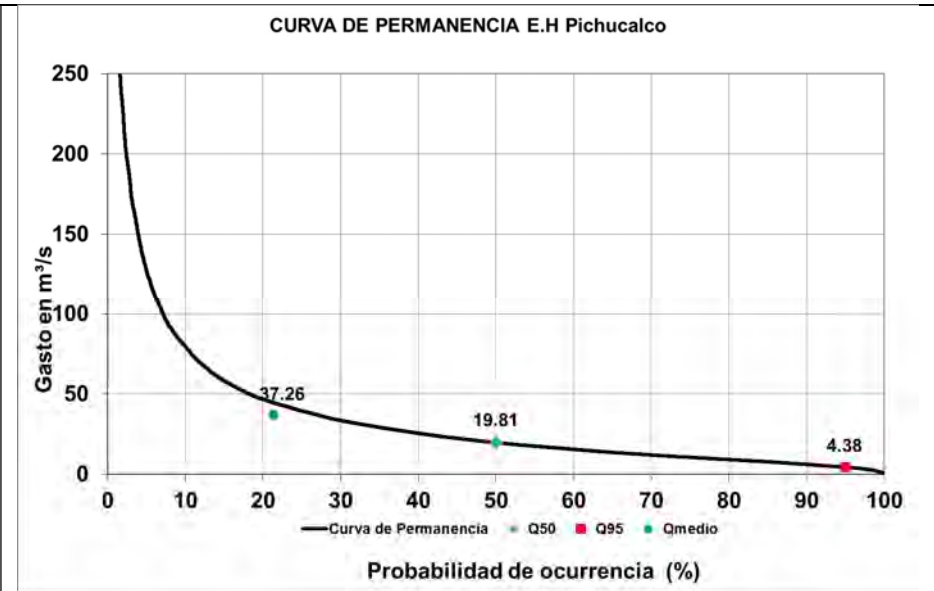
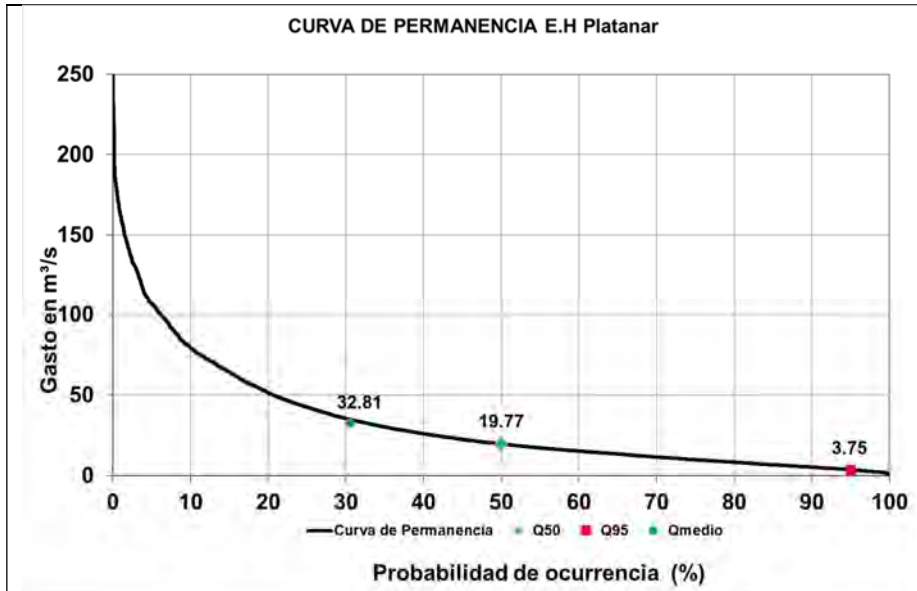
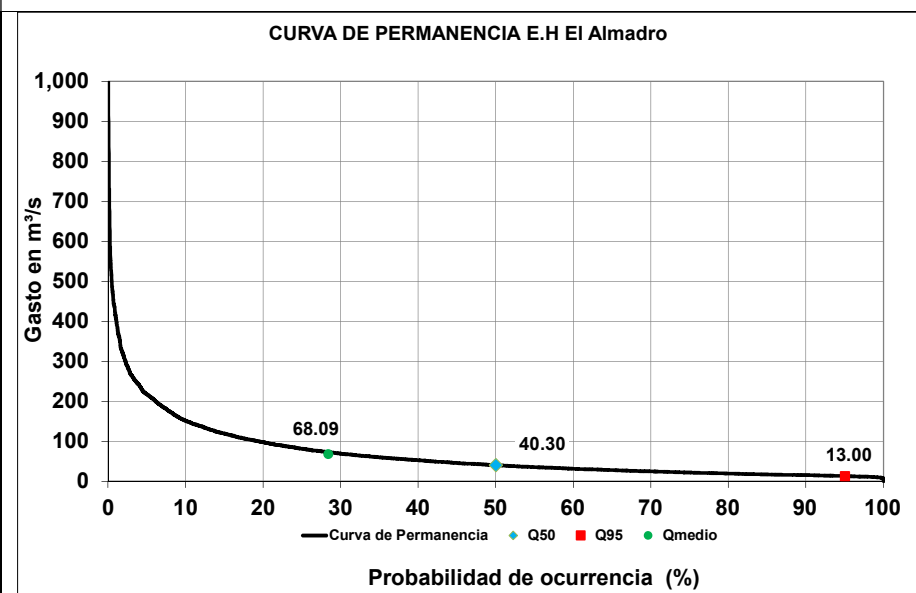
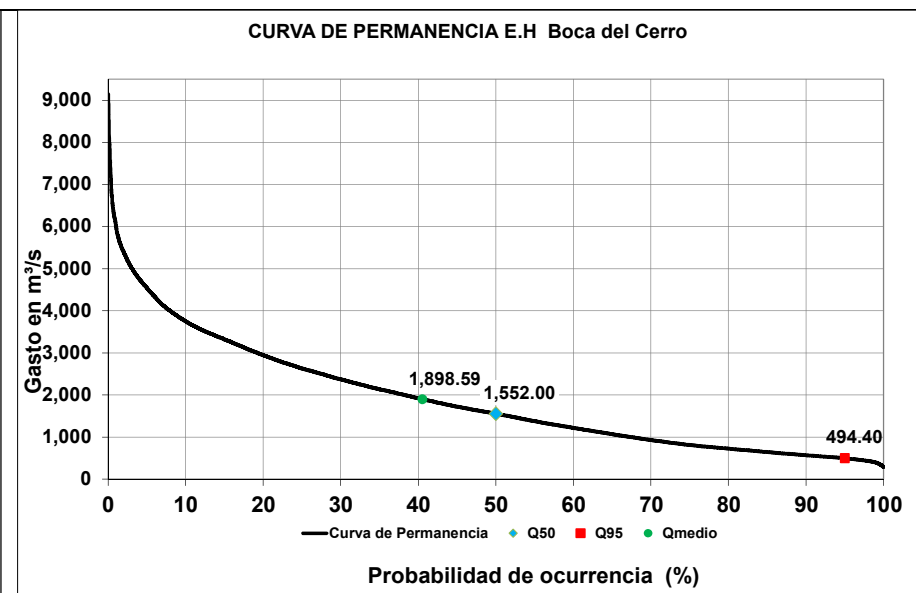
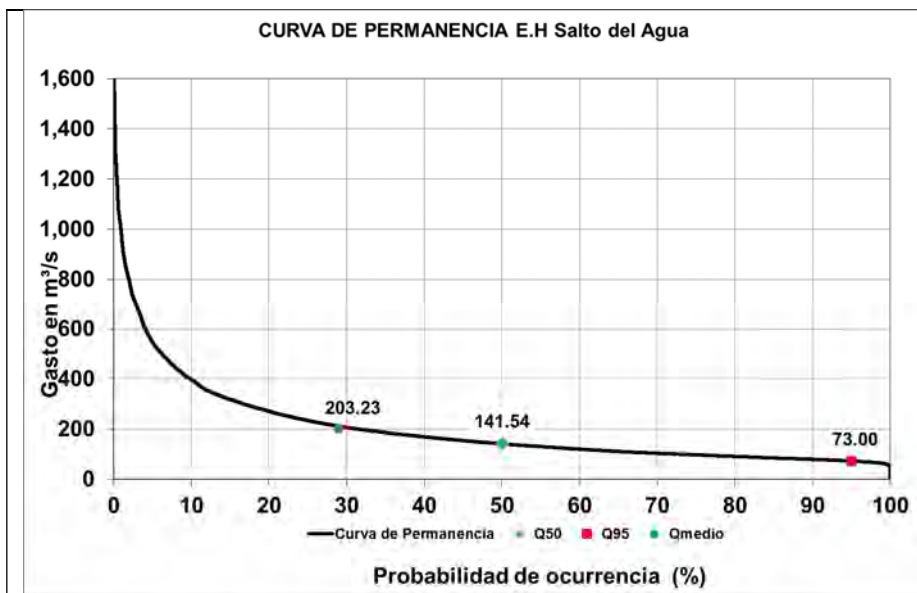
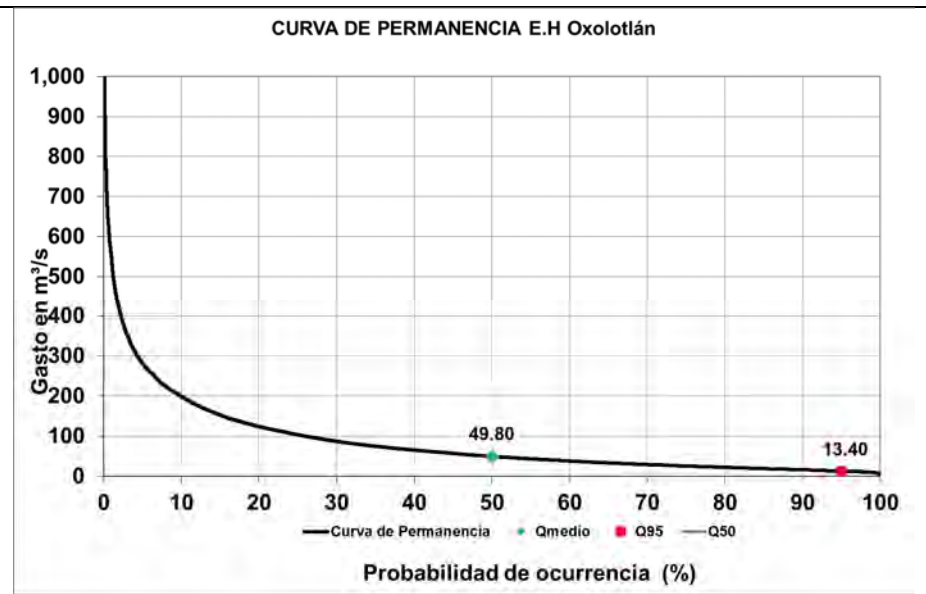
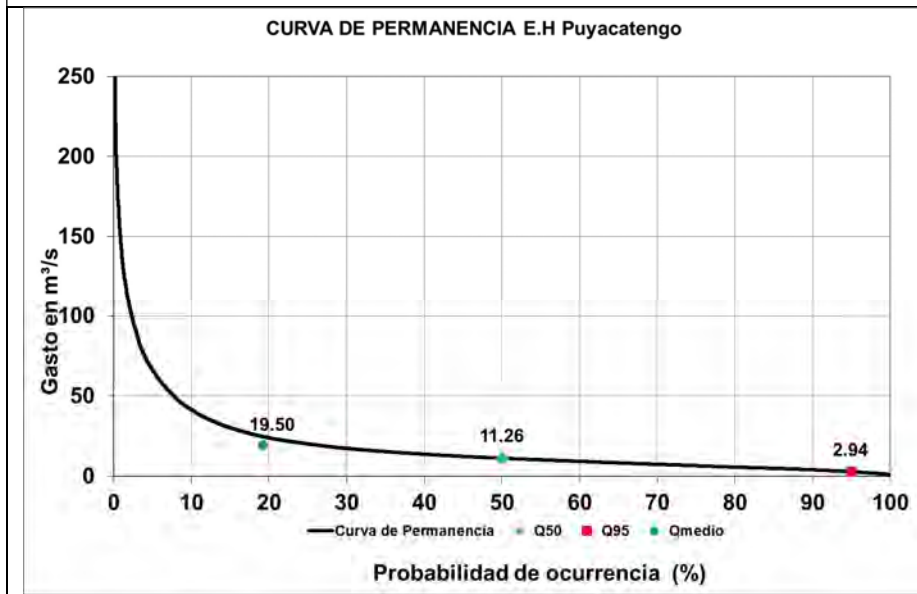
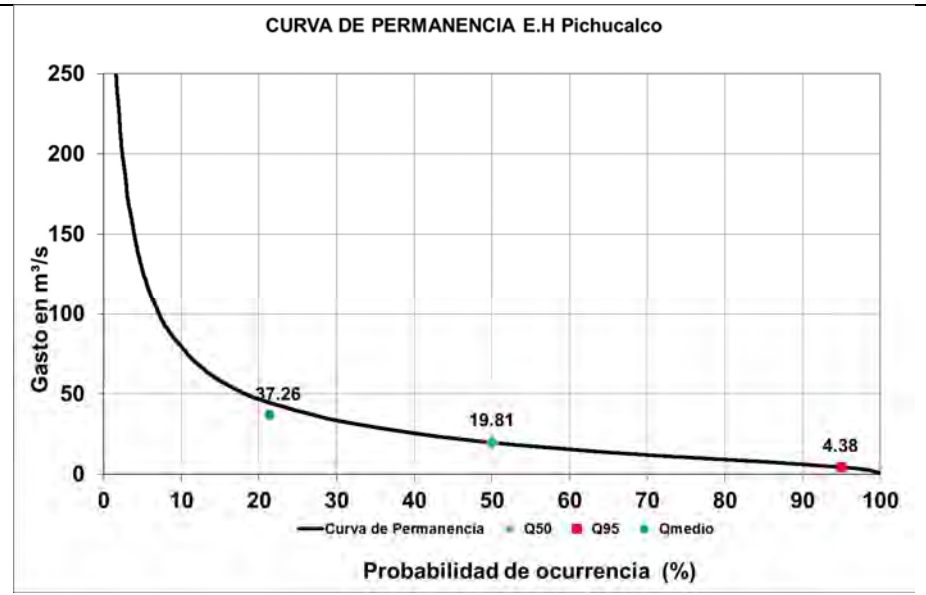
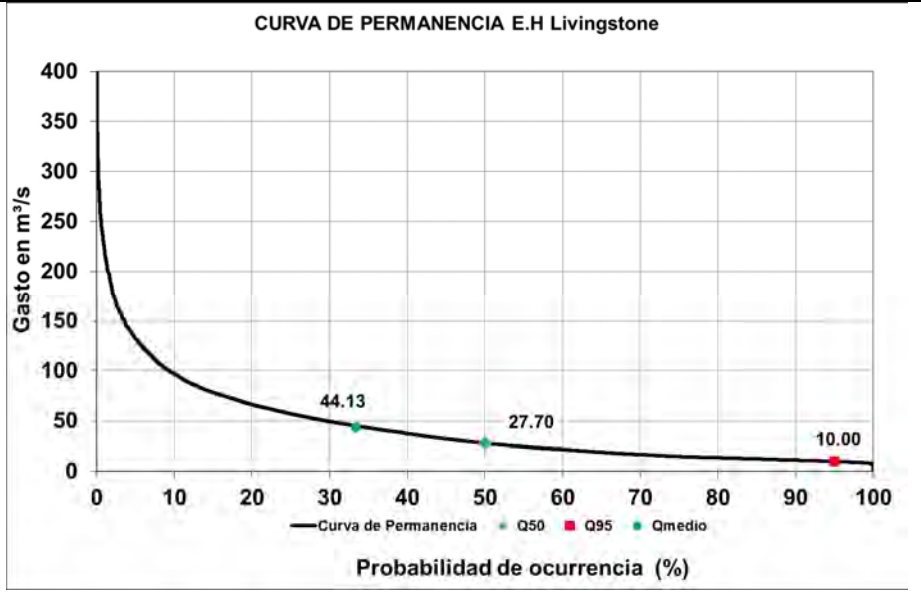
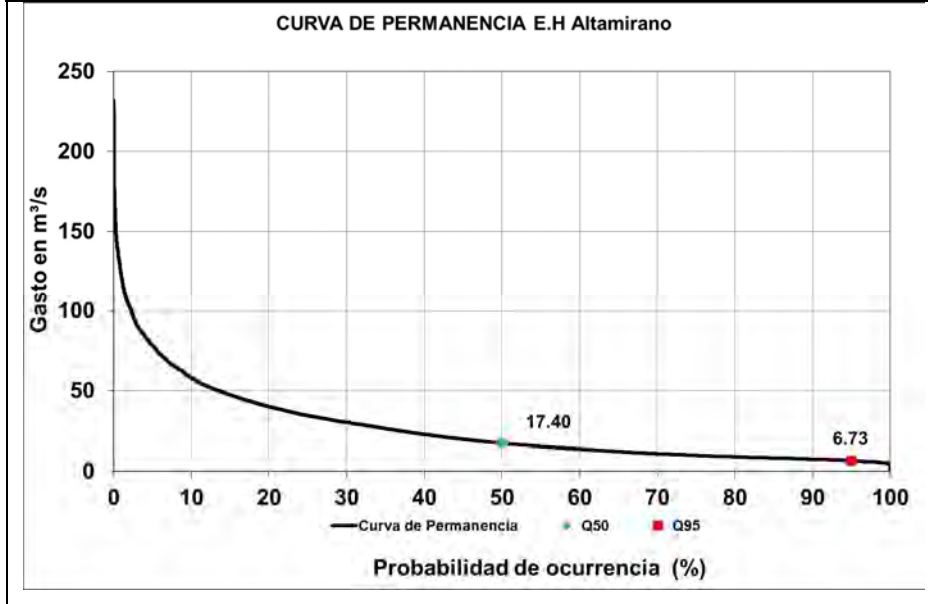
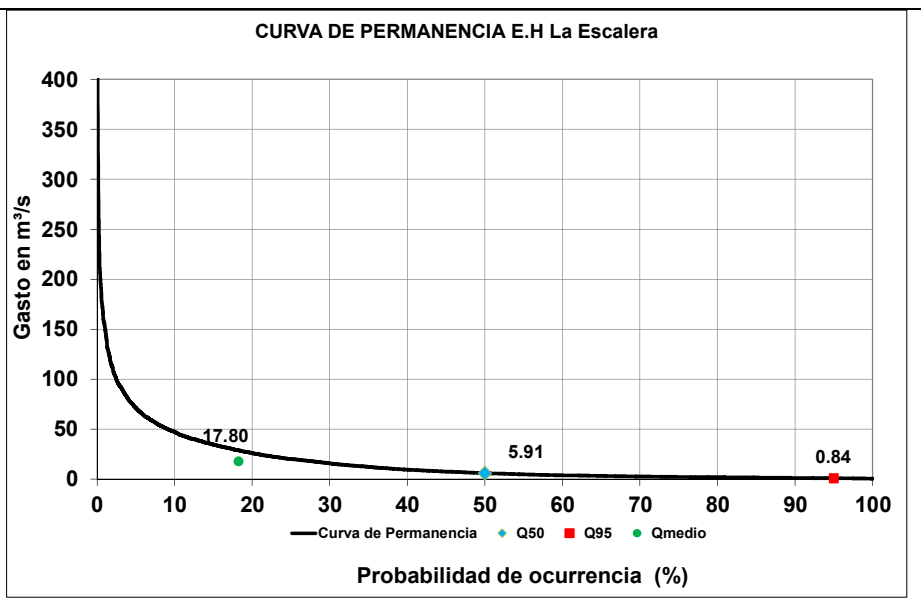


