

283
171



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Facultad de Ingeniería

Evaluación Económica del Anteproyecto de la Planta
Hidroeléctrica la Amistad, Rio Bravo, Edo. de Coahuila

T E S I S

Que para obtener el título de:

I N G E N I E R O C I V I L

P r e s e n t a :

Rodrigo Antonio Rodríguez Cárdenas

México, D. F.

1982



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA

Señor RODRIGO ANTONIO RODRIGUEZ CARDENAS,
P r e s e n t e .

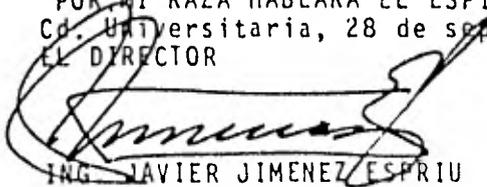
En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que aprobado por esta Dirección propuso el Profesor Ing. Roberto Carvajal Rodríguez, para que lo desarrolle como tesis para su Examen Profesional de la carrera de Ingeniero CIVIL.

"EVALUACION ECONOMICA DEL ANTEPROYECTO DE LA PLANTA HIDRO-ELECTRICA LA AMISTAD, RIO BRAVO, EDO. DE COAHUILA"

1. Antecedentes.
2. Descripción general del proyecto.
3. Características de la planta hidroeléctrica.
4. Evaluación económica de la planta hidroeléctrica.
5. Comparación con una planta térmica.
6. Conclusiones.

Ruego a usted se sirva tomar debida nota de que en cumplimiento con lo especificado por la Ley de Profesiones, deberá prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito indispensable para sustentar Examen Profesional; así como de la disposición de la Coordinación de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, 28 de septiembre 1982
EL DIRECTOR



ING. JAVIER JIMENEZ ESPRIU

I N D I C E

	Pág.
I. ANTECEDENTES	1
II. DESCRIPCION GENERAL DEL PROYECTO	3
III. CARACTERISTICAS DE LA PLANTA HIDROELECTRICA	11
IV. EVALUACION ECONOMICA DE LA PLANTA HIDROELECTRICA	14
V. COMPARACION CON UNA PLANTA TERMICA	25
VI. CONCLUSIONES	30

INTRODUCCION

La Presa Internacional La Amistad fue construida conjuntamente por los gobiernos de los Estados Unidos Mexicanos y por los Estados Unidos de Norteamérica, con la finalidad de aprovechar las aguas del río Bravo en riego, control de avenidas, producción de energía eléctrica y fines recreativos.

De conformidad con el Tratado Internacional de 1944, el costo de la presa se dividió entre ambos países en la misma proporción en que se asignó a cada uno de ellos la capacidad útil de la presa, es decir, 43.8 por ciento a México y 56.2 por ciento a los Estados Unidos; estableciéndose, además, que cada país construirá las tomas, tuberías a presión y las obras que se requieran para la futura instalación de su planta hidroeléctrica, por su propia cuenta. Que cada gobierno instalará separadamente, a sus expensas, la planta hidroeléctrica, en los sitios designados para este fin a cada lado de la presa, cuando determine que tal instalación le es conveniente.

La construcción de la presa se inició en 1964 y el cierre del desvío se llevó a cabo en 1968.

A la fecha el Gobierno de México, a través de la Comisión Federal de Electricidad,

realiza el anteproyecto de la Planta Hidroeléctrica La Amistad, tomando en cuenta las características de las obras realizadas con anterioridad, así como, los estudios alternativos de producción y transmisión de energía eléctrica en el Sistema Falcon—Monterrey, al cual se interconectará la planta hidroeléctrica para determinar la conveniencia del desarrollo hidroeléctrico.

El presente trabajo tiene como finalidad realizar la evaluación económica del anteproyecto de la Planta Hidroeléctrica La Amistad, así como su comparación con una planta térmica.

I. ANTECEDENTES

La Comisión Internacional de Límites y Aguas entre México y los Estados Unidos celebró un tratado el 3 de febrero de 1944, en el cual los gobiernos de ambos países se comprometieron a la construcción conjunta de las presas que se requieran para almacenamiento y regulación del escurrimiento del río Bravo; así como las obras comunes para la derivación de sus aguas.

