



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS HIDROELÉCTRICO DE UN SITIO CON
POTENCIAL HIDROELÉCTRICO, CUENCA DEL RÍO
TECOLUTLA**

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN HIDRÁULICA

P R E S E N T A:

ING. JORGE NOÉ MARTÍNEZ DEL VALLE

DIRECTOR DE TESINA: M.I. ALEJANDRO MAYA FRANCO

CIUDAD DE MÉXICO

ABRIL 2021



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.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, porque ha colmado mi vida de bendiciones y, sobre todo, de mucha salud.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, mi casa de estudios, por darme la oportunidad de pertenecer a ella, agradezco por todos los recursos que puso a mi disposición para formarme como profesionista y sobre todo como ser humano. Gracias a todos los profesores por transmitirme sus enseñanzas y conocimientos.

Gracias M.I. Alejandro Maya Franco por brindarme su apoyo y su confianza en la realización del presente trabajo, también agradezco las oportunidades brindadas y su amistad.

A la M.I. Claudia Edith López Fuentes por su apoyo y disposición para llevar este trabajo al mejor término. Agradezco su amistad.

A mi madre, Socorrito del Valle, porque siempre se desvivió por sus hijos y por ser una excelente madre, porque desde pequeño fue mi apoyo, siempre estuvo al tanto de mis estudios, gracias a sus regaños y enseñanzas soy lo que soy, su esfuerzo se ve reflejado en este trabajo.

A mi padre, Jorge Martínez, por demostrarme que jamás hay que rendirse, porque ha sido un gran padre, por siempre darnos los recursos para salir adelante, incluso más de los merecidos, por todas las risas.

A Fernando Martínez del Valle mi hermano, por ser una gran persona y un excelente ser humano, porque lo admiro y ha demostrado ser una persona fuerte y sobreponerse a las adversidades. Te quiero hermano.

A mi abuelita Carmen Luna †, por todo su amor, porque sé que donde quiera que ella esté me cuida y me protege.

A Julia y Carmen del Valle, por todo el amor y cariño que desde pequeño me han brindado.

Gracias a Karlita Segura, por ser mi compañera, por ser una maravillosa persona y gran ser humano. Porque siempre me da las palabras indicadas para continuar y ser una gran motivación. Agradezco su apoyo y todo su cariño.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
JUSTIFICACIÓN.....	1
OBJETIVOS.....	2
1. ANTECEDENTES.....	3
1.1 EL CICLO HIDROLÓGICO	3
1.2 CONTEXTO NACIONAL.....	5
1.2.1 Regiones hidrológicas de México.....	5
1.2.2 Generación hidroeléctrica en México	7
1.3 CONTEXTO REGIONAL	10
1.3.1 Región Hidrológica 27	10
1.3.2 Cuenca del Río Tecolutla	11
1.3.3 Aprovechamientos hidráulicos	12
1.4 MARCO NORMATIVO.....	13
1.4.1 Caudal ecológico.....	16
1.5 CENTRALES HIDROELÉCTRICAS	19
1.5.1 Características importantes.....	19
1.5.2 Turbinas	22
1.6 CLASIFICACIÓN DE LAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS.....	25
1.7 COMPONENTES DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA	26
1.8 FACTOR DE PLANTA	28
2. VASOS DE ALMACENAMIENTO	29
2.1 CARACTERÍSTICAS DE UN VASO DE ALMACENAMIENTO.....	30
2.2 ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN O CAPACIDAD ÚTIL.....	32
2.3 CURVA ELEVACIONES – ÁREAS – CAPACIDADES	32
3. FUNCIONAMIENTO DE VASOS.....	34
4. DESARROLLO DEL CASO DE ESTUDIO.....	36
4.1 PROCESO DE ANÁLISIS DEL CASO DE ESTUDIO.....	36
4.2 UBICACIÓN DEL PROYECTO.....	37
4.3 FUNCIONAMIENTO DE VASO EN EL SITIO DE ANÁLISIS (RÍO AJAJALPAN)	38

4.3.1 Procedimiento de cálculo de funcionamiento de vaso.....	38
4.3.2 Entradas al vaso.....	39
4.3.3 Salidas del vaso	41
4.3.4 Curva de frecuencia	42
4.4 ANÁLISIS HIDROELÉCTRICO.....	45
4.4.1 Selección de turbinas	63
5. RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS	65
6. CONCLUSIONES	68
ANEXO	72
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86

INTRODUCCIÓN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Existen diversos factores que afectan el diseño, la construcción y puesta en marcha de un proyecto de generación hidroeléctrica, los factores pueden ser económicos, hidráulicos, geológicos, inclusive temas sociales y políticos, se deben tomar en cuenta todos los factores mencionados antes de tomar la decisión de invertir en un proyecto de generación hidroeléctrica.

La premisa fundamental para la aprobación de un proyecto de generación es la cantidad de agua disponible, sin embargo, la determinación del potencial hidroeléctrico de un sitio es un aspecto que cobra importancia pues, dentro del análisis de factibilidad del proyecto, se debe analizar la relación de costo-beneficio. El análisis del potencial hidroeléctrico arroja factores de funcionamiento, factores que deben ser considerados antes de la construcción de un proyecto hidroeléctrico.

Con el análisis del potencial hidroeléctrico de un sitio se puede, tomar la decisión de continuar o descartar el proyecto hidroeléctrico a una etapa temprana y no cuando se hayan realizado inversiones y estudios que generen pérdidas económicas.

JUSTIFICACIÓN

México es un país sumamente rico en recursos naturales, por su parte, los recursos hídricos del país no se quedan atrás, se podría decir que la distribución del agua en México no es del todo equitativa, solo basta con decir que las cinco de las centrales hidroeléctricas con mayor generación se ubican en el sur del país, en el estado de Chiapas, a pesar de lo anterior, México es un país que cuenta con suficientes recursos hídricos, datos de CONAGUA del año 2011 registran que existen alrededor de 4,000 presas distribuidas en el territorio nacional, solo 181 presas representan casi el 80% de la capacidad del almacenamiento total del país. Es ahí cuando es importante realizar estudios y tener metodologías que ayuden a identificar nuevas zonas de aprovechamiento, zonas con un alto potencial que se han quedado en el olvido.

OBJETIVOS

Analizar el funcionamiento de vaso de un sitio (río Ajajalpan) y estimar su potencial hidroeléctrico para determinar la factibilidad del proyecto.

Determinar las variables que intervienen en el desarrollo del funcionamiento de un vaso.

Presentar un proyecto de generación hidroeléctrica atractivo para el sector privado, siempre buscando estar apegado a las leyes que regulan los servicios en el ecosistema.

1. ANTECEDENTES

1.1 EL CICLO HIDROLÓGICO

A lo largo de los años el agua se ha convertido en un recurso natural de suma importancia para los seres humanos, al grado de ser denominado como el “líquido vital”. El agua tiene propiedades físicas y químicas que la convierten en un recurso singular, en su paso por la atmósfera y la superficie terrestre sufre una serie de cambios en su estructura molecular, dichos cambios se producen a través de ciertos procesos, a esa serie de procesos se les conoce en conjunto como el ciclo hidrológico. En la Figura 1-1 se observa la representación del ciclo hidrológico, los procesos de análisis más importantes del ciclo hidrológico dentro del campo de la ingeniería civil son: la precipitación, la evaporación, el escurrimiento, la infiltración y la transpiración.

Todo comienza cuando el vapor de agua existente en la atmósfera se acumula, derivado de lo anterior comienza la formación de nubes, posteriormente ese vapor se condensa, dando como resultado la precipitación, dicha precipitación decanta sobre la superficie terrestre formando escurrimientos; los escurrimientos se clasifican en: superficiales, subsuperficiales y subterráneos, los escurrimientos de interés para el presente trabajo son los superficiales, en su paso por la superficie terrestre los escurrimientos forman sistemas de corrientes, posteriormente y luego de varios años esos sistemas de corrientes forman cuerpos de agua, de los cuerpos de agua las sociedades pueden abastecerse y satisfacer sus necesidades (abastecimiento de agua potable, riego, generación de energía o usos recreativos)

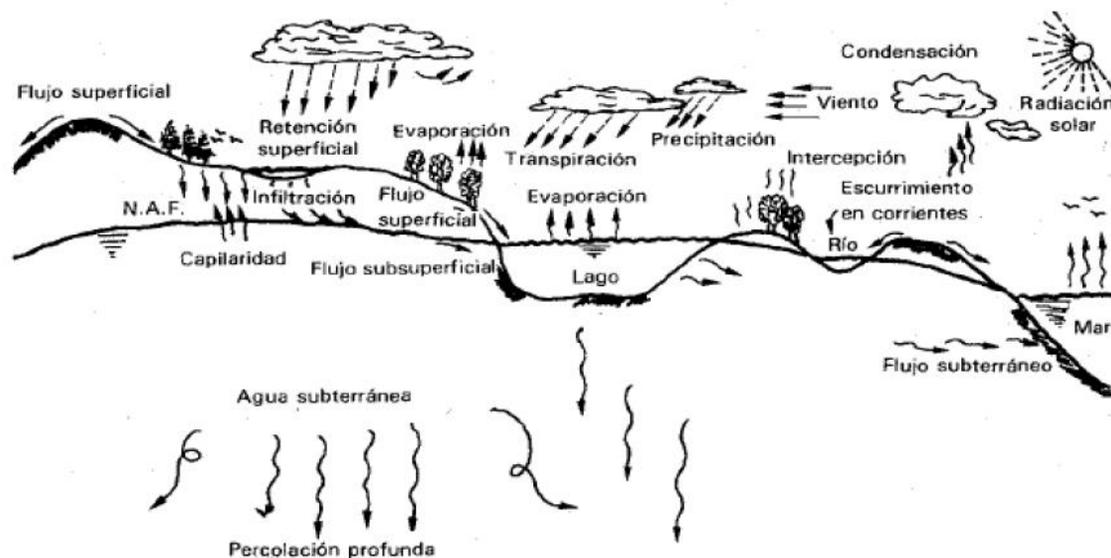


Figura 1-1 Ciclo hidrológico

La precipitación promedio del país, con datos de 1971 a 2019, ha sido de 760 milímetros, la mayor parte de la precipitación 68% se presenta entre los meses de junio y septiembre, con excepción de la península de Baja California, en donde se presenta durante el invierno.

Ahora bien, en México, el ciclo hidrológico presenta algunas variaciones, la zona sur del país se caracteriza por tener precipitaciones constantes, de gran intensidad y larga duración, caso contrario a la zona norte del país, por lo tanto, en el norte del país, las cuencas son áridas o semiáridas. Es notable a simple vista que la zona sur cuenta con ecosistemas y vegetación abundante, sin embargo, sus sociedades todavía no alcanzan a desarrollarse de acuerdo con los recursos naturales con los que cuentan. Por lo anterior, es posible concluir que la disponibilidad de agua en la República Mexicana no es equitativa, y ha limitado, a la región norte, sobre todo, la posibilidad de satisfacer las demandas de las sociedades. En la Figura 1-2, se aprecia la distribución de la precipitación anual en México, y confirma lo anteriormente descrito.

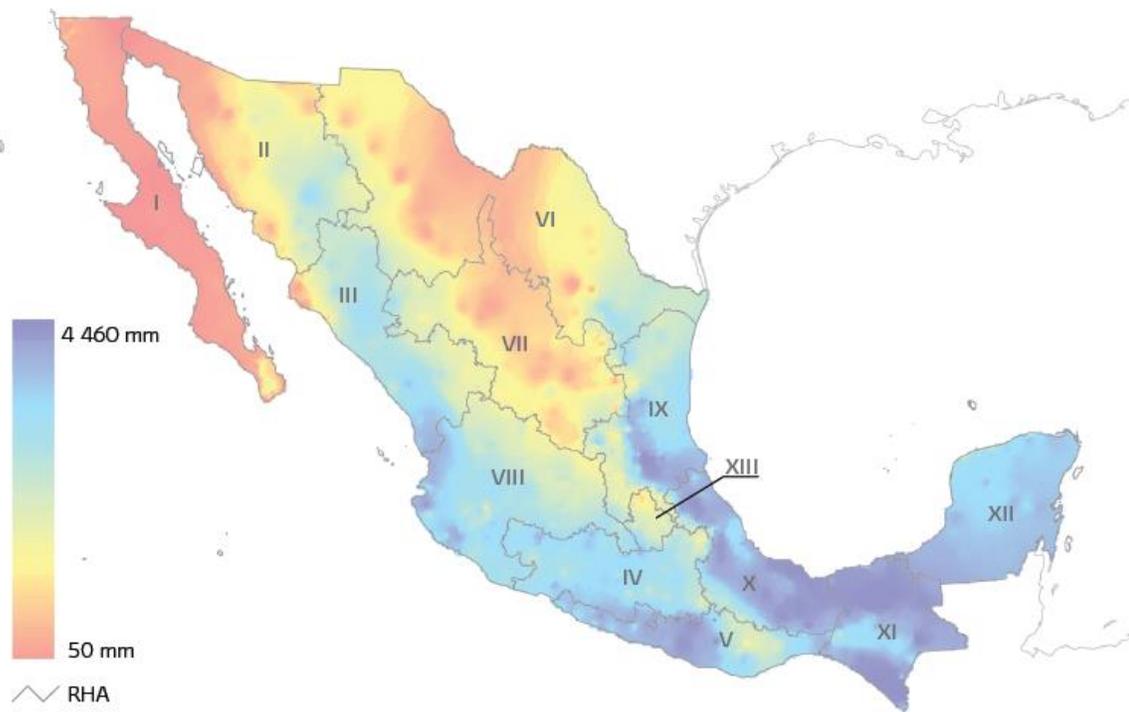


Figura 1-2 Distribución de la precipitación anual en la República Mexicana (1971 - 2019), Fuente CONAGUA

Aunado a la inequidad en la distribución del agua en la República Mexicana, las cuencas sufren daños debido a actividades que las sociedades realizan (deforestación, crecimiento de la mancha urbana, expansión excesiva de actividades productivas, entre otras), lo anterior se traduce en un déficit en la recarga de acuíferos, por lo tanto, la disponibilidad del volumen de agua disminuye.

1.2 CONTEXTO NACIONAL

1.2.1 Regiones hidrológicas de México

México tiene una superficie de 1,964,375 km², al norte colinda con los Estados Unidos de América y al sur con Guatemala y Belice; se compone de 32 entidades federativas. Su ubicación en el planeta tierra lo sitúa a la altura del Trópico de Cáncer, a lo largo del territorio mexicano convergen diversas condiciones climáticas, encontrando zonas áridas en el norte del país y climas cálidos húmedos y subhúmedos en el sur y sureste, además, en las regiones elevadas se presentan climas fríos o templados.

Como se mencionó en párrafos anteriores, el ciclo hidrológico se presenta en las cuencas, las cuencas son la unidad fundamental de estudio de la hidrología, o bien, son la unidad mínima de manejo del agua. En México se han definido 1,471 cuencas hidrológicas de acuerdo con trabajos de la CONAGUA, las cuencas se encuentran agrupadas en 37 regiones hidrológicas y en 13 regiones hidrológico-administrativas. En las Figuras 1-3 y 1-4 se observa la delimitación de las regiones hidrológicas y de las hidrológico-administrativas respectivamente. En primer lugar, las regiones hidrológicas están conformadas de acuerdo con sus características morfológicas, orográficas e hidrológicas, en segundo lugar, las regiones hidrológico-administrativas están conformadas con la finalidad de favorecer la administración del agua, sus límites se ajustaron a los de los municipios.

Las regiones hidrológicas representan los límites naturales de las grandes cuencas de México y se emplean para el cálculo del agua renovable.¹

En cada región hidrológica está contenida, al menos, una cuenca, además, no existe cuenca alguna que esté en más de una región hidrológica. La región hidrológica con mayor superficie es la Bravo-Conchos (N° 24) con 229,740 km², por otro lado, la más pequeña es la región hidrológica Huicicila (N°13) con 5,225 km² de extensión. La región que presenta más precipitación es la de la Costa de Chiapas (N°23) con 2,347 mm de precipitación anual, contrastando la región de Baja California Centro Este (N° 2) con apenas 101 mm.

CONAGUA tiene en operación un total de 4,008 estaciones para medir las variables climatológicas e hidrométricas. En las estaciones se mide la temperatura, precipitación, evaporación, velocidad y dirección del viento. Por su parte, las estaciones hidrométricas miden el caudal de los ríos, así como la extracción por obra de toma de las presas. En las 37 regiones hidrológicas se presenta una precipitación promedio de 772 mm, que se traduce en un volumen de 1,519 km³.

¹ Atlas del Agua en México, 2015, p. 15

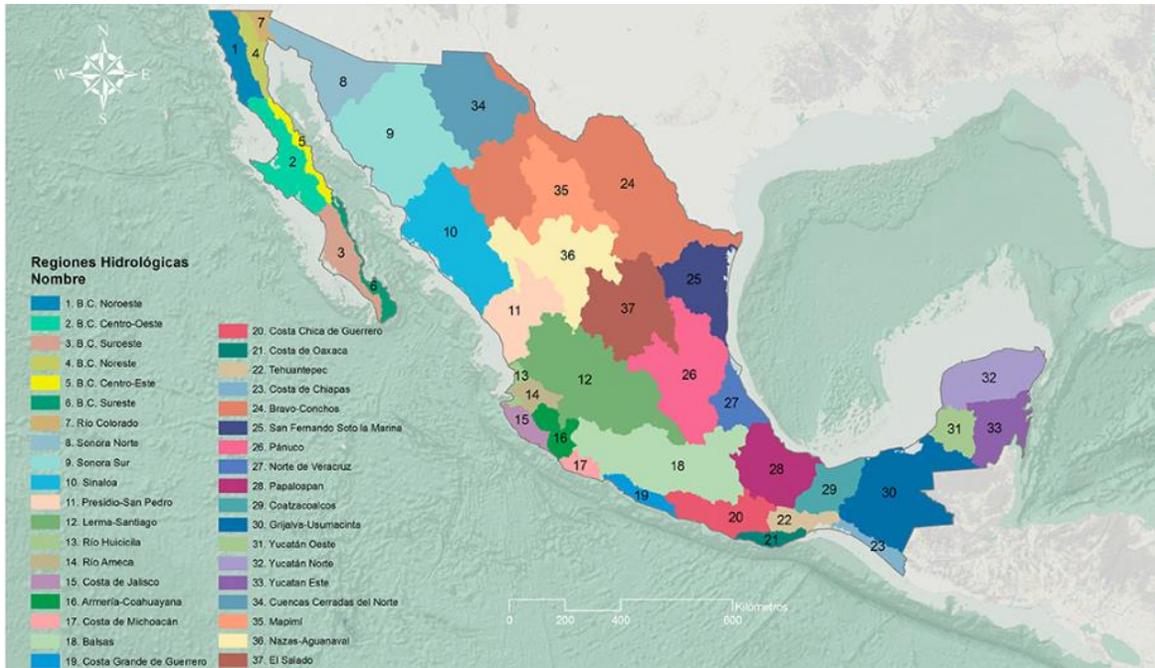


Figura 1-3 Regiones hidrológicas de México, Fuente SEMARNAT

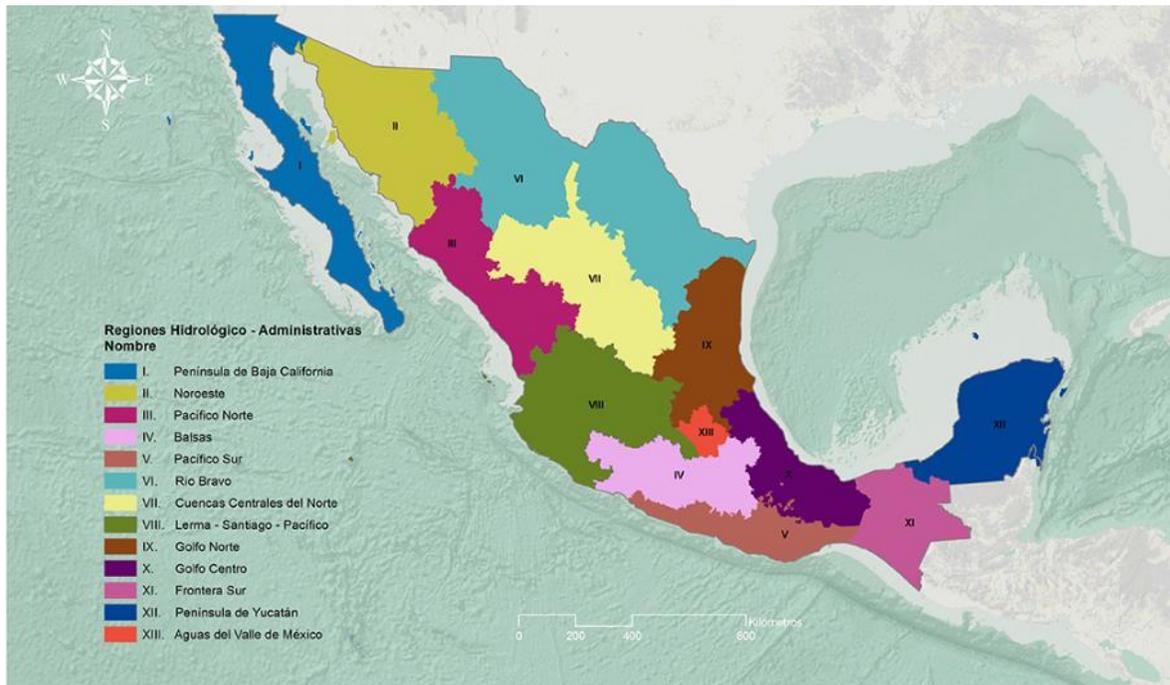


Figura 1-4 Regiones hidrológico - administrativas de México, Fuente SEMARNAT

1.2.2 Generación hidroeléctrica en México

La generación hidroeléctrica tiene sus inicios en el año de 1882 con centrales pequeñas construidas en Inglaterra, Francia y Estados Unidos. Fue en México, en el año de 1889, con la presa Chihuahua 1, ubicada en el municipio de Batopilas, Chihuahua, cuando se tienen los primeros registros del comienzo de la construcción de una central hidroeléctrica. A lo largo de muchos años empresas extranjeras comenzaron a construir pequeñas centrales hidroeléctricas, lucraron con el servicio.

Fue hasta 1937, durante el gobierno del presidente Lázaro Cárdenas, que se creó la Comisión Federal de Electricidad (CFE), gracias a lo anterior el manejo de los recursos hídricos para generación pasaron a ser administrados por el Estado. La primera obra de importancia a cargo de la CFE fue la central hidroeléctrica de Ixtapantongo, en el Estado de México, que posteriormente fue una parte del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán.

En la última década del siglo XX hubo un crecimiento en la construcción de centrales hidroeléctricas, dentro de los principales proyectos se pueden mencionar: Aguamilpa, Zimapán, Agua Prieta, Comedero y Huites, en ese periodo se obtuvo un total de 11,576 MW de generación. La presa Zimapán, ubicada en el cauce de los ríos San Juan y Tula, en los estados de Querétaro e Hidalgo respectivamente, ocupó el lugar 14 entre las presas de arco más altas del mundo.

Otro proyecto hidroeléctrico importante en México es el localizado en la cuenca del río Grijalva, dicho proyecto se integra por las centrales hidroeléctricas: Belisario Domínguez (la Angostura), Manuel Moreno Torres (Chicoasén), Netzahualcóyotl (Malpaso) y Ángel Albino Corzo (Peñitas).

El último gran proyecto de generación hidroeléctrica construido fue la presa Alfredo Elías Ayub (la Yesca), ubicada en el cauce del río Gran de Santiago, en el estado Nayarit, el proyecto de la Yesca tiene una potencia instalada de 750 MW.

Una de las principales virtudes de la energía hidroeléctrica es que, en su mayoría, se clasifica como energía de base que puede tener un alto nivel de potencia dependiendo del embalse con el que se cuente.

De acuerdo con datos del Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) 2018-2032, el total de la capacidad instalada en México es de 87,968.926 MW, incluyendo tecnología convencional, limpia, renovable y otras, la tecnología renovable da un aporte de 27,347.650 MW, de los cuales 12,670.967 MW son de centrales hidroeléctricas, esto quiere decir que la energía hidroeléctrica representa un 46.33% del total de las energías renovables.

De acuerdo con datos de la Secretaría de Energía (SEN), México cuenta con 97 centrales hidroeléctricas distribuidas en el territorio nacional, 33% se encuentran en

el área oriental. Es justo en esta zona en donde se encuentran las centrales hidroeléctricas más grandes del país (Chicoasén y Malpaso).

En el área occidental se concentra el 27.8% de las centrales hidroeléctricas del país, las tres centrales con mayor capacidad en esta área son: Aguamilpa, Solidaridad, El Cajón y la Yesca, todas en el estado de Nayarit.

En el estado de Guerrero, en la zona centro, se encuentra la segunda central hidroeléctrica con mayor capacidad instalada del país, la presa Infiernillo.

En lo que respecta a la zona norte del país, la mayoría de las centrales se concentra en el estado de Sinaloa seguido de Sonora y San Luis Potosí.

De acuerdo con la SEN, para el período 2018 – 2032, se planea añadir 4,491.8 MW a la capacidad de energía hidroeléctrica en el país. Las adiciones de energía hidroeléctrica se muestran en la Figura 1-5.