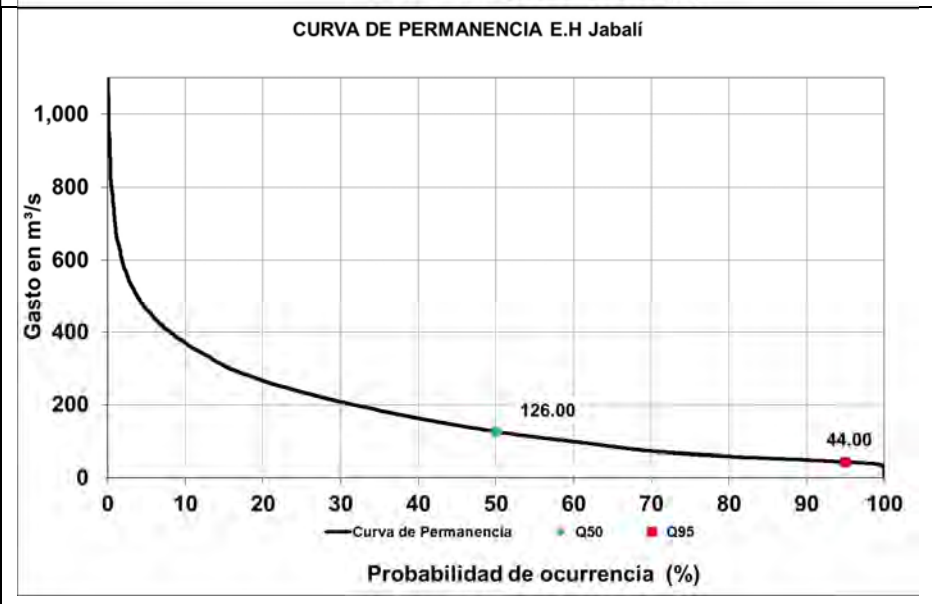
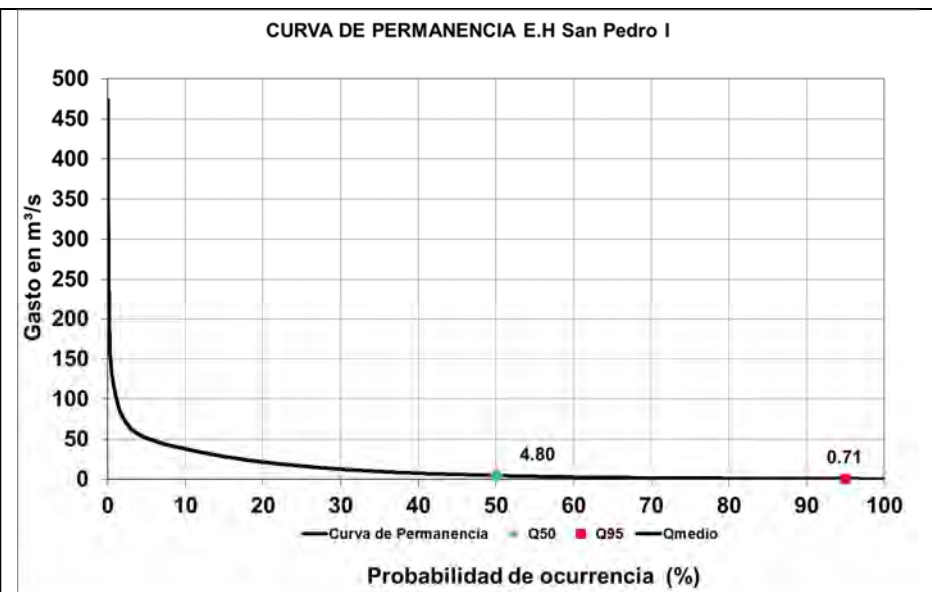
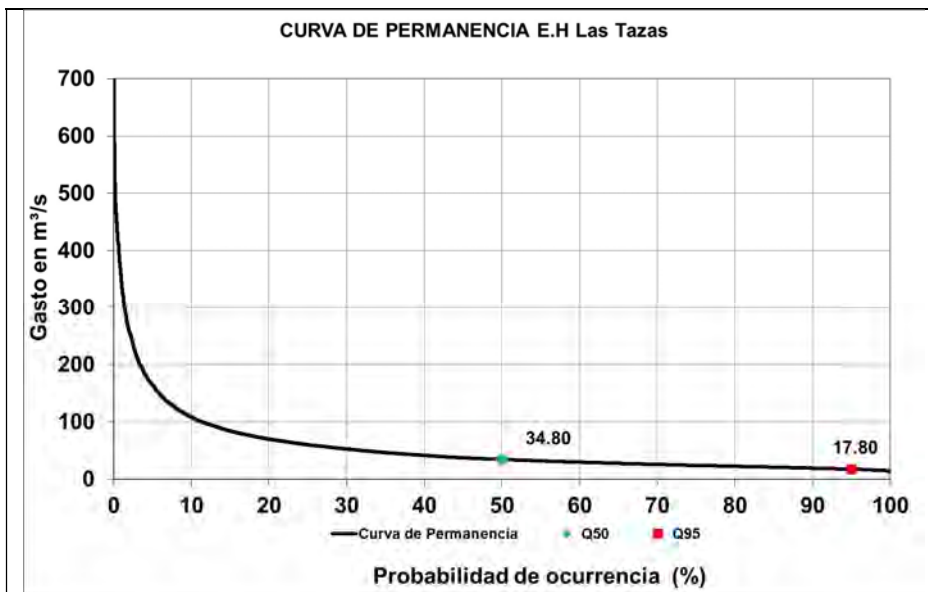
Figura 5.19 Panorama de la carencia de energía asociada a estaciones hidrométricas

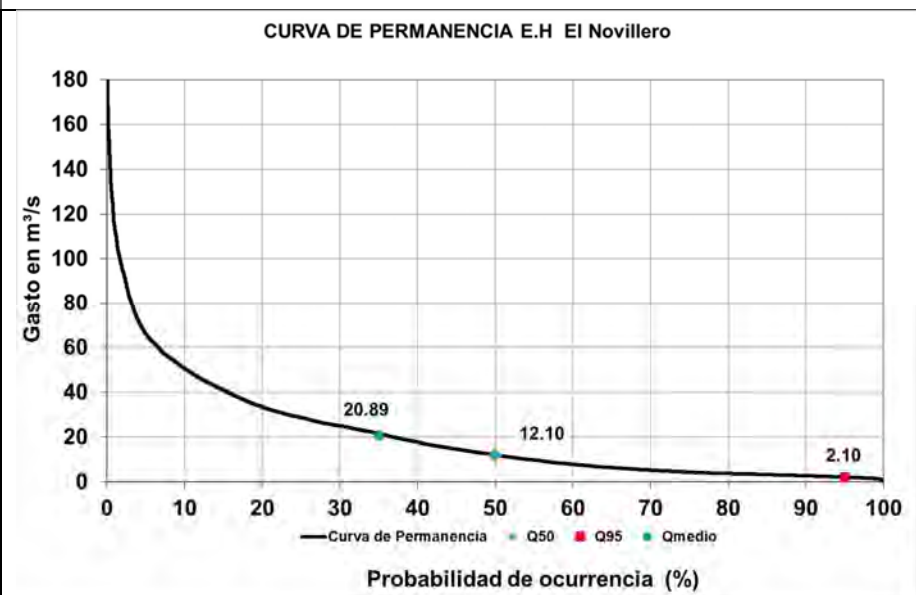
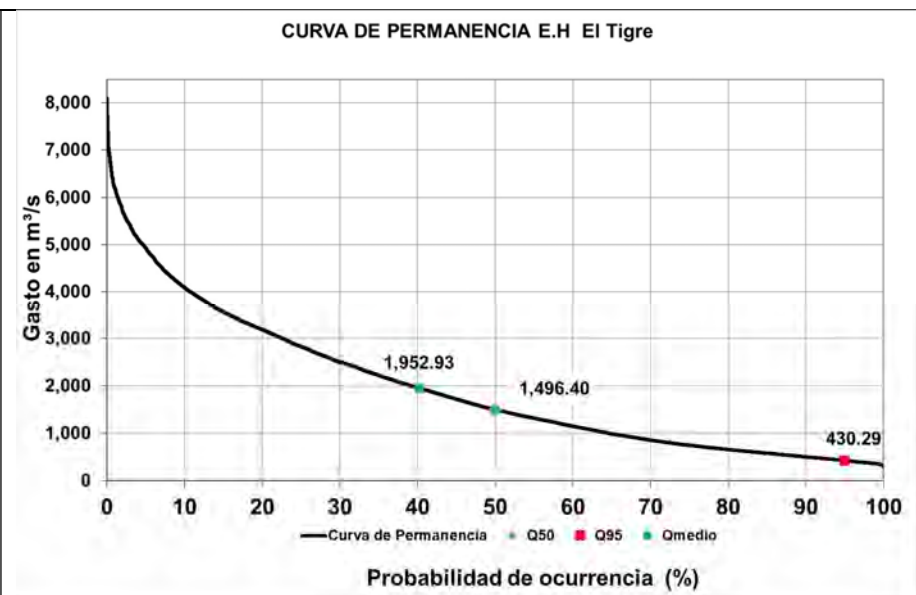












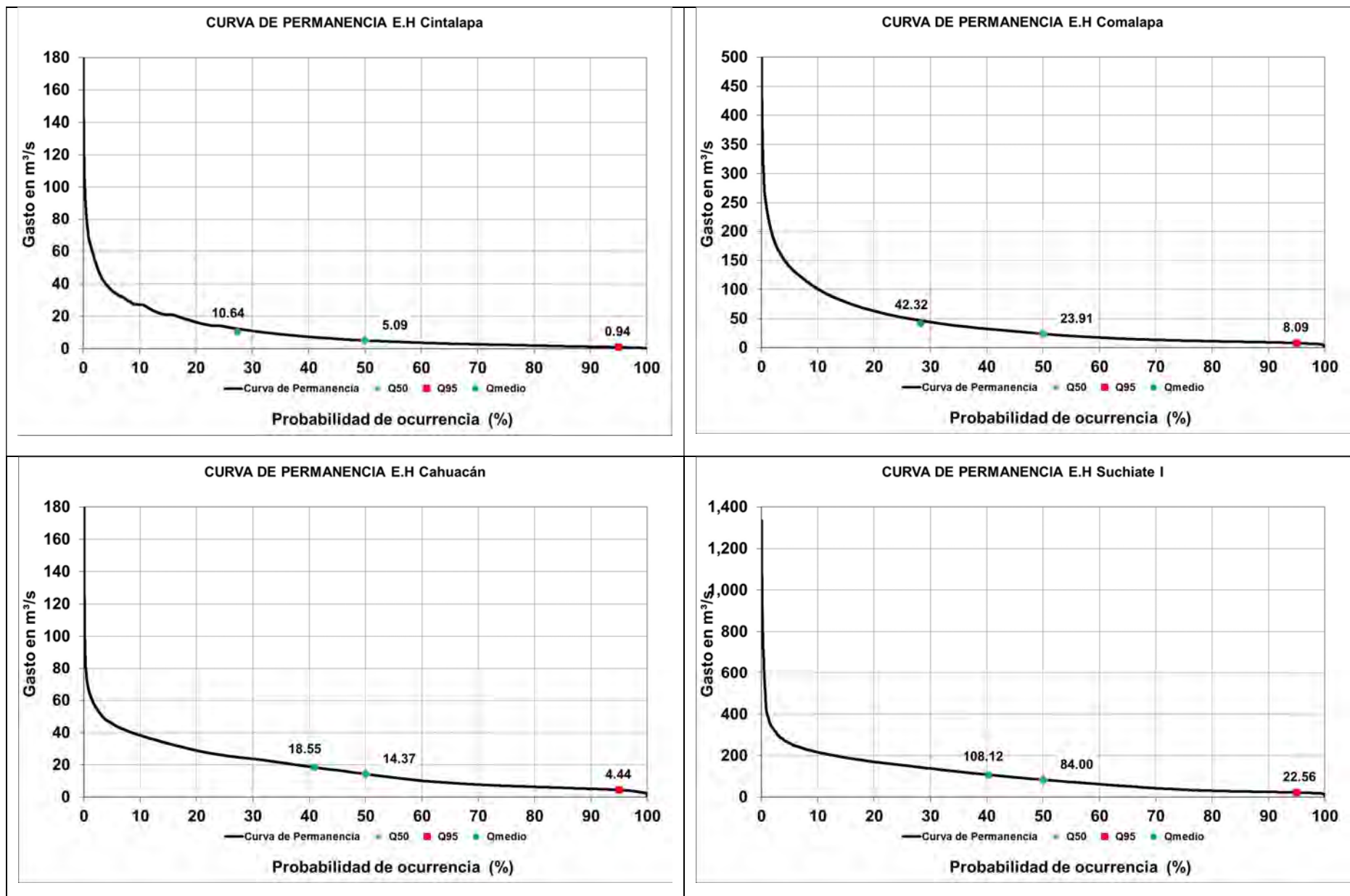


Figura 5.20 Curvas de permanencia para 24 sitios

Es importante hacer mención que las curvas de permanencia permiten garantizar la existencia del recurso para el funcionamiento del aprovechamiento, sin embargo es necesario conocer las características espaciales y temporales de los gastos a un mayor detalle, y asociarlos inminentemente con su profundidad de tirante y el comportamiento de la sección transversal para estar en posición de conocer sitios que tienen posibilidades reales de ser aprovechados.

5.2.10 Existencia de comunidades cercanas a ríos, sin acceso a energía eléctrica.

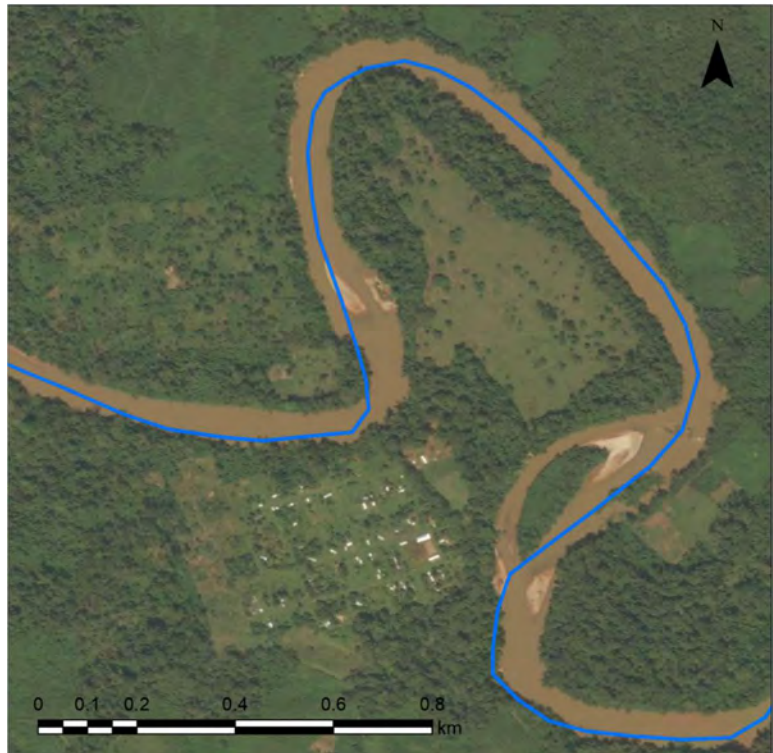
Los aprovechamientos hidrocínéticos pueden ser más atractivos cuando son instalados en sitios cerca de comunidades o centros de consumo que no se encuentren conectadas a la red eléctrica, y en consecuencia, se ven obligados a utilizar combustibles caros y contaminantes para desarrollar sus actividades como lo es el diesel. Con información de SENER actualizada al 2015, se identificaron localidades mismas que no se encuentran conectadas a la red, y que a su vez, cuentan con un río perenne a pocos metros de ella, el cuál podría ser aprovechado. Se enumeran de la Figura 5.21 a la Figura 5.25 los sitios que representan una opción más atractiva para contemplar instalar un aprovechamiento hidráulico con fines de generación de energía hidrocínética en ríos.