A la fecha se han construido:

a) Presa Falcon

La presa Falcon es un aprovechamiento de usos múltiples, riego, generación eléctrica y control de avenidas. Se localiza en el río Bravo a 120 km aguas abajo de Nuevo Laredo, Tamps. (Laredo, Texas), con una capacidad total del vaso de 5,038 millones de m³ y una potencia instalada para cada país de 31,500 kW, en tres unidades de 10,500 kW. Se dejó la preparación necesaria para instalar, en el futuro, otra unidad con las mismas características en cada país.

b) Presa La Amistad

La presa La Amistad es un aprovechamiento de usos múltiples, para riego, ge-

neración eléctrica y control de avenidas con capacidad total del vaso de 7,069 millones de m³. Se localiza sobre el río Bravo a 1.5 km aguas abajo de la confluencia del río Devil's.

El cierre del desvío de esta presa se llevó a cabo el 31 de mayo de 1968, habiéndose construido para la planta hidroeléctrica: la obra de toma y conducción a presión, no así la casa de máquinas.

El presente trabajo tiene como finalidad llevar a cabo la evaluación económica del anteproyecto de la Planta Hidroeléctrica La Amistad, tomando en cuenta las características determinadas por la Comisión Federal de Electricidad. Este aprovechamiento del agua está sujeto a lo estipulado en la Cuarta Parte del tratado antes mencionado, cuyo artículo se refiere a la distribución del agua y su uso con fines de generación de energía eléctrica entre ambos países.

II: DESCRIPCION GENERAL DEL PROYECTO

Descripción de la presa

La presa La Amistad se localiza sobre el río Bravo, a 20 km aguas arriba de Ciudad Acuña, Coah., y el río Texas, y a 1.1 km aguas abajo de la confluencia del río Devil's con el río Bravo, en el estado de Coahuila; de la población de Ciudad Acuña, Coah., se inicia un camino pavimentado de 21 km de longitud que comunica con la presa.

Los propósitos son de riego de 240,000 Ha., en México, control de avenidas, desarrollo de energía eléctrica, retención de azolves y fines recreativos; su construcción se inició en 1964 finalizándose en 1969.

Las obras que a la fecha integran la presa La Amistad construidas en 1964 a 1969, son:

1. Cortina de tipo mixto de sección gravedad de concreto vertedora y enrocamiento.
2. Obra de toma para riego.
3. Obra de toma para generación y tubería a presión.

Cortina

Es una estructura de tipo mixto con una longitud total aproximada de 9,765 m y una altura de 87 m al desplante de la cimentación en la sección de concreto y de 35 m en la sección de enrocamiento.

En la parte central de la boquilla o cañón del cauce del río, la estructura es de sección gravedad de concreto de 665 m de longitud donde se alojan: las tomas, las tuberías a presión y el vertedor de demasías; ligada a ambos lados por terraplenes de enrocamiento y tierra de 6,500 m de longitud en México y 3,600 m en Estados Unidos de Norteamérica.

Los terraplenes o sección flexible de enrocamiento y tierra consisten en un corazón de material impermeable con talud de 0.5:1 en ambos lados, protegido aguas arriba por una capa de material semipermeable con talud de 2.5:1 y una última capa de material de roca de gran tamaño colocada a volteo con el mismo talud y 3 m de espesor. Aguas abajo, la protección es una capa de material permeable con talud 2:1 y otra capa superpuesta de roca colocada a volteo con el mismo talud y 1 m de espesor. La altura máxima del terraplén es de 35 m con ancho de corona de 10 m pavimentada, con parapeto metálico en ambos lados, banqueteta y guarnición de concreto aguas arriba. La corona está a la elevación 351 msnm.

Vertedor

Se localiza en la sección de concreto de la cortina, situada sobre el antiguo cauce del río Bravo; con longitud total de 315.16 m y 16 compuertas radiales de 15.24 m de ancho por 16.46 m de alto, separadas entre sí por pilas de concreto armado sobre las cuales se apoyan vigas de concreto presforzado a la elevación 351 msnm, para soportar la calzada y banquetetas del camino de acceso. La capacidad máxima de descarga es de 43,690 m³/s.

El tanque amortiguador tiene un delantal horizontal de 289.56 m de ancho y

69.11 m de largo con una línea de 47 dientes deflectores, cada uno de 3.66 m de altura y 2.47 m de ancho, situado a 24.83 m aguas arriba del extremo inferior de dicho tanque. El piso es de concreto reforzado de 1.50 m de espesor, anclado en la roca caliza. El umbral de extremo tiene 5.49 m de alto; 1.52 m de espesor y la cara de aguas arriba un talud de 1:1.