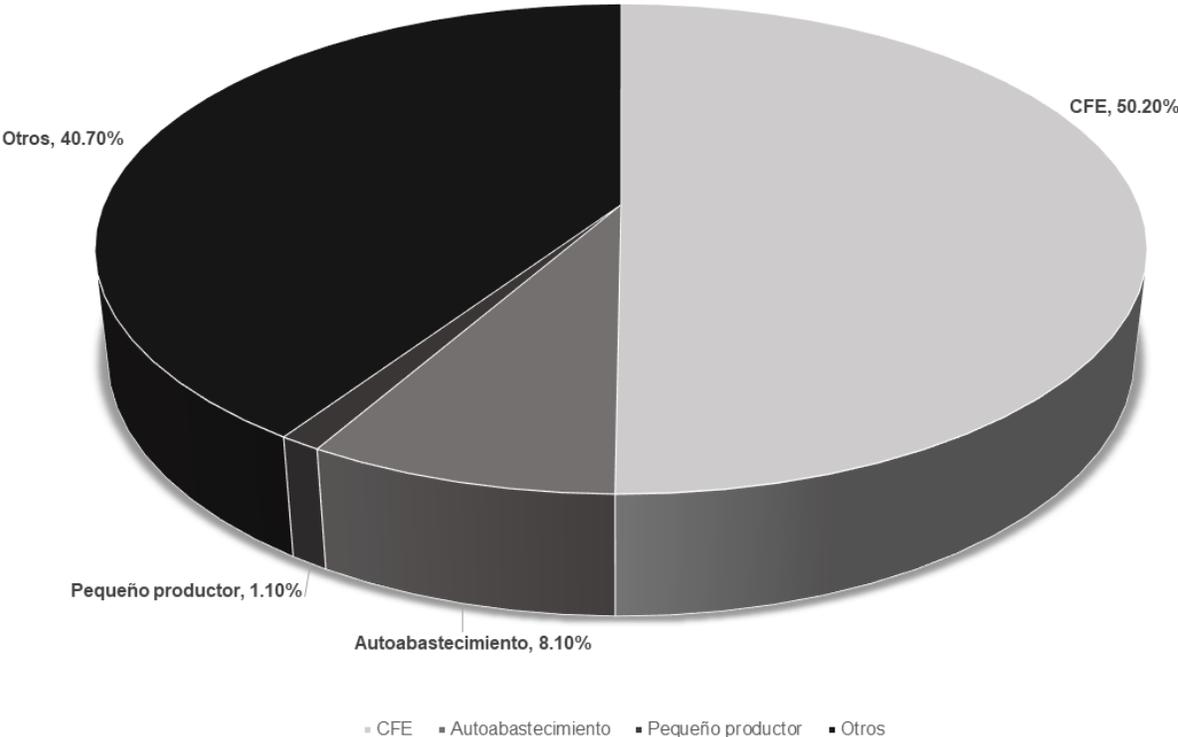


Figura 1-5 Capacidad adicional de energía hidroeléctrica en México, Fuente SENER

En la figura anterior se observa que, el 50.2% de la capacidad de adición de energía hidroeléctrica en México corresponde a proyectos financiados por CFE (2,253 MW), 40.7% a proyectos de importación y exportación; en el caso de la categoría de autoabastecimiento y pequeño productor (8.1% y 1.1%) en conjunto suman 412 MW.

Por lo tanto, en el periodo 2018 – 2032 se espera que la generación de energía eléctrica incremente en 15,748.4 GWh, para llegar a una generación total de 49,902 GWh al final del periodo de proyección.

1.3 CONTEXTO REGIONAL

El proyecto se ubicará en el cauce del río Ajajalpan, el río Ajajalpan se encuentra dentro la cuenca del río Tecolutla, perteneciente a la Región Hidrológica RH27 Tuxpan-Nautla, a continuación, se realizará una descripción con las características de dicha región y cuenca.

1.3.1 Región Hidrológica 27

La Región Hidrológica 27 (RH27) se localiza en la parte central del Golfo de México y abarca un 25.70% del estado de Veracruz, la hidrografía de la región se integra por ríos, lagunas en su mayoría, y en menor cantidad por corrientes. Entre los principales ríos se encuentran: el Tuxpan, Cazonces, Tecolutla, Nautla, Misantla y Colipa. La mayoría de los ríos y corrientes tienen su comienzo en el estado de Veracruz, sin embargo, llegan a abarcar una zona importante del estado de Puebla y áreas menores de los estados de Hidalgo y Tlaxcala (Figura 1-6).

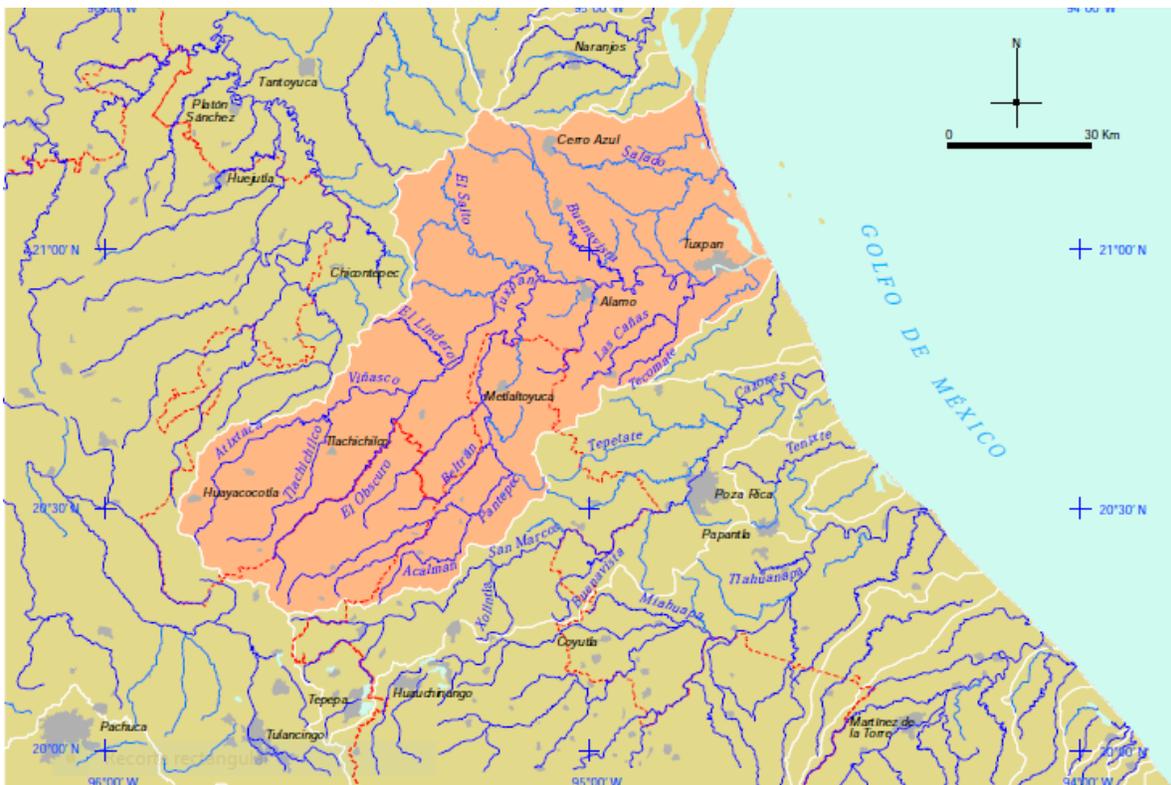


Figura 1-6 Localización de los principales ríos de la RH27

La región comienza en la barra de Tampico, de ahí continúa en una península de 25 km de longitud hacia el sureste, posteriormente toma dirección sur y se une a tierra firme, la superficie mencionada se conoce como Laguna de Tamiahua, es una laguna poco profunda y en su interior se levantan algunas islas, la laguna de Tamiahua se conecta con el Golfo de México por medio de la bahía de Tanhuijo y a 10 km al sur de la misma desemboca al río Tuxpan.

El área en la que se sitúa la Región Hidrológica 27 está en la porción suroriental de la Sierra Madre Oriental, así como en la parte frontal de las provincias fisiográficas Mesa Central y Faja Costera del Golfo de México.

En una amplia superficie de la región se encuentra una gran extensión de la Sierra Madre Oriental, además, hace contacto con la cordillera Neovolcánica que se extiende hasta la costa. Ambas constituyen sitios importantes en donde ocurren la mayoría de las precipitaciones, por lo tanto, en ellas se generan los escurrimientos que fluyen hacia la planicie dando lugar a corrientes torrenciales con gastos considerables aún en temporada de estiaje.

1.3.2 Cuenca del Río Tecolutla

La cuenca del río Tecolutla comprende los estados de Tlaxcala, Hidalgo, Puebla y Veracruz, el área que drena hasta la desembocadura en el Golfo de México es de 7,342 km².

En la cuenca se distinguen tres zonas principales:

- La parte alta, que comprende la Sierra Madre Oriental, los cauces se encuentran en cañones angostos y con fuertes pendientes.
- La parte intermedia, con pendientes menos fuertes, en esta zona es posible construir vasos de almacenamiento para generación eléctrica.
- La parte baja, que atraviesa la planicie costera del estado de Veracruz y desemboca hasta el Golfo de México.

Los arroyos que se alojan en la cuenca nacen en la Sierra de Puebla en los municipios de Huauchinango, Zacatlán, Acatlán y Teziutlán. La corriente principal recibe los nombres de arroyo Zapata, río Coyuca, río Apulco y finalmente río Tecolutla. Los afluentes principales se muestran en la Figura 1-7 y son los ríos Xiucayucan, Tehuantepec y Laxaxalpan.

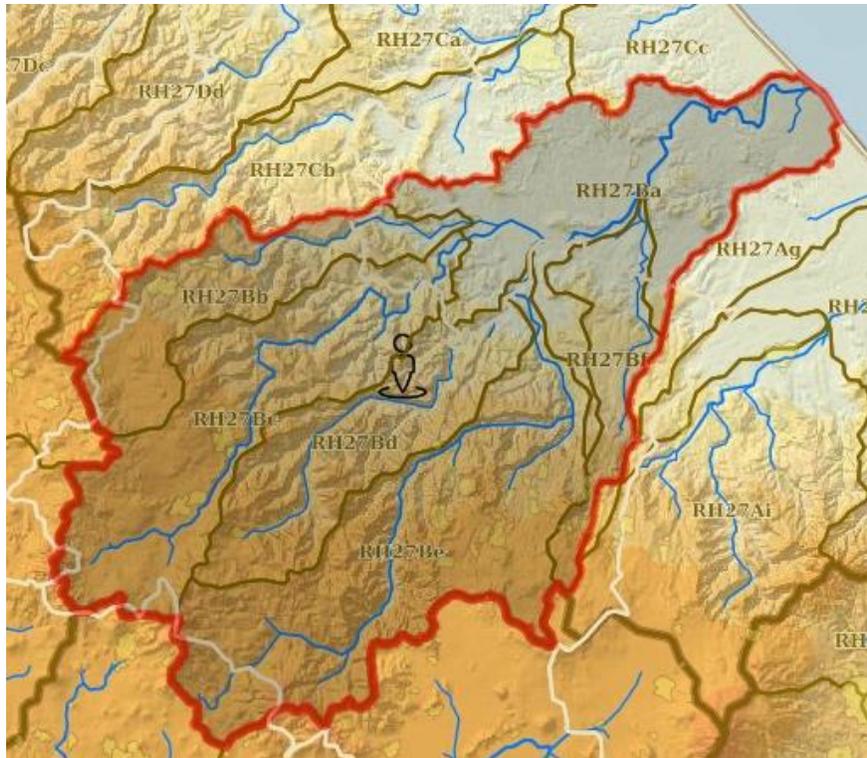


Figura 1-7 Cuenca del Río Tecolutla

1.3.3 Aprovechamientos hidráulicos

En la cuenca se construyeron los primeros aprovechamientos hidráulicos importantes en el país. Sobre el río Necaxa se ubica el sistema hidroeléctrico que recibe el mismo nombre. Además, se encuentran las presas de Los Reyes, Laguna, Acatlán, Tenango y Nexapa.

El presente proyecto planea construirse en la subcuenca del río Laxaxalpan, el río Laxaxalpan nace en el estado de Tlaxcala a una altitud de 3,250 msnm, en el cerro del Peñón del Rosario, en su inicio no tiene nombre, posteriormente recibe el nombre de río Tecoyuca y mantiene su curso hacia el noreste, 5 km al sur de Chignahuapan cambia de nombre por el del río Laxaxalpan. La subcuenca del río Laxaxalpan es la de mayor superficie dentro de la RH27 con un área de 1,608.95 km².

Por todo lo anteriormente mencionado se puede concluir que la zona brinda una oportunidad para construir nuevos proyectos, ya que cuenta con un amplio potencial hidroeléctrico.

1.4 MARCO NORMATIVO

México cuenta con una gran diversidad de ecosistemas, flora y fauna, las fuentes de energía siguen la misma línea. A partir de 1992 con la reforma a la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica y con la sobreexplotación de las energías fósiles y las altas emisiones contaminantes que de ellas se derivan, México ha promovido la generación de nuevas políticas energéticas con un enfoque a la inclusión de fuentes de energía limpia.

Las energías limpias son aquellas fuentes de energía y procesos de generación de electricidad definidos como tal en la Ley de la Industria Eléctrica (LIE).²

Las energías renovables son aquellas energías cuya fuente reside en fenómenos de la naturaleza o materiales propensos a ser transformados en energía aprovechable por el ser humano, que se regeneran naturalmente. Por lo anterior, las energías renovables se encuentran disponibles de manera continua o periódica, por lo tanto, no generan emisiones contaminantes.

De acuerdo con la Ley de Transición Energética, son consideradas fuentes de energías renovables:

1. El viento
2. La radiación solar
3. 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 la capacidad de generación y superficie del embalse, superior a 10 watts/m²
4. 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
5. El calor de los yacimientos geotérmicos
6. Los bioenergéticos que determine la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos

² Ley de la Industria Eléctrica, Del Objeto y Finalidad de la Ley. Definiciones. Art. 3, fracción XXII. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LIElec_110814.pdf

En México, el agua de ríos, lagos y acuíferos es propiedades de la nación y corresponde al Poder Ejecutivo su administración. De tal forma, se cuenta con dos instrumentos principales:

1. La Ley de Aguas Nacionales
2. La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)

La Figura 1-6 muestra un panorama general del marco legal que actúa sobre las energías renovables en México. Dicho marco está encabezado por la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.

En la Constitución no hay referencia alguna que exprese relación con las energías renovables, sin embargo, los artículos a los que se hace referencia en la Figura, se encuentran vinculados directa o indirectamente con tales formas de energía, por otra parte, la leyes en el aspecto de energías renovables son elementos relativamente nuevos dentro del marco jurídico a nivel nacional, a partir de la leyes se derivan ordenamientos (reglamentos) los cuales contienen disposiciones que regulan las energías renovables.



Figura 1-6 Marco legal de las energías renovables en México

Además, en México, cada seis años se elabora el Plan Nacional de Desarrollo, en él se plantean las prioridades, objetivos, y estrategias fijadas por autoridades federales durante el periodo sexenal.

El Plan Nacional de Desarrollo vigente reconoce el valor estratégico del agua como esencial, tiene como prioridad al recurso para atender las necesidades de la

población e impulsar el desarrollo de las actividades económicas dentro del territorio nacional, a lo anterior se antepone como requisito fundamental el cuidado y preservación del medio ambiente.

En el año 2015 se implementaron cambios en el sector energético en México, entró en vigor la Reforma Energética, a partir de ese momento se establecieron innumerables instituciones que buscaban regular la transición de los antiguos estatutos a la reforma.

Por un lado, existe un documento publicado en el Diario Oficial de la Federación, titulado, ACUERDO por el que la Secretaría de Energía aprueba y publica la actualización de la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios, en términos de la Ley de Transición Energética, el cual tiene como objetivos principales:

- Establecer las metas que el documento promulga
- Fomentar la reducción de emisiones contaminantes originadas por la industria eléctrica
- Reducir, bajo criterios de viabilidad económica, la dependencia del país de los combustibles fósiles, como fuente primaria de energía

Por otro lado, la Secretaría de Energía (SENER), publicó un documento denominado Prospectiva de Energías Renovables, que abarca los años del 2016 al 2030, en dicho documento, se establece un marco normativo y político en el manejo de energías renovables apegándose al marco de leyes nacionales e internacionales.

De acuerdo con las regulaciones anteriormente mencionadas, se espera que en el año 2024 se cumpla la meta del 35% de energías limpias y en el 2050 del 50%, para cumplir lo anterior se cuentan con 24 mecanismos legales obligatorios.

La Secretaría de Energía cataloga dentro de la tecnología limpia y renovable a: la energía hidroeléctrica, eólica, geotérmica, solar y termosolar, la Tabla 1-1 muestra la evolución de la capacidad instalada por tecnología limpia en México, los años 2016 y 2017 no muestran datos, es a partir del año 2018 que se tienen datos registrados, en el caso específico de la energía hidroeléctrica, se observa que no ha existido un aumento considerable entre los años 2019 y 2020.

Cabe mencionar que, de la capacidad de generación hidroeléctrica instalada en México, el 57.2% corresponde a centrales eléctricas propiedad de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), 17.5% pertenece a centrales eléctricas de Productores Independientes de Energía y el 25.3% restante a energía que particulares aportan bajo los esquemas de autoabastecimiento.

Tabla 1-1 Evolución de la capacidad instalada por tecnología limpia en México, Fuente PRODESEN

TECNOLOGÍA	2016	2017	2018	2019	2020
Limpia	N/D	N/D	25,007.356	29,192.755	31,902.755
<i>Renovable</i>	N/D	N/D	20,453.250	24,637.650	27,347.650
Hidroeléctrica	N/D	N/D	12,642.287	12,670.967	12,670.967
Eólica	N/D	N/D	4,875.375	659.875	8,127.575
Geotérmica	N/D	N/D	950.600	935.600	905.600
Solar Fotovoltaica	N/D	N/D	1,970.988	4,426.208	5,629.508
Termosolar	N/D	N/D	14.000	14.000	14.000

Datos en MW

1.4.1 Caudal ecológico

El caudal ecológico puede definirse como *la cantidad, calidad y variación del caudal reservado para preservar los servicios ambientales de los ecosistemas acuáticos y terrestres que dependen de procesos hidrológicos, ecológicos y sociales*³.

El 20 de septiembre de 2012 se publicó en el Diario Oficial de la Federación la declaratoria de vigencia de la Norma Mexicana MX-AA-159-SCFI-2012, la cual "Establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas".

La Norma Mexicana NMX – AA – 159 – SCFI – 2012 a la letra establece:

Para mantener el equilibrio de los elementos naturales que intervienen en el ciclo hidrológico, así como permitir la protección de los ecosistemas riparios, ecosistemas acuáticos terrestres y costeros, es necesario que se garantice un régimen de caudal ecológico en las corrientes o escurrimientos.

Por lo tanto, en todos los proyectos en las cuales los ecosistemas mencionados en el párrafo anterior se vean involucrados se debe considerar el caudal ecológico, el presente proyecto plantea la construcción de una central hidroeléctrica, por lo que, la Norma NMX – AA – 159 – SCFI – 2012 tendrá participación.

³ Gaceta del IMTA, Entra en vigor la Norma Mexicana para la Determinación del Caudal Ecológico. <https://www.imta.gob.mx/gaceta/anteriores/g61-10-2012/norma-mexicana-caudal-ecologico.html#:~:text=El%20caudal%20ecol%C3%B3gico%20se%20define,geomorfol%C3%B3gicos%20y%20sociales%22.>

La norma considera dos parámetros importantes para la clasificación de las cuencas hidrológicas, a continuación, se mencionan los mismos.

- Importancia ecológica
- Presión de uso del agua

Para la determinación de la importancia ecológica deben ser considerados: aspectos bióticos, aspectos de integridad ecológica y alteración ecohidrológica. La importancia ecológica puede clasificarse en: muy alta, alta, media y baja.

Por otro lado, la presión de uso del agua queda definida como la relación, en porcentaje, del volumen de agua asignado más el concesionado entre la disponibilidad media anual por cuenca o acuífero. La importancia de la presión de uso quedará establecida de acuerdo con los valores mostrados en la Tabla 1-2.

Tabla 1-2 Presión de uso del agua, Fuente NMX - AA - 159 - SCFI - 2012

PRESIÓN DE USO	MUY ALTA	ALTA	MEDIA	BAJA
	≥ 80%	≥ 40%	≥ 11%	≤ 10%

La Figura 1-7 complementa la Tabla 1-2, en ella se deberá asignar el objetivo ambiental (Importancia ecológica) correspondiente a la cuenca hidrológica de estudio.

Importancia Ecológica	Muy Alta	A	A	B	C
	Alta	A	B	C	D
	Media	B	C	C	D
	Baja	B	C	D	D
		Baja	Media	Alta	Muy Alta
		Presión de Uso			

Figura 1-7 Matriz de objetivos ambientales, Fuente NMX - AA - 159 - SCFI - 2012

El procedimiento para determinar la política de caudal ecológico a implementar en el proyecto es la siguiente:

1. Determinar el objetivo ambiental para la cuenca
2. Según el objetivo ambiental y la naturaleza de la corriente (permanente o intermitente) considerar el intervalo de porcentajes del Esguerrimiento Medio Anual (EMA)

Tabla 1-3 Valores de referencia para asignar un volumen de caudal ecológico conforme a los objetivos ambientales, Fuente NMX - AA- 159 - SCFI – 2012

OBJETIVO AMBIENTAL	ESTADO DE CONSERVACIÓN	CAUDAL ECOLÓGICO (EMA) [%]	
		CORRIENTES PERENNES	CORRIENTES TEMPORALES
A	MUY BUENO	>40	> 20
B	BUENO	25 - 39	15 - 19
C	MODERADO	15 - 24	10 - 14
D	DEFICIENTE	5 - 14	5 - 9

3. Asignar un porcentaje dentro del intervalo definido por el objetivo ambiental, en este punto es necesario considerar el interés de conservación de la cuenca, así como los posibles conflictos con el resto de los usos del agua o las condiciones particulares de la masa de agua (contaminación o alteración morfológica)
4. A partir de los escurrimientos obtenidos, obtener la parte que se considera caudal ecológico de acuerdo con el porcentaje elegido en el punto anterior

1.5 CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

Como su nombre lo dice, las centrales hidroeléctricas buscan aprovechar la energía que el agua proporciona para transformarla (con ayuda de turbinas) en energía eléctrica, lo anterior se realiza con la suma de: caudal del río, diferencia de niveles en la topografía y condiciones geológicas favorables.

Una central hidroeléctrica, está conformada por diversas obras:

- Obras de captación: tomas de derivación, presas de embalse y por bombeo
- Obras de conducción: canales y túneles, sifones y tuberías
- Obras de protección: desarenadores, rejillas, desfuegos, disipadores de energía

Además, existen obras complementarias como caminos, bancos de materiales y campamentos, que, aunque no son obras hidráulicas, complementan el proyecto.

1.5.1 Características importantes

Existen conceptos importantes que se encuentran intrínsecos dentro del análisis de un vaso de almacenamiento para generación eléctrica, dichos conceptos se describirán a continuación.

- *Potencia instalada ($Pot_{Instalada}$)*

Es la capacidad global que tiene la central hidroeléctrica en cuanto a generación de energía, la potencia instalada se obtiene como lo indica la expresión 1.1:

$$Pot_{Instalada} = 9.81\eta_G Q_{Equipado} H_{Bruta} \quad 1.1$$

donde:

$Pot_{Instalada}$: potencia instalada [kW]

η_G : eficiencia global de la central hidroeléctrica

$Q_{Equipado}$: gasto equipado de la central hidroeléctrica [m^3/s]

H_{Bruta} : carga bruta de la central hidroeléctrica [m]

- *Potencia media (Pot_{Media})*

La potencia media de una central eléctrica es la razón de generación media anual al número de horas del año, que para términos prácticos se consideran 8,760 h/año.

*En hidráulica la potencia media se puede expresar en función de las características hidroenergéticas del aprovechamiento.*⁴

$$Pot_{Media} = 9.81\eta_G Q_{Turbinado} H_{Bruta} \quad 1.2$$

donde:

Pot_{Media} : potencia media [kW]

η_G : eficiencia global de la central hidroeléctrica

$Q_{Turbinado}$: gasto turbinado [m^3/s]

H_{Bruta} : carga bruta de la central hidroeléctrica [m]

- *Generación media (Gen_{Media})*

Es el resultado del producto de la potencia media (Pot_{Media}), las horas de operación (Hrs_{Op}) y los días que trabajará la central ($Días$).

$$Gen_{Media} = \frac{Pot_{Media} Hrs_{Op} Días}{1000000} \quad 1.3$$

donde:

Gen_{Media} : generación media [GWh/mes]

Pot_{Media} : potencia media [kW]

Hrs_{Op} : horas de operación de la central [horas]

$Días$: días de operación de la central durante cada mes [días]

⁴ García, Nava, 2013 , p. 2

- *Generación media total* ($Gen_{Media\ Total}$)

Se obtendrá una generación media por cada unidad generadora instalada, por lo tanto, la generación media total será la suma de cada generación media aportada por cada unidad. Lo anterior queda reflejado en la expresión 1.4

$$Gen_{Media\ TOTAL} = \sum_{i=1}^n Gen_{Media\ n} \quad 1.4$$

donde:

$Gen_{Media\ TOTAL}$: *generación media TOTAL para la central [GWh/mes]*

$Gen_{Media\ n}$: *generación media de cada unidad instalada [GWh/mes]*

- *Generación media anual* ($Gen_{Media\ ANUAL}$)

Es la suma de la generación media total ($Gen_{Media\ TOTAL}$) de cada mes.

$$Gen_{Media\ ANUAL} = \sum_{i=1}^{12} Gen_{Media\ TOTAL\ i} \quad 1.5$$

1.5.2 Turbinas

La turbina es la máquina hidráulica que transforma energía hidráulica en energía mecánica, posteriormente, un generador transforma la energía mecánica en energía eléctrica.

Las turbinas pueden ser agrupadas en dos grupos, de reacción o de acción. En el primer grupo, el rodete se mueve sumergido en el agua, es decir, son aquellas turbinas en las que el trabajo mecánico se obtiene por medio de la transformación de la energía cinética y de la presión del agua por medio de elementos giratorios.

En el segundo grupo, la energía potencial del agua en un almacenamiento se transforma en energía cinética cuando el agua está en movimiento. El agua en movimiento choca con los elementos giratorios de la turbina cuyo rodete no está sumergido, en este caso no existe una diferencia de presiones a la entrada y salida de la turbina.

Las turbinas comúnmente instaladas en las centrales hidroeléctricas son:

- Turbina Pelton

Desarrollada por el estadounidense Lester Allan Pelton, esta turbina cuenta con un rodete que en su perímetro tiene instalados álabes, los álabes giran al momento de ser impactados en dirección tangencial por un chorro de agua, el chorro de agua es lanzado a alta velocidad. El flujo es dirigido por uno o varios dispositivos llamados inyectores. Las turbinas Pelton entran dentro de la clasificación de turbinas de acción. Están catalogadas para trabajar con cargas mayores a los 1,500 m. y gastos pequeños.

La Figura 1-8 muestra un corte transversal de una Turbina Pelton, el flujo de agua va de izquierda a derecha, pasa a través de los inyectores, posteriormente golpea las paletas del rodete, una vez que se produce el giro en el rodete el agua es liberada a través de la descarga.

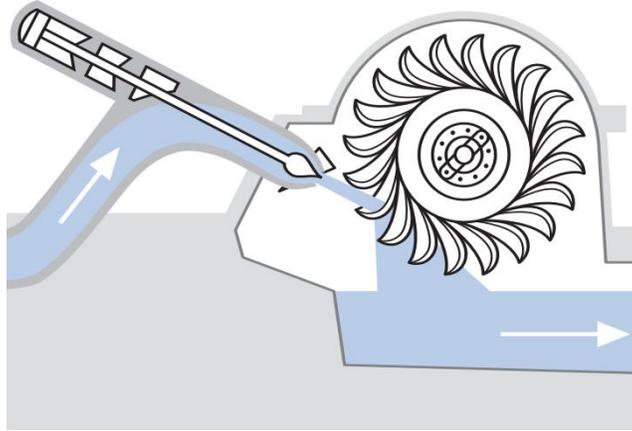


Figura 1-8 Turbina Pelton

- Turbina Kaplan

Diseñada por el austriaco Viktor Kaplan, este tipo de turbina es comúnmente utilizada para caudales grandes con cargas cercanas a los 50 m. Es una turbina de reacción y el flujo entra de manera axial. Los álabes del rodete, así como del distribuidor, pueden ser ajustados, optimizando la generación de energía. La Figura 1-9 muestra un corte a través del cual se aprecia el interior de una Turbina Kaplan, se aprecia que los álabes del rodete tienen forma de hélice.