- **Municipio:** Ocosingo
- **Localidad:** Plan de Guadalupe
- **Distancia mínima al río:** 50 m.
- **Número de habitantes sin energía:** 398 hab



Figura 5.21 Imagen satelital Localidad Plan de Guadalupe

- **Municipio:** Las Margaritas
- **Localidad:** Hermosillo
- **Distancia mínima al río:** 70 m.
- **Número de habitantes sin energía:** 307 hab



- **Municipio:** Ocosingo
- **Localidad:** Candelaria
- **Distancia mínima al río:** 150 m.
- **Número de habitantes sin energía:** 495 hab.



Figura 5.22 Imagen satelital Localidades Hermosillo y Candelaria

- **Municipio:** Ocosingo
- **Localidad:** Amador Hernández
- **Distancia mínima al río:** 500 m.
- **Número de habitantes sin energía:** 603 hab



- **Municipio:** Las Margaritas
- **Localidad:** Benito Juárez
- **Distancia mínima al río:** 500 m.
- **Número de habitantes sin energía:** 522 hab.



Figura 5.23 Imagen satelital Localidades Amador Hernández y Benito Juárez

- **Municipio:** Las Margaritas
- **Localidad:** El Caracolito
- **Distancia mínima al río:** 200 m.
- **Número de habitantes sin energía:** 177 hab

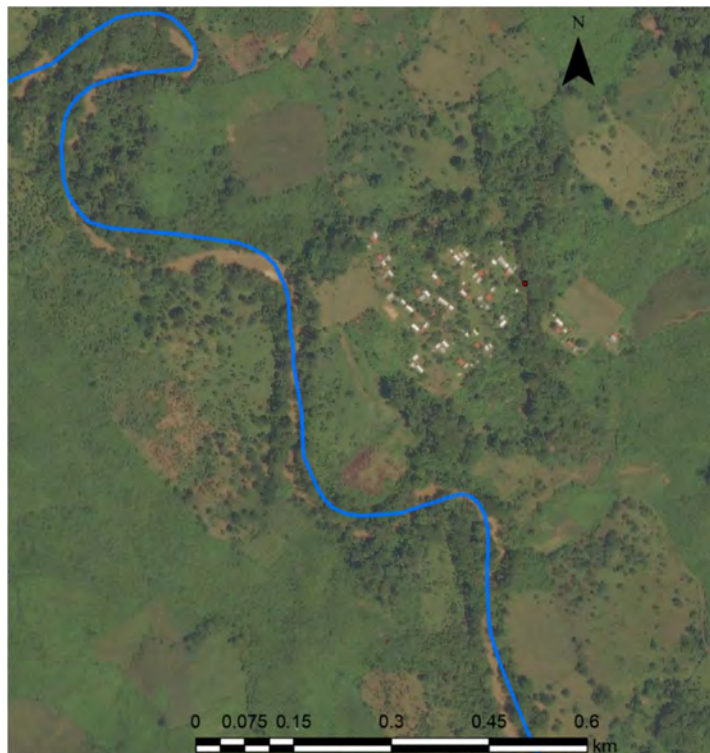


Figura 5.24 Imagen satelital Localidad El Caracolito



Figura 5.25 Imagen satelital Localidades Nueva Libertad, La Providencia, San Pedro y San Luis

Los sitios mostrados en las Figura 5.21 a la Figura 5.25 fueron elegidos debido a la cercanía que tienen a un río de gran caudal, la carencia de energía en las localidades, y la cantidad de gente sin energía que podría ser

beneficiada por medio de la instalación de un aprovechamiento hidrocínético. Se identifica como una oportunidad para desarrollar alguna de dichas localidades como un proyecto piloto de electrificación rural.

5.2.11 Posición de los aprovechamientos hidrocínéticos ante la Ley de Aguas Nacionales

El estudio de aprovechamientos de energía hidrocínética como una fuente de energía renovable es escaso. Por lo tanto, no existe un pronunciamiento de parte de la Ley de Aguas Nacionales hacia el espacio que ocupa este tipo de tecnología en el marco legal. En base a la Ley de Aguas Nacionales, se construyó un diagrama mismo que se muestra en Figura 5.26 en el que se ubican los aprovechamientos de energía hidrocínética.

El criterio por medio del cual se ubicó a los aprovechamientos hidrocínéticos tal y como se muestra en la Figura 5.26 obedece a la política de operación de ese tipo de sistemas, los cuales

- no necesitan remanso alguno para generar
- no desvían el cauce natural del río
- no alteran la calidad ni la cantidad del agua descargada
- la capacidad instable de los aprovechamientos hidrocínéticos, por el actual estado de la tecnología, es menor a los 30 MW que indica la ley.

En base a los puntos anteriormente descritos, un aprovechamiento hidrocínético en ríos **no requiere una concesión de la CONAGUA**, como se muestra en la Figura 5.26.

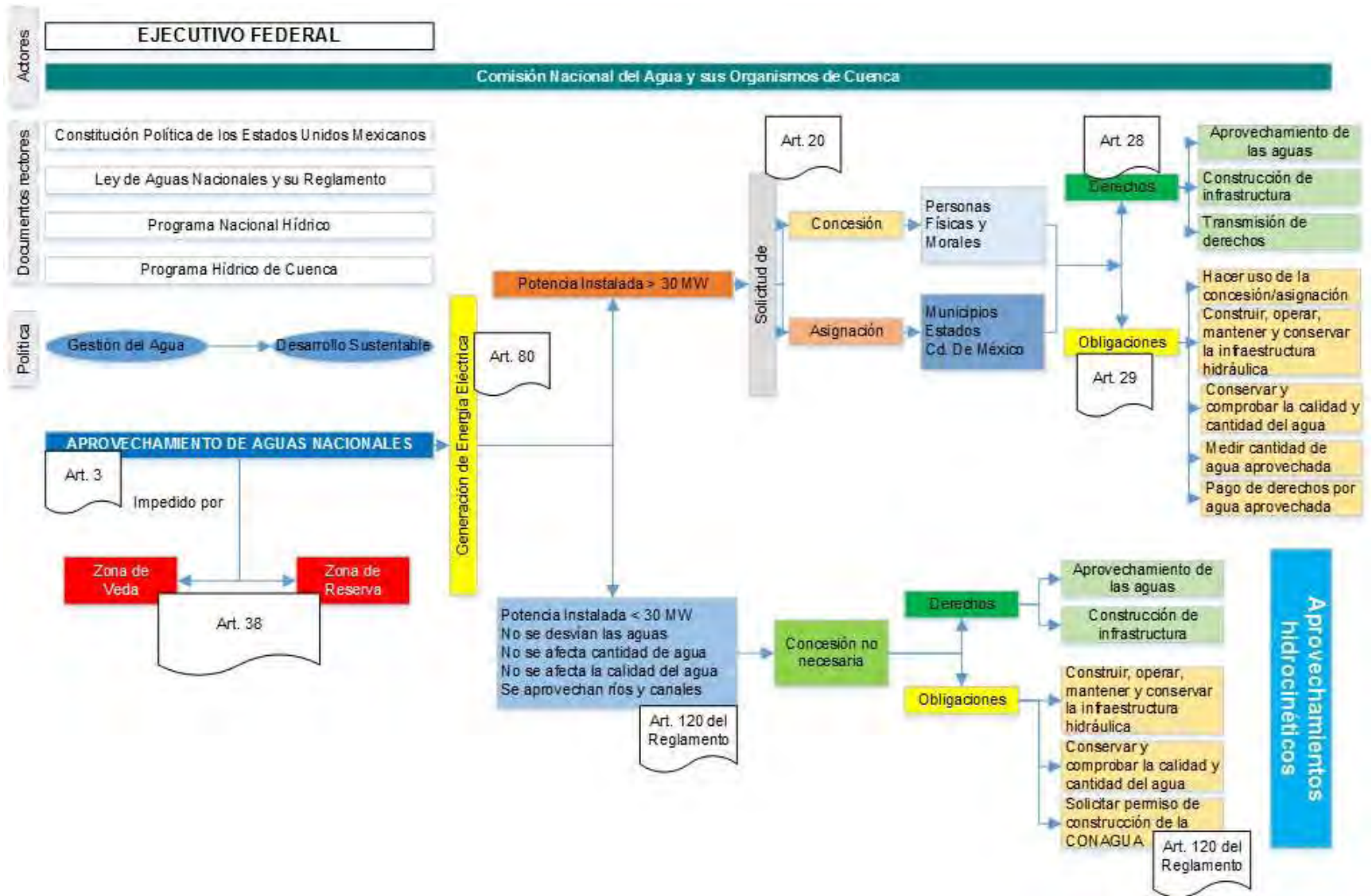


Figura 5.26 Aprovechamientos hidrocinéticos en la Ley de Aguas Nacionales

5.2.12 Condiciones climatológicas permiten la complementación de la generación de energía hidrocínética con otras fuentes de generación de energía renovable

Con información descargada del Inventario Nacional de Energías Limpias construido por la SENER, se construyeron curvas de irradiancia media mensual en diferentes sitios en los que se ubican estaciones hidrométricas, con el fin de observar la posibilidad de compensar gastos bajos en épocas de estiaje, con valores altos de irradiancia. Se observó un comportamiento adecuado en ese sentido, especialmente en la cuenca Costa de Chiapas, en donde la irradiancia media mensual tiene un comportamiento inverso a la temporada de estiajes y avenidas. Dicho comportamiento se muestra en las Figura 5.27, Figura 5.28, Figura 5.29 y Figura 5.30.

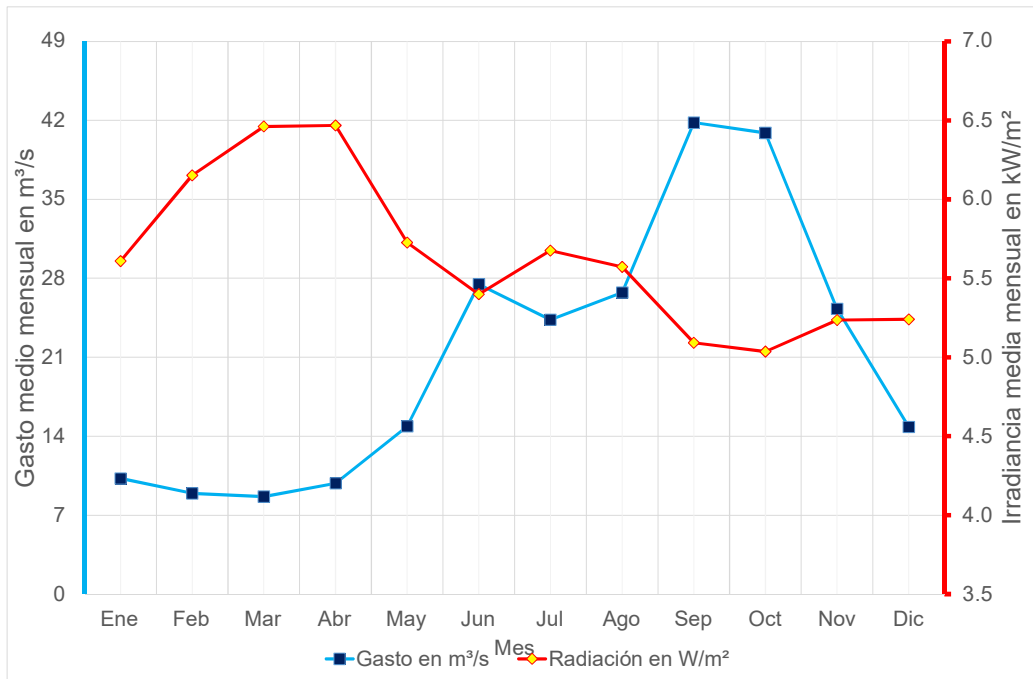


Figura 5.27 Gastos medios mensuales vs Irradiancia mediamensual sobre sitio en el río Cahuatán

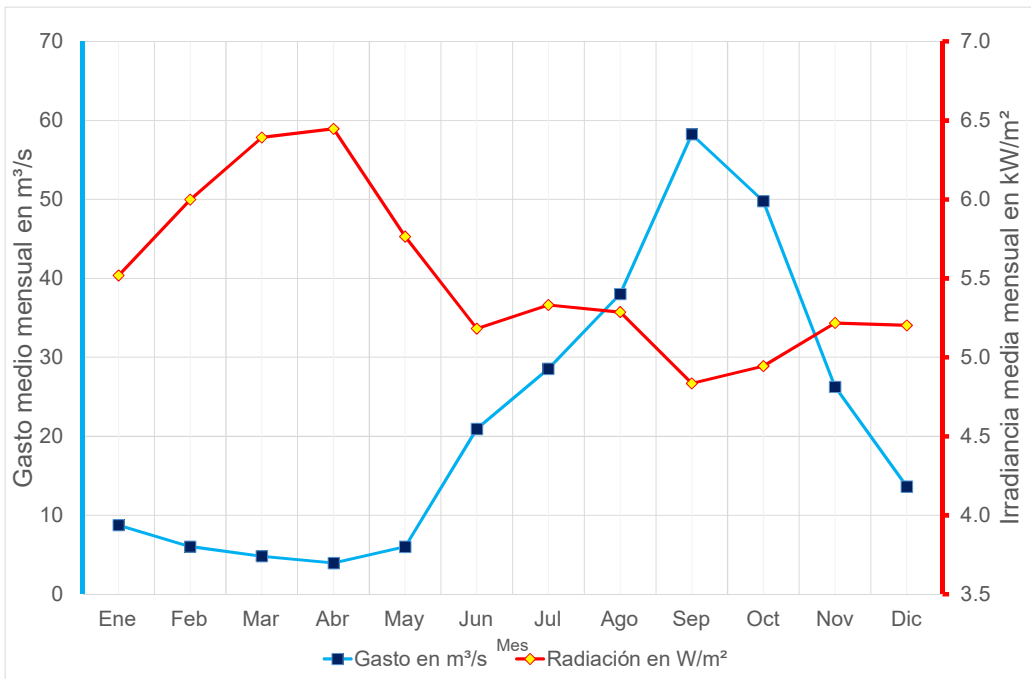


Figura 5.28 Gastos medios mensuales vs irradiación mediamensual sobre sitio en el río Novillero

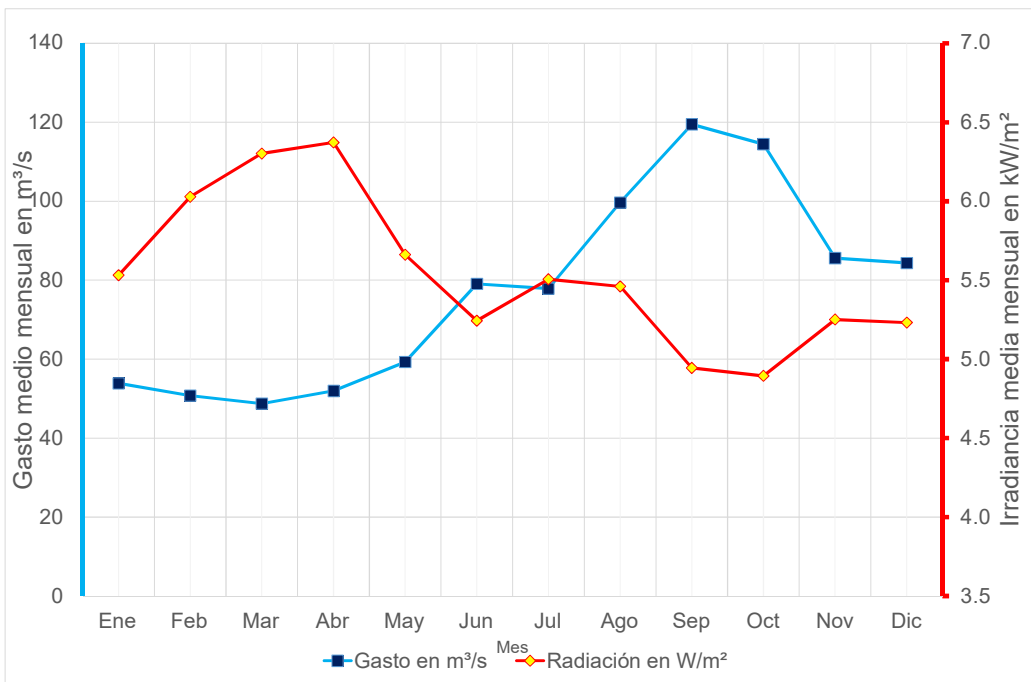


Figura 5.29 Gastos medios mensuales vs Irradiación media mensual sobre sitio en el río Huehuetán

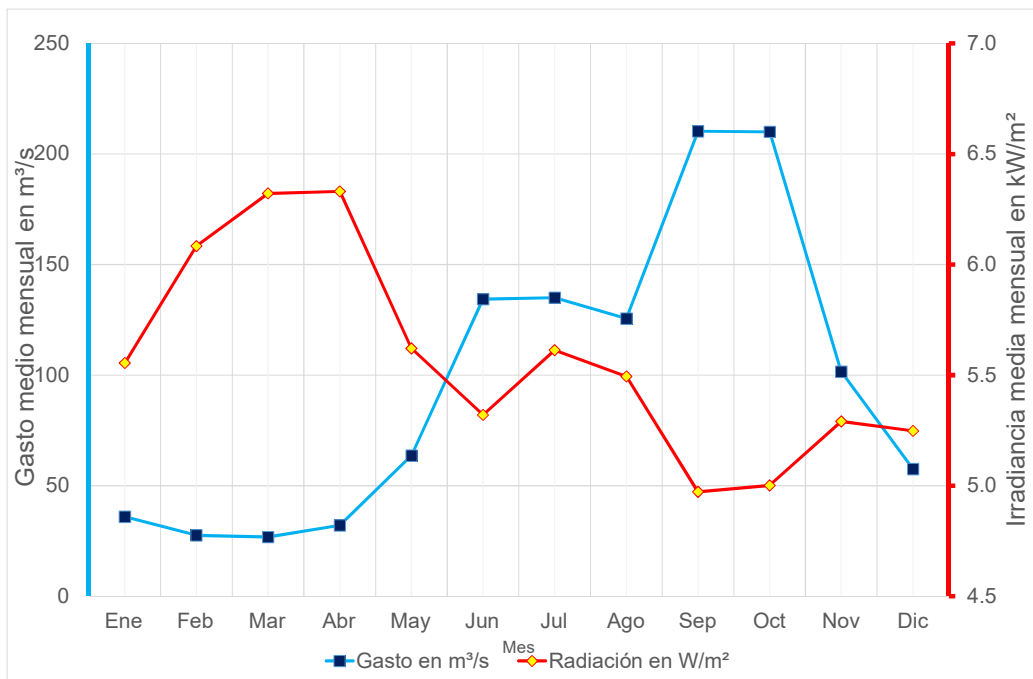


Figura 5.30 Gastos medios mensuales vs Irradiancia media mensual sobre sitio en el río Huehuetán

Se observa como una oportunidad, la posibilidad de idear sistemas híbridos que se compensen entre sí para la generación de energía eléctrica por medio de aprovechamientos hidrocinéticos y de generación fotovoltaica.