Características generales de la presa

Escurrimiento medio anual internacional (1907-1979)	2,729 x 10 ⁶ m ³
Gasto medio escurrido internacional	86.54 m ³ /s
Capacidad máxima del vertedor	43,690 m ³ /s
Avenida de diseño	54,000 m ³ /s

	Capacidad (millones de m ³)	Elevación (msnm)
Corona de la cortina		351.22
Cresta del vertedor	2,300	331.14
NAME	6,982	347.59
NAMO para generación	4,378	340.46
NAMINO para generación	550	312.50
NAMINO para riego	337	307.00
Nivel lecho del río	0	273.71
Capacidad útil para generación	3,828	
Capacidad útil para riego	4,041	

Resultados del funcionamiento internacional del vaso

Potencia media	35.31 MW
Caída media bruta	57.74 m
Generación mensual máxima	78.84 GWh
Generación mensual media	25.78 GWh
Generación mensual mínima	9.33 GWh
Generación media anual	309.37 GWh
Consumo específico	7.76 m ³ /kWh
Factor de planta	0.3270

Planta hidroeléctrica

La Comisión Federal de Electricidad con base en las características de las obras ya existentes, como son: la obra de toma (estructuras colectoras y tuberías a presión) y excavaciones en la zona prevista para el desplante y desfogue de una futura casa de máquinas exterior, realizó el anteproyecto de la Planta Hidroeléctrica La Amistad, Coah.

Obra de toma

Cada país construyó su obra de toma, la de México se localiza en la margen derecha del río Bravo. Consta de cuatro estructuras colectoras con sus correspondientes tuberías a presión, separadas 17 m entre ejes. De éstas la No. 1 se emplea actualmente para extracciones de agua para riego y las Nos. 2, 3 y 4 previstas para generación.

Estructuras colectoras: Se localizan en la cortina cada una provista de rejillas, una compuerta de servicio de 5.40 m por 5.80 m y una compuerta de emergencia de 5.40 m por 6.10 m, las cuales operan verticalmente. La entrada es de forma abo-

cinada de sección rectangular, y por medio de una transición de 9.47 m de longitud cambia a sección circular con 4.60 m de diámetro interior a la elevación 294.08 msnm, punto donde se inician las tuberías a presión.

La plantilla de acceso a las estructuras colectoras se encuentran a la elevación 290.10 msnm, la elevación del umbral a 294.08 msnm y el piso de los mecanismos elevadores de las compuertas a la elevación 351.22 msnm.

Las tuberías a presión se inician en la sección circular de la transición de la estructura colectoras a la elevación 294.08 msnm y termina a la elevación 271 msnm con una longitud total de 101.97 m, de los cuales, 91.18 m se realizaron durante la construcción de la presa y los 10.78 m restantes los constituye una transición de 4.60 a 2.76 m de diámetro, propuesta por el anteproyecto para unir la tubería con las turbinas. De la longitud total, una parte de ella está ahogada en la sección gravedad de concreto de la cortina y la otra dentro de un monolito rocoso.

El corte longitudinal de la tubería consta de cuatro tramos: un primer tramo inclinado 30° con respecto a la horizontal y 40.79 m de longitud; un segundo tramo constituido por una curva vertical con deflexión de 30° con radio de 20 m y longitud de 11.68 m; un tercer tramo horizontal con una longitud de 38.71 m; el cuarto y último tramo, es una transición de 10.78 m de longitud con diámetro interior variable de 4.60 m a 2.76 m, por medio de la cual se une la tubería a presión con la turbina.

En el extremo del tercer tramo de las tuberías Nos. 2, 3 y 4 actualmente se tienen instaladas tapas ciegas. En el extremo de la tubería No. 1 está instalada una válvula tipo Howell Bungler, por medio de la cual se regulan y controlan las extracciones de agua para riego.

Casa de máquinas

El sitio destinado para cada casa de máquinas, ubicado en la margen derecha del

río a 90 m, aproximadamente, aguas abajo del eje de la cortina, se excavó durante la construcción de la presa, estando la parte más profunda a la elevación 267 msnm; la casa de máquinas estudiada, se desplantará a la elevación 263 msnm, es exterior y alojará dos unidades turbo-generadoras de 27 MW, cada una, empleando las tuberías a presión No. 3 y 4, previendo para una ampliación futura la tubería No. 2.

Las dimensiones generales de la casa de máquinas son: 42 m de longitud, 19.40 m de ancho y 32 m de altura. Estas dimensiones se determinaron de acuerdo con el tamaño de las unidades turbo-generadoras.