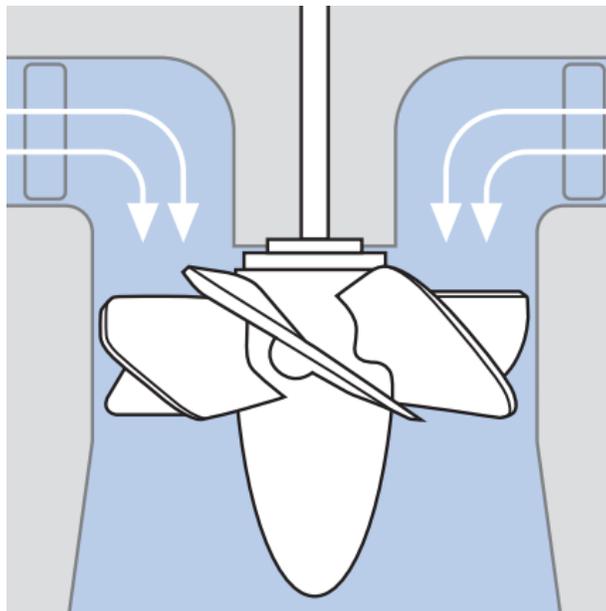


Figura1-9 Turbina Kaplan

- Turbina Francis

Debe su nombre a James B. Francis, quien fue el hombre que la desarrolló, al igual que la anterior, es una turbina de reacción, usada para cargas que van entre los 20 a los 700 m. y caudales grandes. Su funcionamiento consiste en un flujo que impulsa los álabes del rodete de forma perpendicular a su eje de giro, posteriormente, el flujo es expulsado de forma axial, en dirección paralela al eje, lo anterior sucede gracias a la torsión que se presenta en los álabes. Es la turbina más comúnmente equipada debido a que, en condiciones óptimas de generación, su eficiencia puede ser de alrededor del 90%.

En la Figura 1-10 se aprecia el interior de una Turbina Francis, se observa cómo el flujo viaja por medio del distribuidor y es dirigida hacia las paletas del rodete, las paletas son fijas y curvas, además, se orientan en sentido antihorario.

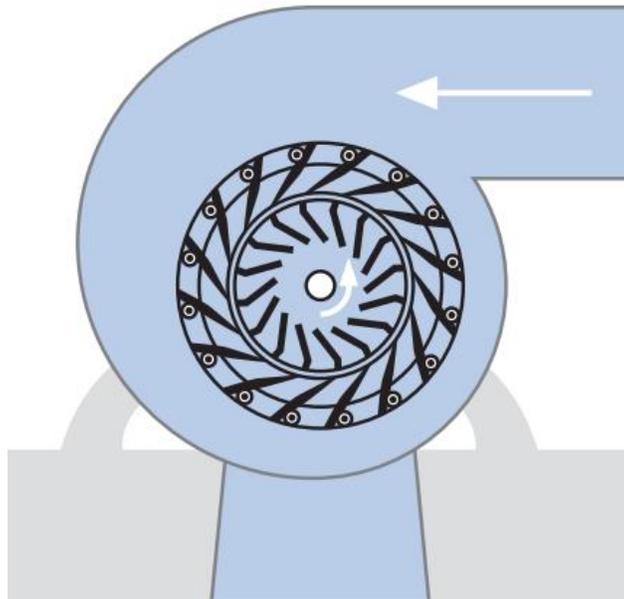


Figura 1-10 Turbina Francis

1.6 CLASIFICACIÓN DE LAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

Las centrales hidroeléctricas pueden ser clasificadas de acuerdo con: su potencia instalada, generación de energía, obra de toma, turbinas, obra de excedencias, embalse, cortina, entre otros. A continuación, se describen algunas clasificaciones que, asociaciones como la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), organismo al cual México está afiliado, sugiere:

1. Según su potencial

- Picocentrales: Capacidad instalada entre 0.5 y 5 kW
- Microcentrales: Capacidad instalada entre 5 y 50 kW
- Minicentrales: Capacidad instalada entre 50 y 500 kW
- Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH): Capacidad instalada entre 500 y 20,000 kW (20 MW), sin posibilidad de abastecer energía eléctrica
- Centrales Hidroeléctricas (CH): Capacidad instalada mayor de 20 MW, con posibilidad de abastecer energía eléctrica

2. Según su carga hidráulica

- Centrales de caída baja: Carga menor a 30 m
- Centrales de caída media: Carga entre 30 y 150 m
- Centrales de caída alta: Carga entre 150 y 300 m
- Centrales de caída muy alta: Carga entre 300 y 2,000 m

3. Según su embalse

- Centrales a caudal libre sin regulación: No cuentan con ninguna estructura de almacenamiento pues emplean el gasto libre que tiene el río, solamente cuentan con una estructura de derivación que se encarga de distribuir el flujo a la o las turbinas. Por lo regular este tipo de centrales son de baja potencia y son comúnmente utilizadas como centrales de apoyo para cubrir demandas en horas pico.

- Centrales de regulación: Se construye una barrera (cortina) al paso de la corriente de agua, la cortina obstruye el paso y con ayuda de un almacenamiento (vaso) acumula cierto volumen de agua, el volumen es regulado para posteriormente ser conducido hasta las turbinas y posteriormente generar energía eléctrica.
- Centrales de acumulación por bombeo: En este tipo de centrales se dispone de dos vasos de almacenamiento situados a distinta elevación, cuando la demanda de energía eléctrica aumenta (horas pico) el agua almacenada en el vaso con elevación superior es utilizada para generar energía, posteriormente, cuando la demanda disminuye, se bombea agua del vaso de menor elevación al de mayor elevación. Es común que en este tipo de centrales sean instaladas turbinas reversibles que hagan también la función de bombas.

1.7 COMPONENTES DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA

- Casa de máquinas: lugar en donde se instalan las unidades turbina-generador.
- Conducción: túnel que conecta el inicio de la obra de toma con la tubería a presión.
- Desfogue: salida del tubo de aspiración y va hasta la superficie libre del agua de la descarga. Por medio del desfogue el gasto turbinado es puesto de nuevo en el cauce del río.
- Línea de transmisión: línea eléctrica que, junto con una instalación eléctrica se encarga de distribuir la energía generada.
- Obra de toma: estructura por medio de la cual se extrae la demanda de agua requerida del vaso.
- Rejillas: estructuras metálicas de protección que se colocan al inicio de la obra de toma, ayudan a evitar el paso de elementos mayores a cierto tamaño que puedan entrar a la obra de toma y posteriormente dañar la turbina.
- Tanque de oscilación: estructura de concreto armado, construida generalmente de sección circular, su función es reducir el golpe de ariete.

- Tubería a presión: tubería de acero que conduce el agua hasta la casa de máquinas.
- Turbinas: máquinas que aprovechan la energía cinética y potencial del agua para generar energía mecánica, la energía generada es transmitida por medio de un eje a un generador para transformarla en energía eléctrica.

CARACTERÍSTICAS DE LOS COMPONENTES

- Aducción: área que va desde las rejillas de la obra de toma, hasta la brida de entrada de la turbina.
- Altura de sumergencia: diferencia de elevaciones entre el nivel del agua en el desfogue y la línea del distribuidor. La altura de sumergencia evita la formación de vórtices de aire dentro de la tubería.
- Toma de agua: área de la obra de toma donde se recoge el agua requerida para accionar la o las turbinas.

La Figura 1-11 representa de manera gráfica los componentes descritos anteriormente.

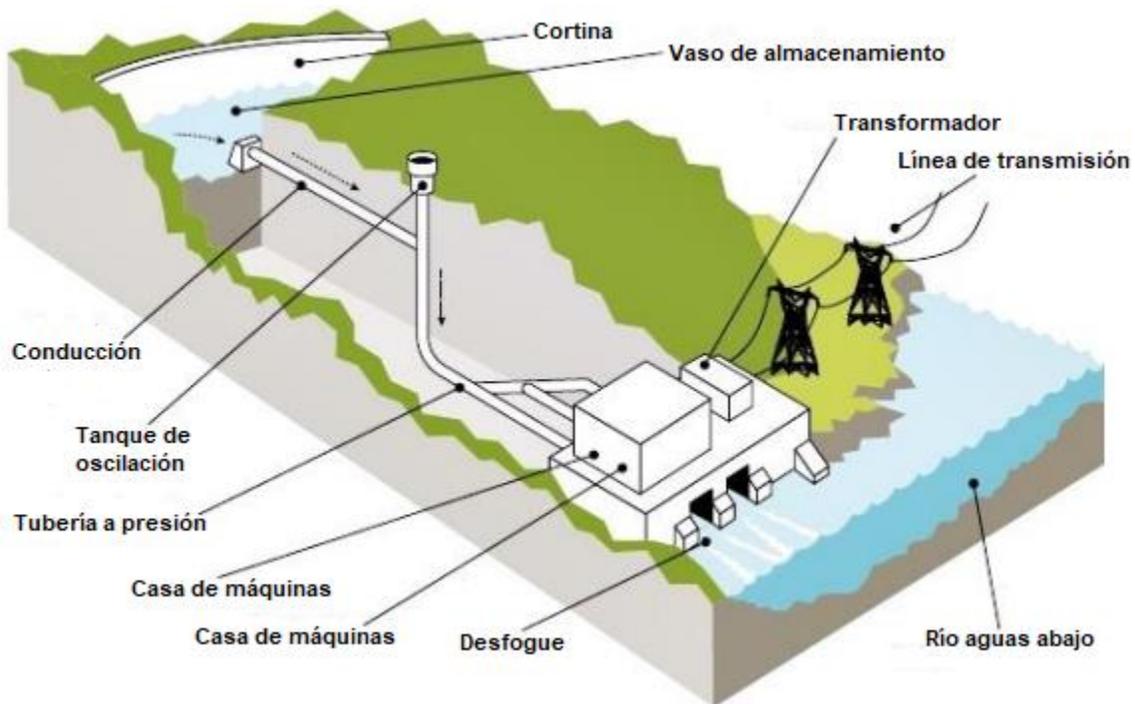


Figura 1-11 Esquema de los componentes de una central hidroeléctrica, Fuente Universidad de Cantabria

1.8 FACTOR DE PLANTA

Es necesario establecer un valor que determine el grado de consumo de la capacidad instalada en una central hidroeléctrica, dicho valor se representa a través de un cociente denominado factor de planta. El factor de planta (FP) es el cociente entre la generación media total ($Gen_{Media\ TOTAL}$) y la generación teórica máxima mensual, esta última está relacionada con la capacidad instalada.

$$FP = \frac{Gen_{Media\ TOTAL}}{Gen.\ Teórica_{MAX}} \quad 1.6$$

donde:

$Gen_{Media\ TOTAL}$: generación media TOTAL para la central [GWh/mes]

$Gen.\ Teórica_{MAX}$: generación teórica para la central [GWh/mes]

Por lo tanto, el factor de planta indica el grado de aprovechamiento de las centrales hidroeléctricas, en comparación con los recursos hídricos disponibles.

Otra forma de representar el factor de planta es la siguiente:

$$FP = \frac{Potencia_{media}}{Potencia_{instalada}} \quad 1.7$$

donde:

$Potencia_{media}$: Potencia media [kW]

$Potencia_{instalada}$: Potencia instalada [kW]

2. VASOS DE ALMACENAMIENTO

Los vasos de almacenamiento tienen la función de almacenar los volúmenes de agua excedentes que escurren de un río en la época de lluvias, lo anterior se realiza con el objetivo de satisfacer una demanda de agua en la temporada de secas.

La demanda de agua puede tener diversos propósitos, tales como: generación, abastecimiento de agua potable, irrigación y control de avenidas, además para otros propósitos como recarga de acuíferos, usos recreativos, inclusive acuicultura.

En la Figura 2-1 se muestra una representación del volumen que pueden ser almacenado en un vaso. Generalmente la temporada de lluvias en la República Mexicana comienza en el mes de mayo, a partir de junio y septiembre comienzan las precipitaciones más abundantes, la misma concluye a finales de noviembre. Por lo anterior es que en la siguiente figura se observa que en los meses de junio a noviembre las presas pueden tener un excedente en su almacenamiento, y en los meses restantes un déficit de volumen almacenado.

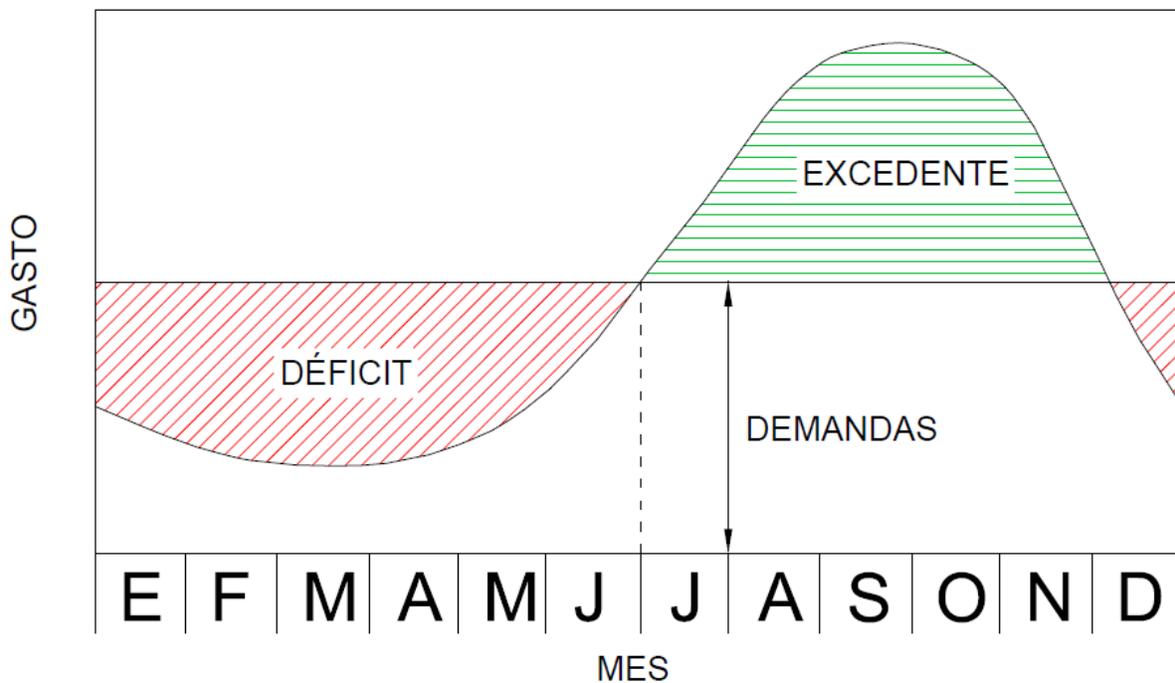


Figura 2-1 Representación mensual del gasto escurrido en un río

2.1 CARACTERÍSTICAS DE UN VASO DE ALMACENAMIENTO

- **NAMIN (Nivel de Aguas Mínimas):** nivel de agua mínimo que el embalse puede alcanzar, por lo general se ubica al mismo nivel de la obra de toma.
- **NAMINO (Nivel de Aguas Mínimas de Operación):** es el nivel de agua mínimo con el cual la presa puede operar para satisfacer la demanda, en las centrales hidroeléctricas se debe tener en consideración que las turbinas necesitan de una carga para asegurar una eficiencia aceptable.
- **NAMO (Nivel de Aguas Máximo Ordinario):** nivel máximo en el cual la presa puede operar para satisfacer la demanda requerida. En caso de que la obra de excedencias tenga compuertas el nivel de NAMO puede ser mayor a la cresta del vertedor, en caso contrario el NAMO deberá coincidir con dicha cresta.
- **NAME (Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias):** nivel más alto que el agua puede alcanzar en el vaso de almacenamiento en cualquier condición, ya sea, en la presencia de una avenida máxima o en el funcionamiento de la obra de excedencias.
- **VOLUMEN ÚTIL:** volumen de agua comprendido entre el NAMO y el NAMINO, en las centrales hidroeléctricas brinda la carga necesaria a las turbinas.
- **VOLUMEN DE AZOLVES:** volumen que se acumula en la presa debido al transporte y acarreo de sedimentos, el volumen de azolves determina la vida útil de la presa, pues en caso de ser rebasado la obra de toma no funcionaría.
- **SUPERALMACENAMIENTO:** volumen de agua almacenado entre el NAMO y el NAME, es el volumen de agua máximo retenido en el tránsito de la avenida.
- **BORDO LIBRE:** distancia vertical entre el NAME y la corona de la cortina, es una protección de la cortina contra efectos de oleaje o sismos.
- **CORONA DE LA CORTINA:** altura máxima de la cortina, su elevación corresponde a la elevación del NAME más el bordo libre.

Las características descritas anteriormente se muestran en la Figura 2-2.

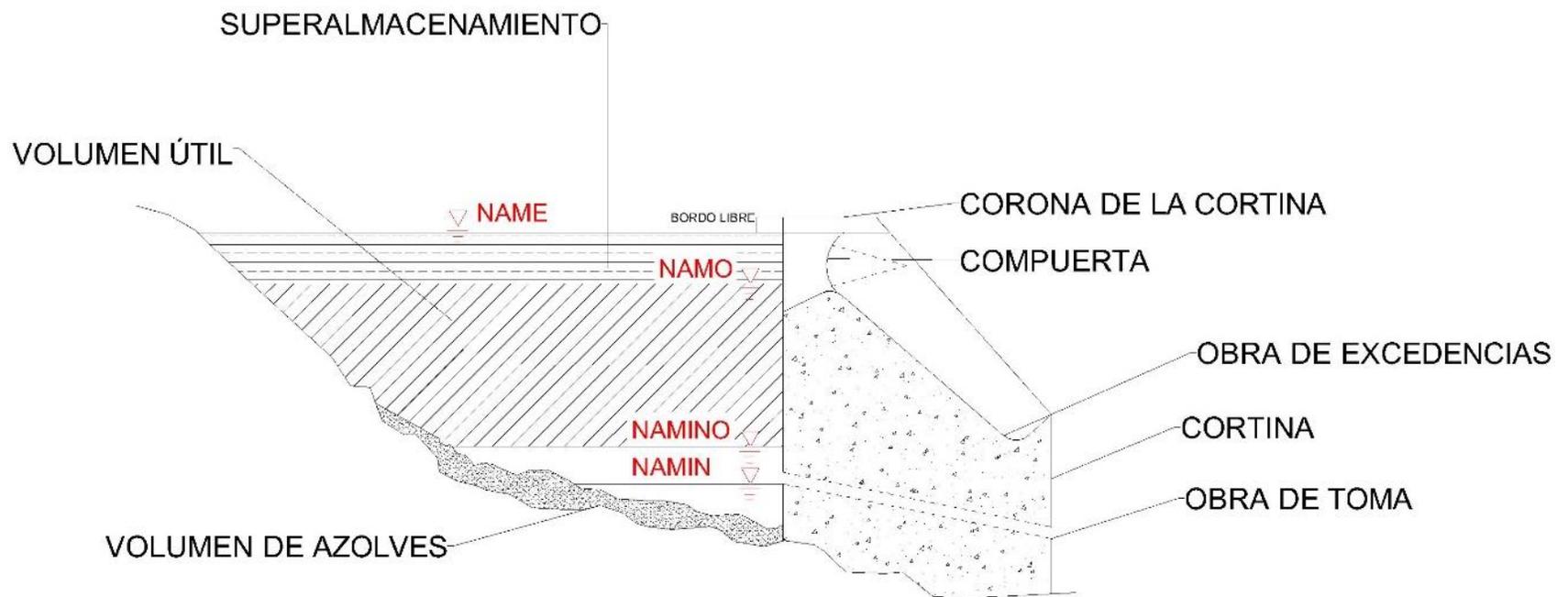


Figura 2-2 Componentes de un vaso de almacenamiento

2.2 ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN O CAPACIDAD ÚTIL

El cálculo del volumen o capacidad útil de la presa es un paso importante en el diseño de esta, dicho volumen será el necesario para surtir la demanda aceptando las deficiencias (pérdidas) admisibles. Para el cálculo de la capacidad útil es necesario contar con los siguientes datos:

- Topografía del sitio, dibujos digitales o cartas topográficas, con ellos es posible realizar la curva de E-A-V (Elevaciones-Áreas-Volúmenes) del vaso. En dicha curva se relaciona el área y volumen que el vaso de almacenamiento podría tener en cierta elevación.
- Determinar si la demanda de la presa será constante o variable, además es necesario el dato de disponibilidad (aportaciones del río).
- Estudio de azolves. Mediciones o deducciones de material en suspensión, más las mediciones por arrastre de fondo (porcentaje del material en suspensión).

2.3 CURVA ELEVACIONES – ÁREAS – CAPACIDADES

Como se mencionó anteriormente la topografía del sitio donde se plantea construir la cortina es esencial, un levantamiento topográfico es la mejor forma de recabar las elevaciones que se presentan en el terreno, tales elevaciones se traducirán en curvas de nivel. La curva elevaciones – áreas – capacidades se construye a partir de dichas curvas de nivel, en la curva es posible apreciar el volumen (capacidad) de agua que podría ser almacenado a cada altura de la cortina, agregado a la elevación y la capacidad, es posible conocer también el área del embalse. Por lo tanto, la importancia de la curva radica en que además de hacerse propuestas en la localización de la cortina, es posible establecer los niveles de la cortina (NAME, NAMO y NAMINO). La curva elevaciones – áreas – capacidades es un apoyo en el dimensionamiento de la cortina.

La Tabla 2-1 muestra el área y el volumen acumulado que le corresponde a cada elevación, es a partir de esta tabla que se genera la curva que se observa en la Figura 2-3.

En la Figura 2-3 se muestra el ejemplo de una curva de elevaciones – áreas – capacidades, las áreas pueden ser medidas directamente de un plano, en épocas recientes y con ayuda de programas es posible medir esas áreas entre las curvas de nivel de manera directa.

Tabla 2-1 Ejemplo de elevaciones, áreas y volúmenes en el vaso

Elevación [msnm]	Área [km ²]	Vol. Acum. [Hm ³]
100.00	0.00	0.00
110.00	1.00	0.05
120.00	2.50	10.00
130.00	5.00	25.00
140.00	10.00	45.00
150.00	15.00	65.00
160.00	20.00	85.00
170.00	25.00	105.00
180.00	30.00	125.00

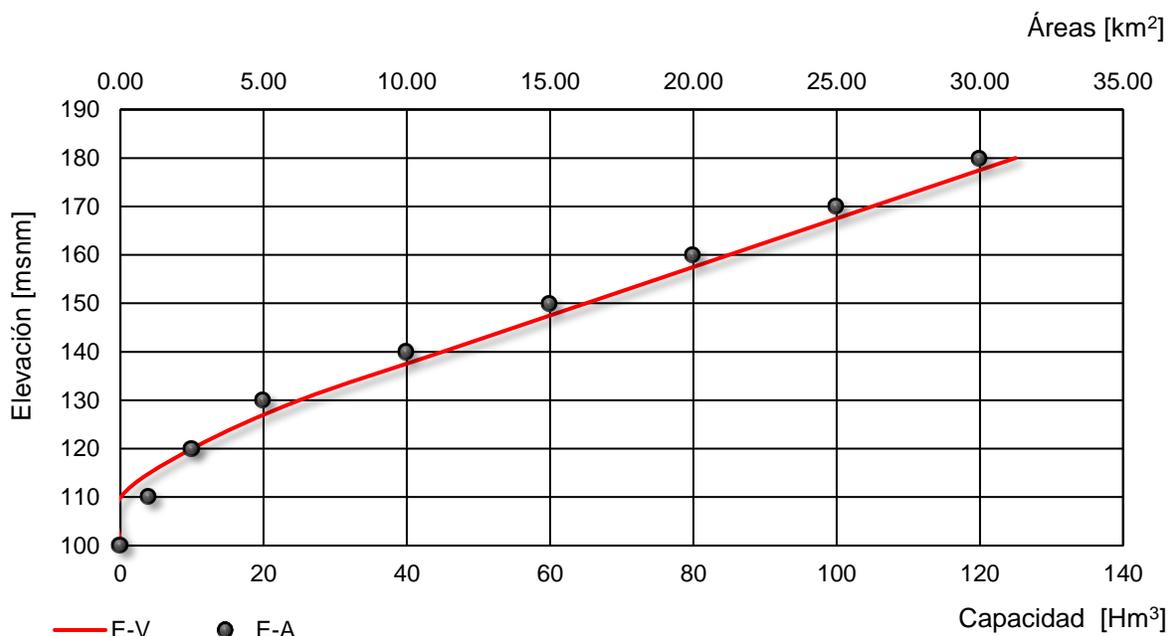


Figura 2-3 Ejemplo de curva Elevaciones – Áreas – Capacidades

3. FUNCIONAMIENTO DE VASOS

Partiendo de la ecuación de continuidad y haciendo la consideración del subíndice i como el inicio del intervalo de estudio y el subíndice $i + 1$ como el final de dicho intervalo, la ecuación de continuidad queda escrita como se muestra en la ecuación 3.1:

$$V_{i+1} = V_i + E_i - S_i \quad 3.1$$

donde:

V_{i+1} : volumen almacenado al final del intervalo

V_i : volumen almacenado al comienzo del intervalo

E_i : entradas al vaso

S_i : salidas del vaso

Desarrollando la ecuación 3.1

$$V_{i+1} = V_i + I_i - OTotal_i - ODemanda Entregada_i \quad 3.2$$

donde:

V_{i+1} : volumen almacenado al final del intervalo

V_i : volumen almacenado al comienzo del intervalo

I_i : entradas totales al vaso durante el intervalo

$OTotal_i$: pérdidas en el vaso durante el intervalo

$ODemanda Entregada_i$: demanda entregada al final del intervalo

Siendo:

$$I_i = ICP_i + IT_i + Ih_{p_i} \quad 3.3$$

donde:

I_i : entradas totales al vaso durante el intervalo

ICP_i : entradas o escurrimientos generados por cuenca propia en el intervalo

IT_i : entradas por transferencia desde otras cuencas

Ih_{p_i} : entradas por lluvia directa sobre el vaso

$$OTotal_i = OQ_{ecológico_i} + OEvap_i + OInf_i + Derr_i \quad 3.4$$

donde:

$OQ_{ecológico_i}$: *gasto ecológico que demanda la ley*

$OEvap_i$: *volumen evaporado en el intervalo*

$OInf_i$: *volumen infiltrado en el intervalo*

$Derr_i$: *volumen derramado por la obra de excedencias durante el intervalo*

Al analizar el funcionamiento del vaso es importante considerar la siguiente restricción:

$$V_{NAMINO} \leq V_{i+1} \leq V_{NAMO} \quad 3.5$$

La restricción anterior cobra importancia pues, por un lado, en caso de que el volumen V_{i+1} sea menor al nivel del NAMINO la presa no podrá operar, por otro lado, si el volumen V_{i+1} supera el nivel del NAMO, la obra de excedencias entrará en funcionamiento y derramará, cualquiera de los dos casos mencionados se traduce en pérdidas económicas importantes.