5.2.13 Herramienta de gestión social para proyectos hidroeléctricos

Se observa de la Sección 4.1.5 que la región sureste es una gran generadora de energía eléctrica, misma que es consumida en gran parte por otras zonas del país. Esta situación provoca parte de la inconformidad social en los habitantes de las regiones en las que se desea construir proyectos hidroeléctricos, y quienes en múltiples ocasiones no perciben de manera directa los beneficios que se derivan de grandes proyectos de energía como lo son las centrales hidroeléctricas. Se observa la oportunidad de utilizar a los aprovechamientos hidrocinéticos como una herramienta de gestión social que permita sensibilizar sobre el aprovechamiento del agua para generación de energía, y proveerles de la misma.

5.2.14 Colaborar con los compromisos adquiridos del país en reducción de emisiones y generación de energía limpia

La tecnología colabora con los compromisos adquiridos por el país en la reducción de emisiones y generación de energías limpias. En lo que respecta a la reducción de emisiones, para el caso de estudio descrito en la Sección 2.5, se obtuvo como resultado que una máquina de 3.8 metros de diámetro operando un 39% del tiempo, y asumiendo una eficiencia global del sistema de un 30% alcanza

una capacidad instalada de 33 kW y genera 107,051 kW·h en un año para el sitio estudiado. Dicha cantidad de energía es equivalente a:

- 9.2 toneladas equivalentes de petróleo (toe),
- 107 toneladas de CO₂ generado utilizando carbón,
- 92 toneladas de CO₂ por medio que utilizan combustóleo

Aun cuando se identifica como una oportunidad, el hecho de poder colaborar con la reducción de emisiones por medio de un aprovechamiento hidrocínético, es importante considerar que podría no ser económicamente atractivo. Su viabilidad económica se encontrará en función del sitio del aprovechamiento y las características que proporcione.

5.3 DEBILIDADES

5.3.1 Potencias instalables pequeñas, en la clasificación de microcentrales hidroeléctricas

Existen diferentes criterios sobre la clasificación que se le debe dar a las centrales hidroeléctricas en función de su potencia instalada. El criterio depende normalmente del país en cuestión. En el caso de México, una clasificación normalmente aceptada es la que se en la Tabla 5.2

Tabla 5.2 Clasificación de centrales hidroeléctricas en función de su potencia instalada (SENER, Boletín de Energías Limpias Volumen 3, 2017)

Clasificación	Potencia instalada
Hidroeléctricas	=>30,000 kW
Pequeña	1,000-30,000 kW
Mini	100 -1,000 kW
Micro	<100 kW

Se muestra en la Tabla 5.3 las potencias instaladas con las que cuentan los fabricantes cuya tecnología se encuentra a un nivel de mayor desarrollo.

Tabla 5.3 Resumen de potencias instalables de aprovechamientos hidrocínéticos en fase precomercial y comercial

Tipo de turbina	Potencia en kW
Verdant Power	35
Underwater Electric Kite	400
RER Hydro	340
RivGen	30-50
Hydro Green Energy LLC	98
Tocado	42-98
SmartHydro Turbine	5
EnCurrent	5-10
HydroQuest	40-80
Guinard Energies	19

De las Tabla 5.1 y Tabla 5.2 se observa que la potencia en la que se ubica la actual tecnología en fase comercial, obedece a una clasificación de Micro Centrales Hidroeléctricas, esto salvo la máquina propiedad del fabricante *Underwater Electrica Kite*, quien cuenta con una turbina de 400 kW, sin embargo, es importante recalcar que la máquina referida es la que menor avance y desarrollo comercial cuenta de las referidas en la Tabla 5.1.

La capacidad instalada de los aprovechamientos hidrocínéticos es considerada como una debilidad de la tecnología, pues su baja capacidad instalada clasificada en microcentrales, puede no resultar atractiva para inversionistas, salvo muy específicos casos como aquellos mencionados en la sección de oportunidades.

5.3.2 Requiere de constante mantenimiento y operación

Aun cuando el personal que requerirá para su operación, es el mínimo necesario para desempeñar actividades relacionadas con el monitoreo de la energía generada, es necesario contemplar el mantenimiento que requiere al tratarse de un aprovechamiento que se encuentra operando a intemperie. Dentro de las actividades necesarias destacan:

- Mantenimiento por concepto de crecimiento de hierba y recolección de materia vegetal
- Mantenimiento y supervisión del anclaje
- Monitoreo en época de avenidas, en donde el anclaje de la máquina puede estar en riesgo de ser vencido por las fuerzas generadas por el agua

5.3.3 Implicaciones del medio en el que opera

Como se estudió anteriormente, las variables que influyen en la generación de energía hidrocínética son el área de barrido, la velocidad del fluido, y la densidad del fluido. Se muestran en la Tabla 5.4 una comparativa de los valores típicamente alcanzados en la

generación de energía entre los aprovechamientos hidrocínicos, frente a la energía de funcionamiento similar, que es la eólica.

Tabla 5.4 Variables de influencia en la generación de energía hidrocínica y sus valores

Variable	Turbinas eólicas	Turbinas hidrocínicas
Densidad del fluido	1.223 kg/m ³	1,000 kg/m ³
Velocidad nominal de operación	11-13 m/s	1.5-3.5 m/s
Diámetro de barrido	Hasta 126 m	Hasta 7 m

Se observa que la alta densidad del fluido del agua, se compensa por otro lado, con el hecho de que la generación eólica tiene la capacidad de desarrollar turbinas con un diámetro de barrido superior y a velocidades superiores. Esto se debe primordialmente a las características del medio. En el caso de ríos y canales, no es solo necesario considerar la velocidad del fluido, sino también el tirante del fluido asociado a dicha velocidad para entonces estar en posición de instalar una turbina.

Por otro lado, a medida que las velocidades del agua son más altas, pueden ocasionar fuerzas de arrastre sobre la máquina que involucren un sistema de anclaje más robusto y encarezca el sistema

5.3.4 Energía menos predecible que una central hidroeléctrica convencional

La certidumbre de la cantidad de energía generada por un aprovechamiento hidráulico con fines de generación de energía hidrocínica es inferior a la de las centrales hidroeléctricas con almacenamiento, debido a que estas últimas regulan su embalse y definen su operación a conveniencia del sistema, sin embargo

5.3.5 Tecnología desarrollada y fabricada en el extranjero, asociado al escaso conocimiento del funcionamiento de las máquinas en ríos mexicanos

Países como Estados Unidos, Canadá, Alemania, Francia, Holanda cuentan con empresas que desarrollan la tecnología. Las soluciones y avances tecnológicos a las que han llegado, aun cuando pueden ser comercializadas a otros países, se identifica la tendencia de esos diseños a las características propias del país y de las condiciones hidrológicas regionales, las cuales pueden no ajustarse a las necesidades de los ríos en territorio mexicano.

Estados Unidos realizó un estudio para la estimación del potencial hidrocínico estableciendo criterios que se ajustan a las características de sus ríos. Se presume que es necesario realizar una modificación a la metodología de tal forma que traiga beneficios e información sobre un potencial hidrocínico mexicano.

5.3.6 Eficiencia alcanzable inferior a 0.5

El Coeficiente de eficiencia integra aquellos factores que no permiten que sea extraída la totalidad de la energía cinética contenida en un fluido. En un sistema

que aprovecha la energía contenida en un fluido en movimiento, con un alto nivel de diseño, es posible alcanzar una eficiencia total del sistema entre 0.4 y 0.45 (Mathew, 2006), normalmente el factor de eficiencia es del 30%. Dentro de los factores más importantes que dan como resultado esta eficiencia, destaca el límite de Betz, el cual establece que la máxima energía extraíble por una turbina proveniente de un flujo a superficie libre, en condiciones ideales es el 59.3% de la energía disponible

5.3.7 Costos de kilowatt nivelado altos frente a otras fuentes de generación energía renovable

El costo de kilowatt nivelado de los aprovechamientos hidrocineéticos es alto frente a otras tecnologías de generación por fuentes renovables y sus costos son competitivos solo en sitios muy específicos. La Figura 5.31 integra los rangos de costos nivelados de la energía para diferentes tecnologías de energías renovables, y fue construida para el presente trabajo, por medio de la recopilación de datos de mayor consistencia de distintas fuentes de la literatura.

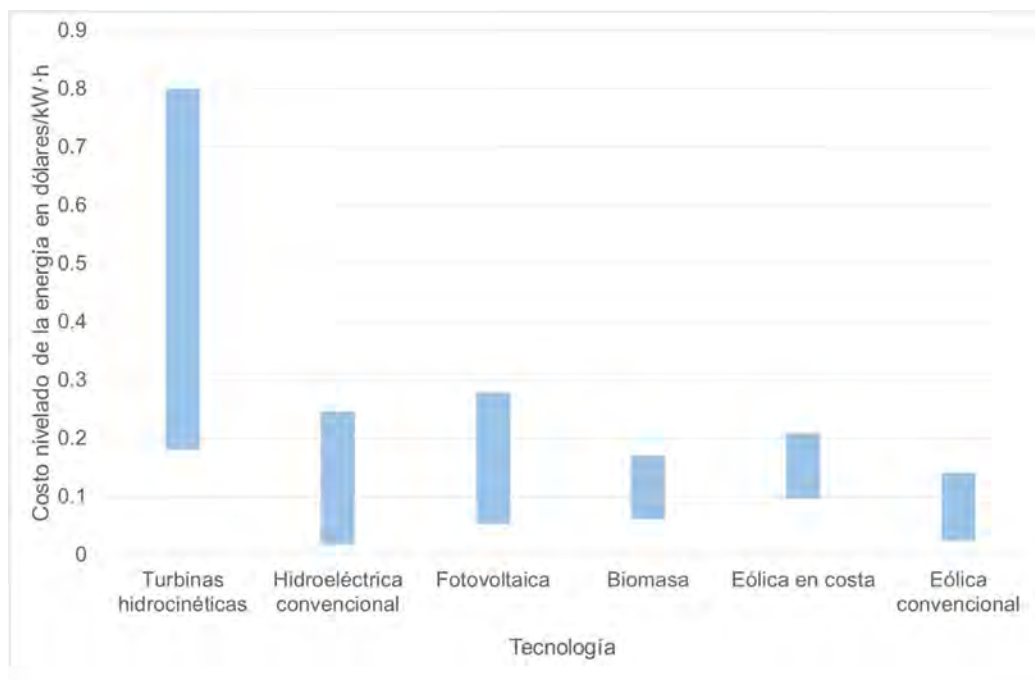


Figura 5.31 Costos nivelados de la energía de diferentes tecnologías vs turbinas hidrocineéticas

De la Figura 5.31 se observa que los costos de energía nivelada de los aprovechamientos hidrocineéticos son altos frente a otras fuentes de generación de energía renovable debido a que:

- Se trata de rangos bajos de potencia inestable, por lo que la economía de escala no le favorece a la tecnología
- Es una tecnología emergente por lo que el costo de producción de las primeras unidades es, naturalmente más alto ya que la inversión en la investigación, desarrollo e infraestructura es mayor. A medida que la producción continúa y aumenta, se prevé que los costos sean menores, gracias a la curva de aprendizaje. (Johnson & Pride, 2011)

5.3.8 Baja competitividad frente a las fuentes de energía que satisfacen la base de la curva de demanda de energía

Debido a que los aprovechamientos hidrocinéticos no almacenan energía, su posición entre las fuentes necesarias para satisfacer la curva de demanda mostrada en la Figura 4.7 se encontraría al lado de las centrales al hilo de corriente, nucleoelectricas y carboelectricas, las cuales poseen costos de producción muy bajos, y que no permiten, a corto plazo, competir a los altos costos nivelados de la energía de una tecnología emergente como los aprovechamientos hidrocinéticos.

5.4 AMENAZAS

5.4.1 Proyectos de baja carga al hilo de corriente pueden ser más atractivos

Los aprovechamientos hidráulicos al hilo de corriente cuentan con la ventaja de tener una mayor aceptación ambiental y social, toda vez que su diseño no contemple una cortina de gran tamaño, además de que integre una adecuada política de operación que no modifique sustancialmente el régimen natural del río. Estas consideraciones permiten que se minimice considerablemente el impacto ambiental y social relacionado con las afectaciones provocadas por un embalse de gran tamaño, en relación a un esquema convencional con almacenamiento. Es un hecho que para llevar a la realidad este tipo de proyectos, es necesaria la intervención humana en la naturaleza, por lo que inevitablemente existe cierto deterioro del medio ambiente. Aun así, estas consecuencias pueden deber de estar justificadas en términos de los costos y beneficios asociados a la central. (Scottish Environment Protection Agency, 2015).

De esta forma, una central hidroeléctrica al hilo de corriente puede ser atractiva técnica y económicamente siempre que:

- Las instancias interesadas en construir el proyecto, propongan acciones de mitigación, salvo que se demuestre con estudios sólidos que dichas medidas no son necesarias.
- Existan una adecuada gestión social en la zona
- Traiga beneficios a la región
- Exista la infraestructura adecuada para subir la energía a la red
- El costo nivelado de la sea competitivo en el precio con otras fuentes como la nuclear o el carbón

Con estos antecedentes, es posible que en determinados ríos una adecuada permanencia en sus gastos, sea económicamente más atractivo llevar a cabo una central hidroeléctrica al hilo de corriente que proporcione una mayor cantidad de energía, que un aprovechamiento hidráulico con fines de generación de energía hidrocinética en ríos.

5.4.2 Susceptibilidad a ser vandalizada

Los aprovechamientos hidrocinéticos son en su mayoría, elementos que pueden ser removidos por medios locales, lo cual se observó como una fortaleza. Sin embargo, y de no existir el compromiso social de la zona, los aprovechamientos hidrocinéticos pueden sufrir actos de robo o vandalismo, como se tiene la experiencia con estaciones hidrométricas.

5.4.3 Generación fotovoltaica y eólica a baja escala, como principal competencia

En lo que respecta a la electrificación rural y el abasto aislado, y atendiendo a los rangos bajos de potencias instalables que manejan los aprovechamientos hidrocinéticos y los cuales se han indicado en la Sección 5.3.2 , es posible que un sistema generación fotovoltaico o eólico puedan representar una opción económicamente más atractiva

5.4.4 Desconocimiento de sitios propensos a ser instalados

No existe en la actualidad, una evaluación a nivel alguno de las posibilidades que la tecnología tiene para su aprovechamiento en México, ni del potencial existente en el recurso hídrico del país. Esto complica la ubicación de regiones, cuencas, ríos o sitios específicos los cuales serían candidatos a ser aprovechados. Países como Canadá, Estados Unidos y Lituania han, o se encuentran realizando esfuerzos respecto al tema, con metodologías propias y las cuales se adaptan a las características de sus ríos.

5.4.5 Requiere del conocimiento de características específicas del sitio para determinar su viabilidad técnica

Contar con permanencia de gastos alto, no implica necesariamente que el sitio sea candidato a ser aprovechado, como se explica a continuación.

Como se ha comentado a lo largo del trabajo, las características más importantes que se deben conocer para el funcionamiento de una turbina hidrocinética, es la velocidad y el tirante. Se obtuvo información generada en sitio, de las correspondencias existentes entre distintos valores de gastos con sus velocidades, para las estaciones hidrométricas Salto de Agua, Oxolotlán y Pijijiapan.