El tubo de aspiración de la turbina, con dos pilas intermedias forman tres ductos de 2.14 m de ancho por 3.50 m de altura en el sitio de las compuertas de desfoque. Estas compuertas son de 2.55 m de ancho por 4 m de alto.

Desfoque

El desfoque de las turbinas se efectúa a través de un canal de sección trapecial a cielo abierto, con longitud aproximada de 60 m y ancho de 28 m. Se inicia a partir del tubo de aspiración en la elevación 265.50 msnm, y termina en la elevación 274 msnm, aproximadamente.

Subestación elevadora

La subestación elevadora está localizada en la margen derecha del río a una distancia de 50 m de la casa de máquinas y a 100 m aguas abajo del eje de la cortina.

Está desplantada a la elevación 319 msnm y sus dimensiones son 60 m de ancho por 75 m de largo.

La obra civil de la subestación consta de caseta, ductos para cables, pavimentación

en áreas de maniobras, barda perimetral con cerca de malla, cimientos para las estructuras y equipo eléctrico, etc.

La subestación elevadora, es del tipo *intemperie*, con esquema de interruptor y medio, con dos bahías de transformadores de potencia trifásico de 32 kVA y 13.8/138 kV, cada uno, y dos bahías de salida de línea de transmisión con tensión nominal de 138 kV.

Ataguía

Con objeto de aislar la zona del desplante de la casa de máquinas, del desfogue de las descargas del vertedor y de las extracciones para el riego, fue necesario construir una ataguía.

Se consideró adecuada para el proyecto una ataguía metálica formada con tabla-estacado de perfiles laminados con corona a la elevación 282 msnm; para facilitar el hincado del tabla-estacado se construirá una pre-ataguía de materiales graduados con altura máxima de 3 m y corona a la elevación 277 msnm.

Camino de acceso a casa de máquinas

A la fecha se cuenta con caminos de acceso a los sitios de la subestación y a la casa de máquinas.

Línea de transmisión

La planta hidroeléctrica mexicana se interconectará, en México, con el Sistema Monterrey-Falcon y, en Estados Unidos, con la planta La Amistad por medio de dos líneas de transmisión de 30 km y 1 km, respectivamente.

La subestación elevadora de la planta La Amistad se interconectará al Sistema Monterrey-Falcon en la subestación receptora de Ciudad Acuña, Coah., por medio de una línea de transmisión de 138 kV, de un circuito con conductores de 477 MCM tipo ACSR y torres de acero con longitud aproximada de 30 km. La línea de transmisión que interconecta con E.U.A. tiene las mismas características antes señaladas, excepto en su longitud que es de 1 km.

III. CARACTERISTICAS DE LA PLANTA HIDROELECTRICA

Las características que a continuación se presentan corresponden a la alternativa seleccionada por la Comisión Federal de Electricidad, a nivel de anteproyecto.

Capacidad instalada	54 MW
Turbinas	
Número y tipo	2, Francis eje vertical
Potencia de diseño	27,411 kW
Gasto de diseño	52.82 m ³ /s
Caída neta de diseño	57.50 m
Velocidad específica	268.87 sistema métrico
Velocidad de rotación	257.15 rpm
Generadores	
Número y tipo	2, eje vertical
Velocidad síncrona	257.14 rpm
Velocidad de desboque	718.81 rpm
Frecuencia	60 Hz
Número de polos	28
Potencia nominal	27,000 kW
Factor de potencia	0.95 intensidad atrasada
Capacidad nominal	28,421 kVA

Resultados del funcionamiento del vaso¹

Potencia instalada	54.00 MW
Potencia media	35.32 MW
Caída media bruta	57.74 m
Generación mensual máxima	39.42 GWh
Generación mensual media	12.89 GWh
Generación mensual mínima	4.66 GWh
Generación media anual	154.685 GWh
Generación de base	98.685 GWh/año
Generación de pico	56.000 GWh/año
Número de horas en pico	1,037.000 h/año
Factor de planta	0.327

¹ Derivados del funcionamiento internacional del vaso

Subestación elevadora

Tipo	Intemperie
Esquema	Interrupción y medio
Transformadores	Trifásicos de 32 kVA, 13.8/138 kV

Línea de transmisión

Tensión	138 kV
Longitud	30 km
Soporte	Torres de acero
Cables	477 MCM-ACSR
Número de circuitos	1