4. DESARROLLO DEL CASO DE ESTUDIO

4.1 PROCESO DE ANÁLISIS DEL CASO DE ESTUDIO

En primer lugar, se definió la ubicación de la cortina, además, con las curvas de nivel del sitio a cada dos metros se realizó la curva de E – A – V. Posteriormente, y con los datos obtenidos anteriormente se realizó un primer análisis del vaso, calculando la Generación Media Anual (GMA) y su respectiva potencia instalada, lo anterior se realizó proponiendo distintos gastos equipados. Los resultados fueron graficados y a partir de dicha gráfica se tomó la decisión de que el gasto equipado a utilizar en el funcionamiento de vaso sería el de 35 m³/s, con el gasto equipado y los datos de escurrimiento (disponibilidad) y demanda se prosiguió al análisis del funcionamiento de vaso, los resultados arrojan el déficit o superávit en la capacidad del vaso para poder satisfacer la demanda. En la Figura 4-1, se muestra un diagrama en el cual se representa el proceso anteriormente descrito.



Figura 4-1 Diagrama de flujo del proceso de análisis del caso de estudio

4.2 UBICACIÓN DEL PROYECTO

En la Figura 4-2 se observa la localización del proyecto, el sitio designado para la obra se encuentra en las coordenadas 97° 41' 31.71" Oeste y 20° 7' 40.77" Norte, en el cauce del río Ajajalpan, los municipios más cercanos al proyecto son Joapala y Olintla y se ubican en el estado de Puebla, la central hidroeléctrica se encontrará a 3.8 km y 3.1 km respectivamente de cada poblado.

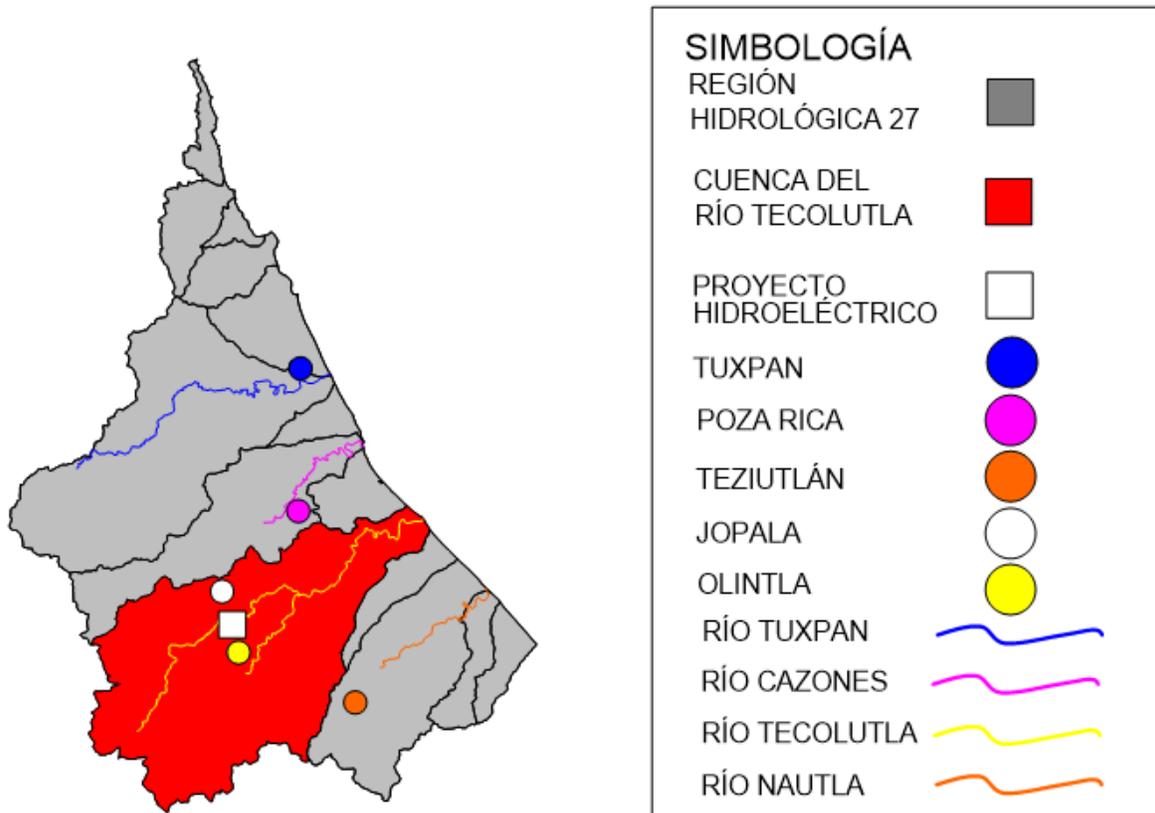


Figura 4-2 Localización del proyecto

4.3 FUNCIONAMIENTO DE VASO EN EL SITIO DE ANÁLISIS (RÍO AJAJALPAN)

En este apartado se presenta el cálculo del funcionamiento del vaso, se especifican los escurrimientos en el mismo. Además, se describen las demandas y salidas dentro del vaso, es importante mencionar que en este análisis no se consideraron salidas por infiltración ni por evaporación en el vaso.

4.3.1 Procedimiento de cálculo de funcionamiento de vaso

Partiendo de la ecuación de continuidad, expresada en un intervalo de tiempo Δt :

$$I - O = \Delta V \quad 4.1$$

donde:

I: volumen de entradas al vaso en el intervalo Δt

O: volumen de salidas del vaso en el intervalo Δt

ΔV : cambio de volumen en el vaso de almacenamiento en el intervalo Δt

Las entradas al vaso quedan compuestas por:

$$I = I_{CP} + I_T + I_{h_p} \quad 4.2$$

donde:

I_{CP}: entradas por cuenca propia (escurrimientos)

I_T: entradas por transferencia de otras cuencas

I_{h_p}: entradas por lluvia directa sobre el vaso

Para el caso específico del presente trabajo no se consideraron entradas por transferencia de otras cuencas ni por lluvia directa sobre el vaso, por lo tanto, la ecuación 4.2 queda como:

$$I = I_{CP} \quad 4.3$$

Por otra parte, las salidas quedan conformadas de la siguiente manera:

$$O: O_{Demanda} + O_{Ecológico} + O_{Evap} + O_{Inf} + O_{Derr} \quad 4.4$$

donde:

$O_{Demanda}$: volumen de agua extraído para satisfacer la demanda

4.3.2 Entradas al vaso

Las entradas al vaso consideradas para este proyecto se componen de registros hidrométricos (aportaciones por cuenca propia) de una estación cercana a la zona. En la Figura 4-3 se observa la localización de la estación hidrométrica, así como la cortina del proyecto. Los registros de escurrimientos obtenidos de la estación 27050 (Santa Ana) comprenden del año 1961 al año 1981. La estación hidrométrica (de coordenadas 97° 23' 12.03" Oeste y 19° 57' 11.14" Norte) se encuentra a 37.33 km del sitio donde se ubicará la cortina.

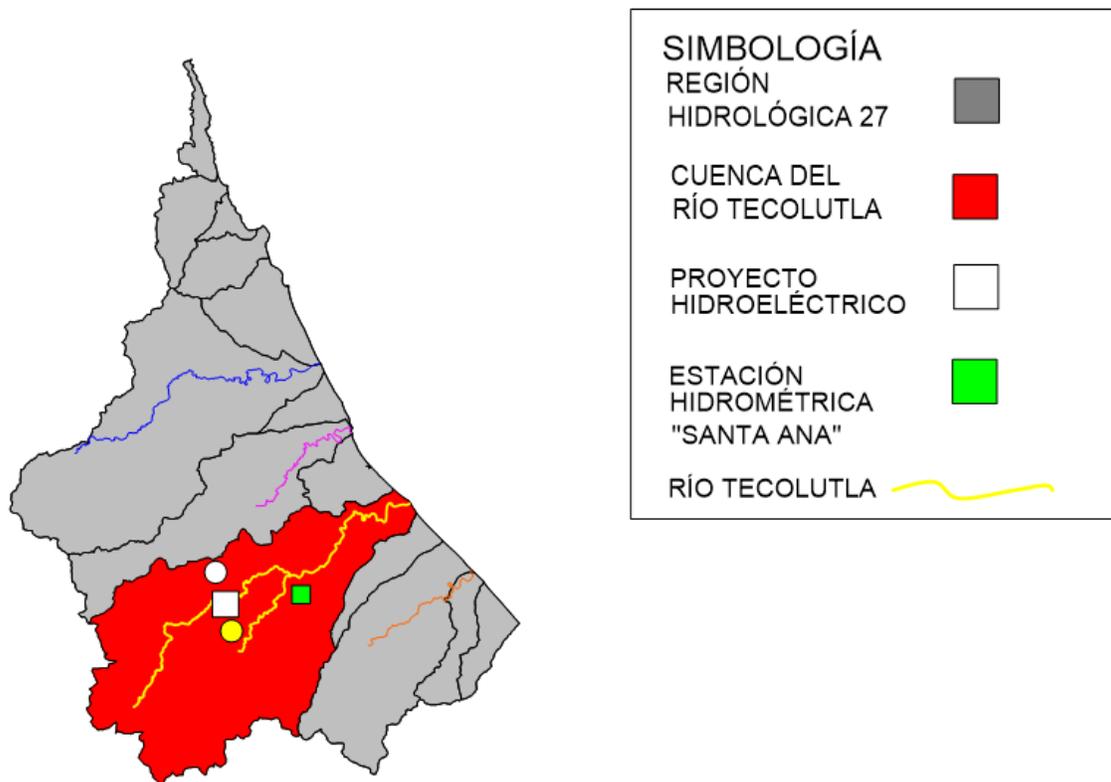


Figura 4-3 Ubicación de la estación hidrométrica 27050 "Santa Ana", Fuente Google Maps

El área drenada que cubre la estación es de 1,670 km², se localiza sobre el río Laxaxalpan, a 6 km aguas arriba del afluente del río Necaxa, en el municipio de Coxquihui, en el Estado de Veracruz, su instalación tiene como objetivo la determinación de la corriente para futuros aprovechamientos. El aforo en la estación se realiza por medio del método de sección velocidad, se emplea un molinete para determinar esta última.

Cabe mencionar que en el presente estudio no se consideraron entradas por transferencia de otras cuencas, lo anterior se considera pues no se tienen registros de descargas de presas aguas arriba del sitio de estudio.

Tabla 4-1 Estación hidrométrica Santa Ana, obtenido del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC
1961	10.35	6.1	6.18	13.84	14.44	15.96	61.36	71.8	82.7	53.5	40.8	17.1
1962	10.56	6.18	6.03	14.56	10.57	18.16	67.92	22.81	88.76	55.09	19.7	15.54
1963	12.08	6.8	5.56	4.33	7.7	23.03	70.23	80.02	62.39	27.23	24.83	14.12
1964	10.7	9.54	6.98	10.98	18.33	79.47	61.89	26.18	44.3	59.34	49	37.31
1965	27.93	10.38	8.61	15.84	12.45	54.48	86.81	178.8	55.3	66.93	25.76	8.92
1966	10.53	12.97	16.48	16.85	16.39	93.55	81.36	54.07	94.54	67.13	23.11	9.79
1967	12.65	11.29	10.68	7.45	15.02	84.36	91.13	83.74	89.47	63.48	22.96	14.56
1968	16	9.42	10.9	16.5	14.1	39.4	72.2	105	108	68.8	22	31.8
1969	20.1	13.9	14.5	13.5	9.7	9.29	114	162	228	45.5	21.8	16.6
1970	9.76	17.8	11.2	6.3	8.03	58.9	83.83	110	136	62.4	18.2	11.7
1971	13.6	14.4	15.2	22.9	9.8	33	90.4	128	102	154	72.2	23.2
1972	22.1	14.1	14.2	8.68	14.1	109	105	97.8	84	63.4	33.2	19.7
1973	10.2	10.06	9.2	5.36	20.57	65.1	127.1	151.3	90.5	75.8	16.3	18.61
1974	11.1	10.8	9.4	11.2	7	89.9	107.1	55.1	111	49.15	26.6	19.5
1975	12.4	11.1	5.83	4.62	5.54	24.7	54.7	107	184.5	85.5	20.9	20.6
1976	28.2	16	19.7	13.5	24.9	98.8	126	119	197	130	46.8	25.7
1977	16.2	15.9	8.11	5.94	5.63	36.7	75.15	30.6	26.8	85.8	33	17.1
1978	7.84	7.21	11.4	6.57	7.41	76.9	67.3	79.5	84	110	29.4	13.4
1979	11.3	15.4	9.4	9.76	17.5	50.4	40.3	127	150	15.8	30.5	17.6
1980	10.3	7.9	8.36	12.8	6.72	26.9	26	61	122	48.6	22.7	18.8
1981	19.8	15.4	9.98	27.9	12.9	126	99.9	191	98.9	66.4	25.9	32.5

El registro histórico que muestra la Tabla 4-1 refleja los gastos medios diarios, en m³/s, de la estación Santa Ana, a partir de dichos gastos se obtuvieron los gastos medios correspondientes a cada mes y el gasto promedio de los 20 años de análisis, dichos gastos medios son la media de cada mes. En la Tabla 4-2 se muestran los gastos promedio mensuales (durante 20 años), además, su correspondiente gasto máximo y mínimo.

Tabla 4-2 Gastos medios mensuales, en la estación hidrométrica Santa Ana

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Q _{promedio} [m ³ /s]	14.46	11.55	10.38	11.88	12.32	57.81	81.41	97.22	106.67	69.23	29.79	19.25
Q _{MÁXIMO} [m ³ /s]	28.20	17.80	19.70	27.90	24.90	126.00	127.10	191.00	228.00	154.00	72.20	37.31
Q _{mínimo} [m ³ /s]	7.84	6.10	5.56	4.33	5.54	9.29	26.00	22.81	26.80	15.80	16.30	8.92

4.3.3 Salidas del vaso

Las salidas van relacionadas con el tipo de demanda que se tiene propuesta, pueden ser de generación eléctrica, riego, abastecimiento de agua potable, etc. En el caso del presente proyecto la demanda será para generación. Más adelante se determinará el gasto equipado elegido con base a el estudio de prefactibilidad y a la curva de frecuencia.

Además de las salidas por generación, en un primer caso de análisis (funcionamiento de vaso), se considerarán salidas por gasto ecológico, tal y como lo establece la Comisión Nacional de Agua (CONAGUA) y la Norma Mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012. Haciendo un análisis de la ubicación del proyecto, considerando que el estado de conservación de la cuenca es muy bueno y que el objetivo ambiental de la misma es del tipo "A", se adoptó la política de gasto ambiental mostrada en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3 Política de gasto ecológico

MES	PORCENTAJE
ENE	100%
FEB	100%
MAR	100%
ABR	100%
MAY	100%
JUN	100%
JUL	50%
AGO	50%
SEPT	50%
OCT	50%
NOV	50%
DIC	100%

4.3.4 Curva de frecuencia

Como su nombre lo dice, la curva de frecuencia representa el número de ocasiones que se repite el gasto en cierta cantidad de tiempo (20 años), a lo largo de veinte años la estación hidrométrica Santa Ana ha tenido un registro de 253 datos de escurrimientos.

El procedimiento para realizar la curva de frecuencia fue el siguiente:

- Ordenar los datos de escurrimiento registrados en la estación hidrométrica de mayor a menor.
- Proponer un intervalo de análisis ($Q_{MÁX}$ y $Q_{mín}$).
- Contar el número de datos que se encuentran dentro del intervalo.
- Obtener la probabilidad de cada intervalo de análisis de acuerdo con el número de datos en el mismo con la siguiente expresión:

$$P = \frac{N^{\circ} \text{ Datos}}{n} \quad 4.5$$

donde:

P : probabilidad en el intervalo de análisis [%]

$N^{\circ} \text{ Datos}$: número de datos que se presentan en el intervalo de análisis

n : número de datos totales de la muestra

- Obtener la frecuencia acumulada de cada intervalo

$$F_j = F_i + P_i \quad 4.6$$

donde:

F_j : frecuencia del intervalo de análisis [%]

F_i : frecuencia del intervalo de análisis anterior [%]

P_i : probabilidad del intervalo de análisis anterior [%]

Tabla 4-4 Frecuencia de ocurrencia de gastos, estación Santa Ana

Q_{MÁX} [m³/s]	Q_{mín} [m³/s]	N° de datos en el intervalo	Probabilidad [%]	Q [m³/s]	Frecuencia [%]
< 230	> = 200	1	0.40%	230	0.00%
< 200	> = 180	3	1.19%	200	0.40%
< 180	> = 160	2	0.79%	180	1.58%
< 160	> = 140	3	1.19%	160	2.37%
< 140	> = 120	8	3.16%	140	3.56%
< 120	> = 100	12	4.74%	120	6.72%
< 100	> = 80	23	9.09%	100	11.46%
< 80	> = 60	23	9.09%	80	20.55%
< 60	> = 40	18	7.11%	60	29.64%
< 40	> = 20	40	15.81%	40	36.76%
< 20	> = 0	120	47.43%	20	52.57%
				0	100.00%

En la Tabla 4-4 se muestran las frecuencias de ocurrencia de los gastos durante el intervalo de análisis propuesto. Para generar la tabla se propusieron intervalos de gasto máximo y mínimo, el límite superior se obtuvo de analizar los datos registrados en la estación hidrométrica, la probabilidad de cada intervalo se obtuvo con la ecuación 4.7:

$$Probabilidad = \frac{N^{\circ} \text{ de datos en el intervalo}}{253} \quad 4.7$$

donde:

Probabilidad: probabilidad de ocurrencia del gasto del intervalo de análisis

N° de datos en el intervalo: número de datos que se presentan en el intervalo de estudio

253: número de datos totales registrados en la estación hidrométrica

Por último, la frecuencia se obtuvo de acumular las probabilidades. En la misma tabla se observa que, a medida que el gasto disminuye su frecuencia de ocurrencia aumenta, un valor de frecuencia mayor podrá garantizar una generación de energía constante.

La Tabla 4-4 se traduce en la curva que se observa en la Figura 4-4, el eje de las abscisas corresponde a frecuencia de ocurrencia, por otro lado, en el eje de las ordenadas está registrado el valor del gasto registrado en la estación hidrométrica.

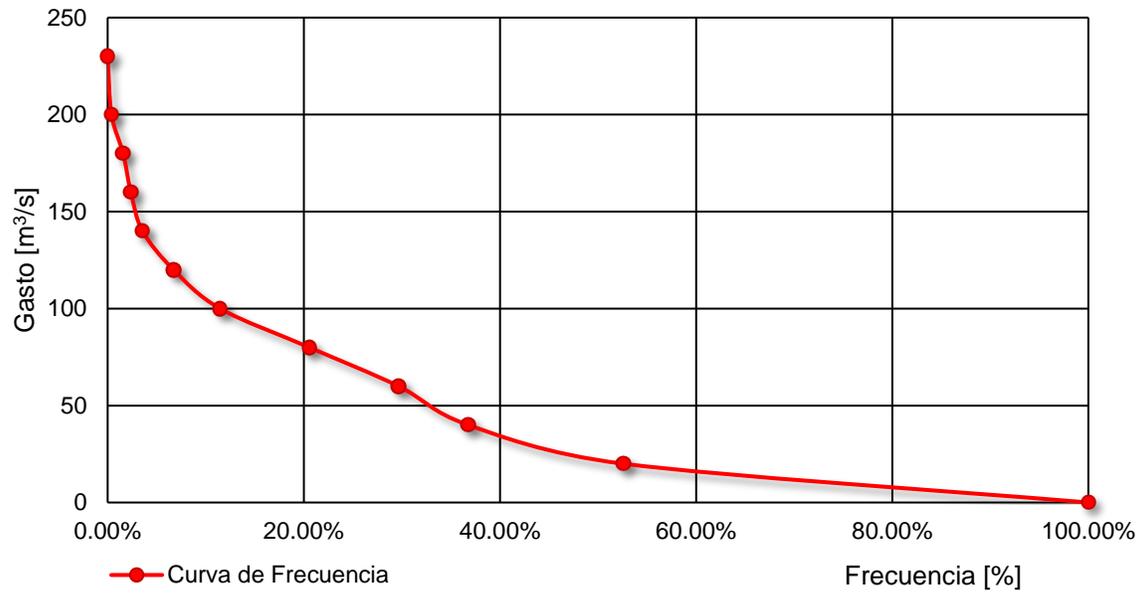


Figura 4-4 Curva de frecuencia de registros hidrométricos, estación Santa Ana

4.4 ANÁLISIS HIDROELÉCTRICO

Para el análisis hidroeléctrico del proyecto se presentarán dos casos de análisis, en primer lugar, se tomará en cuenta la política de gasto ecológico descrito anteriormente, en segundo lugar, se realizará el funcionamiento de vaso sin considerar las salidas de gasto ecológico, lo anterior se propone pues la casa de máquinas se localizará al pie de la cortina, lo que se traduce en conducciones no muy largas, por lo tanto, en esta segunda opción se propone que el gasto turbinado sea dispuesto de manera inmediata al cauce y así las condiciones ecológicas de las zonas no puedan verse afectadas.

Los volúmenes y capacidades que se muestran en la Tabla 4-5 se obtuvieron de analizar los gastos medios de los registros de la estación hidrométrica y la demanda del proyecto, también se consideró la topografía del sitio. Todas las elevaciones fueron obtenidas de cartas topográficas, las curvas se presentan a cada 2 m.

Tabla 4-5 Datos particulares del proyecto

NAMO	220.00	[msnm]
NAME	234.92	[msnm]
NAMINO	214.00	[msnm]
CORONA	238.50	[msnm]
Volumen Útil	2,049,088.76	[m ³]
Volumen Muerto	29,647.09	[m ³]
Volumen al NAMO	3,169,677.05	[m ³]
Volumen al NAMINO	1,120,588.29	[m ³]

La Tabla 4-6 muestra las elevaciones – áreas – capacidades. A partir de dicha tabla se construye la curva del mismo nombre mostrada en la Figura 4-5.

Tabla 4-6 Elevaciones – áreas – volúmenes en el vaso

Elevación [msnm]	Área [km²]	Vol. Acum. [Hm³]
200.0	0.0022	0.000
202.0	0.0028	0.005
204.0	0.0036	0.011
206.0	0.0045	0.020
208.0	0.0056	0.030
210.0	0.2034	0.239
212.0	0.2204	0.662
214.0	0.2377	1.121
216.0	0.2554	1.614

Elevación [msnm]	Área [km ²]	Vol. Acum. [Hm ³]
218.0	0.2734	2.142
220.0	0.7539	3.170
222.0	0.8346	4.758
224.0	0.9152	6.508
226.0	0.9958	8.419
228.0	1.0764	10.491
230.0	1.1570	12.725
232.0	1.3368	15.218
234.0	1.5166	18.072
236.0	1.6963	21.285
238.0	1.8761	24.857
240.0	2.0558	28.789

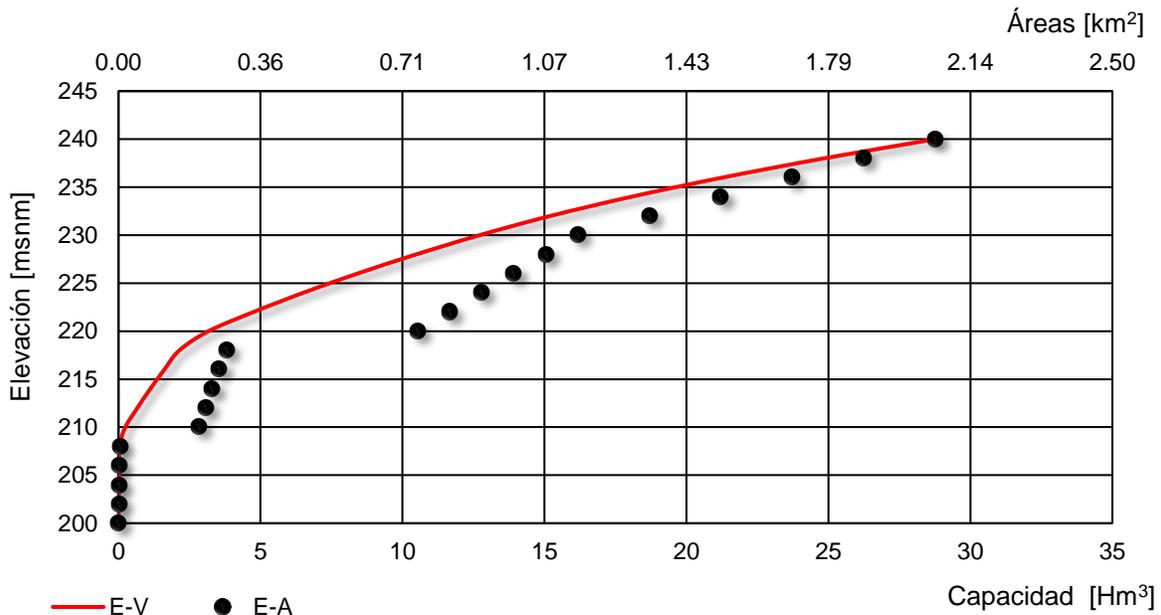


Figura 4-5 Curva elevaciones – áreas – capacidades en el vaso

Para el cálculo de la potencia, y observado la topografía que el sitio otorga, se consideró una carga bruta (H_{Bruta}) de 20 m. así como las eficiencias^{5 6} (turbina, generador y pérdidas) mostradas en la Tabla 4-7.

⁵ Manual de Incremento de Eficiencia Física, Hidráulica y Energética en Sistemas de Agua Potable, 2012

⁶ Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines, 1997

Tabla 4-7 Parámetros para el cálculo de la potencia

H_{Bruta}	20	[m]
$\eta_{Turbina}$	0.94	
$\eta_{Generador}$	0.98	
$\eta_{Pérdidas}$	0.98	

Para la elección del gasto equipado se realizó un estudio de prefactibilidad el cual consistió en proponer distintos gastos equipados con cierta distribución en las turbinas, de cada gasto se obtuvieron diversos parámetros (potencia media de cada unidad generadora, factor de planta, volumen derramado) sin embargo, se graficaron dos parámetros, la generación media anual (GMA [Gwh/año]) y la potencia instalada ($Pot_{Instalada}$ [Mw]), en la Figura 4-6 se observa la curva que se genera al graficas ambos parámetros y además el gasto equipado.