Se graficaron las velocidades que corresponden a sus determinados gastos y se construyeron curvas de velocidad-gasto para los tres sitios. El resultado se aprecia en la Figura 5.32, Figura 5.33, Figura 5.34 y en la Tabla 5.5

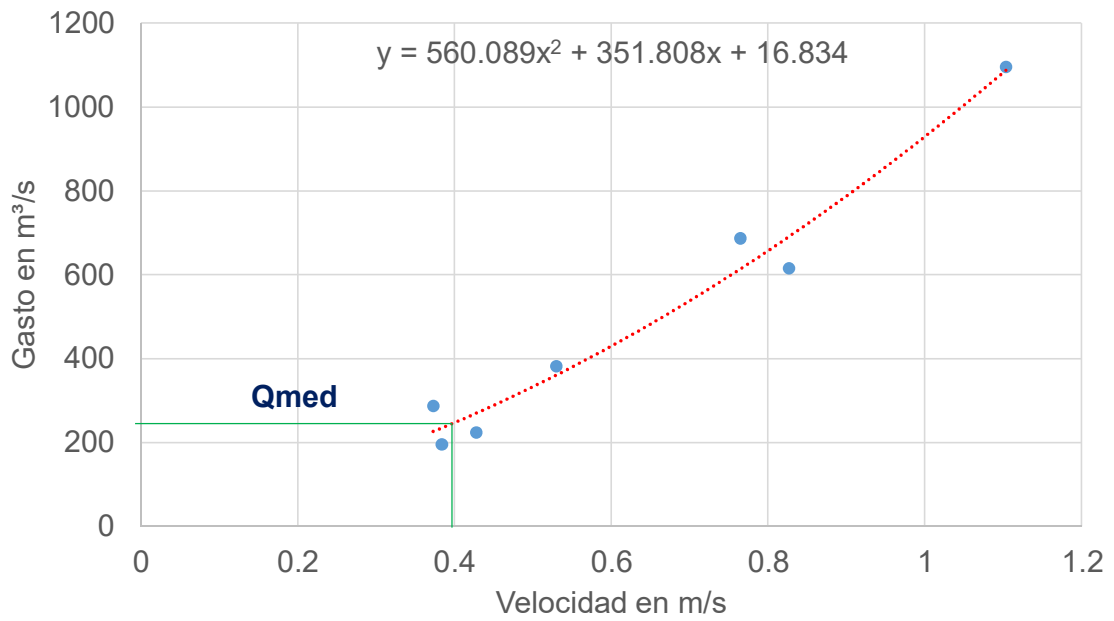


Figura 5.32 Curva de Gastos-Velocidades de la EH Salto de agua (Grijalva-Usumacinta)

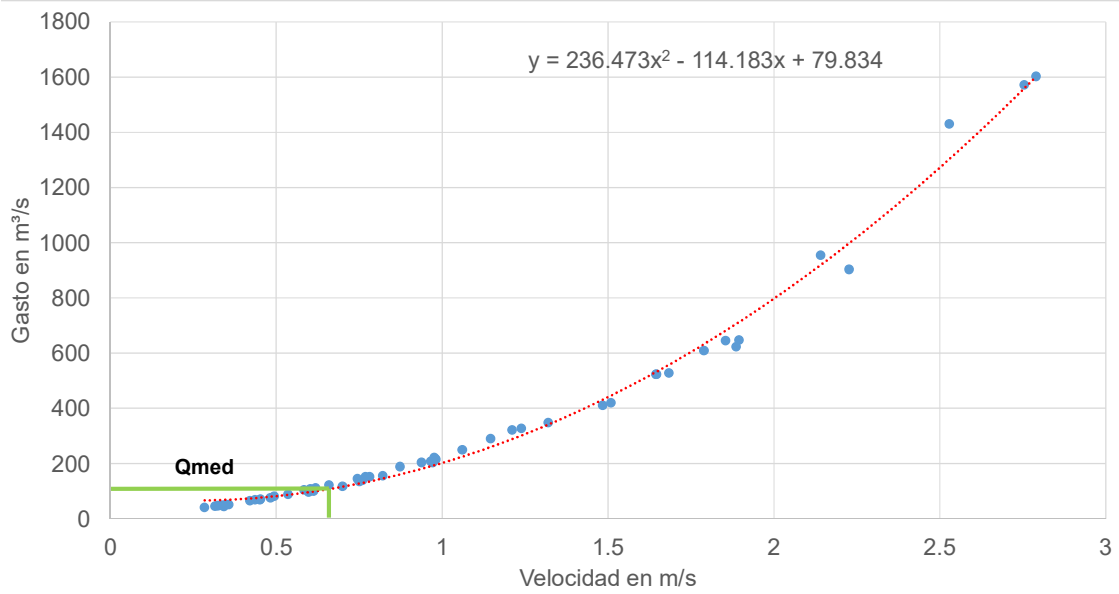


Figura 5.33 Curva de Gastos-Velocidades de la EH Oxotlán (Grijalva-Usumacinta)

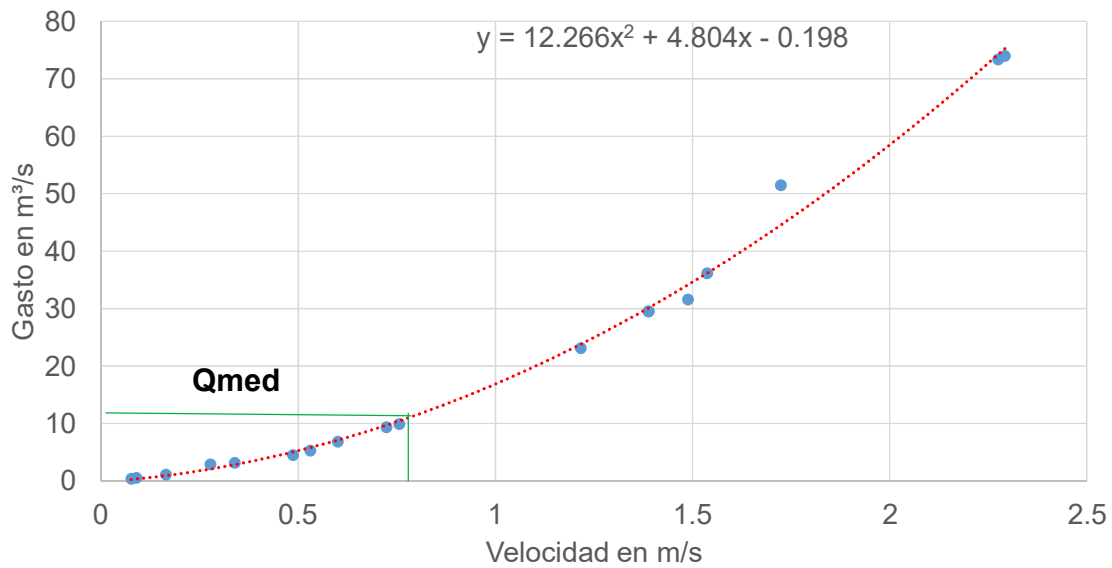


Figura 5.34 Curva de Gastos-Velocidades de la EH Pijijiapan (Costa de Chiapas)

Tabla 5.5 Velocidad asociada al gasto medio de EEHH Salto del agua, Oxolotlán y Pijijiapan

Estación Hidrométrica	Q _{medio} en m ³ /s	Velocidad en m/s
Salto de agua	204	0.4 m/s
Oxolotlán	86	0.65 m/s
Pijijiapan	12	0.76 m/s

De la Figura 5.32, Figura 5.33, Figura 5.34 y la Tabla 5.5, se observa que para estos puntos de medición los cuales se encuentran aforados por las correspondientes estaciones hidrométricas, las velocidades son altas solo en los casos en los que los gastos son significativamente superiores al gasto medio, de lo contrario, son inferiores a 1 m/s. Esto conduce a la idea de que los ríos con una alta permanencia en sus gastos proporciona certidumbre de la existencia de las condiciones mínimas para la operación de la máquina, incluso en épocas de estiaje, sin embargo, las condiciones de tirante y velocidad necesarias y propicias para la operación de la máquina, se encontrarán en función de las características propias del sitio en la que se pretenden instalar, tales como la pendiente y el área hidráulica, así como del material del que esté compuesto las márgenes del río.

5.4.6 Inexistencia de un marco legal que proporcione certidumbre a interesados en invertir en investigación y desarrollo de la tecnología

La actual legislación relacionada con aspectos ambientales, energéticos y del agua, menciona de manera genérica aquellas leyes aplicables a los aprovechamientos hidrocinéticos, sin embargo, no existe una postura clara sobre aquellos procedimientos, permisos y licencias que un aprovechamiento de este tipo debería seguir. Bajo el esquema convencional de adquisición de permisos para operar, se corre el riesgo de entrar en un círculo vicioso en donde no se cuenta con la información necesaria para solicitar una licencia, ya que para obtener esa información, es necesario la puesta en operación de la máquina, para

lo que se necesita una licencia. La inexistencia de un marco legal sólido que indique y de las facilidades para la obtención de permisos y licencias, representa un riesgo que muchos inversionistas no están dispuestos a correr, lo que afecta al desarrollo de la tecnología.

5.4.7 Falta de cooperación interinstitucional para la obtención de información

Para el presente trabajo, se realizaron gestiones para la obtención de información específica de estaciones hidrométricas con los dos organismos que las operan en el país. CONAGUA y CFE. En lo que respecta a CONAGUA, la obtención de información de gastos hidrométricos fue obtenida de la plataforma BANDAS, sin embargo, para las características geométricas específicas de la estación hidrométrica, se requiere de un procedimiento burocrático de gran duración, que involucra extender cartas y motivos a las autoridades. Se encontraron complicaciones, para conocer las características específicas de grandes canales de riego como su geometría y gastos transportados. En lo que respecta a las estaciones operadas por CFE, la información específica de las estaciones hidrométricas fue negada de manera determinante.

Esta situación complica la iniciativa de investigadores, instituciones y universidades para el estudio de los aprovechamientos hidráulicos con fines de generación hidrocínética en ríos

Es necesario desarrollar mecanismos, políticas públicas, acuerdos, que inviten a la participación, interacción de organismos operadores de bases de datos hidrométricas en el estudio de esta tecnología. De tener éxito puede fomentar a una sinergia en la que las instituciones encargadas de las estaciones hidrométricas, y los actores interesados en estudiar e implementar la tecnología, y quienes necesitan de información hidrométrica actualizada para la cuantificación del recurso.

5.4.8 Escombros flotantes

Se trata de, posiblemente la amenaza más grande hacia la tecnología en lo que respecta a su operación. Los grandes ríos aprovechables como el Usumacinta, presentan en época de avenidas un gran arrastre de escombros como troncos y rocas. Es necesario conocer el tipo de escombros que existe así como sus dimensiones, esto para la correcta ubicación de la máquina.

En el 2010, las demostraciones de operación de turbinas hidrocínéticas llevadas a cabo por Ruby y Eagle en Alaska fueron afectadas por escombros arrastrados por el río. Esto indica que desarrollar investigación en torno a solucionar los problemas relacionados con los escombros, son una alta prioridad para llevar las máquinas a operación. Así mismo, representa una ventaja el aprovechamiento de ríos controlados que aminoren significativamente la presencia de grandes escombros flotantes

6. DIAGNÓSTICO

6.1 Interpretación y resultados del análisis FODA

La interpretación y resultados derivados del análisis FODA, se presenta a manera de un diagnóstico. Con el fin de que el diagnóstico sea accesible, didáctico e integre el trabajo de manera concreta y sintetizada para su consulta, se eligió la matriz FODA como herramienta para la representación del diagnóstico, bajo el entendido de que el sustento de cada uno de los elementos enunciados en la matriz, se encuentra respaldado por las actividades previamente realizadas y descritas a lo largo del trabajo. De esta forma, la matriz FODA integrará los resultados como se muestra en la Figura 6.1

F ortalezas Características de la tecnología, que la coloca en una posición de ventaja sobre otras	D ebilidades Características de la tecnología que la pone en una posición de desventaja sobre otras.
O portunidades Elementos externos a la tecnología, que la tecnología puede aprovechar para su beneficio	A menazas Elementos externos a la tecnología, que pueden causar problemas a la tecnología

Figura 6.1 Estructura y contenido de la matriz FODA

Se presenta el diagnóstico, en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1 Diagnóstico a través de una matriz FODA

	Aspectos benéficos para la tecnología	Aspectos perjudiciales para la tecnología
Internas de la tecnología	<p style="text-align: center;">F O R T A L E Z A S</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ No requiere un embalse para operar ▪ Manejo y transporte accesible a sitios marginados ▪ Inversión menor en obra civil ▪ Energía renovable ▪ Energía limpia ▪ Mayor certidumbre que fuentes como la solar y eólica ▪ Mayor energía que una turbina eólica de dimensiones similares ▪ Precios competitivos en sistemas no conectados a la red, que sustituyan generadores diésel ▪ Menor impacto ambiental que centrales hidroeléctricas convencionales ▪ No necesita de estructuras adicionales como vertedor, pozo de oscilación, galerías de conducción, distribuidor, inyector o válvulas 	<p style="text-align: center;">D E B I L I D A D E S</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Factores de eficiencia bajos, gobernados por el límite de Betz ▪ Potencias instalables inferiores a 100 kW, en la clasificación de microcentrales hidroeléctricas ▪ Necesario el mantenimiento por concepto de crecimiento de hierba y recolección de materia vegetal ▪ Necesario el mantenimiento y supervisión del anclaje ▪ Monitoreo en época de avenidas, en donde el anclaje de la máquina puede estar en riesgo de ser vencido por las fuerzas generadas por el agua ▪ Diámetros y velocidades de operación de las máquinas, mucho menores que la generación eólica ▪ Posible cavitación ▪ Pueden causar daño a peces ▪ Puede afectar la navegabilidad ▪ Energía cara debido las bajas potencias inestables, por lo que la economía de escala no le favorece a la tecnología, adicional a que es una tecnología emergente ▪ Las fuerzas de arrastre generadas por el agua, pueden requerir de un sistema complejo de anclaje ▪ No almacena energía ▪ No es competitiva frente a las fuentes de energía que satisfacen la base de la curva de demanda de energía debido a su alto costo
Externos a la tecnología	<p style="text-align: center;">O P O R T U N I D A D E S</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ No existe competencia en México, respecto a la misma tecnología ▪ Estados como Chiapas, Oaxaca y Veracruz cuentan con gran recurso hídrico y carecen de energía ▪ Marco legal en favor de las energías renovables y limpias ▪ Venta de energía como Generador Exento debido a las bajas potencias ▪ Participación en el Mercado Eléctrico Mayorista a través de un Suministrador de Servicios Básicos ▪ Producción para abasto aislado ▪ Venta de Certificados de Energías Limpias ▪ Candidata a participar en el Fondo del Servicio Universal Eléctrico ▪ Una máquina puede generar 107 MWh/año, energía equivalente a la consumida por 100 viviendas rurales y que siendo generada a través de carbón, emitiría 107 toneladas de CO₂, y 96 a través de combustóleo. 	<p style="text-align: center;">A M E N A Z A S</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Proyectos de baja carga al hilo de corriente pueden ser más atractivos, dependiendo del sitio ▪ Daños por avenidas presentadas ▪ Colisión de cuerpos flotantes ▪ Susceptibilidad a ser vandalizadas ▪ Desconocimiento del potencial hidrocínético en México ▪ Sistemas fotovoltaico y eólicos a baja escala, pueden ser una mejor opción para la electrificación rural ▪ Falta de información para la estimación de potencial e identificación de sitios ▪ No existe una postura precisa de leyes ambientales y de uso de agua hacia la tecnología ▪ Centrales al hilo de corriente pueden ser una mejor opción dependiendo del sitio ▪ Tecnología debe ser importada desde el extranjero

Externos a la tecnología	O P O R T U N I D A D E S	A M E N A Z A S
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Complementarse con otras fuentes de energía renovable intermitente (solar y eólica) ▪ No requiere de la solicitud de una concesión de agua de acuerdo a la CONAGUA ▪ No requiere la elaboración de una Manifestación de Impacto Ambiental de acuerdo a SEMARNAT ▪ Existen localidades identificadas, no conectadas a la red y cercanas a ríos, las cuales podrían ser electrificadas y así mejorar la calidad de vida de sus habitantes ▪ Menor cantidad de estudios, licencias y tiempos de ejecución que una central hidroeléctrica al hilo de corriente ▪ Modificación y rectificación de secciones para alcanzar valores de velocidad y tirantes apropiados para su operación ▪ Ríos controlados ofrecen mayor facilidad para su instalación. Se recomienda estudiar zona aguas abajo de la C.H Peñitas por su alta permanencia de gastos turbinados ▪ Condiciones climatológicas permiten su interacción con fuentes de generación como la fotovoltaica ▪ Colaborar con los compromisos adquiridos del país en reducción de emisiones y generación de energía limpia 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Susceptible a ser vandalizada ▪ Flujo en régimen supercrítico pueden afectar su funcionamiento ▪ Gastos grandes no garantizan la existencia de sitios propicios a ser aprovechados, se necesitan características específicas del sitio como tirante y velocidad ▪ No existe un marco legal de procesos, permisos y licencias para los interesados en estudiar y llevar a la práctica la tecnología ▪ Falta de cooperación interinstitucional para la obtención de información hidrométrica, las características particulares de las estaciones, así como información referente a grandes canales de riego ▪ Desconocimiento de la interacción de aprovechamientos hidrocínicos con las especies que habitan en ríos candidatos a ser equipados

Tabla 6.1 Diagnóstico a través de una matriz FODA (continuación)

Se hace hincapié, en que el fundamento a cada uno de los enunciados que se integran en la matriz FODA puede ser consultado en los capítulos previos del presente trabajo. Con la existencia de este diagnóstico, se propone a continuación una estrategia que favorezca el estudio e implementación de la tecnología.

7. ESTRATEGIAS

Se define como estrategia, a la serie de acciones analizadas y estudiadas, encaminadas hacia un fin determinado.

Con base en el diagnóstico realizado en el Capítulo 6, se construyó una estrategia que integra acciones a realizarse, para favorecer la planeación, el estudio, el desarrollo y la ejecución de aprovechamientos hidráulicos con fines de generación de energía hidrocínética en ríos,

La estrategia se construyó una vez que se generó el diagnóstico a través de las herramientas de análisis FODA y PEST, se pretende proponer acciones concretas en determinados ejes, esto en favor de potencializar las Fortalezas y Oportunidades, y de minimizar las Debilidades y Amenazas,

Se plantea a continuación la realización de acciones en dos ejes estratégicos:

- Estimación del Recurso
- Tecnología

El eje estratégico de la Estimación del Recurso se enfoca en la estimación un potencial de energía hidrocínética en fases, mismas que deberán ser desarrolladas tanto por actores privados como públicos, y las cuales requieren distinta calidad y cantidad de información.