Costos

Concepto	Costo en millones de pesos		Total
	Obra civil	Obra electromecánica	
Trabajos preliminares	5.3	---	5.3
Ataguías	13.2	---	13.2
Caminos de acceso	4.8	---	4.8
Campamentos	13.2	---	13.2
Casa de máquinas	90.5	460	550.5
Total sin subestación ni línea	127.0	460	587.0
Subestación elevadora	7.9	68.3	76.2
Línea de transmisión	4.0	29.1	33.1
T o t a l	138.9	557.4	696.3

Resumen

	Costo* (millones de pesos)	Años const.	Porcentajes anuales	Vida útil (años)
I. Obra civil (sin subestación, ni línea)	127	3	51, 41, 8	50
II. Obra electromecáni- ca (sin subestación, ni línea)	460	3	30, 40, 30	30
III. Subestación elevadora	76.2	2	42, 58	30
IV. Línea de transmisión	33.1	1	100	30

* El costo incluye imprevistos, supervisión y administración de la obra.

IV. EVALUACION ECONOMICA DE LA PLANTA HIDROELECTRICA LA AMISTAD

La evaluación económica de una planta o central eléctrica se puede llevar a cabo mediante el método de beneficio-costos; éste se basa en la relación de los beneficios que se obtienen en un sistema eléctrico al costo del proyecto. Para una relación beneficio-costos unitaria, el beneficio será igual al costo y esto establece la justificación mínima para la inversión.

Beneficio

El beneficio que se obtiene en un sistema eléctrico por incorporar una nueva planta destinada a satisfacer la demanda, deriva de la adición de capacidad y energía que se pone a disposición del sistema, distinguiéndose beneficios por potencia y por generación; éstos corresponden respectivamente a la adición de un kW y un kWh al mismo.

Por lo que se refiere a los beneficios por energía, se distinguen beneficios a las horas de máxima demanda (pico) y beneficios fuera de las horas de máxima demanda (base).

Es sumamente complejo determinar el valor cronológico de dichos beneficios en un sistema eléctrico dado (red), ya que éste es función de un gran y variable número de parámetros, tales como, forma y magnitud de la demanda; tipo y número de centrales eléctricas que integran el sistema en una fecha determinada, características de los medios de transformación y transmisión, etc.

La Comisión Federal de Electricidad determina periódicamente valores económicos unitarios, en valor presente, por potencia y energía en función de la fecha y sistema al cual se interconectará una central eléctrica, que aplicados a la potencia y generación entregados a la red por ésta, tomando en cuenta los consumos de los auxiliares en la planta y las pérdidas en la transmisión, establecen el beneficio total.

$$BT = BP + BGP + BGB \quad (1)$$

donde:

$$BP = BUP \cdot PN \cdot 10^{-3} \quad (2)$$

$$BGP = BUGP \cdot GPN \quad (3)$$

$$BGB = BUGB \cdot GBN \quad (4)$$

BT beneficio total en valor presente, referido a la fecha de inicio de operación de la central, en millones de pesos

BP beneficio por potencia, en millones de pesos

BGP beneficio por generación en pico, en millones de pesos

BGB beneficio por generación en base, en millones de pesos

BUP beneficio unitario por potencia, en \$/kW

BUGP beneficio unitario por generación en pico, en \$/kWh

BUGB beneficio unitario por generación en base, en \$/kWh

PN potencia entregada a la red o neta, en MW

GPN generación anual de pico entregada a la red o neta, en GWh/año

GBN generación anual de base entregada a la red o neta, en GWh/año

$$PN = PD - \Delta PD = PD(1 - f_{pp} \cdot L \cdot 10^{-4}) = PD \cdot F_p \quad (5)$$

$$PD = PI (1 - ca) \quad (6)$$

$$\Delta PD = PD \cdot f_{pp} \cdot L \cdot 10^{-4} \quad (7)$$

$$GPN = PN \text{ pico} \cdot NP \cdot FI \cdot 10^{-3} \quad (8)$$

$$GBN = PN \text{ base} \cdot NB \cdot FI \cdot 10^{-3} \quad (9)$$

PD potencia disponible antes de la transmisión, en MW

ΔPD pérdidas de potencia por transmisión, en MW

ca consumo de auxiliares de la planta, en p.u.