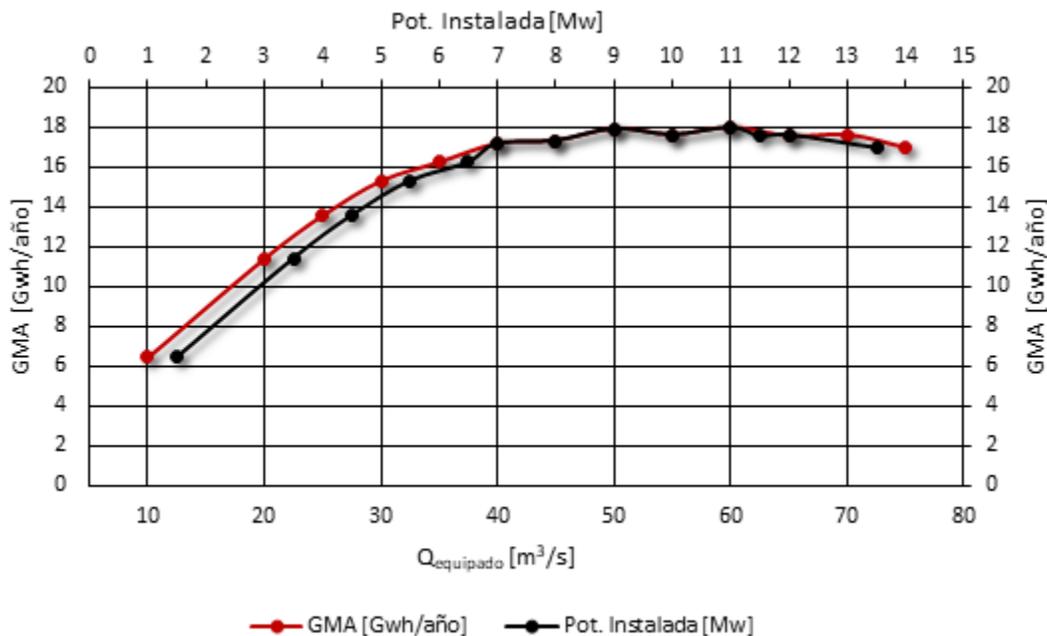


Figura 4-6 Generación media anual y potencia instalada vs gasto equipado

En el gráfico anterior es posible observar que a medida que el gasto equipado aumenta lo hacen también la generación media anual y la potencia instalada, sin embargo, se aprecia que llega un punto en el cual la curva comienza a decrecer, la potencia continuará en ascenso, sin embargo, la generación disminuye, lo anterior podría resultar contradictorio ya que la generación no aumenta de forma equitativa con la potencia y ambas van de la mano, no obstante, el gasto equipado es un concepto independiente, a medida que el gasto equipado aumenta la generación disminuye, se debe considerar el gasto que el río aporta, si el gasto demandado es mayor al que el río ofrece ocurre ese decrecimiento de generación de energía. Con lo descrito anteriormente es posible concluir que no forzosamente por equipar gastos mayores se obtendrá una mayor generación de energía.

Observando la Figura 4-6 y, además tomando como apoyo la curva de frecuencias generada anteriormente (Figura 4-4), es posible tomar la decisión del gasto equipado a elegir para el proyecto. El gasto equipado debe garantizar una constante generación de energía.

La Tabla 4-8 muestra cada gasto equipado, así como su arreglo, además se muestran dos datos importantes en la construcción de un proyecto hidroeléctrico, la generación media anual y la potencia instalada, cabe mencionar que en la tabla se presenta el resultado para la condición de análisis que considera salidas por gasto ecológico.

Tabla 4-8 Análisis de prefactibilidad (hidroenergético)

Escenario	Q_{U1} [m³/s]	Q_{U2} [m³/s]	Q_{equipado} [m³/s]	GMA [GWh/año]	Pot. Instalada [MW]
1	0	0	0	0	0
2	2.5	7.5	10	6.45	1.5
3	5	15	20	11.4	3.5
4	7.5	17.5	25	13.56	4.5
5	10	20	30	15.29	5.5
6	15	20	35	16.23	6.5
7	10	30	40	17.17	7
8	20	25	45	17.32	8
9	15	35	50	17.92	9
10	20	35	55	17.62	10
11	20	40	60	17.98	11
12	25	40	65	17.53	11.5
13	25	45	70	17.6	12
14	32.5	42.5	75	16.95	13.5

Se realizaron distintos análisis de prefactibilidad con gastos equipados y arreglos variables, el gasto equipado elegido es de 35 m³/s, la Tabla 4-8 muestra que la generación y la potencia instalada aumentan de manera directamente proporcional al gasto equipado, sin embargo, y complementando con la Figura 4-6 es posible apreciar que pasando los 70 m³/s la generación comienza a decrecer. Otro punto que reafirma la elección de los 35 m³/s, es que, observando la curva de frecuencias (Figura 4-4) se aprecia que a partir del gasto equipado elegido la probabilidad de ocurrencia es mayor al 35%, mientras que, para gastos mayores la probabilidad disminuye al 20%.

Los 35 m³/s de gasto equipado considera un arreglo de equipamientos de dos unidades, en la unidad (Q_{U1}) se considera un gasto de 15 m³/s, por lo tanto, haciendo una diferencia, en la unidad generadora dos (Q_{U2}) el gasto es de 20 m³/s.

Ahora bien, una vez elegido el gasto equipado se procede a analizar el funcionamiento de vaso. Como se mencionó al comienzo, se mostrarán los resultados del funcionamiento de vaso, en primer lugar, considerando salidas por gasto ecológico, y en un segundo caso de análisis sin considerar el mismo (gasto ecológico).

La Tabla 4-9 muestra los días considerados en cada mes para el cálculo de entradas (escurrimiento) y salidas (demanda de generación) en volúmenes (m³), pues al comienzo dichos datos se tienen en gastos (m³/s). La ecuación 4.8 muestra dicha conversión.

$$Vol = Gasto(N^{\circ}Días \times 24 \times 3600) \quad 4.8$$

donde:

Vol: volumen de agua [m³]

Gasto: gasto de entrada o salida que se presenta en el mes de estudio [m³/s]

N°Días: número de días que se presentan en el mes

24: número de horas que hay en un día [horas]

3600: número de segundos que hay en un día [segundos]

Tabla 4-9 Días y horas de operación de cada mes de análisis

Días	Mes	Horas de operación
31	Enero	24
28.25	Febrero	24
31	Marzo	24
30	Abril	24
31	Mayo	24
30	Junio	24
31	Julio	24
31	Agosto	24
30	Septiembre	24
31	Octubre	24
30	Noviembre	24
31	Diciembre	24

Cabe mencionar que a pesar de que los escurrimientos varían a lo largo de los veinte años de estudio (1961 – 1981), los días y horas de operación en cada año se consideraron tal y como se muestran en la tabla anterior, por lo tanto, cada año la

demanda de generación será la misma en cada mes. En la Tabla 4-10 se observa la demanda de generación que habrá en cada mes.

Tabla 4-10 Demanda de generación mensual (gasto y volumen)

Mes	Días	[m³/s]	[m³]
Enero	31	35	93,744,000.0
Febrero	28.25	35	85,428,000.0
Marzo	31	35	93,744,000.0
Abril	30	35	90,720,000.0
Mayo	31	35	93,744,000.0
Junio	30	35	90,720,000.0
Julio	31	35	93,744,000.0
Agosto	31	35	93,744,000.0
Septiembre	30	35	90,720,000.0
Octubre	31	35	93,744,000.0
Noviembre	30	35	90,720,000.0
Diciembre	31	35	93,744,000.0

1. Primer caso de análisis (considerando salidas por gasto ecológico)

$$Q_{Total} = 35 [m^3/s].$$

En este primer caso de análisis si se consideran salidas por gasto ecológico, la política de gasto ecológico aplicada fue la descrita anteriormente en el presente capítulo. El gasto total equipado (Q_{Total}) es de 35 m³/s y está distribuido en dos unidades generadoras, en la primera el gasto es de 15 m³/s, por lo tanto, en la segunda unidad el gasto queda de 20 m³/s.

La Tabla 4-11 muestra algunos datos importantes a considerar en un proyecto hidroeléctrico, como se mencionó en el párrafo anterior el gasto equipado es de 35 m³/s, mientras que la potencia instalada corresponde a 6.5 MW y la generación ronda los 16.23 GWh/año.

Por otro lado, en la Tabla 4-12 se observa un resumen general mensual del funcionamiento de vaso, en la primera fila se registran los datos que corresponden al gasto medio registrado en la estación hidrométrica a lo largo del periodo de análisis (1961-1981), además se observan el gasto y la potencia medios mensuales de cada turbina (2 turbinas). En las últimas dos filas se registran, por un lado, los volúmenes que se derraman del vaso mensualmente y, por otro lado, el factor de planta mensual. En la Tabla 4-9 se menciona que en cada mes del año y las 24 horas de cada día el proyecto estará en funcionamiento, sin embargo, en la Tabla 4-12 se aprecia que en la primera mitad del año no existe generación, pareciera contradictorio que por una parte se menciona que el proyecto trabajará durante todo el año y por otra parte no existe generación de energía, pero lo que en realidad se puede concluir es que en los primeros meses del año no se puede satisfacer la demanda de generación que requiere el proyecto.

La Figura 4-7 muestra los niveles que se presentan en el vaso de almacenamiento a lo largo del periodo de análisis (20 años), en primer lugar, el eje de las abscisas indica el mes y año de análisis, en segundo lugar, en el eje de las ordenadas existen dos escalas, la escala de la izquierda indica el volumen en el vaso y se relaciona con el gráfico en color azul, de igual forma se indican los niveles del NAMINO (214 msnm) y NAMO (220 msnm), por otra parte, la escala de la derecha muestra el volumen de agua entregada y que por lo tanto está disponible para generación. Las líneas verticales rojas indican el volumen disponible para generación, es posible apreciar que en la primera mitad (enero a junio) de todos los años, no se cuentan con los volúmenes suficientes para poder generar energía, sin embargo, en la segunda mitad (julio a noviembre) se registran los volúmenes más altos, alcanzando su pico entre los meses de julio a septiembre.

En la Figura 4-8 es posible observar que año con año el vaso se llena y se vacía, es en los meses de junio y hasta diciembre donde se presentan los registros de precipitación más altos, es en los meses restantes durante los cuales el vaso de

almacenamiento sufre la disminución del volumen de almacenamiento hasta llegar al nivel del NAMINO.

Finalmente, en la Figura 4-9 se grafica la generación media mensual de la obra y se confirma lo previamente descrito, durante los meses de enero a junio la obra no cuenta con el agua suficiente para satisfacer la demanda de generación y es a partir de julio y hasta noviembre en donde la obra puede ofrecer generación hidroeléctrica. El promedio de generación media anual considerando salidas por gasto ecológico es de 16.23 GWh/año.

Tabla 4-11 Resumen final del funcionamiento de vaso (considerando salidas por gasto ecológico)

Gasto Equipado [m³/s]	35
Potencias Instalada [MW]	6.50
GMA (GWh/año)	16.23
FP_{GLOBAL}	0.28
Volumen derramado [Hm³]	492.74

Tabla 4-12 Cuadro resumen del funcionamiento de vaso (considerando salidas por gasto ecológico)

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Gasto medio mensual (1961-1981) [m³/s]	4.12	3.53	2.94	2.92	3.33	7.73	10.18	11.10	23.16	18.47	8.76	5.22
Gasto medio turbinado [m³/s]	0	0	0.04	0	0	0	32.37	31.06	32.90	29.78	15.04	0.04
Gasto medio turbinado U1 [m³/s]	0	0	0	0	0	0	13.31	13.15	13.75	11.02	7.72	0
Potencia media U1 [kW]	0	0	0	0	0	0	2,157.29	2,204.90	2,356.25	1,609.63	997.64	0
Generación media U1 [GWh/mes]	0	0	0	0	0	0	1.61	1.64	1.70	1.20	0.72	0
Gasto medio turbinado U2 [m³/s]	0	0	0	0	0	0	19.05	17.91	19.05	18.10	6.89	0
Potencia media U2 [kW]	0	0	0	0	0	0	3,037.49	2,986.73	3,229.85	2,568.60	906.74	0
Generación media U2 [GWh/mes]	0	0	0	0	0	0	2.26	2.22	2.33	1.91	0.65	0
Generación media mensual [GWh/mes]	0	0	0	0	0	0	3.86	3.86	4.02	3.11	1.37	0
Volumen derramado [Hm³]	37.41	27.49	27.79	30.78	33.01	149.84	21.05	46.84	52.83	14.00	0.14	51.55
Factor de planta medio	0	0	0	0	0	0	0.80	0.80	0.86	0.64	0.29	0

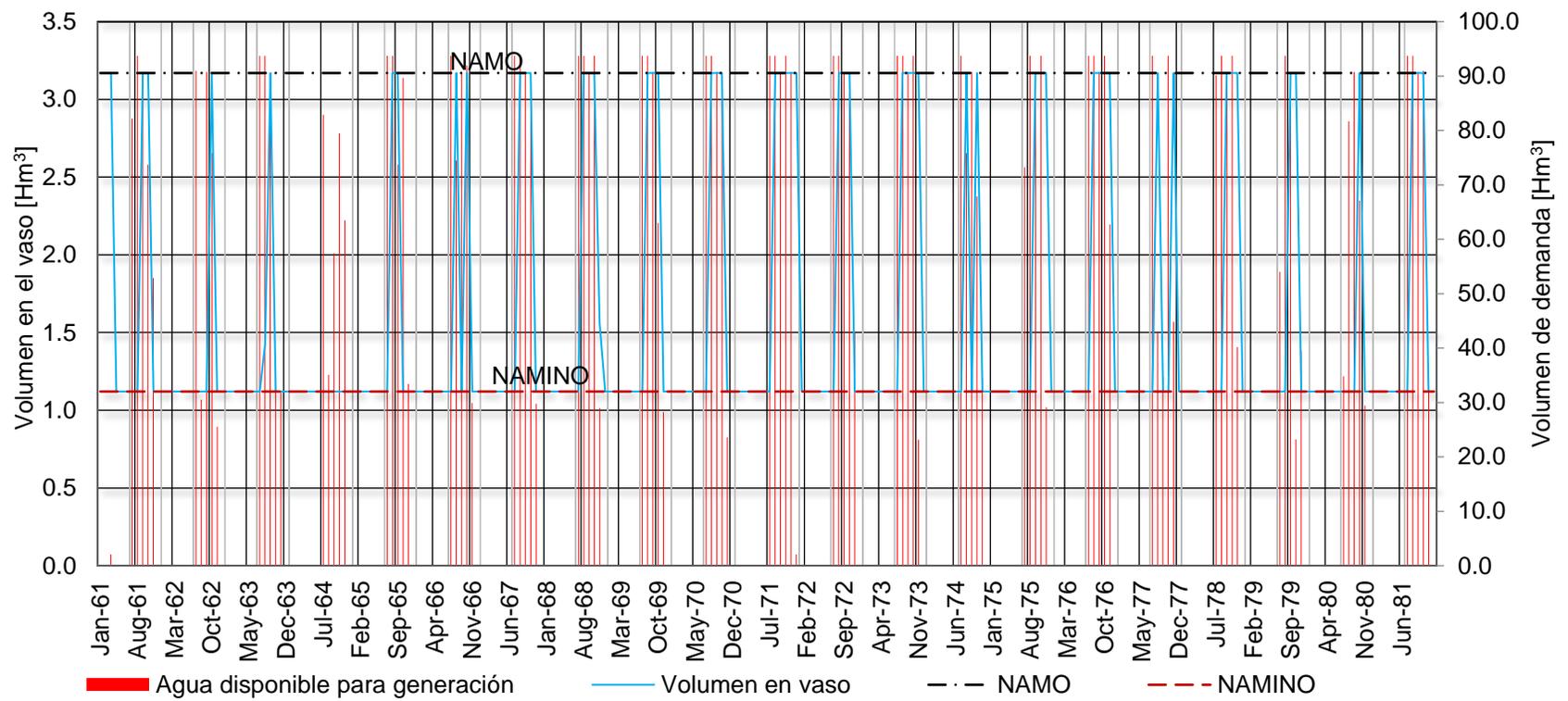


Figura 4-7 Demanda entregada de acuerdo con el volumen en el vaso (considerando salidas por gasto ecológico)

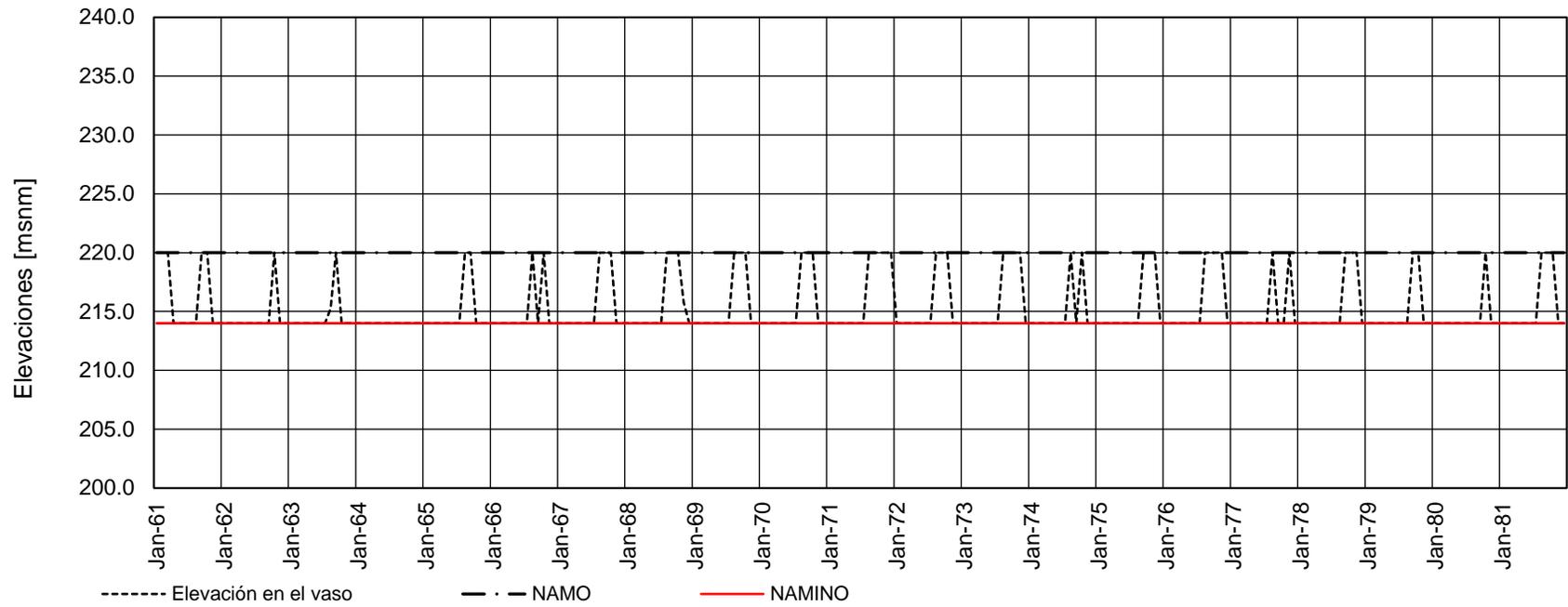


Figura 4-8 Elevaciones anuales en el vaso (considerando salidas por gasto ecológico)

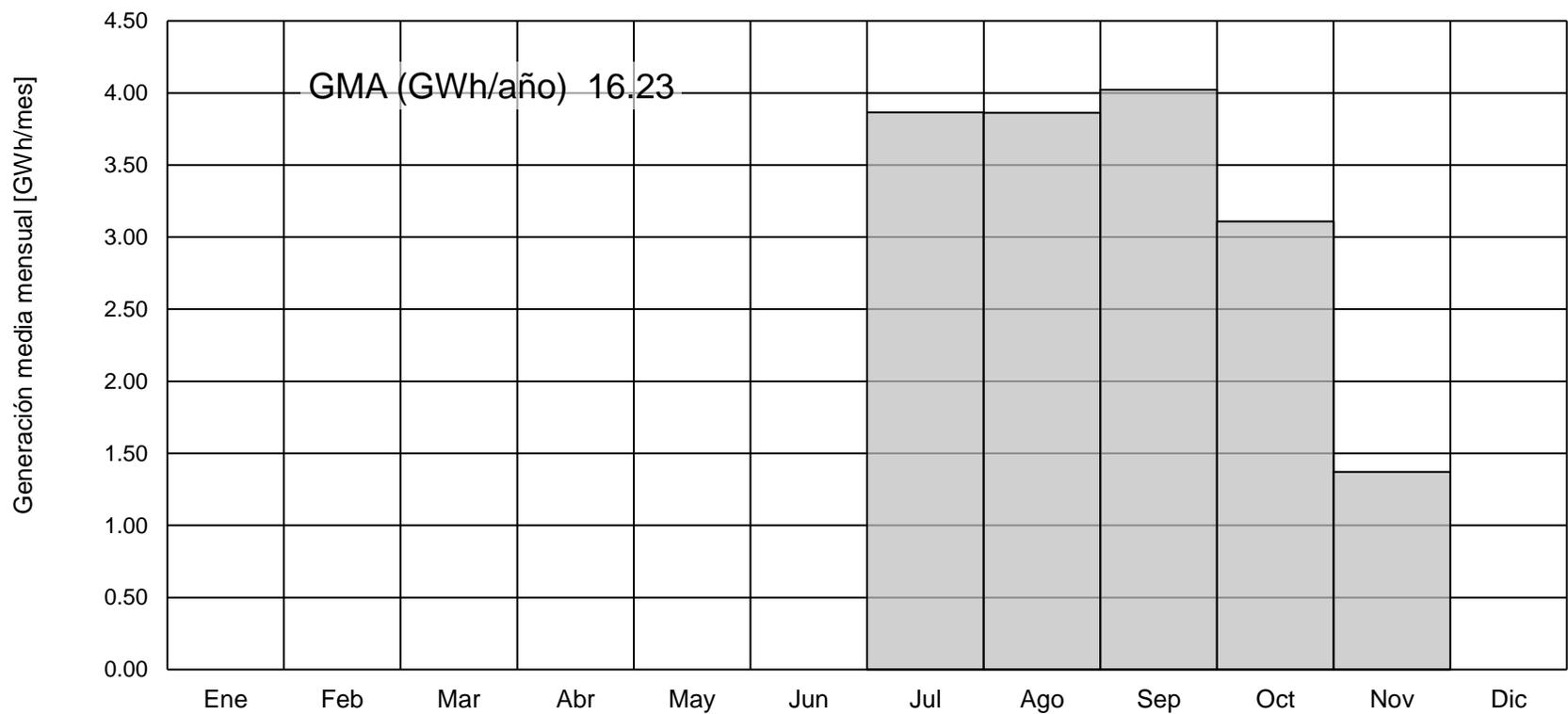


Figura 4-9 Generación media mensual (considerando salidas por gasto ecológico)

2. Segundo caso de análisis (sin considerar salidas por gasto ecológico)

$$Q_{Total} = 35 [m^3/s].$$

En este segundo análisis no son consideradas salidas por gasto ecológico, debido a que la casa de máquinas se construirá al pie de la presa, no existirá una conducción muy larga, por lo tanto, es factible no considerar un caudal ecológico, pues todo el gasto que sea turbinado será inmediatamente dispuesto en el cauce, el ecosistema no se verá afectado y los servicios ambientales serán preservados.

En primer lugar, la Tabla 4-13 muestra un resumen general del funcionamiento de vaso de este segundo caso de análisis en este segundo caso, y gracias a que no se consideran salidas por gasto ecológico, en todos y cada uno de los meses se alcanza una generación de energía. La generación media anual (GMA) es la suma de la generación de cada uno de los meses de los 20 años de análisis, la generación está estrictamente ligada a la potencia y al gasto cubierto de la demanda, una vez que se ha calculado la potencia se realiza el cálculo de la generación, la generación es el resultado de multiplicar la potencia por el número de días y horas que se tendrá en funcionamiento las turbinas, en ambos casos de análisis se tiene previsto que las turbinas se mantengan en funcionamiento las 24 horas y los 365 días del año. Posteriormente, en la Tabla 4-14 se desglosan los datos mensuales más significativos del funcionamiento de vaso.

En complemento a las tablas (4-13 y 4-14) se presentan las figuras 4-10, 4-11 y 4-12. En cuanto a los niveles que se presentan en el vaso a lo largo de los años, tienen un comportamiento similar al caso de análisis en donde sí se consideran salidas por gasto ecológico, año con año el vaso alcanza su más alto volumen de almacenamiento llegando al NAMO y de igual forma sus niveles más bajos al llegar al NAMINO, la Figura 4-11 lo corrobora. Sin embargo, a diferencia del caso en el que se consideran salidas por gasto ecológico, en la Figura 4-10 se aprecia que a partir del mes de enero se cuenta con el volumen de agua suficiente para generar energía, alcanzando los volúmenes máximos en los meses de junio a octubre.

Por último, en la figura 4-12 se grafica la generación media mensual y se reafirma lo descrito en el párrafo anterior, pues, a partir del mes de enero y a lo largo del año, existe generación de energía. La generación media anual que se alcanza en este esquema de operación es de 30.76 GWh/año.