Se asume como un eje estratégico pues busca realizar trabajos que atiendan a la identificación de sitios a nivel regional, y local, que cuenten con las características suficientes y necesarias para la operación de la tecnología


El eje estratégico respecto a la Tecnología, se enfoca en proponer acciones que fomenten el estudio y conocimiento de los elementos que componen los aprovechamientos, su optimización, su mejora, y de manera muy importante, su interacción con el medio ambiente.

Se orienta también, en los aspectos legales de la tecnología, la cual, al ser emergente, no cuenta con una posición clara de la legislación hacia su funcionamiento, permisos y licencias que se deben gestionar para su puesta en operación.

Se acepta como un estratégico pues busca realizar investigación y trabajos enfocados a hacer más eficiente la tecnología, conocer sus efectos en el medio ambiente, y dar origen a un marco legal que dé certidumbre a inversionistas interesados en incursionar en la tecnología.

La Tabla 7.1 esquematiza los aspectos más importantes de la estrategia propuesta, continuando con el desglose de actividades más específicas que forman parte de un plan de trabajo preliminar

Tabla 7.1 Matriz integradora de la estrategia

E S T R A T E G I A					
ESTIMACIÓN DEL RECURSO					
Etapa	Potencial Teórico Convencional (PTC)	Potencial Recuperable (PR)	Potencial Teórico Hidrocinético (PTH)	Potencial Técnico Aprovechable	Potencial Práctico
Concepto	Energía física que se encuentra hipotéticamente disponible en río $P = \gamma Q \Delta H$	% del PTC recuperable bajo consideraciones de permanencia en gastos, velocidades, tirantes.	Potencial teórico existente de acuerdo al principio de la energía hidrocinética, medido en KW/m ²	% de PTH técnicamente factible aprovechar, utilizando determinado tipo de tecnología	% de PTA aprovechable, considerando aspectos económicos, ambientales, sociales y regulatorios
Detalle	- Regional		Local + 		
Ejecutor	Entidades Gubernamentales Centros de Investigación		Firmas de Ingeniería		

T E C N O L O G Í A			
Etapa	Diseño y optimización de la tecnología	Aspectos legales	Aspectos ambientales
Concepto	Incrementar la eficiencia y disminuir costos de producción, para favorecer su viabilidad económica	Creación de un proceso definido para la obtención de permisos y licencias, proporciona certidumbre a partes interesadas	Evaluación de los efectos de su interacción con los seres vivos y su influencia en el medio
Ejecutor	Entidades Gubernamentales Centros de Investigación Firmas de ingeniería	Entidades Gubernamentales	Entidades Gubernamentales Centros de Investigación Firmas de ingeniería

7.1 Estimación del recurso

La estrategia de acción en lo que respecta a la estimación del recurso, tiene como objetivo general, realizar una evaluación de la cantidad de energía aprovechable por medio del movimiento de los ríos. Para ello se clasifican diferentes tipos de potenciales los cuales se describen a continuación

7.1.1 Potencial Teórico Convencional

Cantidad media anual de energía física que se encuentra hipotéticamente disponible en río. El término *convencional* obedece a que utiliza la ecuación de potencia hidroeléctrica de la forma

$$P = \gamma * Q * \Delta H$$

Debido a que la energía hidroeléctrica convencional es una tecnología madura, existen diferentes metodologías para la estimación de un potencial teórico. Se caracterizan por ser útiles para realizar el reconocimiento y revisión de grandes áreas como cuencas, regiones hidrológicas y estados, y posteriormente identificar sitios atractivos para el desarrollo de proyectos hidroeléctricos.

- *Información mínima requerida para su elaboración*
 - Modelos Digitales de Terreno escala 1:50,000
 - Información hidrométrica de gastos medios diarios
- *Actividades sustanciales a realizar*
 - Manipulación por medio de Sistemas de Información Geográfica de la información
 - Estimación de elevaciones de terreno por segmento de estudio
 - Estimación de gastos por segmento de estudio
- *Resultado esperado*
 - Plataforma de Sistema de Información Geográfica de acceso público y gratuito, que integre elementos como
 - Gasto medio por tramo de río
 - Pendiente por tramo de río
 - Potencial media por tramo de río
 - Información en formato descargable, que permita a los usuarios e interesados, la manipulación de los archivos para la investigación, desarrollo e investigación de nuevos proyectos.

En la actualidad, existe una plataforma en SIG creada por SENER de nombre INEREL, que es un inventario de proyectos hidroeléctricos para todo el país, sin embargo, los datos otorgados por el SIG son de carácter informativo y de proyectos hidroeléctricos en concretos, esto limita al usuario para poder utilizar la información a conveniencia para la identificación de nuevos proyectos.

Importante mencionar que el potencial teórico convencional es parte del insumo para estimar, posteriormente, el potencial asociado a la extracción de energía hidrocínética

7.1.2 Potencial Recuperable

Porcentaje estimado del potencial teórico convencional, el cual podría ser recuperado haciendo consideraciones técnicas de gabinete como la permanencia en los ríos, tirantes y velocidades estimadas.

La metodología para calcular el potencial recuperable, puede tomar elementos del trabajo realizado por EPRI, en 2012; sin embargo, es necesario realizar una revisión de las consideraciones realizadas por el trabajo referido, y asumir las propias para aplicarlas a los ríos en territorio mexicano.

El objetivo de la metodología propuesta por EPRI, es la estimación de un potencial recuperable por aprovechamientos hidráulicos con fines de generación de energía hidrocínética en ríos, a partir de un potencial de energía hidroeléctrica convencional. Para esto, la idea central del estudio realizado por EPRI en 2012 propone el cálculo de un Factor de Recuperación, el cual represente la cantidad de energía hidroeléctrica convencional, con la por medio de la utilización de turbinas hidrocínética.

De acuerdo al planteamiento de EPRI, el Factor de Recuperación deberá estar en función del gasto y la pendiente de los tramos de río en cuestión. (Electric Power Research Institute, 2012)

Las consideraciones más importantes, realizadas por EPRI para el cálculo del Factor de Recuperación son las siguientes

- Se descartó del análisis, ríos con gasto medio anual inferior a 28.1 m³/s.
- Se definieron 2 metros de tirante como valor mínimo para la operación de turbinas hidrocínéticas y 0.5 m/s como valor mínimo de velocidad, para una permanencia de gastos del 95%.
- Para configuraciones en arreglo, se definió una distancia mínima de 2 diámetros longitudinales entre máquina y 1 diámetro de separación lateral.
- Se definió el diámetro de la máquina, como el 80% del tirante que se presenta para una permanencia del 95%.

Con las consideraciones anteriormente descritas, y desarrollando la metodología referida, EPRI estimó un Potencial Recuperable de 120 TWh/año para territorio estadounidense.

Se identifica la metodología desarrollada por EPRI, como el estudio más profundo existente a la fecha a nivel regional.

- *Información mínima requerida para su elaboración*

- Potencial Hidroeléctrico Convencional
- Información proveniente de estaciones hidrométricas como

-
- Curva de elevaciones-gastos
 - Curva de elevaciones-áreas
 - Curvas de permanencia de gastos en diferentes sitios
 - Características geométricas de las secciones transversales que componen la red de estaciones hidrométricas
 - *Actividades a realizar*
 - Desarrollo de metodología para la evaluación de energía hidrocínética recuperable en ríos. Se propone revisar como base la metodología desarrollada por EPRI misma que puede ser sintetizada en las siguientes actividades específicas
 - Definir el área de estudio (País, Región Hidrológica, Estado, Cuenca)
 - Definir el gasto medio a partir del cual será necesario descartar cierto número de ríos, de acuerdo a la hidrología correspondiente del área de estudio
 - Incluir en la identificación, grandes canales de riego para su aprovechamiento
 - Definición de tirante mínimo y velocidad mínima para la operación de turbinas hidrocínéticas
 - Definición de la permanencia de gastos necesaria, que garantice el tirante mínimo y la velocidad mínima para la operación de las máquinas
 - Definición de separación mínima lateral y transversal de máquinas para su correcto funcionamiento
 - Definición de diámetro, considerado como un porcentaje del tirante que se presenta para un gasto de permanencia alto (Diámetro considerado como el 80% del tirante que se presenta para una permanencia del 95%)
 - Determinación de una sección transversal tipo y su n de manning, para modelar por medio de software diferentes combinaciones de gastos y pendientes y observar su comportamiento hidráulico. Se le denominarán tramos genéricos.
 - Análisis de la información geométrica de las secciones transversales de las estaciones hidrométricas existentes, para la determinación de una sección transversal tipo que funcione de manera aceptable
 - Análisis de sensibilidad sobre la influencia de la variación en la geometría de la sección y la n de Manning en los resultados finales
 - Estimación del Potencial Recuperable para los tramos genéricos,

en función de los resultados de las condiciones hidráulicas de la modelación de las diferentes combinaciones de gasto y pendiente, y la cantidad y características de las máquinas instalables

- Estimación del Potencial Teórico Convencional para los tramos genéricos
- Cálculo de Factor de Recuperación como:

- $Factor\ de\ Recuperación = \frac{Potencial\ Aprovechable}{Potencial\ Teórico\ Convencional}$

- Construir una ecuación del Factor de Recuperación que se encuentre en función de la pendiente y el gasto, misma que será aplicada a los diferentes segmentos de río del área de estudio, toda vez que se generó la información necesaria en la fase de Potencial Teórico Convencional.
- Aplicar el factor de recuperación al área de estudio del Potencial Teórico Convencional
- Determinación del Potencial Recuperable del área de estudio
- Integración de resultados en plataforma de Sistema de Información Geográfica para su consulta y acceso público

EPRI definió los propios criterios mencionados en la estimación del Factor de Recuperación, en base a la necesidad energética y las características de sus ríos.

La situación energética en México es completamente diferente, adicional a las características de sus ríos, lo que conduce a la necesidad de hacer una evaluación sobre los criterios propios del país para la estimación del Factor de Recuperación, de otra manera, se corre el riesgo de descartar ríos que de otra forma podrían aprovecharse.

- *Resultado esperado*

- Potencial Recuperable en el área de estudio
- Plataforma en SIG de libre acceso que permita al usuario, identificar aquellos sitios con una mayor cantidad de potencial recuperable en determinados sitios que contemplen actividades productivas, falta de energía e impulsar la dirección de esfuerzos hacia zonas en las que se observan posibilidades de aprovechamiento, y en consecuencia, sea conveniente invertir en investigación para la siguiente etapa de estudios

7.1.3 Potencial teórico hidrocínético

Se define como el potencial teórico existente de acuerdo al principio de la energía hidrocínética.

Se propone que su principal parámetro de medición, sea el parámetro de Densidad de Potencia, debido a que se concentra en aspectos relacionados a la estimación del recurso energético en el río, sin involucrar aspectos relacionados

con la máquina, su eficiencia, y su posibilidad de instalarlas en arreglo.

El objetivo de la estimación de un potencial teórico hidrocínético, es el de evaluar la potencia teórica por concepto de la velocidad del agua para diferentes secciones, y de esta forma elegir aquellas secciones o tramos que presenten una condición más atractiva para su estudio a mayor detalle, y la instalación de un eventual aprovechamiento hidráulico con fines de generación de energía hidrocínética en ríos.

Para su estimación, requiere información de campo. Se visualiza como una etapa de estudios consecuente al Potencial Recuperable, y que puede derivarse de la identificación de zonas atractivos de acuerdo a la etapa anterior; sin embargo, es importante recalcar que la realización de esta etapa de estudios puede ser realizada de manera independiente a la fase anterior, toda vez que se identifique de parte del interesado, la posibilidad de aprovechar determinada área de estudio que puede tratarse de un tramo de río, o un río en su totalidad.

- *Información mínima requerida para su elaboración*

- Gastos medios diarios
- Velocidad media asociada a gastos en las secciones
- Tirante de la sección asociada a gastos en las secciones
- Velocidad asociada tirantes en las secciones
- De no contarse con la información anteriormente mencionada, es necesario generarla, lo que implica la siguiente información
 - Batimetría de la zona, o conocimiento de del comportamiento del terreno debajo de la lámina de agua
 - Información para calibración y validación de información calculada
 - Curvas de elevaciones-gastos en determinados puntos

- *Actividades sustanciales a realizar*

- Estimación de velocidad media por sección y tirante por sección
 - Modelación hidráulica en software
 - Construcción de modelo
 - Calibración
- Cálculo del parámetro de Densidad de Potencia para las secciones que componen la zona de estudio
- Relación del cálculo del parámetro de Densidad de Potencia por sección con el tirante presentado
- Selección de los tramos mejor calificados para su aprovechamiento a partir de los siguientes criterios
 - Densidad de Potencia atractiva para valores altos de permanencia

de gastos

- Tirante mínimo necesario para valores altos de permanencia de gastos

Un ejemplo de las actividades a realizar para la estimación del Potencial Técnico Hidrocinético se puede observar a mayor detalle en la Sección 2.5.3

- *Resultado esperado*

Selección de tramos de río y zonas que integren secciones transversales que arrojen condiciones de tirante y velocidades apropiadas para la operación, así como valores de densidad de potencia atractiva para su aprovechamiento.

7.1.4 Potencial Técnico Aprovechable

Porcentaje del Potencial Teórico Hidrocinético que es técnicamente factible aprovechar, utilizando determinado tipo de máquina dentro de la tecnología.

- *Información mínima requerida para su elaboración*

- Estimación de información horaria de gastos
- Secciones o tramos atractivos, provenientes del Potencial Teórico Hidrocinético
- Inventario de máquinas existentes en el mercado y disponibles comercialmente
- Características técnicas de las máquinas que integren información como
 - Dimensiones
 - Velocidad de inicio de operación
 - Velocidad nominal
 - Velocidad de corte
 - Eficiencia del sistema

- *Actividades sustanciales a realizar*

- Recopilación y análisis de la información de las máquinas disponibles comercialmente
- De acuerdo al comportamiento de los gastos en el río, realizar la definición del diámetro óptimo para maximizar aprovechamiento de la energía hidrocinética, y maximizar el número de horas de operación de la máquina

Un ejemplo de las actividades a realizar para la estimación del Potencial Técnico Hidrocinético se puede observar a mayor detalle en la Sección 2.5.

- *Resultado esperado*

- Diámetro óptimo de la máquina, mediante el cual se maximiza la producción de energía, y se maximiza el número de horas de operación, de acuerdo a las condiciones de velocidad y tirante, impuestos por el

comportamiento del río aprovechado.

- Potencia
- Energía media anual generada
- Horas de operación

7.1.5 Potencial práctico

Potencial técnico aprovechable, considerando aspectos económicos, ambientales, sociales y regulatorios

- *Información mínima requerida para su elaboración*

- Diámetro óptimo de la máquina, mediante el cual se maximiza la producción de energía, y se maximiza el número de horas de operación, de acuerdo a las condiciones de velocidad y tirante, impuestos por el comportamiento del río aprovechado.
- Información referente a la cantidad de energía generada, y horas de operación.
- Costo de las máquinas candidatas a ser utilizadas
- Características técnicas específicas de las máquinas
- Elementos secundarios para el funcionamiento del aprovechamiento (Inversor, Regulador, Conducción, Disipador de energía etc.)
- Panorama de la situación social de la zona
 - Actividades productivas
 - Uso de suelo
 - Actividades de pesca y navegación
 - Conflictos sociales
- Panorama de la situación ambiental de la zona
 - Especies
 - Temporalidad de las especies
 - Zona de área protegida
- Situación energética de la zona en la que se tiene la intención de desarrollar el proyecto
- Información de sedimentos y escombros del río
- Inspección de la topografía del sitio
- Conocimiento de la geología del sitio
- Regulación ambiental, legal, energética y de uso de agua aplicable

- *Actividades sustanciales a realizar*

- Caracterización y Diagnóstico Social de la zona
- Caracterización y Diagnóstico Ambiental de la zona
- Plan para la obtención de permisos legales y ambientales
- Selección preliminar de la máquina a ser utilizada
- Elaboración de esquemas de destino y venta de la energía generada por el aprovechamiento hidráulico con fines de generación de energía hidrocínética en ríos
 - Electrificación rural
 - Actividades productivas en el sitio
 - Contrato de Cobertura Eléctrica
 - Bombeo
- Presupuesto preliminar del proyecto obedeciendo a costos referenciales
- Estimación del Costo Nivelado de la Energía en $\$/kW \cdot h$
- Estimación del Costo de la Potencia Instalada en $\$/kW$
- Evaluación económica y financiera
 - Costo/Beneficio
 - Valor Presente Neto
 - Tasa Interna de Retorno
 - Retorno de Capital de Inversión
- Decisión sobre la viabilidad preliminar de la situación Técnica, Social, Ambiental y Económica del proyecto

En el caso de ser un proyecto viable por un margen considerable

- Elaboración de la ingeniería de detalle del proyecto que integre aspectos como
 - Logística del transporte de la máquina y sus elementos al sitio
 - Definición del sistema de anclaje y su proceso constructivo
 - Definición de la estructura necesaria para el control de la energía
 - Esquema de operación y mantenimiento
- Presupuesto definitivo del proyecto
- Definición de los indicadores económicos definitivos del proyecto
- Planos y especificaciones para su implementación

Las actividades y la información propuesta dependerán del tamaño del aprovechamiento hidráulico con fines de generación hidrocínética en ríos, siendo posible omitir información y actividades, toda vez que no se consideren

necesarias.