Tabla 4-13 Resumen final del funcionamiento de vaso (sin considerar salidas por gasto ecológico)

Gasto Equipado [m³/s]	35
Potencias Instalada [MW]	6.50
GMA (GWh/año)	30.76
FP_{GLOBAL}	0.54
Volumen derramado [Hm³]	656.60

Tabla 4-14 Cuadro resumen del funcionamiento de vaso (sin considerar salidas por gasto ecológico)

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Gasto medio mensual (1961 - 1981) [m³/s]	4.12	3.53	2.94	2.92	3.33	7.73	10.18	11.10	23.16	18.47	8.76	5.22
Gasto medio turbinado [m³/s]	14.01	11.26	10.41	11.88	12.32	30.53	34.57	33.90	34.61	33.79	27.08	19.24
Gasto medio turbinado U1 [m³/s]	7.62	7.43	7.42	6.53	6.42	11.39	14.57	13.73	14.61	13.95	6.15	5.63
Potencia media U1 [kW]	946.47	923.59	922.68	811.08	798.53	1,948.33	2,572.04	2,391.25	2,576.78	2,457.02	916.30	737.95
Generación media U1 [GWh/mes]	0.70	0.63	0.69	0.58	0.59	1.40	1.91	1.78	1.86	1.83	0.66	0.55
Gasto medio turbinado U2 [m³/s]	6.29	3.83	2.45	4.25	5.11	18.77	20.00	20.00	20.00	19.84	19.81	13.40
Potencia media U2 [kW]	781.25	476.45	304.10	527.88	634.71	3,042.86	3,500.41	3,398.95	3,500.41	3,429.35	2,665.53	1,715.71
Generación media U2 [GWh/mes]	0.58	0.32	0.23	0.38	0.47	2.19	2.60	2.53	2.52	2.55	1.92	1.28
Generación media mensual [GWh/mes]	1.29	0.95	0.91	0.96	1.07	3.59	4.52	4.31	4.38	4.38	2.58	1.83
Volumen derramado [Hm³]	1.32	0.71	0.00	0.00	0.00	69.35	124.88	169.81	186.72	95.03	8.49	0.29
Factor de planta medio	0.27	0.22	0.19	0.21	0.22	0.77	0.93	0.89	0.93	0.91	0.55	0.38

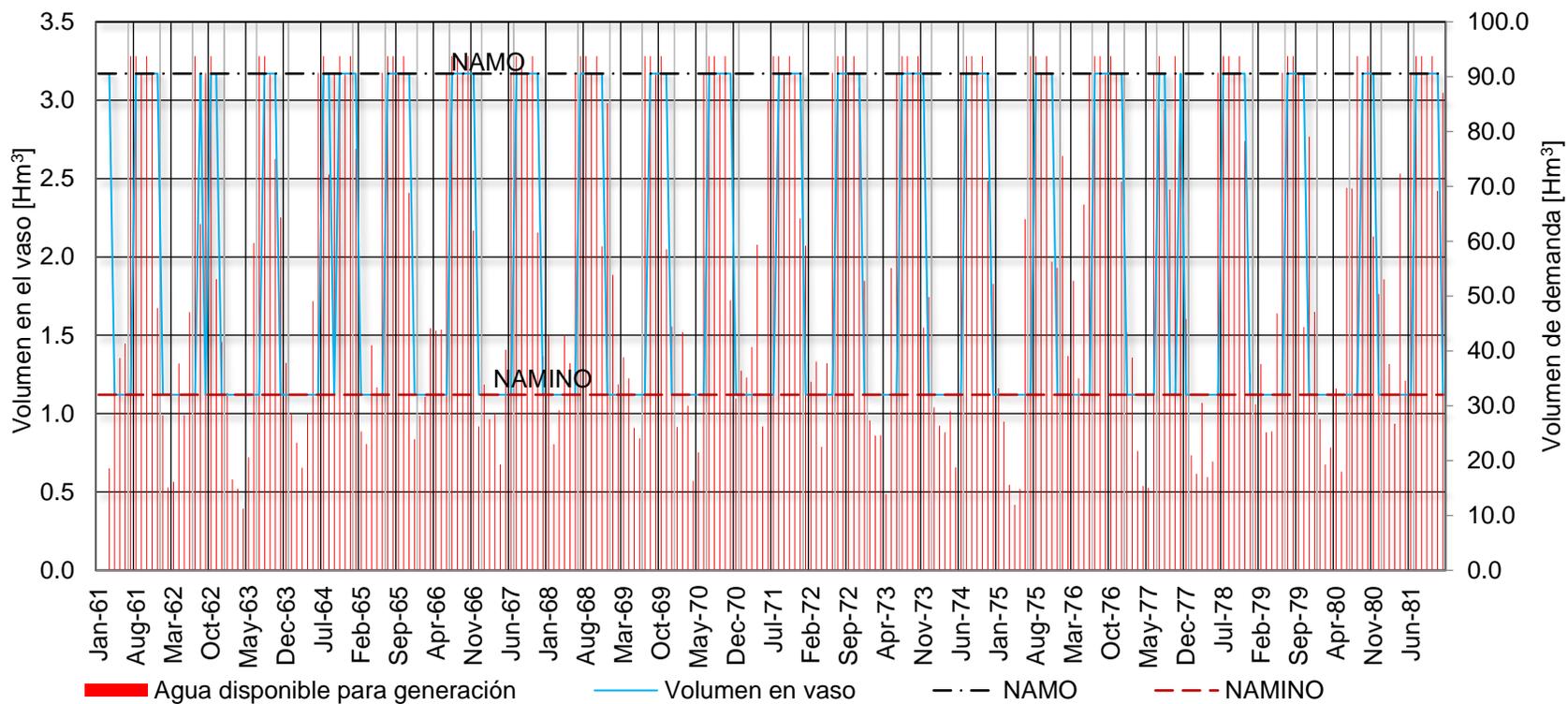


Figura 4-10 Demanda entregada de acuerdo con el volumen en el vaso (sin considerar salidas por gasto ecológico)

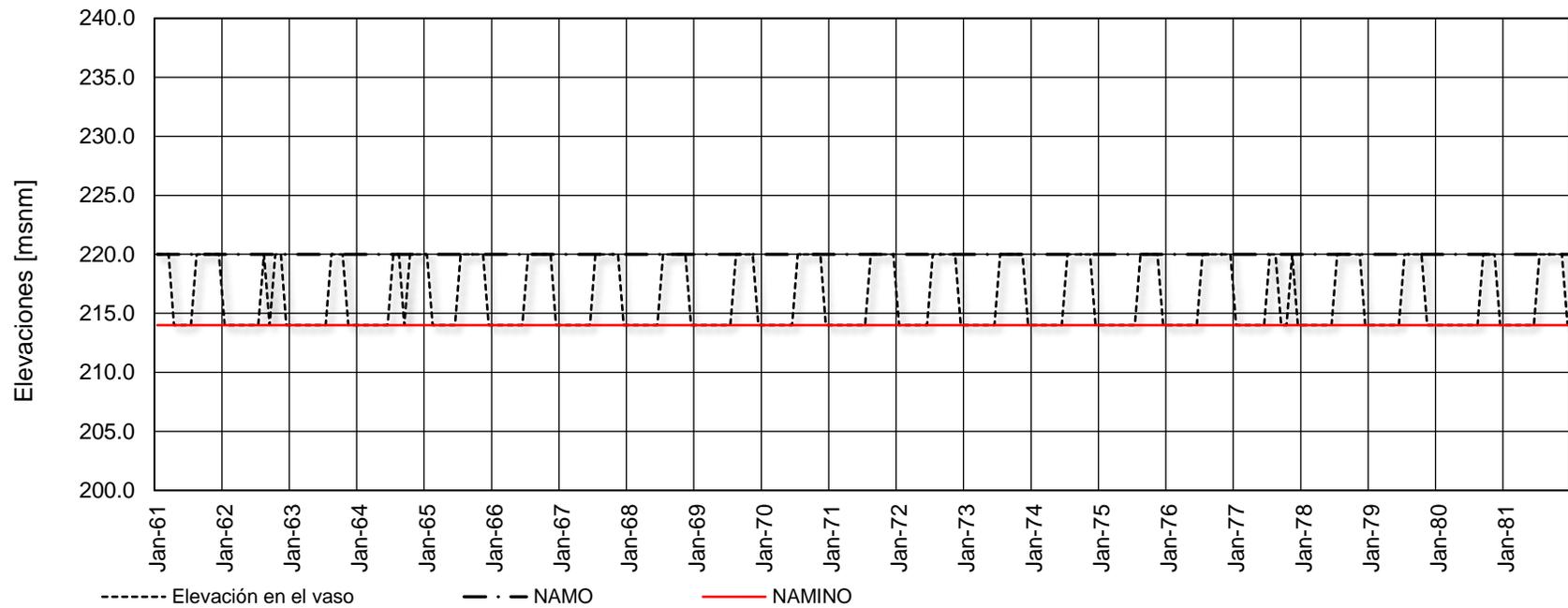


Figura 4-11 Elevaciones anuales en el vaso (sin considerar salidas por gasto ecológico)

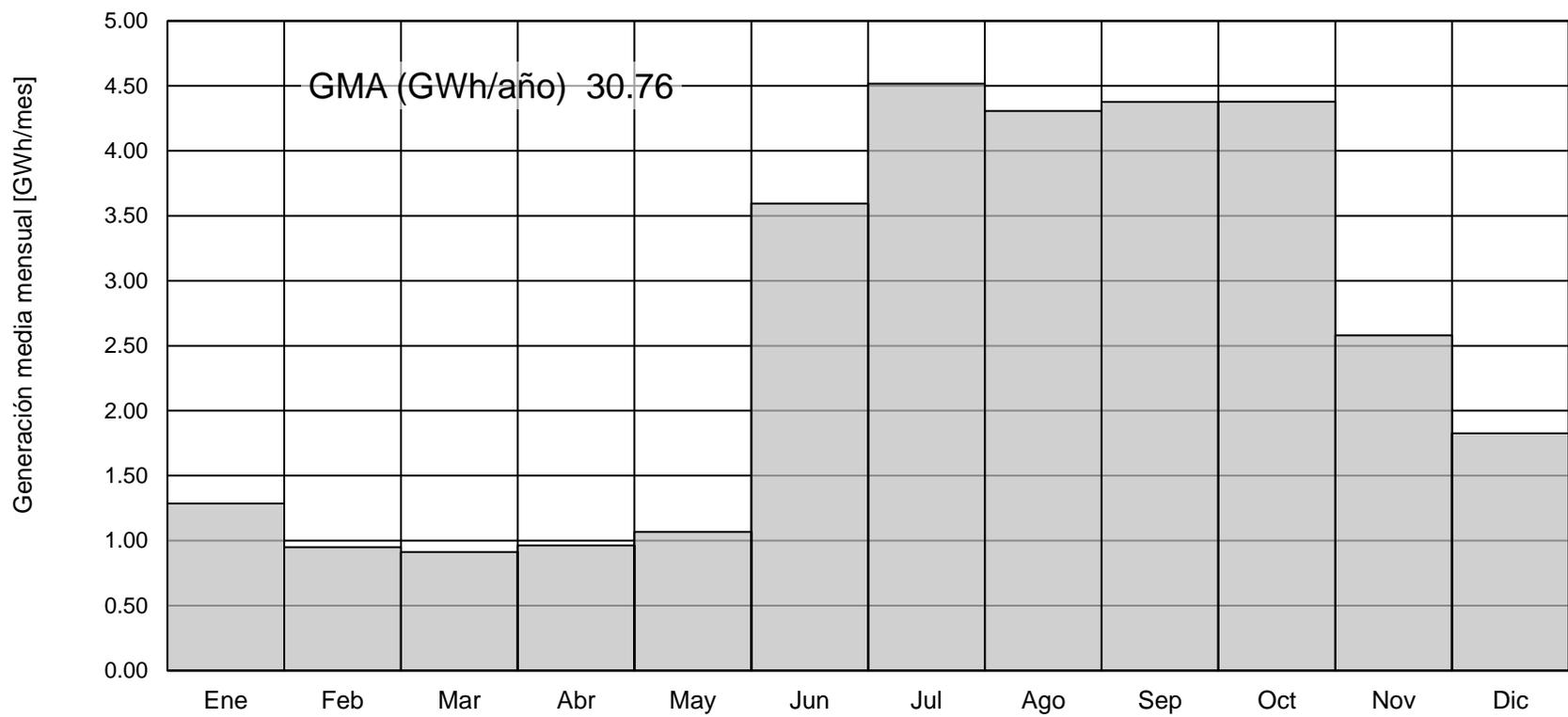


Figura 4-12 Generación media mensual (sin considerar salidas por gasto ecológico)

4.4.1 Selección de turbinas

En este momento es posible observar que, en el segundo caso de análisis, en el cual no se considera caudal ecológico, la generación es mayor, más adelante se profundizará en la comparación de ambos de casos de análisis, sin embargo, para la selección de las turbinas se trabajarán con los datos arrojados en el segundo caso de análisis, pues la generación es mayor, y en centrales hidroeléctricas es un factor preponderante para decantarse por un proyecto.

La elección de las turbinas es un aspecto fundamental en lo que incumbe al diseño de las centrales hidroeléctricas, pues en ellas recae una parte importante del presupuesto total de la obra; otro aspecto de importancia es que de acuerdo a las características que cada turbina tiene, descritas en el capítulo 1.5, se debe obtener la mayor eficiencia, una mayor eficiencia se verá reflejada en la generación, y, por ende, en las ganancias económicas que el proyecto generará.

Para la selección de la turbina se utilizará el criterio descrito en el Manual de Pequeña Hidráulica, European Small Hydropower. En el diagrama mostrado en la Figura 4-13 se muestran distintos tipos de turbinas, la elección de la turbina está en función de la carga (H_{Bruta}) y el gasto equipado para cada unidad generadora (Q_{U1} y Q_{U2}).

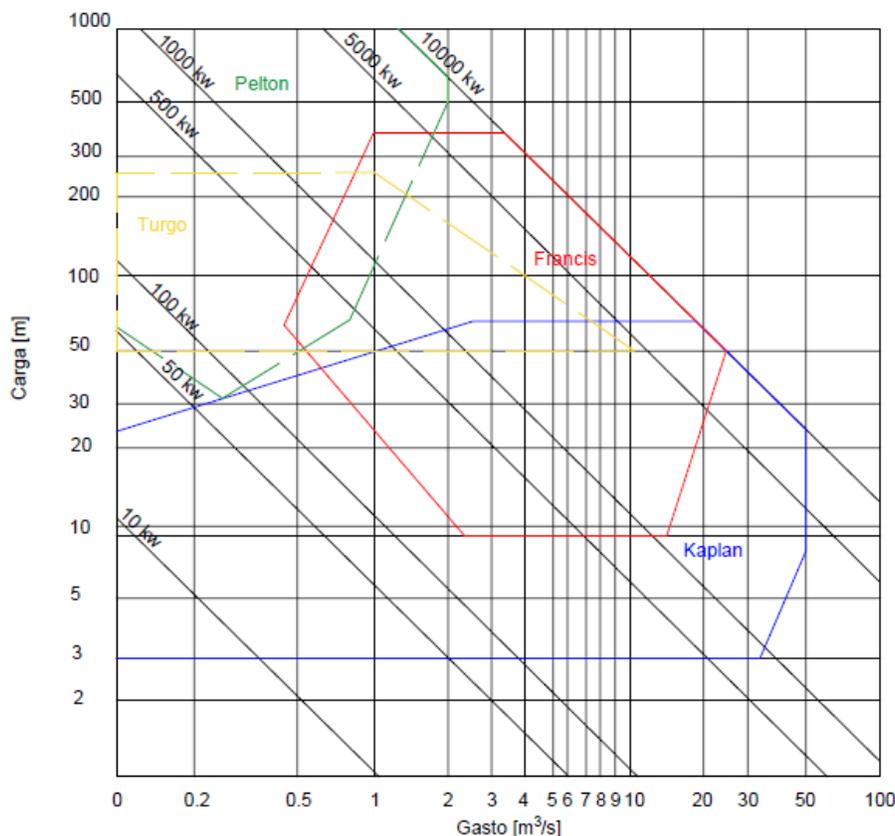


Figura 4-13 Diagrama de selección de turbinas, Fuente Manual Pequeña Hidráulica

La carga bruta que se presenta en el proyecto de acuerdo con las elevaciones obtenidas de la carta es de 20 m, por otro lado, el gasto equipado total es de 35 m³/s, de esos 35 m³/s, el caudal se distribuye en dos unidades generadoras, en la primera se destinan 15 m³/s, por lo tanto, a la segunda unidad llegan los 20 m³/s restantes.

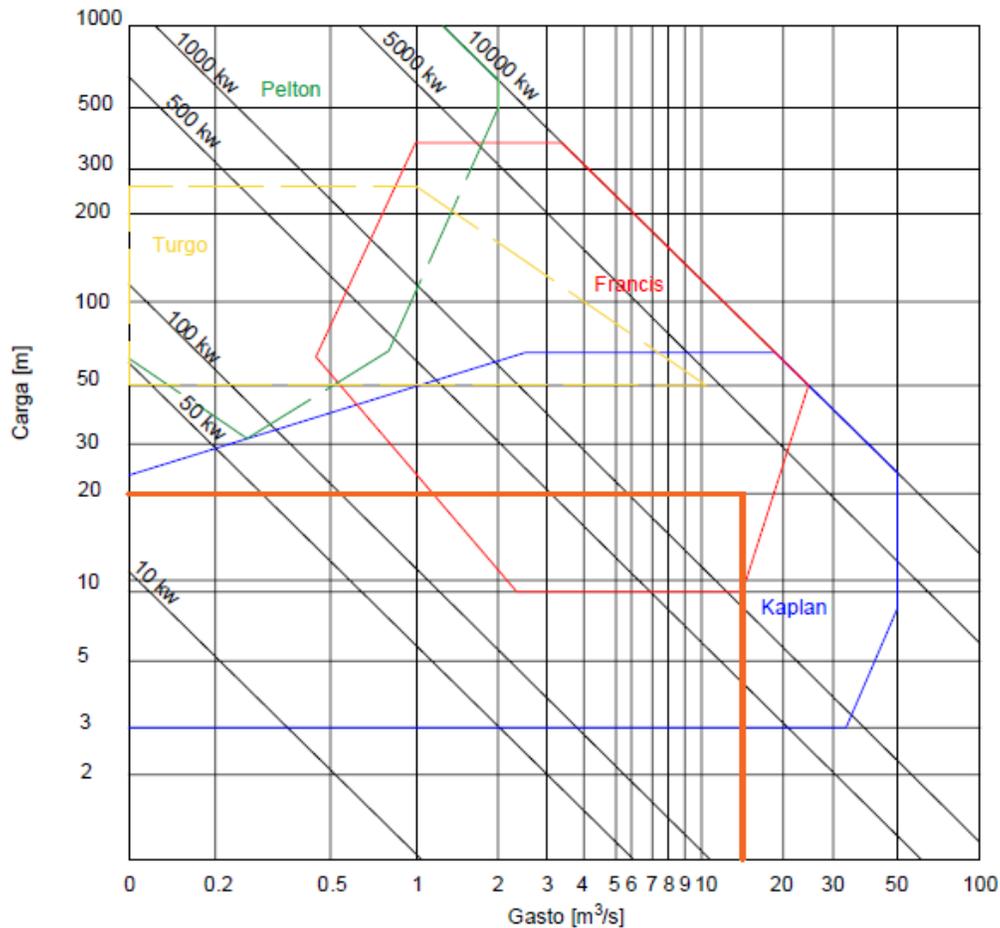


Figura 4-14 Selección de turbinas a equipar

Al trabajar con la gráfica, el gasto y carga, como se muestra en la Figura 4-14 es posible observar que la elección de las turbinas puede ser del tipo Kaplan o Francis, para el caso concreto de este proyecto la elección de las turbinas será del tipo Francis, considerando la potencia instalada, el gasto y la carga se espera que la eficiencia que puedan alcanzar los equipos sea considerablemente aceptable.

5. RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS

Tabla 5-1 Comparación de resultados mensuales de funcionamiento de vaso

CONSIDERANDO SALIDAS POR GASTO ECOLÓGICO												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Gasto medio mensual (1961 - 1981) [m³/s]	0.12	0.49	0.15	0.08	0.13	2.56	11.97	17.09	14.96	2.33	0.09	0.08
Gasto medio turbinado [m³/s]	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	32.37	31.06	32.90	29.78	15.04	0.04
Gasto medio turbinado U1 [m³/s]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.31	13.15	13.75	11.02	7.72	0.00
Potencia media U1 [KW]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2157.29	2204.90	2356.25	1609.63	997.64	0.00
Generación media U1 [GWh/mes]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.61	1.64	1.70	1.20	0.72	0.00
Gasto medio turbinado U2 [m³/s]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	19.05	17.91	19.05	18.10	6.89	0.00
Potencia media U2 [KW]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3037.49	2986.73	3229.85	2568.60	906.74	0.00
Generación media U2 [GWh/mes]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.26	2.22	2.33	1.91	0.65	0.00
Generación media mensual [GWh/mes]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.86	3.86	4.02	3.11	1.37	0.00
Volumen derramado [Hm³]	37.41	27.49	27.79	30.78	33.01	149.84	21.05	46.84	52.83	14.00	0.14	51.55
Factor de planta medio	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.80	0.80	0.86	0.64	0.29	0.00

Tabla 5-2 Comparación de resultados mensuales de funcionamiento de vaso

SIN CONSIDERAR SALIDAS POR GASTO ECOLÓGICO												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Gasto medio mensual (1961 - 1981) [m³/s]	0.12	0.49	0.15	0.08	0.13	2.56	11.97	17.09	14.96	2.33	0.09	0.08
Gasto medio turbinado [m³/s]	14.01	11.26	10.41	11.88	12.32	30.53	34.57	33.90	34.61	33.79	27.08	19.24
Gasto medio turbinado U1 [m³/s]	7.62	7.43	7.42	6.53	6.42	11.39	14.57	13.73	14.61	13.95	6.15	5.63
Potencia media U1 [KW]	946.47	923.59	922.68	811.08	798.53	1948.33	2572.04	2391.25	2576.78	2457.02	916.30	737.95
Generación media U1 [GWh/mes]	0.70	0.63	0.69	0.58	0.59	1.40	1.91	1.78	1.86	1.83	0.66	0.55
Gasto medio turbinado U2 [m³/s]	6.29	3.83	2.45	4.25	5.11	18.77	20.00	20.00	20.00	19.84	19.81	13.40
Potencia media U2 [KW]	781.25	476.45	304.10	527.88	634.71	3042.86	3500.41	3398.95	3500.41	3429.35	2665.53	1715.71
Generación media U2 [GWh/mes]	0.58	0.32	0.23	0.38	0.47	2.19	2.60	2.53	2.52	2.55	1.92	1.28
Generación media mensual [GWh/mes]	1.29	0.95	0.91	0.96	1.07	3.59	4.52	4.31	4.38	4.38	2.58	1.83
Volumen derramado [Hm³]	1.32	0.71	0.00	0.00	0.00	69.35	124.88	169.81	186.72	95.03	8.49	0.29
Factor de planta medio	0.27	0.22	0.19	0.21	0.22	0.77	0.93	0.89	0.93	0.91	0.55	0.38

Tanto en las Tablas 5-1, así como en la 5-2 se muestran los resultados obtenidos de los funcionamientos de vaso de ambos casos de análisis. Por una parte, en la Tabla 5-1 se muestran los resultados mensuales obtenidos del funcionamiento de vaso, es notorio que, en el caso de análisis que se consideran salidas por gasto ecológico, en casi la mitad del año no se obtienen los volúmenes suficientes para generación, por otra parte, en el caso en que no se consideran salidas por gasto ecológico, se observa que a lo largo del año la obra genera energía. Finalmente, en la Tabla 5-2 el resultado que más llama la atención es la generación media anual (GMA), pues, considerando salidas por gasto ecológico solo se tiene generación la mitad del año y en su contraparte, cuando no se considera el gasto ecológico, la generación se mantiene todo el año.

Tabla 5-2 Comparación de resultados de funcionamiento de vaso

	CONSIDERANDO SALIDAS POR GASTO ECOLÓGICO	SIN CONSIDERAR SALIDAS POR GASTO ECOLÓGICO
Gasto Equipado [m³/s]	35.00	35.00
Potencias Instalada [MW]	6.50	6.50
GMA (GWh/año)	16.23	30.76
FP_{GLOBAL}	0.28	0.54
Volumen derramado [Hm³]	492.74	656.60

6. CONCLUSIONES

Las centrales hidroeléctricas, como su nombre lo dice, generan electricidad a base de turbinas hidráulicas, la generación a base de agua es proceso totalmente amigable con el medio ambiente, el agua es una fuente de energía renovable, no se generan emisiones de ningún tipo, tampoco residuos sólidos o líquidos y mucho menos se contamina el agua utilizada.

Diversos estudios han arrojado que la región oriente del territorio nacional tiene un amplio potencial hidroeléctrico, el presente trabajo evaluó dicho potencial en una de las regiones hidrológicas con mayor extensión territorial (RH27) y con bastos recursos para generación de energías renovables.

A lo largo del trabajo se evaluó específicamente el potencial hidroeléctrico en la cuenca del Río Tecolutla por medio de datos hidrométricos que abarcan un periodo de 20 años. Es importante mencionar que el periodo de análisis abarca solamente 20 años (1961 a 1981) pues son los datos que la estación hidrométrica Santa Ana ha registrado. Los aforos fueron realizados empleando un molinete y su operación está a cargo de la Comisión Federal de Electricidad (C.F.E.). La estimación y posterior evaluación del potencial hidroeléctrico ayudan a identificar aquellos sitios de una cuenca que cuenta con las características para desarrollar proyectos hidroeléctricos que potencialmente puedan atraer inversiones públicas o privadas.

El presente estudio permitió definir, en primer lugar, el gasto a equipar, así como la distribución de este en dos unidades generadoras, la elección de dos unidades es porque se considera que una unidad siempre se encuentre trabajando y la segunda sirva como un respaldo en caso de dar mantenimiento a la primera unidad, así como que entre en funcionamiento en caso de una avenida extraordinaria. En segundo lugar, y habiendo elegido el gasto equipado y su arreglo en las turbinas se procedió a analizar el funcionamiento de vaso, considerando los volúmenes que se presentarían en el mismo.

México es un país que desde finales del siglo pasado ha promovido el cuidado y la preservación de los ecosistemas y los recursos naturales, por lo tanto, a pesar de que el aspecto de la generación es primordial, el presente estudio está apegado en su totalidad al marco normativo que rige al país; es por eso por lo que dentro del análisis se consideró el caudal ecológico.

En el capítulo 4 se analizaron dos funcionamientos de vaso, en el primero de ellos se consideró que además de la demanda de generación existiría una salida por la demanda que el caudal ecológico requiere, en el segundo caso se tiene casi el mismo esquema a excepción de que no se consideran salidas por caudal ecológico.

En el apartado 1.4.1 Caudal Ecológico se definió el concepto de caudal ecológico, además se mencionó la Norma Mexicana que regula a dicho criterio. A lo largo de

su recorrido por los ríos, el agua tiene distintos usos, ya sea agrícola o doméstico, o como es el caso del presente trabajo, generación de energía, los distintos usos del agua provocan que el caudal original del río se vea modificado, por lo tanto, los ecosistemas se ven igualmente modificados. En el presente trabajo se presenta un caso de análisis en el cual no se consideran salidas por gasto ecológico, sin embargo, esto no es del todo cierto, pues inmediatamente después de ser turbinado el agua regresará al cauce del río, por lo tanto, los servicios del ecosistema se afectarán en un porcentaje mínimo.

De una manera preliminar y sin haber realizado cálculo alguno se podría pensar que la generación debería aumentar de manera significativa en el segundo caso, pues, al no considerarse un volumen de salida por el caudal ecológico, el gasto que podría ser aprovechado en las turbinas aumentaría y por ende la generación de la central. Sin embargo, es hasta después de haber realizado el análisis (funcionamiento de vaso) que se podrá llegar corroborar tal hipótesis.

Al observar los gráficos generados en el capítulo 4, se observa que en el segundo caso de análisis la generación media anual aumenta de manera significativa, pasa de 16.23 GWh/año a 30.76 GWh/año, otro aspecto que favorece al caso de análisis dos es que el factor de planta aumenta de 0.28 a 0.54. Que el factor de planta aumente es un aspecto positivo, y que era de esperarse pues depende de manera directa de la generación media y anteriormente se mencionó que en el caso dos, dicha generación aumentó. El factor está por encima del 50%, cabe mencionar que, como se mencionó anteriormente, el factor de planta evalúa la energía generada de la central, por lo tanto, en el factor influyen los gastos de operación y gastos financieros del proyecto, un factor de planta mayor nos indicará que los recursos serán optimizados, el caso de análisis que no considera salidas por gasto ecológico propicia la reducción de los riesgos financieros y beneficios en la generación.

Por otro lado, otro aspecto a considerar antes de tomar la decisión del esquema a elegir es el volumen de agua derramado a lo largo del periodo del funcionamiento de vaso. La diferencia de volumen derramado entre ambos casos de estudio es de aproximadamente 160 Hm³, en el segundo caso de análisis el volumen derramado es de 656 Hm³, en un sentido estricto se podría considerar que ese volumen se traduce en agua no aprovechada para generar energía eléctrica, y lo anterior a su vez se traduce en pérdidas económicas.

De acuerdo con la clasificación de las centrales hidroeléctricas, descrita en el capítulo 1, la central del presente estudio cae en la categoría de Pequeña Central Hidroeléctrica (PCH), pues su potencia instalada es de 6.50 MW (6500 kW).

Las PCH, son proyectos atractivos para el sector privado, ya sea para generar la energía que utilizarán ellos mismos en sus actividades económicas, llámese fábricas o manufactura, o también para abastecer a localidades pequeñas cercanas a la zona donde se ubicará la central.

La energía proveniente de PCH es altamente competitiva y presenta amplias ventajas con respecto a otras fuentes de energías renovables (eólica, geotérmica, fotovoltaica y termosolar). Las PCH, por lo general, presentan factores de planta superiores al 50%, aspecto que en el segundo caso de análisis del presente proyecto se cumple, además son proyectos económicamente atractivos pues dependiendo de las turbinas elegidas, su costo de inversión de acuerdo con Gabriela König, directora comercial Latinoamérica y península Ibérica para turbinas CINK Hydro-Energy, ronda los \$2,000,000.00 US por MW instalado.

Las PCH son proyectos que, para decirlo de cierta forma, pasan desapercibidos por la naturaleza, las obras que se requieren en su construcción son poco dañinas con el ambiente, generalmente las casas de máquinas son de un tamaño reducido, además, en casos especiales, las PCH pueden aprovechar la infraestructura existente, ya sea de centrales anteriores o embales existentes por otros usos (agua potable, residual, agrícola y otros). De acuerdo con datos de 2017 de la Red Eléctrica Española, la producción de energía hidroeléctrica generada por las centrales hidroeléctricas en dicho país ascendía a 268 TWh, sin embargo, la demanda de consumo en ese mismo año fue de 242 TWh, por lo tanto, existen 26 TWh/año de pérdidas, estas pérdidas son equivalentes al consumo de 6,5 millones de familias, lo anterior viene a colación pues la PCH aumentan también la eficiencia energética y disminuyen pérdidas.

Otra característica importante de las pequeñas centrales es que son proyectos que se amoldan bien al marco normativo que regula los ecosistemas, pues son altamente respetuosos con los servicios que los ecosistemas proveen.

El trabajo mostrado busca ofrecer una salida viable al conflicto del mercado eléctrico, existente entre el sector privado y el gobierno federal y estatal en México. La mayor parte de las acciones que los organismos gubernamentales ejecutan priorizan a la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y limitan el campo de acción de los particulares, por lo tanto, inversionistas nacionales y extranjeros tienen que tomar sus reservas al momento de analizar su participación en proyectos energéticos.

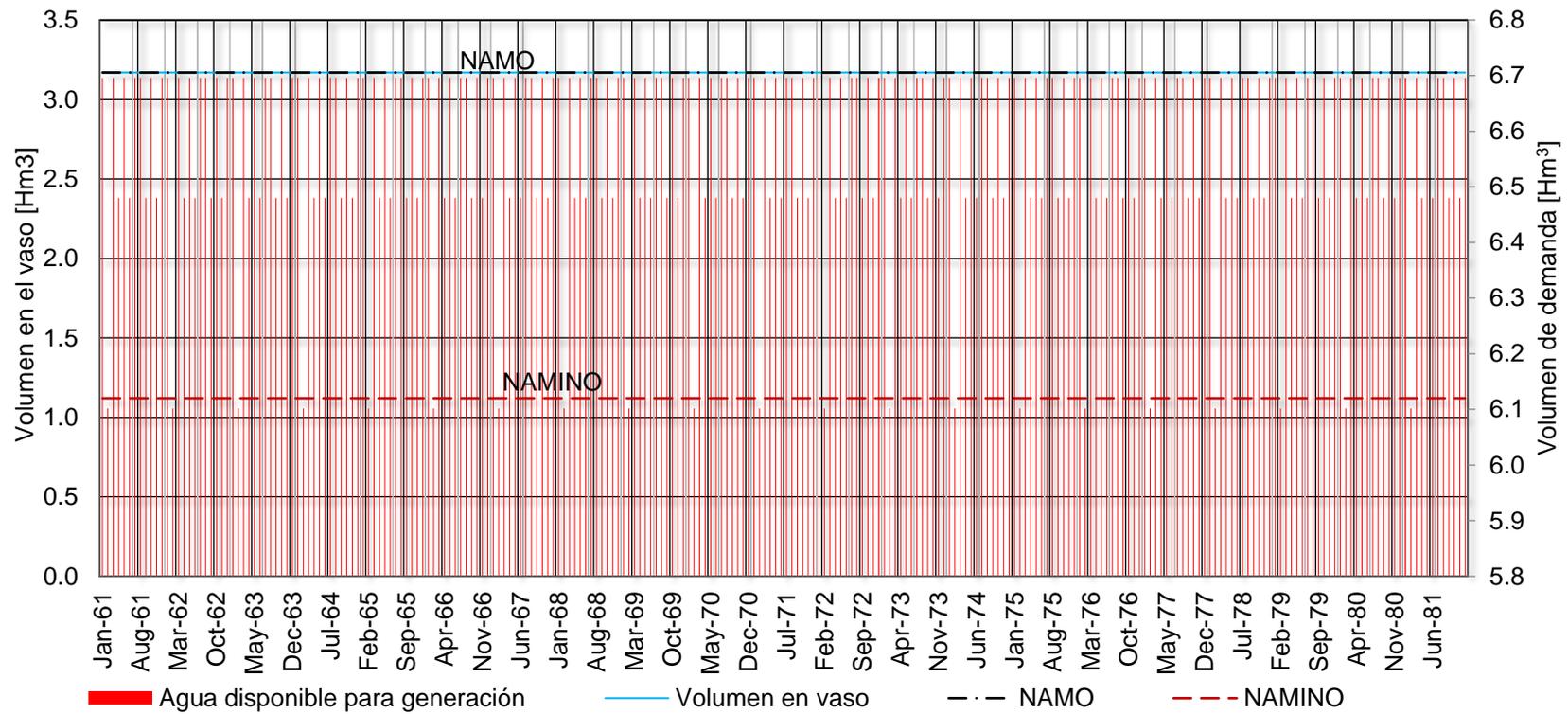
El proyecto además tiene la ventaja de que la casa de máquinas estará ubicada a pie de presa, lo anterior quiere decir que las turbinas estarán ubicadas aguas abajo y a pie de la cortina, la mayor parte de las PCH se construyen con el diseño mencionado, además, una vez que el gasto ha sido turbinado se devuelve inmediatamente después al cauce natural.

En conclusión, el proyecto no cambia, mismas turbinas, misma casa de máquinas, conducciones, etc., lo que cambia es la forma de operación, por lo tanto, no considerar salidas por gasto ecológico es lo más favorecedor, el diseño de la PCH presentada considera llevar el caudal por una tubería hasta el par de turbinas e inmediatamente devolverlo a su curso natural. El no considerar el caudal ecológico no afectará al ecosistema, pues inmediatamente después ser utilizado para generar

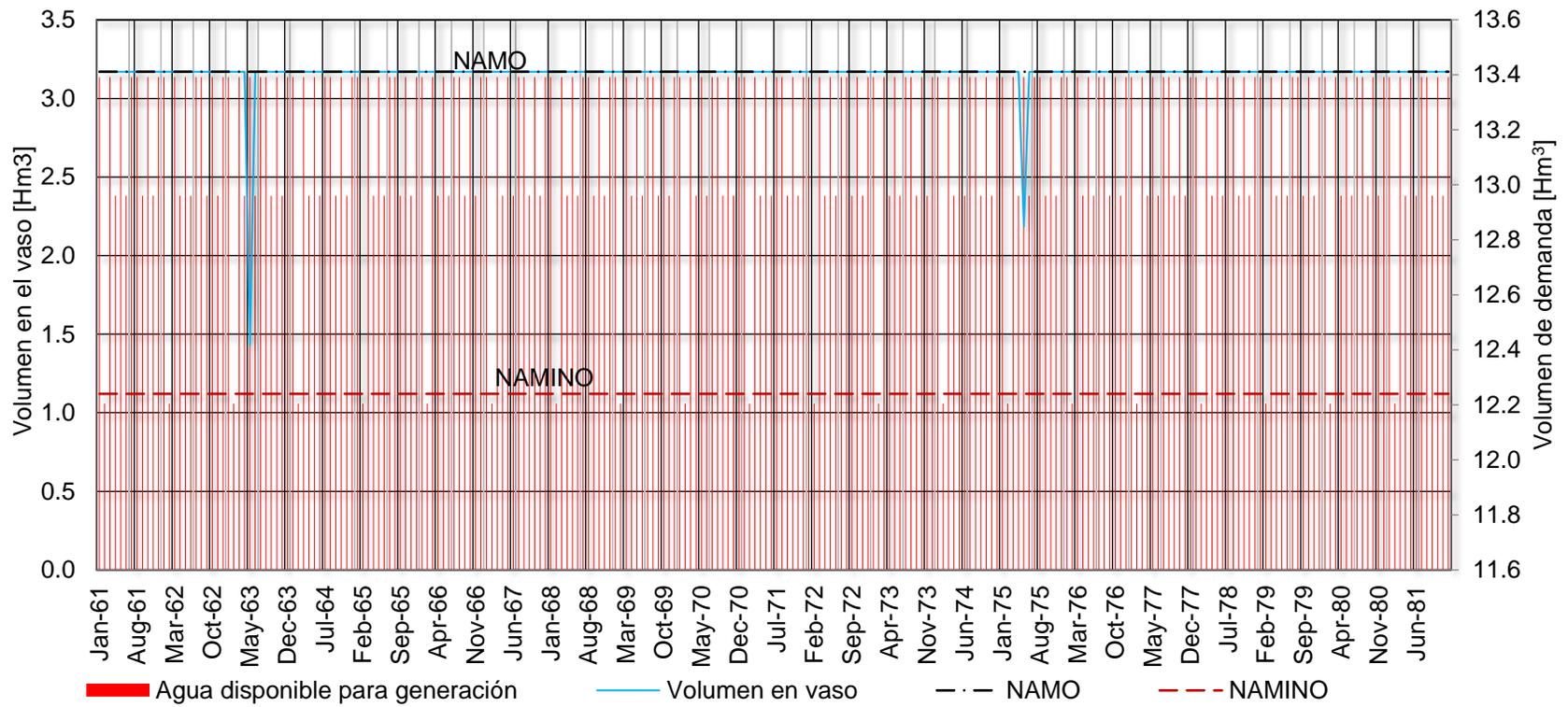
energía eléctrica será dispuesto al cauce, por lo tanto, aguas abajo los escurrimientos podrán ser aprovechados si así se desea, y, sobre todo, el ecosistema no se verá afectado ni modificado. Las normas existentes obligan a mantener el caudal ecológico dentro del cauce, el proyecto buscará minimizar el impacto en la flora y fauna del sitio.

ANEXO

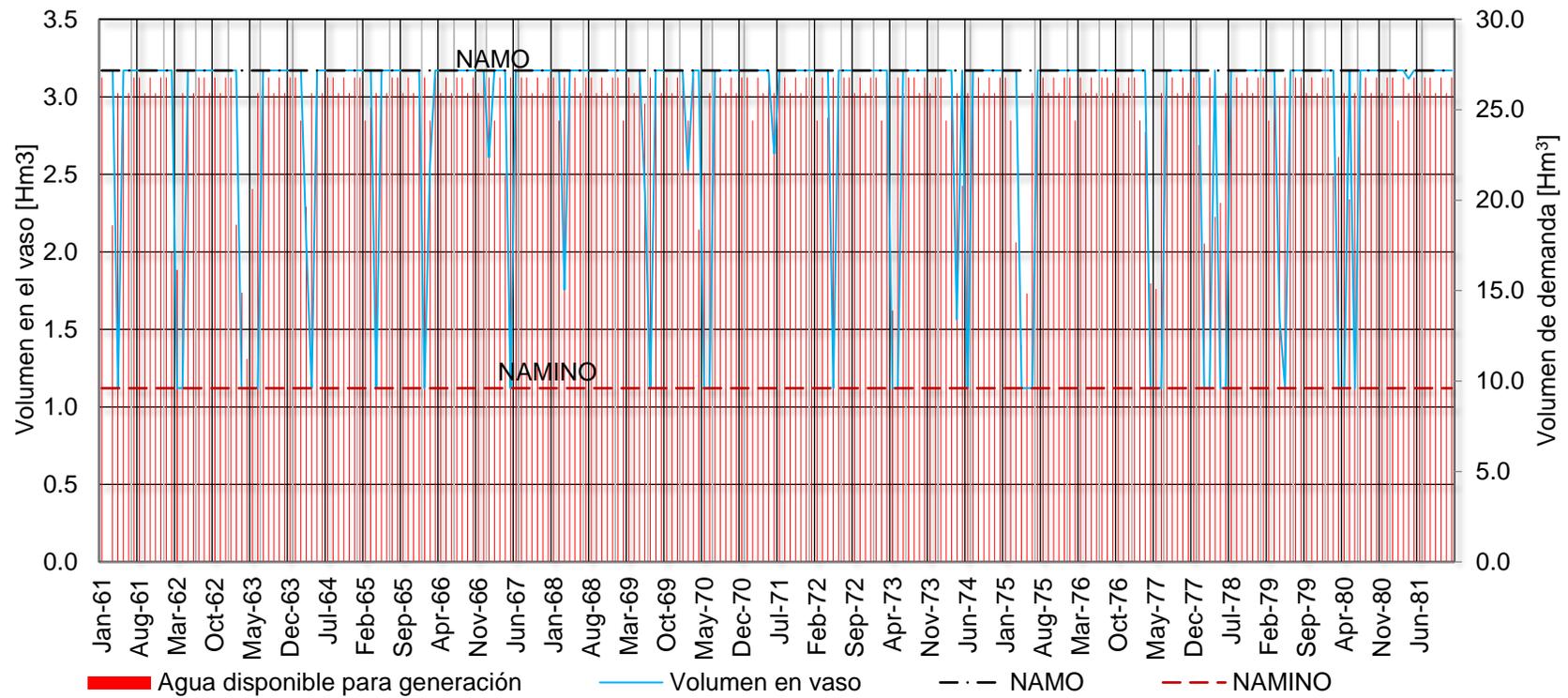
Q_{equipado}	Q_{U1}	Q_{U2}	GMA	POTENCIA INSTALDA	FP
[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[GWh/año]	[MW]	
2.5	1.00	1.50	3.89	0.50	0.89
5	2.00	3.00	7.77	1.00	0.89
10	4.00	6.00	14.46	2.00	0.82
15	6.50	8.50	18.92	3.00	0.72
20	7.50	12.50	22.53	3.50	0.73
25	10.00	15.00	25.61	4.50	0.65
30	12.50	17.50	28.31	5.50	0.59
35	15.00	20.00	30.76	6.50	0.54
40	17.50	22.50	33.17	7.00	0.53
45	20.00	25.00	35.57	8.00	0.51
50	22.50	27.50	37.72	8.50	0.49
55	25.00	30.00	39.34	9.50	0.46
60	27.50	32.50	40.68	10.50	0.44



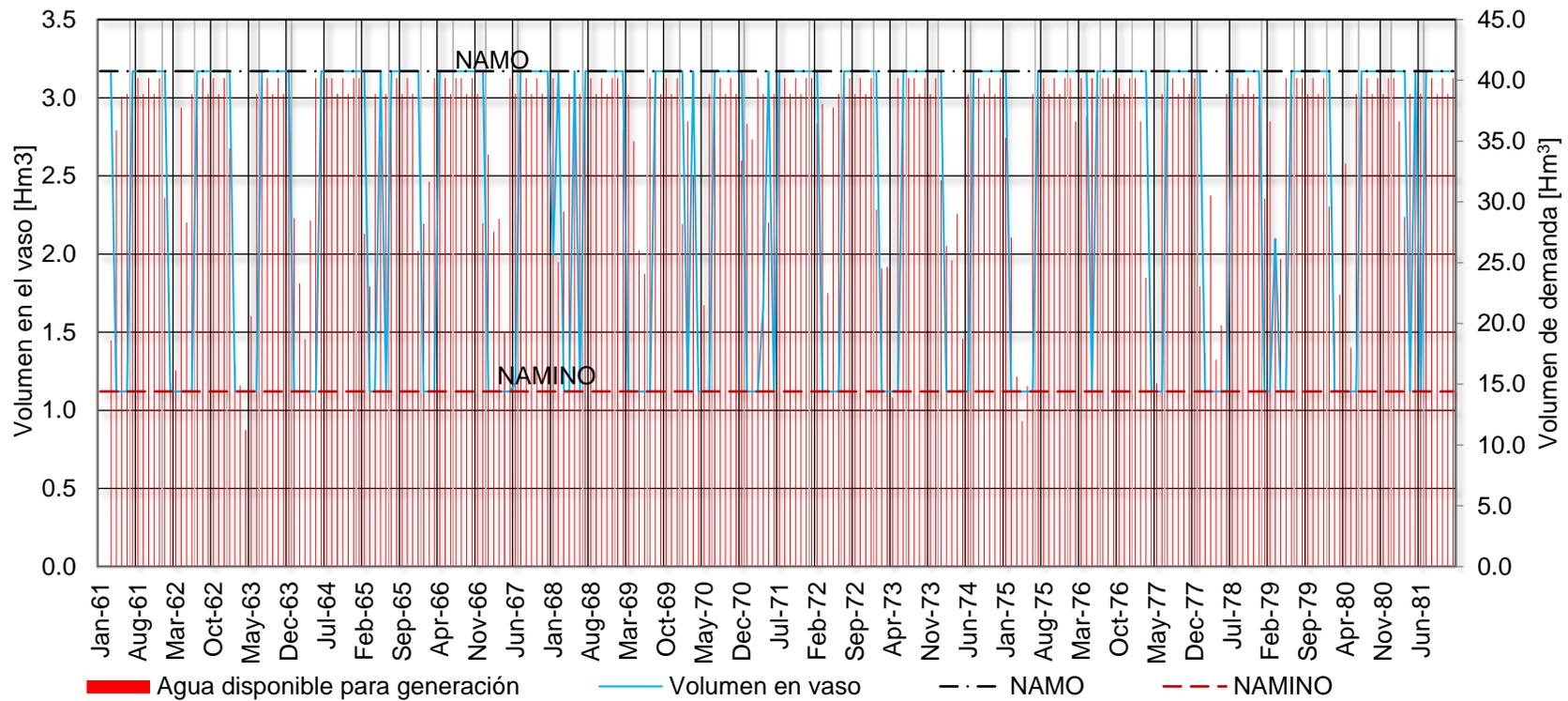
$Q_{\text{equipado}} = 2.5[\text{m}^3/\text{s}]$, Generación = 3.89[GWh/año], FP = 0.89, Potencia = 0.50[MW]



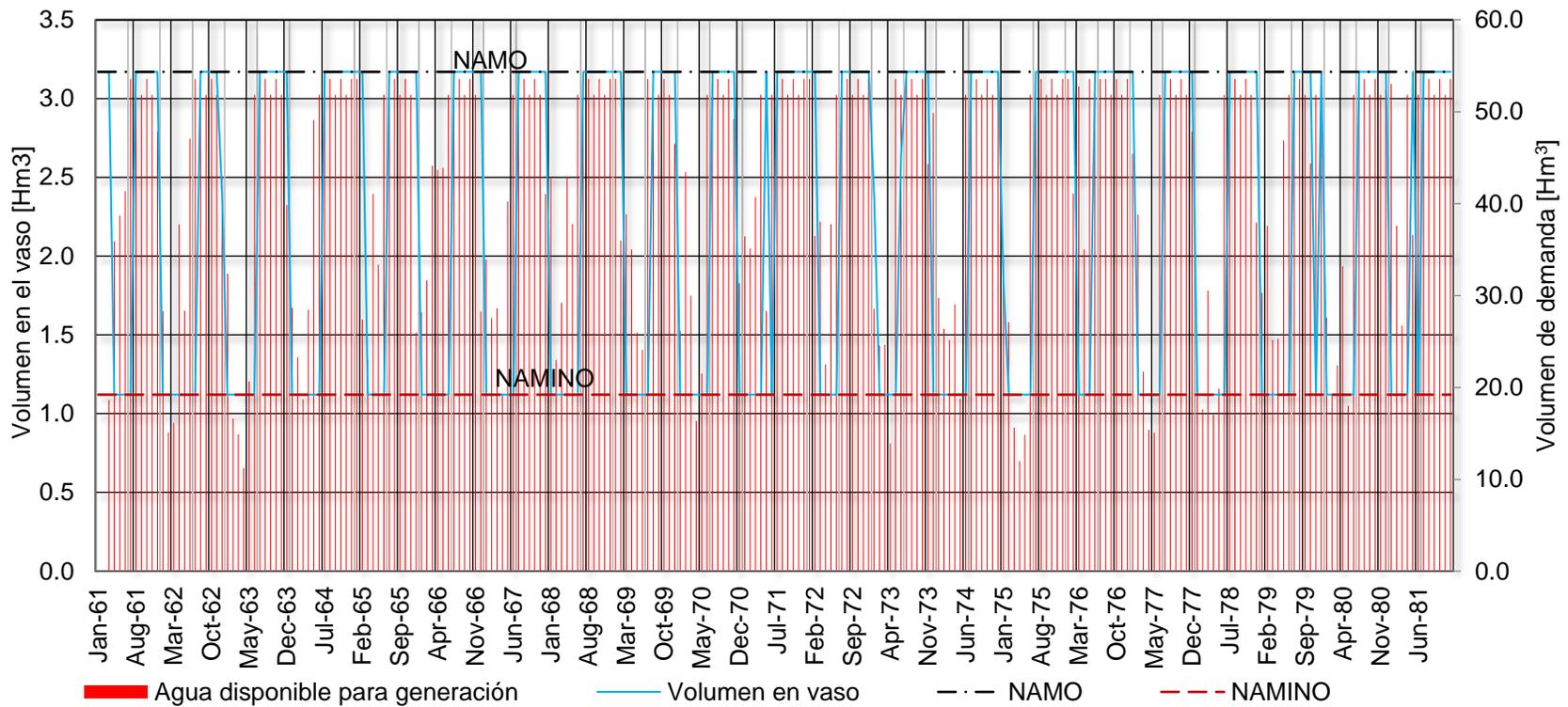
$Q_{\text{equipado}} = 5[m^3/s]$, Generación = 7.77[GWh/año], FP = 0.89, Potencia = 1.00[MW]



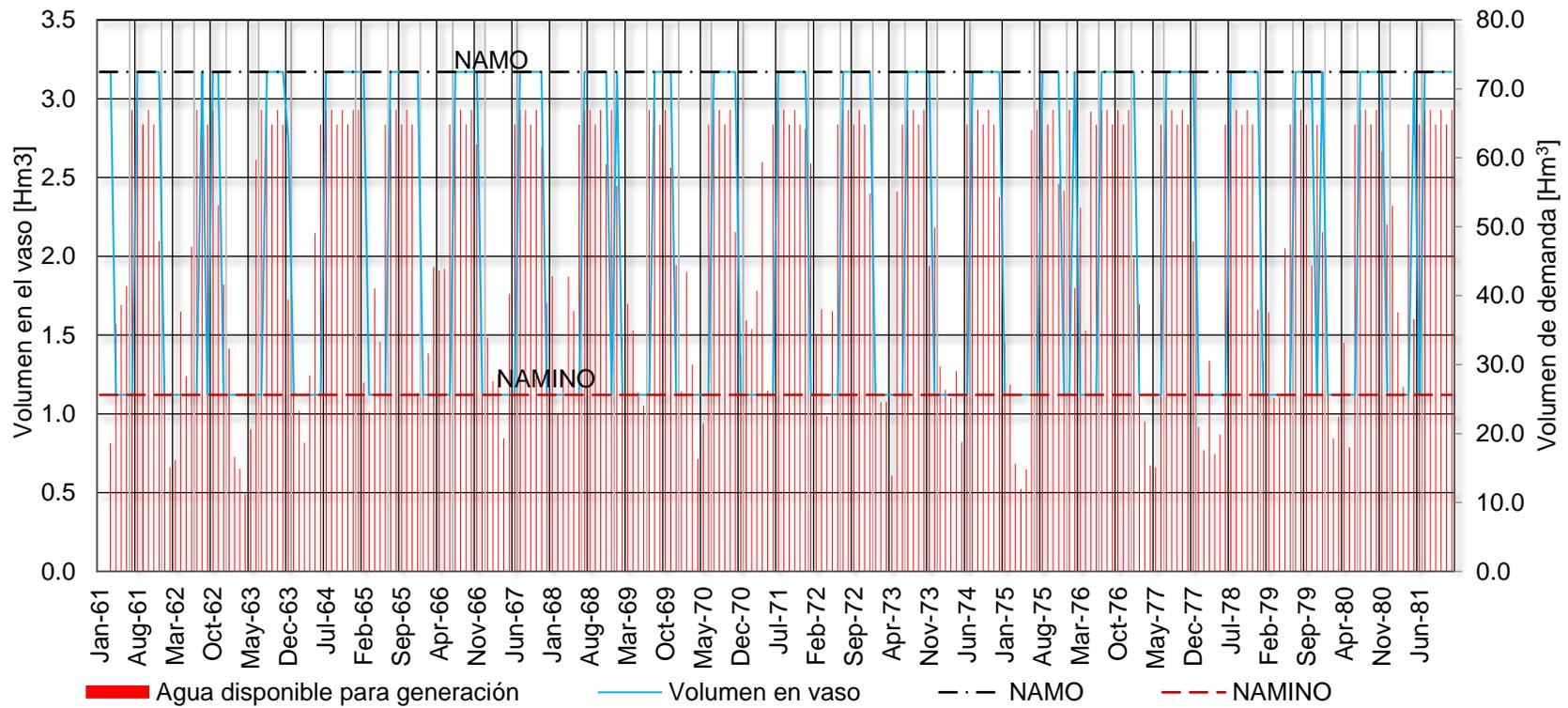
$Q_{\text{equipado}} = 10[\text{m}^3/\text{s}]$, Generación = 14.46[GWh/año], FP = 0.82, Potencia = 2.00[MW]