- *Resultado esperado*

Factibilidad Técnica y Económica del proyecto

- *Actores involucrados y sus responsabilidades*

Se muestran en la Tabla 7.2 los actores involucrados y sus responsabilidades a desempeñar, en el eje estratégico de la estimación de recursos.

Tabla 7.2 Matriz de actores involucrados y sus responsabilidades en el eje estratégico de la estimación del recurso

	Potencial Teórico Convencional	Potencial Recuperable	Potencial Teórico Hidrocinético	Potencial Técnico Hidrocinético	Potencial Práctico
Proveer recursos económicos	SENER Bancos de Desarrollo Fondos	SENER Bancos de Desarrollo Fondos	Promovente	Promovente	Promovente
Proveer información	CFE CONAGUA INEGI	CFE CONAGUA INEGI	CFE CONAGUA INEGI Empresas de topografía	Empresas dueñas de la tecnología	Empresas dueñas de la tecnología INEGI SEMARNAT CONAGUA
Trabajo técnico operativo	CFE IMTA UNIVERSIDADES Y CENTROS DE INVESTIGACIÓN	CFE IMTA UNIVERSIDADES Y CENTROS DE INVESTIGACIÓN	Firma de Ingeniería	Firma de Ingeniería	Firma de Ingeniería
Construcción y operación de plataforma SIG	CFE IMTA UNIVERSIDADES Y CENTROS DE INVESTIGACIÓN	CFE IMTA UNIVERSIDADES Y CENTROS DE INVESTIGACIÓN			
Conformidad social					Habitantes de la zona del proyecto
Gestión de permisos					SEMARNAT CONAGUA SENER

De la Tabla 7.2 se identifica la importancia del papel desempeñado por instituciones públicas en las etapas tempranas de la estimación del recurso.

7.2 Tecnología

En la actualidad, de acuerdo a lo observado en la Sección 2.3, la tecnología existente ha sido desarrollada por países como Estados Unidos, Francia, Alemania y Holanda.

Adicional a la estimación del recurso, se requieren acciones en lo que respecta al estudio y desarrollo de la tecnología. Se proponen las siguientes acciones

7.2.1 Diseño y optimización de la tecnología para extracción de energía

El trabajo referente al diseño y optimización de la tecnología es tan importante como la estimación del recurso. El avance en este tema, es crucial para lograr que los aprovechamientos hidráulicos con fines de generación hidrocínética en ríos, sea económicamente viable. Para eso se requiere la participación de diferentes disciplinas, que colaboren en el diseño y la modelación numérica y física de alternativas.

- *Disciplina mecánica*

- Diseño hidrodinámico del sistema de propulsión
- Diseño del rotor
- Diseño del ducto para los casos en que la turbina lo requiera
- Flotación
- Cavitación en las aspas
- Aspectos estructurales de su funcionamiento
- Estimación de la vida útil de la máquina

- *Disciplina hidráulica*

- Efectos de la presencia de la máquina en el medio
 - Tirante
 - Velocidad
 - Evaluación en el cambio del régimen del flujo
- Comportamiento de aprovechamientos hidráulicos con fines de generación de energía hidrocínética en arreglo

- *Disciplina eléctrica*

- Control de la electricidad proveniente de la turbina
- Seguridad del sistema
- Eficiencia en el generador para bajas velocidades de rotación
- Protección del sistema para velocidades altas

- *Resultado esperado*

Diseño y optimización de la tecnología: Incrementar la eficiencia y disminuir costos de producción, para favorecer su viabilidad económica

7.2.2 Aspectos legales

Aun cuando la ley indica de manera genérica, los trámites necesarios para obtener la autorización de parte del Estado para poner en marcha proyectos de infraestructura energética, se propone ser específico sobre la creación de la dirección que debe seguir para obtener dicha autorización, esto con el objetivo de tener un marco legal que proporcione certidumbre en los interesados en invertir en la investigación y desarrollo de la tecnología, de que los que los proyectos, de ser logrados, se podrán operar. Se proponen las siguientes acciones específicas:

- *Actividades a realizar*

- Definir la autoridad responsable de tomar las decisiones en lo que respecta al desarrollo de aprovechamientos hidráulicos con fines de generación de energía hidrocínética en ríos, sin excluir la injerencia de otras dependencias involucradas.
- Establecer aquellos permisos o licencias que otorgarán otras dependencias ajenas a la autoridad responsable previamente definida.
- Procurar que bajo ninguna circunstancia se dupliquen trámites o se extiendan innecesariamente el tiempo de gestión de licencias.
- Establecer un esquema de permisos, que de manera gradual permitan demostrar la factibilidad comercial de los aprovechamientos hidráulicos con fines de generación de energía hidrocínética en ríos, así como de las implicaciones ambientales que tienen estos sistemas. Se propone tomar como base el criterio de la Comisión Federal Reguladora de Energía de los Estados Unidos (FERC) quienes contemplan dos tipos de licencia.
 - Licencia Preliminar como una fase de estudio que permita, por un lado, tener la preferencia en el sitio sobre el que se va desarrollar el estudio de esta forma no exista conflicto alguno entre promoventes interesados, y por el otro, la obtención de información relevante a la operación de la tecnología, toda vez que el proyecto reúna las siguientes características.
 - Baja potencia
 - Licencia a corto plazo
 - El sitio del aprovechamiento no es tiene una alta sensibilidad ambiental o social
 - El proyecto no represente riesgo alguno para los habitantes de la región y las especies que habitan en el ecosistema
 - El proyecto sea removible una vez que termine su período de

-
- evaluación, y este no genere cambios en el ecosistema
- El aprovechamiento se encuentre equipado para el monitoreo de su operación, y proporciona información para el análisis de su impacto ambiental
 - Las instalaciones propuestas serán utilizadas solo durante el tiempo necesario para realizar los estudios requerido
 - Establecer a la Licencia de Operación, como una fase posterior a la Licencia para Operar, una vez que se haya recopilado la información necesaria, que permita al órgano regulador, tomar la decisión sobre la factibilidad de desarrollar el proyecto.
- Llevar un monitoreo sobre el acreedor del permiso para verificar que la licencia preliminar está siendo ejercida responsablemente.
 - Adecuar los permisos necesarios en función de la capacidad instalada, el tamaño del proyecto y la intervención que tenga en el medio ambiente.
 - Elaboración de un esquema para que la generación de energía generada en el sitio no genere estabilidad en la red, y así mismo, ser aprovechada y vendida con el objetivo de financiar los estudios.
 - Construcción de un inventario de acceso público que integre los sitios que cuentan con una Licencia Preliminar o de Operación, e información técnica sobre las características del aprovechamiento como:
 - Tipo de turbina
 - Potencia estimada
 - Generación estimada
 - Estado de la licencia

Se propone la integración del inventario en un Sistema de Información Geográfica

- *Resultado esperado*

Creación de un marco legal con responsabilidades definidas para la obtención de permisos y licencias que uniformice criterios bajo los cuales, los aprovechamientos hidrocineéticos puedan ser estudiados y puestos en operación, y de esta forma, favorecer la participación de inversionistas.

7.2.3 Aspectos ambientales

El tema ambiental de los aprovechamientos hidrocineéticos es un tema de gran sensibilidad, que es decisivo para el futuro de la tecnología. Se requieren definir acciones en lo que respecta a la investigación y evaluación de los efectos de aprovechamientos hidráulicos con fines de generación de energía hidrocineética en ríos, en el medio acuático.

- *Actividades a realizar*

- Estudio de la interacción de las máquinas con la fauna

-
- Probabilidad de encuentro de especies de diferente tamaño con turbinas
 - Estimación de daño sobre las especies ante posible colisión
 - Obstrucción admitida por las especies para su adecuado tránsito, en función del área hidráulica
 - Perturbación del medio acústico, y su influencia en las especies
 - Interacción de las máquinas con la vegetación
 - Depósito de sedimentos y arrastre de escombros
 - Crecimiento vegetal en los elementos de la máquina
 - Impacto ambiental para aprovechamientos individuales
 - Impacto ambiental para aprovechamientos en arreglo
 - Efectos en el régimen del río aguas abajo
 - *Resultado esperado*

Realizar trabajos de investigación que favorezcan a la evaluación de los efectos de la interacción de los aprovechamientos hidrocinéticos con seres vivos y en el medio

- *Actores involucrados y sus responsabilidades*

Se muestran en la Tabla 7.3 los actores involucrados y sus responsabilidades a desempeñar, en el eje estratégico del estudio de la tecnología.

Tabla 7.3 Matriz de actores involucrados y sus responsabilidades en el eje estratégico del estudio de la tecnología

	Diseño y Optimización	Aspectos legales	Aspectos ambientales
Proveer recursos económicos	SENER Bancos de Desarrollo Fondos Inversionistas	SENER	Firmas de ingeniería Inversionistas Centros de Investigación de Energía
Proveer información	Centros de Investigación de Energía	Firmas de ingeniería Empresas propietarias de la tecnología Promovente	SEMARNAT INEGI INECOL
Trabajo técnico operativo	Laboratorios de pruebas Firmas de Ingeniería Centros de Investigación		Laboratorios de pruebas Firmas de Ingeniería
Trabajo legislativo y normativo		SENER Comisión Reguladora de Energía Centros de Investigación de Energía	SEMARNAT
Gestión de licencias		Firmas de Ingeniería Promovente del proyecto	
Autorización de licencias		SENER Comisión Reguladora de Energía Centros de Investigación de Energía	SEMARNAT

8. CONCLUSIÓN

Se concluye el presente trabajo, estableciendo que los aprovechamientos hidráulicos con fines de generación de energía hidrocínética en ríos atiende a necesidades diferentes a las que se enfoca la energía hidroeléctrica convencional. Los aprovechamientos hidrocínético, a corto plazo, se visualizan como proyectos que satisfacen necesidades energéticas locales es decir, en el sitio del aprovechamiento, mientras que las grandes centrales hidroeléctricas convencionales, una parte fundamental de la seguridad energética de la nación. De esta forma, **los aprovechamientos hidrocínéticos y las centrales hidrioeléctricas convencionales deben de visualizarse como tecnologías complementarias y no sustitutas.**

El marco-entorno político resulta ser favorecedor para el desarrollo de la tecnología, debido a que la actual legislación contempla impulsar y promover las energías limpias y renovables.

El macro-entorno económico no resulta ser favorecedor para el desarrollo de la tecnología, ya que es emergente, sus costos nivelados de la energía son altos, y existen tecnologías cuyos costos pueden ser más competitivos.

El macro-entorno social resulta ser favorecedor para el desarrollo de la tecnología, ya que existen estados con una gran carencia de energía, y un gran recurso hídrico, y que permitiría proveer de energía a zonas no interconectadas a la red, impulsando el desarrollo social de la región. Se visualiza a la tecnología como una herramienta social para promover proyectos de energías, además que al no generar afectaciones territoriales, facilita su gestión social.

El macro-entorno tecnológico resulta ser favorecedor para el desarrollo de la tecnología, pues las tecnologías como fotovoltaica y eólica presentan una mayor intermitencia que un aprovechamiento hidrocínético por lo que existe la oportunidad de complementar su operación en sistemas híbridos, con un adecuado estudio de la climatología de la zona, además que la obra civil asociada a otras tecnologías renovables es mayor.

Algunos de los retos más grandes a enfrentar, para desarrollar una industria en torno a la generación de energía hidrocínética son:

- Determinar la viabilidad tecnológica
- Determinar la viabilidad económica
- Determinar la viabilidad operacional

La adecuada organización y priorización de las actividades descritas en el Capítulo 7, en la estrategia, la asignación de responsabilidades a los actores interesados, la gestión y asignación de recursos, favorecerían el desarrollo e implementación de aprovechamientos hidráulicos con fines de generación de energía hidrocínética en ríos, en miras de convertir a México en un país que tome la iniciativa sobre el desarrollo de esta tecnología

Apéndice

Definiciones y conceptos generales asociados a la energía

Trabajo

Se trata de la magnitud física del desplazamiento de un cuerpo cuando se aplica una fuerza sobre él. Es una magnitud escalar la cual se define como:

$$W = F \cdot d$$

En donde:

W Trabajo, en J

F Fuerza, en N

d Distancia, en m

De la expresión anterior es posible observar que, la cantidad de trabajo será directamente proporcional al valor de la fuerza y de la distancia involucrada. De esta forma, un objeto transportado a una mayor distancia, aplicando una fuerza menor sobre él, podrá tener una cantidad similar de trabajo que el de un objeto que es transportado a una menor distancia, pero al cual se le aplica una fuerza mayor.

El trabajo es una medida de transferencia de energía, por lo que los términos de trabajo y energía se encuentran estrechamente ligados

El origen de la palabra proviene del latín “*tripalium*”, que significa “tres palos” y era un instrumento de tortura en la antigüedad. El uso de esta palabra, se relacionó con una incomodidad, una molestia, la realización y ejecución de una actividad que demanda incomodidad y esfuerzo. Como se aprecia, el origen de la palabra aparenta ser lejano al significado que tiene para la física y mecánica, sin embargo, es posible relacionar al trabajo como una perturbación de un objeto de su estado inicial. (Chile, Etimologías, 2017)

El sistema internacional definió la unidad de trabajo (energía) como el joule (J), en honor al físico británico James Prescott Joule, quien a través de sus experimentos estudió la conversión del calor en trabajo, y del trabajo en calor. (Encyclopedia Britannica, 2017)

Energía

Se define como la capacidad de realizar trabajo, de producir movimiento, de generar cambio en un sistema. La energía se encuentra contenida en la naturaleza de diversas formas (movimiento del agua, movimiento del viento, combustibles fósiles, luz solar, altas temperaturas del subsuelo, elementos químicos etc.) y que por medio de la utilización de diferentes tecnologías, (turbinas hidráulicas, turbinas eólicas, plantas de combustión, paneles solares, centrales geotérmicas, plantas nucleares) es posible su transformación hacia otras formas de energía como la eléctrica y la mecánica, de manera que pueda ser aprovechada para la producción de bienes y servicios.

La conversión, uso, almacenamiento y transferencia de la energía ha sido objeto y ha dado pie a la creación de industrias en torno a cada una de las mencionadas actividades.

Obedece a la primera Ley de la Termodinámica, en donde se establece que la energía no se crea ni se destruye, solo se transforma. El origen de la palabra energía viene del griego *en* que significa dentro o contener, y *ergon* (acción o trabajo), y estos vocablos forman otros como *energeia* (ἐνέργεια), que significa actividad, que tiene trabajo o capacidad para realizar trabajo (Chile, 2017).

A continuación se comentan las unidades de mayor uso para la representación de la energía.

- *Joule*

El Joule (J) es una unidad derivada de energía, la cual expresa cantidad de energía transferida a un cuerpo, cuando una fuerza equivalente a un newton actúa de tal manera que logra un desplazamiento de un metro. Se trata de una unidad perteneciente al Sistema Internacional

- *Caloría*

La caloría (Cal) se define como la cantidad necesaria de energía para elevar un gramo de agua, un grado centígrado. Es normalmente utilizada para describir la energía proveniente de los alimentos.

- *British Thermal Unit*

British Thermal Unit (BTU) es una unidad que describe la cantidad necesaria de energía para elevar una libra de agua, un grado Fahrenheit. Se trata de una medida tradicional, la cual es normalmente utilizada para describir procesos de calentamiento y enfriamiento en donde se involucra el trabajo realizado por máquinas.

- *Kilowatt-Hora (kW·h)*

El kilowatt hora (kW·h) se define como la cantidad de energía empleada en sostener un kilowatt de potencia durante una hora. Unidad con la que comúnmente se expresa el consumo de energía eléctrica.

- *Toneladas Equivalentes de Petróleo (toe)*

Las toneladas equivalentes de petróleo (toe) es una unidad que permite representar cantidades de energía en términos de cierta cantidad de petróleo, específicamente en toneladas métricas.

- *Toneladas Equivalentes de Carbón (tce)*

La tonelada equivalente de carbón (tce) es una unidad que permite representar cantidades de energía en términos de cierta cantidad de carbón, específicamente en toneladas métricas.

Tanto en las toneladas equivalentes de petróleo como de carbón, existen ligeras variaciones de la cantidad de energía capaz de generar, debido a la composición química de los combustibles, de esta forma se realizó una convención que

permitió uniformizar esta unidad de medida. (National Institute of Standards and Technology, 2008)

Energía eléctrica

Se trata de la energía que resulta de la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos. Cuando estos dos puntos se ponen en contacto mediante un material conductor, existe un movimiento de electrones positivos y negativos a través del mismo, originando corriente eléctrica. La corriente eléctrica genera un campo magnético, y el movimiento de este último produce electricidad a través del cable misma que puede ser convertida en energía luminosa, térmica y mecánica para su consumo y utilización. La producción de energía eléctrica proviene de plantas de generación como son, por ejemplo, las centrales hidroeléctricas, geotérmicas, nucleares, ciclo combinado, combustión, parques eólicos y paneles solares.

Se le atribuye su descubrimiento a Benjamín Franklin, quien se dedicó a observar y a realizar experimentos con el fin de conocer la naturaleza de este tipo de energía. Posteriormente, científicos como Alessandro Volta, Charles-Augustín de Coloumb, Carl Friederich Gauss, Joseph Henry, Michael Faraday, realizaron trabajos y desarrollaron conocimiento que condujo a la invención de dispositivos como la batería en 1800, el generador y motor eléctrico en 1831, el telégrafo en 1837 y el teléfono en 1876. (Blume, 2007).