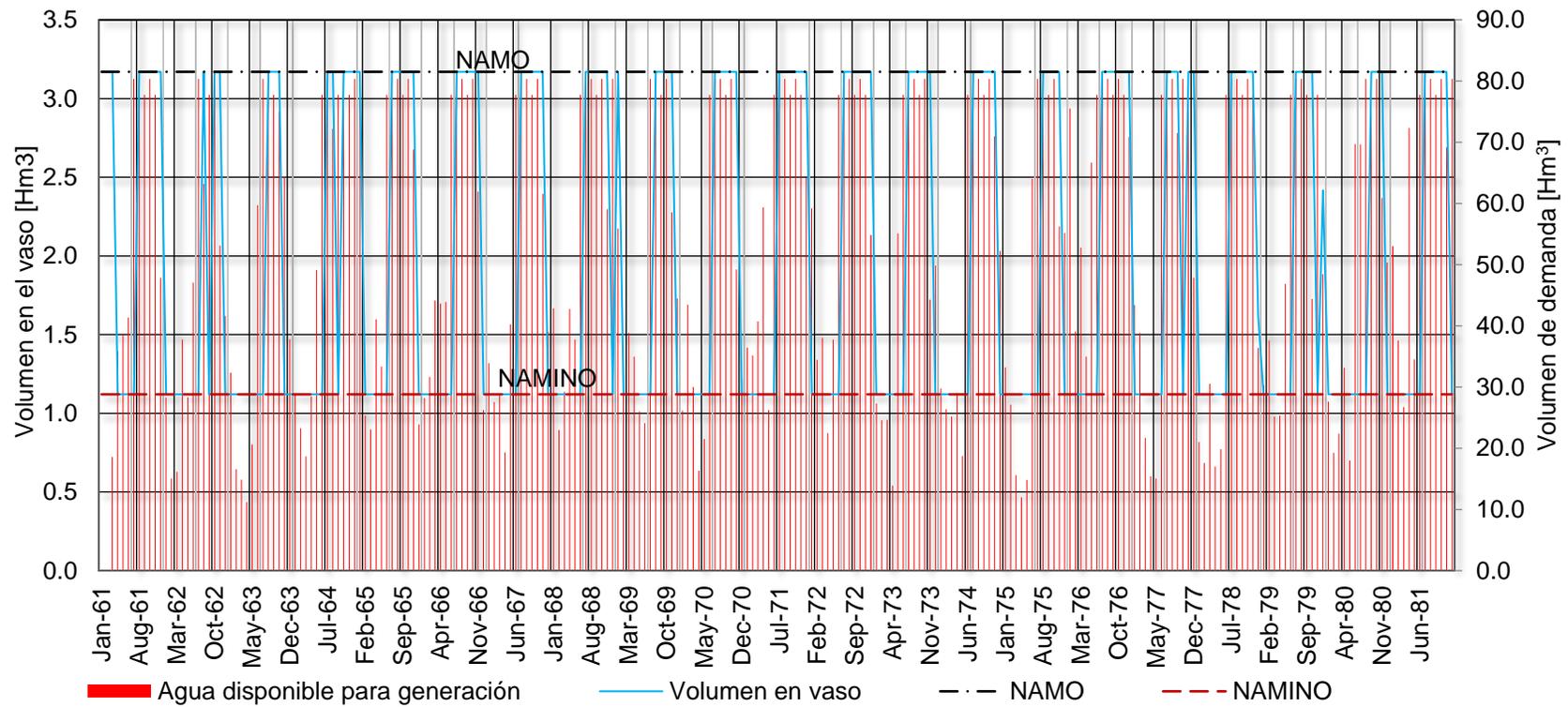
$Q_{equipado} = 15[m^3/s]$, $Generación = 18.92[GWh/año]$, $FP = 0.72$, $Potencia = 3.00[MW]$



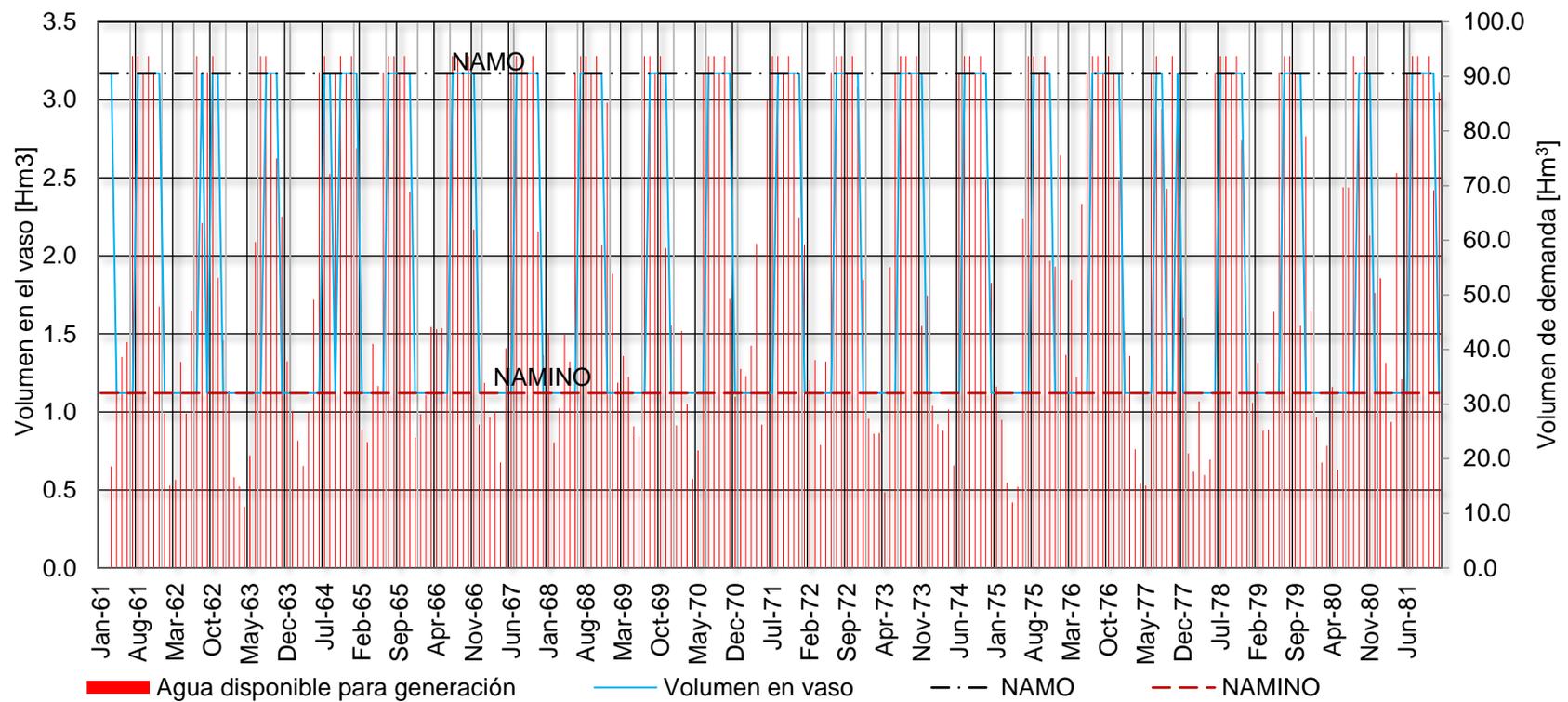
$Q_{\text{equipado}} = 20[\text{m}^3/\text{s}]$, Generación = 22.53[GWh/año], FP = 0.73, Potencia = 3.50[MW]



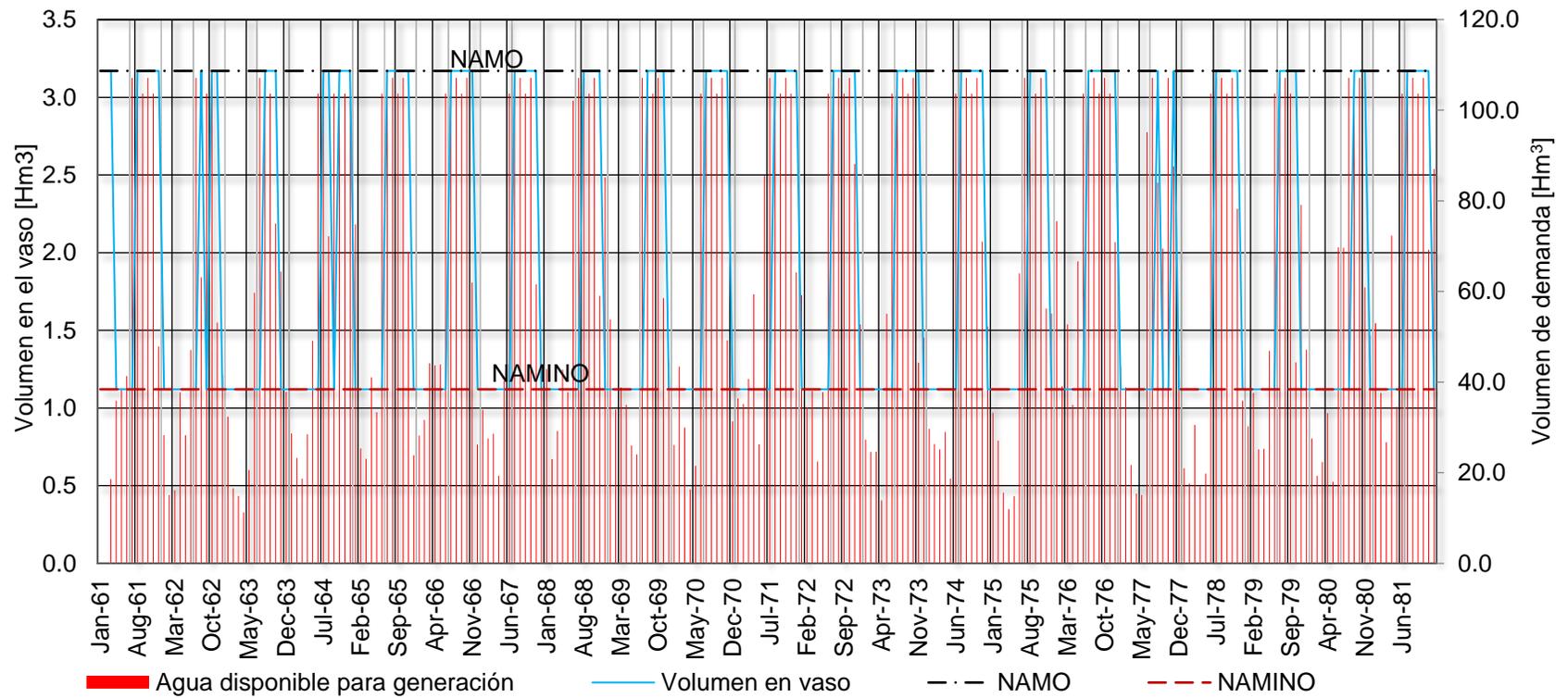
$Q_{\text{equipado}} = 25[\text{m}^3/\text{s}]$, Generación = 25.61[GWh/año], FP = 0.65, Potencia = 4.50[MW]



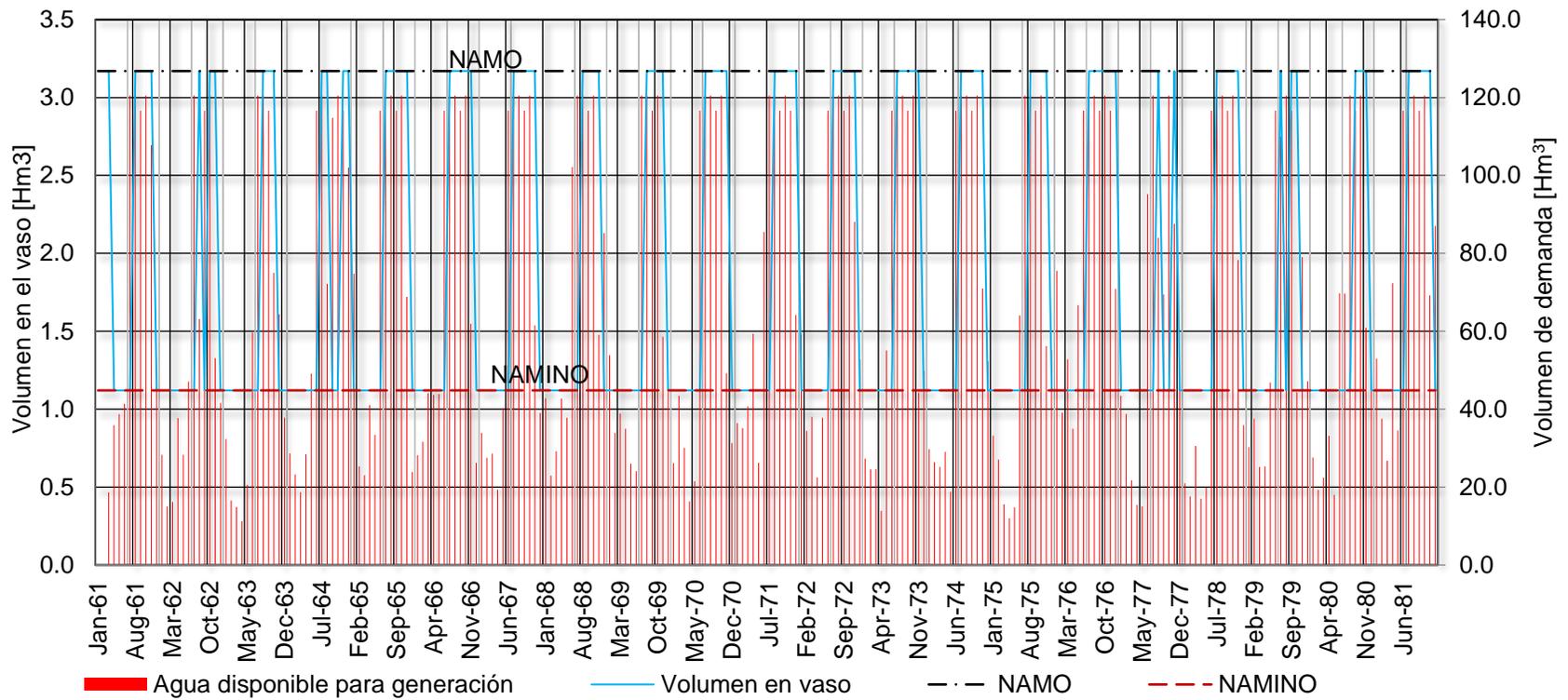
$Q_{\text{equipado}} = 30[\text{m}^3/\text{s}]$, Generación = 28.31, FP = 0.59, Potencia = 5.50[MW]



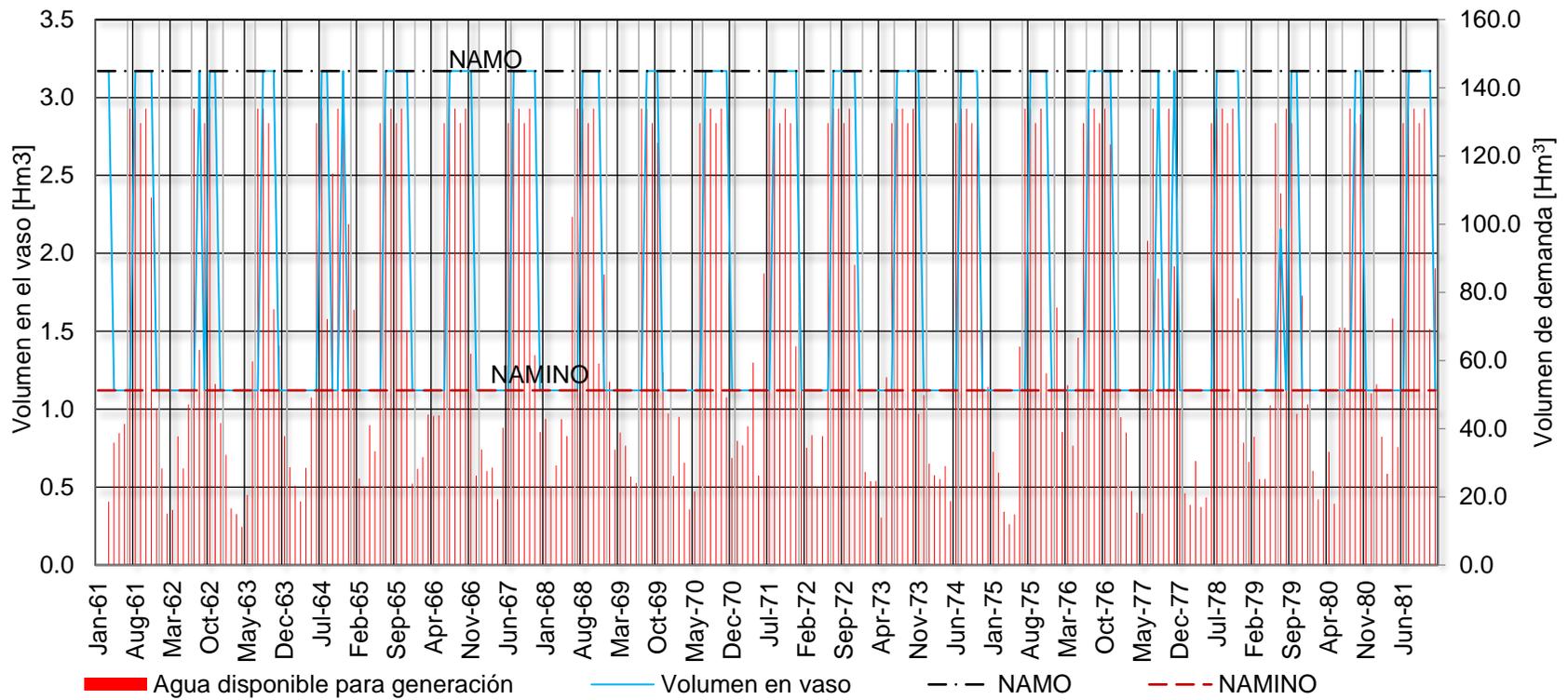
$Q_{\text{equipado}} = 35[\text{m}^3/\text{s}]$, Generación = 30.76[GWh/año], FP = 0.54, Potencia = 6.50[MW]



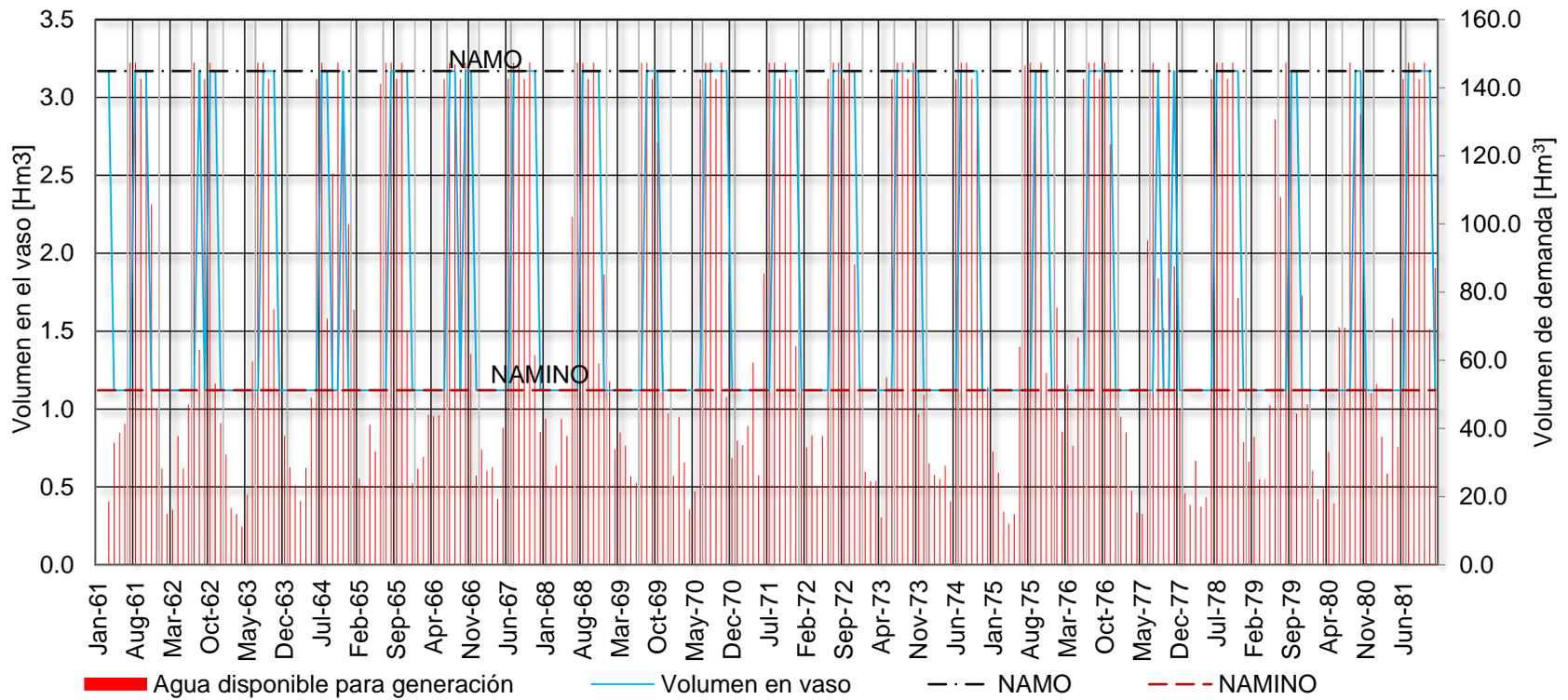
$Q_{\text{equipado}} = 40[\text{m}^3/\text{s}]$, Generación = 33.17[GWh/año], FP = 0.53, Potencia = 7.00[MW]



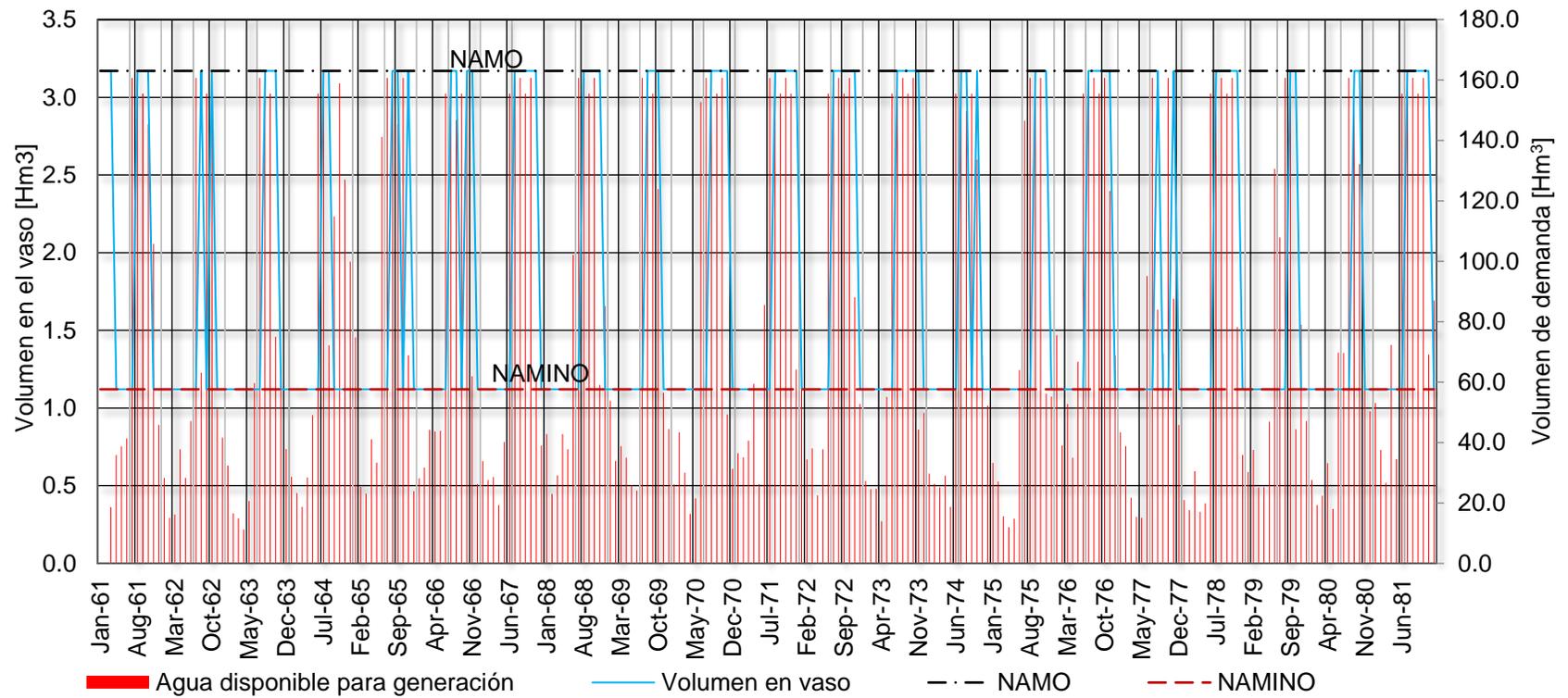
$Q_{\text{equipado}} = 45[\text{m}^3/\text{s}]$, Generación = 33.57[GWh/año], FP = 0.51, Potencia = 8.00[MW]



$Q_{\text{equipado}} = 50[\text{m}^3/\text{s}]$, Generación = 37.72[GWh/año], FP = 0.49, Potencia = 8.50[MW]



$Q_{equipado} = 55[m^3/s]$, $Generación = 39.34[GWh/año]$, $FP = 0.46$, $Potencia = 9.50[MW]$



$Q_{\text{equipado}} = 60[\text{m}^3/\text{s}]$, Generación = 40.68[GWh/año], FP = 0.44, Potencia = 10.50[MW]

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aparicio, M. F. (1989). Fundamentos de Hidrología de Superficie. (1 ed.). México: Limusa.
2. Comisión Federal de Electricidad. (1976). Documentación proporcionada por fabricantes de turbinas hidráulicas y generadores eléctricos. México, CFE.
3. Comisión Nacional del Agua. (2018). Estadísticas del Agua en México. México: CONAGUA.
4. Comisión Nacional del Agua. (2006) El Agua en México. México: CONAGUA.
5. García, G. H. (1985). Apuntes de selección de Turbinas Hidráulicas. (1 ed.). México: Facultad de Ingeniería, UNAM.
6. Mataix, C. (1982). Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. (2 ed.). México: Alfaomega.
7. Secretaría de Energía. (2012). Prospectiva de Energías Renovables 2016 – 2030. México: SENER.
8. Segura, G. K. (2019). Propuesta de práctica en el Laboratorio de Hidráulica, para la obtención de generación eléctrica en un modelo de presa. Universidad Nacional Autónoma de México.
9. Sotelo, A. G. (1997). Hidráulica General Vol. 1. (1 ed.). México: Limusa