Energía potencial

Energía que posee un cuerpo en virtud de su posición.

$$E_p = M \cdot g \cdot h$$

Donde

E_p energía cinética, en J

M masa, en kg

g aceleración de la gravedad, en m/s^2

h altura, en m

El origen de la palabra “potencial” proviene del latín, específicamente del vocablo “*potis*” que significa *poder*, el nexa “*nt*” que equivale a “agente”, y el sufijo “*al*” que significa *perteneciente*. De esta forma, se entiende como “agente al que le pertenece el poder de llevar algo a cabo. (Cocheo & Pérez, 2016)

Energía cinética

Energía que posee un cuerpo en virtud de su movimiento

Se define como:

$$E_C = \frac{1}{2} Mv^2$$

donde

E_p energía cinética, en J

M masa, en kg

v velocidad de la masa, en m/s

El origen de la palabra “cinética” proviene del griego “*kinesis*” que significa *movimiento*.

Energía mecánica

En un sistema conservativo, la sumatoria de todos los tipos de energía cinética y potencial es constante e igual a la energía mecánica total del sistema. De esta forma se tiene que:

$$E_M = E_p + E_C$$

donde

E_M energía mecánica, en J

E_p energía potencial, en J

E_C energía cinética, en J

Energía renovable

Energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables y de recursos que se regeneran de manera natural a un ritmo igual o mayor que al cual son consumidos. Por la naturaleza de la definición, no se consideran energías renovables aquellas tecnologías que integran en su proceso de generación, el uso de combustibles fósiles.

Potencia y Capacidad instalada

Su definición física se interpreta como la cantidad de trabajo realizada en un determinado tiempo, y se define como

$$P = \frac{W}{t}$$

donde:

P potencia, en W

W trabajo o energía empleada, en J

t tiempo, en s

Se define como la máxima cantidad de energía eléctrica que un dispositivo es capaz de producir, bajo condiciones específicas. Para el caso de un aprovechamiento hidroeléctrico, la potencia será definida por la magnitud de gastos pertenecientes al régimen del río, y la carga proporcionada por el almacenamiento

Desde la perspectiva de la energía eléctrica, la potencia se define como:

$$P = V \times I$$

donde

P potencia en W

V voltaje en V

I corriente en A

Desde el punto de vista de la potencia de una turbina para generación de energía, se calcula con la ecuación:

$$P = \gamma \cdot Q \cdot H \cdot \eta$$

donde

P potencia en kW

Q gasto en m³/s

H carga en m

γ peso específico del agua en kg/m³

η factor de eficiencia, adimensional

La unidad adoptada por el sistema internacional para caracterizar la potencia es el Watt, en honor al ingeniero escocés James Watt (1736-1819) quien contribuyó a mejorar la máquina de vapor y desarrolló el término de “caballos de fuerza”. Es equivalente a un joule en un segundo. Se trata de una unidad perteneciente al Sistema Internacional. Es posible utilizar la unidad de caballo de fuerza (hp). Al tratarse de una unidad de potencia, al igual que el Watt, describe la rapidez o la tasa a la que un dispositivo realiza un trabajo o convierte energía. Surge de la necesidad de comparación que existía, en la época de su definición, entre un motor de vapor, y la capacidad de realizar trabajo de caballos. El origen etimológico de la palabra potencia, proviene del latín “*potentia*” que significa poder, facultad, posibilidad. (Conceptos, 2017)

Generación

Es la cantidad de energía eléctrica que un dispositivo es capaz de producir, en un periodo de tiempo dado.

Despejando el término de energía, se tiene que:

$$\text{Potencia} = \frac{\text{Energía}}{\text{Tiempo}} = \frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{W}$$

$$\text{Energía} = \text{Potencia} \times \text{Tiempo} = \left(\frac{\text{J}}{\text{s}}\right) \cdot (\text{s}) = \text{W} \cdot \text{s}$$

De esta forma se define la potencia en un lapso de tiempo. Para obtener la unidad de medida indicada por el sistema internacional, se tiene que:

$$\text{Energía} = (\text{watt}) \times (\text{segundo}) \times \left(\frac{\text{kW}}{\text{watt}}\right) \times \left(\frac{1 \text{ h}}{\text{segundos}}\right) = \text{kW} \cdot \text{h}$$

Como un ejemplo se tiene que, si un generador con 1 MW de potencia opera a su capacidad total durante una hora, entonces se dice que el generador producirá 1 MW·h de electricidad. Si el mismo generador opera a la mitad de su capacidad durante una hora, entonces producirá 0.5 MW·h de electricidad. Se confirma con esto que, mientras que la potencia describe la capacidad del dispositivo de generar energía, la generación es el valor de energía producida en un lapso de tiempo y la cual se encontrará en función de la disponibilidad y costos de los combustibles que utiliza, así como las exigencias del sistema eléctrico. Se deriva del latín “*generare*” que significa producir, engendrar, dar luz. (Concepto Definición, 2017)

Factor de planta

Es un indicador del grado de utilización de la capacidad de las unidades generadoras en un periodo de tiempo específico (SENER, Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables, 2013)

Por medio del factor de planta, es posible relacionar la energía eléctrica producida por una planta generadora durante un tiempo determinado, y la energía que habría sido producida si la planta generadora hubiese ejercido la totalidad de su capacidad instalada, durante el mismo período de tiempo. El factor de planta es equivalente a las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} \text{Factor de planta} &= \frac{\text{Potencia media}}{\text{Potencia instalada}} = \frac{\text{Horas de operación de la máquina al día}}{24 \text{ h}} \\ \text{Factor de planta} &= \frac{\text{Energía generada}}{\text{Energía máxima producible operando a potencia máxima}} \\ \text{Factor de planta} &= \frac{\text{Gasto medio aprovechable}}{\text{Gasto de diseño de el total de turbinas}} \end{aligned}$$

Energía media anual

Promedio anual de la energía generada por un aprovechamiento, expresada comúnmente en GW·h/año.

Energía media anual generada en el pico

Es la energía media anual generada considerando únicamente las horas de máxima demanda en cada día en GW·h/año.

Energía media anual generada en base

Energía anual generada, considerando las horas que no son de máxima demanda en GW·h/año.

Energía firme

Valor máximo de energía que puede ser generada sin interrupción alguna, aun considerando condiciones críticas del combustible. La energía firme es la suministrada al sector comercial y residencial (James & Lee, 1971). Dependiendo del organismo que proyecte la central, es posible que se admita un porcentaje de déficit de energía en la estimación de la energía firme.

Energía secundaria

Se trata de energía que no puede ser garantizada la mayor parte del tiempo, pero que está disponible más de la mitad del tiempo. Por su naturaleza intermitente, es vendida a un precio menor que el de la energía firme (James & Lee, 1971).

Matrices de factores de conversión

Con el fin de tener una herramienta útil de valores de referencia, por medio de la cuál sea posible realizar las conversiones pertinentes entre valores de energía y potencia, se construyeron matrices en donde se citan los respectivos factores que permiten realizar las conversiones para las unidades de mayor uso.

Para la matriz de factores de conversión de unidades de potencia, se integraron valores pertenecientes a unidades de energía en razón del tiempo, como BTU/hr y J/s, esto con el fin de poder comparar unidades de energía y potencia cuando así se requiera.

Matriz de conversión de unidades de potencia

Unidades de capacidad-potencia					
Convertir de \ a	kW	BTU/h	J/s	Caballo de fuerza	Cal/s
kW	1	3,412.00	1,000.00	1.34	239.01
BTU/hora	0.000293	1	0.293071	0.000393	0.070046
J/s	0.001000	3.41214245	1	0.001341022	0.239006
Caballo de fuerza	0.745712	2,544.53	745.70	1	178.25
Cal/s	0.004184	14.28	4.18	0.005610	1

Matriz de conversión de unidades de energía

Unidades de energía					
Convertir de \ a	kW·h	Joule	BTU	Tonelada equivalente de petróleo	Tonelada equivalente de carbón
kW·h	1	3,600,000.00	3,412.14	8.59845e ⁻⁰⁵	0.00012284
Joule	2.77778e ⁻⁰⁷	1	0.000947817	2.3888e ⁻¹¹	3.4e ⁻¹¹
BTU	0.000293071	1,055.06	1	2.5219E ⁻⁰⁸	3.6e ⁻⁰⁸
Tonelada equivalente de petróleo	11,622.22	41,861,321,813.10	39,652,611.40	1	1.42857
Tonelada equivalente de carbón	8,135.56	29,288,000,000.00	27,774,300.62	0.70	1

Bibliografía

- Alaska Center for Energy and Power. (Noviembre de 2010). River, Tidal, and Ocean Current Hydrokinetic Energy Technologies: Status and Future Opportunities in Alaska. Alaska.
- Alstom Power. (2015). Low Head Hydro Power Plants. Obtenido de <http://alstomenergy.gepower.com/Global/Power/Resources/Documents/Brochures/hydro-low-head-power-plant.pdf>
- Arms, B. (1978). What Idaho Power Has Learned. USA.
- Blume, S. (2007). Electric Power System Basics for the Nonelectrical Professional. Nueva Jersey: WILEY-INTERSCIENCE .
- Boston University College of Engineering. (Septiembre de 2016). Coherent Application Threads. Obtenido de <http://people.bu.edu/dew11/liftanddrag.html>
- CENACE. (2016). Demanda Sistema Eléctrico Nacional. Obtenido de CENACE: <http://www.cenace.gob.mx/GraficaDemanda.aspx>
- CFE. (1981). Manual de Obras Civiles: Cámaras de Oscilación. Ciudad de México.
- CFE. (1983). Manual de Obras Civiles. Obras de toma. Ciudad de México.
- Chapus, E., & Haddad, C. (s.f.). Bulb Units for Low-Head Hydroelectric Generation. Low Head Hydro: An examination of an alternative energy source. Idaho.
- Chile, E. d. (Abr de 2017). Obtenido de <http://etimologias.dechile.net/?energi.a>
- Chile, E. d. (2017). Etimologías. Obtenido de <http://etimologias.dechile.net/?trabajo>
- Cochero, M., & Pérez, M. (2016). Configuración de sujetos en la praxis. Antioquia, Colombia.
- CONAGUA. (2012). Atlas Digital del Agua en México. Obtenido de <http://www.conagua.gob.mx/atlas/usosdelagua32.html>
- CONAGUA. (2014). Estadísticas del Agua en México. Ciudad de México.
- Concepto Definición. (Abr de 2017). Concepto Definición. Obtenido de <http://conceptodefinicion.de/generacion/>
- Conceptos, D. (Abr de 2017). Concepto de Potencia. Obtenido de <http://deconceptos.com/ciencias-naturales/potencia>
- CONEVAL. (2015). Índice de Rezago Social 2015. Presentación de resultados. . CDMX.
- Congreso de la Unión. (11 de Ago de 2014). Ley de la Industria Eléctrica. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación.
- Congreso de la Unión. (01 de Jun de 2016). Ley General de Cambio Climático. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación.
- Congreso de la Unión. (2016). Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable. CDMX.
- Congreso de la Unión. (2016). Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Medio Ambiente. CDMX.
- Cooper, J. (03 de 12 de 2013). Irrigation in Australia. Obtenido de <https://irrigationinaustralia.wordpress.com/2013/12/03/basic-principles-of-water-irrigation-systems/>
- Diputados, C. d. (2013). Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Diario Oficial de Federación. México.
- Diputados, C. d. (2016). Ley de Aguas Nacionales. Diario Oficial de la Federación . México.
- El Economista. (19 de Feb de 2017). El Economista. Obtenido de <http://eleconomista.com.mx/industrias/2017/02/19/conflictos-sociales-amenazan-proyectos-energia>
- Electric Power Reserach Institute. (Diciembre de 2012). Assessment and Mapping of the Riverine Hydrokinetic Resource in the Continental United States. California, Estados Unidos.
- Encyclopedia Britannica. (08 de Abr de 2017). Encyclopedia Britannica. Obtenido de <https://www.britannica.com/biography/James-Prescott-Joule>
- ESHA. (2004). European Small Hydropwer Associaton. Obtenido de Guide on How to Develop a Small Hydropwer Plant: http://www.esha.be/fileadmin/esha_files/documents/publications/GUIDES/GUIDE_SHP/GUIDE_SHP_EN.pdf
- FAO. (2016). Obtenido de <http://www.fao.org/aquaculture/es/>

-
- FERC. (Octubre de 2016). Hydrokinetic Project. Obtenido de <http://www.ferc.gov/industries/hydropower/gen-info/licensing/hydrokinetics.asp>
 - General Electric Hydro. (2016). General Electric Renewable Energy. Obtenido de <https://st-renewables.gepower.com/hydro-power/large-hydropower-solutions/hydro-turbines/francis-turbine.html>
 - Gleick, P. (2002). The World's Water 2002-2003: The Biennial Report on Freshwater Resources. Washington D.C, USA.
 - Gonzáles, F. B. (2004). Sistemas de Energía Eléctrica. España.
 - Hatch Energy. (Marzo de 2008). Natural Resources Canada. Obtenido de <https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/canmetenergy/files/pubs/LowHeadMarketAssessRptVol5E1MainReport.pdf>
 - INEGI. (2010). Encuesta Nacional de la Dinámica Demográfica 2014. Obtenido de Densidad de población por entidad federativa, 2000 y 2010: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/sisept/Default.aspx?t=mdemo11&s=est&c=17520>
 - IRENA. (2014). International Renewable Energy Agency. Obtenido de Renewable Power Generation Costs in 2014: http://www.irena.org/documentdownloads/publications/irena_re_power_costs_2014_report.pdf
 - IRENA. (2016). Obtenido de <http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/?topic=4&subTopic=19>
 - Ishak, M., & Muratoglu, A. (2013). Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72-82.
 - Jacobson, P., Amaral, S., Casto-Santos, T., & Glza, D. (2012). Environmental Effects of Hydrokinetic Turbines on Fish.
 - James, L., & Lee, R. (1971). Economics of water resources planning. USA: McGraw-Hill.
 - Johnson, J., & Pride, D. (2011). River, Tidal, and Ocean Current Hydrokinetic Energy Technologies. ACEP, 32.
 - Kaldellis, J., & Kondilli, E. (2011). Techno-Economic Evaluation of Hydro Power Plants Using (NPV-IRR) Method: A Complete Sensitivity Analysis.
 - Khan, M., Iqbal, M., & Quaicoe, J. (05 de Abril de 2007). River current energy conversion systems: Progress, prospects and challenges. Canadá.
 - Kirke, B. (2005). Developments in ducted water current turbines. Cyberiad.
 - Laws, N., & Epps, B. (01 de 2016). Hydrokinetic Energy Conversion: Technology, research and outlook. EUA.
 - Liu, Y., & Packey, D. (2013). Sistemas Hidroeléctricos de Ciclo Combinado: Posibilidades de Instalar turbinas hidrocinéticas en desfuegos de presas. Australia.
 - Loots, I. (2014). A review of low head hydropower technologies and applications in a South African context. *Renewable and Sustainable Energy*.
 - Mathew, S. (2006). Fundamentals Resource Analysis and Economics. Nueva York: Springer.
 - National Institute of Standards and Technology. (2008). Guide for the Use of the International System of Units (SI). En A. Thompson, & B. Taylor.
 - Natural Resources Canadá. (03 de 2010). Assessment of Canada's Hydrokinetic Power Potential: Phase I Report Methodology and Data Review. Ottawa, Ontario, Canadá.
 - Programa Nacional de las Naciones Unidas. (Feb de 2015). www.mx.undp.org. Obtenido de http://www.mx.undp.org/content/dam/mexico/docs/Publicaciones/PublicacionesReduccionPobrez a/InformesDesarrolloHumano/PNUD_boletinIDH.pdf
 - Punys, P., Adamonyte, I., KVaraciejus, A., Martinaitis, E., Martinaitis, E., Vyciene, G., & Kasiulis, E. (2015). Riverine hydrokinetic resource assessment A case study of a lowland river in Lithuania. 12.
 - Robaldi Vázquez, M. (2011). Comportamiento hidráulico de turbinas cinéticas de flujo axial en canales a superficie libre, como una alternativa de generación de energía hidroeléctrica en obras y estructuras existentes.
 - Sánchez Bibriesca, J. L., & Fuentes Mariles, O. A. (2000). Consideraciones sobre la selección de las turbinas de una central hidroeléctrica. Instituto de Ingeniería UNAM, 47.
 - Scottish Environment Protection Agency. (Noviembre de 2015). Guidance for developers of run-of-river hydropower schemes. Obtenido de <https://www.sepa.org.uk/media/156800/guidance-for-developers-of-run-of-river-hydropower-schemes.pdf>

-
- SENER. (2013). Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables. Ciudad de México.
 - SENER. (2016). Ley de Transición Energética. México.
 - SENER. (2016). PRODESEN. Obtenido de <https://www.gob.mx/sener/acciones-y-programas/programa-de-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-33462>
 - SENER. (Marzo de 2016). Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional. Obtenido de http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/102166/PRODESEN_2016-2030_1.pdf
 - SENER. (2016). Sistema de Información de Energía. Obtenido de <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=temas>
 - SENER. (Feb de 2017). Boletín de Energías Limpias Volumen 3. CDMX, México.
 - Shen, H., & Zydlewski, G. (2015). Estimating the probability of fish encountering a marine hydrokinetic device. Orono.
 - The Shift Project Data Portal. (Jul de 2016). Breakdown of Electricity Capacity by Energy Source. Obtenido de <http://www.tsp-data-portal.org/Breakdown-of-Electricity-Capacity-by-Energy-Source#tspQvChart>
 - Union of Concerned Scientists. (2016). Union of Concerned Scientists. Obtenido de http://www.ucsusa.org/clean_energy/our-energy-choices/renewable-energy/how-hydrokinetic-energy-works.html#.V_GMvvDhDIU
 - Utterback, J. (1994). Mastering the Dynamics of Innovation. EUA: Harvard University.
 - Vásquez, J. (2013). Estudio hidroenergético para proyectos hidroeléctricos al hilo de corriente. Ciudad de México: UNAM