FA factor de consumo de auxiliares = $1 - ca$

f_{pp} pérdidas por transmisión en 100 km de longitud de línea

$$F_p = 1 - f_{pp} \cdot L \cdot 10^{-4}$$

PI potencia instalada en la planta, en MW

L longitud de la línea de transmisión, en km

NP número de horas al año de operación en pico de la central

NB número de horas al año de operación en base de la central

FI factor de indisponibilidad = $1 - ID$

ID indisponibilidad por mantenimiento y fallas accidentales de la central en p.u.

Costo

El costo total en valor presente, referido a la fecha de inicio de operación de la central, corresponde a la suma de la inversión inicial, los intereses durante la construcción, los gastos por concepto de reposición de las obras y equipos al término de su vida útil por otras de iguales características y los cargos derivados por la operación y mantenimiento de la planta.

$$VPT = VPI + VPCF \quad (10)$$

$$VPI = CA (1 + i)^m / [(1 + i)^m - 1] \quad (11)$$

$$CA = \frac{C}{100} \sum_{j=1}^n K_j (1 + t)^{-j} \quad (12)$$

$$VPCF = CF/i \quad (13)$$

$$CF = OM + MS + ML + I + COM \quad (14)$$

donde:

- VPT costo total en valor presente, referido a la fecha de inicio de operación, en millones de pesos
- VPI costo en valor presente por concepto de la inversión, en millones de pesos
- VPCF costo en valor presente por concepto de operación y mantenimiento, en millones de pesos
- CA suma de la inversión inicial y los intereses durante el periodo de construcción, en millones de pesos
- i tasa de amortización de capital durante la vida útil de las obras consideradas, en p.u.
- m vida útil de las obras consideradas, en años
- C inversión inicial de las obras consideradas, en millones de pesos
- Kj inversión en el año j respecto a la inversión inicial, en porcentaje
- t tasa de interés de la inversión durante el periodo de construcción, en p.u.
- n número de años del periodo de construcción
- CF cargos fijos anuales por concepto de operación y mantenimiento de la planta, incluyendo subestación, línea de transmisión, impuestos y combustible, en millones de pesos/año
- OM cargos fijos anuales por concepto de mano de obra, materiales y refacciones para mantenimiento y operación de las obras consideradas, en millones de pesos/año

- MS cargos fijos anuales por concepto de mantenimiento de la subestación elevadora, en millones de pesos/año
- ML cargos fijos anuales por concepto de mantenimiento de la línea de transmisión, en millones de pesos/año
- I impuestos anuales, en millones de pesos/año
- COM cargos anuales por concepto de combustible, cuando procedan, en millones de pesos/año

Para una planta hidroeléctrica:

$$OM = OMH = 0.003 CC + 0.02 CE + 0.005 GM + 0.4 \quad (15)$$

$$MS = 0.06 CS \quad (16)$$

$$ML = 0.004 PI + (5 CL/L) \quad (17)$$

$$I = IH = 0.01 GMN \quad (18)$$

$$COM = COMH = 0 \quad (19)$$

donde:

- CC inversión inicial en obra civil, en millones de pesos
- CE inversión inicial en obra electromecánica, en millones de pesos
- GM generación media anual de la central, en GWh/año
- CS inversión inicial de la subestación elevadora, en millones de pesos
- PI potencia instalada en la central, en MW
- CL inversión inicial de la línea de transmisión, en millones de pesos
- L longitud de la línea de transmisión, en km
- GMN generación media anual entregada a la red, en GWh/año

Para una planta térmica

$$OM = OMT = CUMj \cdot PIT \cdot 10^{-3} \quad (20)$$

$$MS = 0.06 CS \quad (21)$$

$$ML = MLT = 0.04 PIT + (5 CL/L) \quad (22)$$

$$I = IT = 0.01 GTN \quad (23)$$

$$COM = COMT = CTj \cdot PC \cdot GBT$$

donde:

CUMj costo unitario de operación y mantenimiento de una planta térmica con unidades de potencia nominal j, en \$/kW

PIT potencia instalada en la planta térmica, en MW

GTN generación anual entregada a la red por la planta térmica, en GWh/año

CTj consumo térmico de unidades de potencia nominal j, en kcal/kWh

PC costo del combustible, en \$/kcal

GBT generación anual bruta o generación en los bornes de los generadores de la planta, en GWh/año

Beneficio-costo

La relación beneficio-costo se obtiene dividiendo el beneficio total en valor presente (BT), entre el costo total en valor presente (VPT).

$$BC = BT/VPT \quad (24)$$

La Planta Hidroeléctrica La Amistad, se interconectará al Sistema Norte, el cual al 31 de diciembre de 1981, contaba con una potencia instalada de 4,347 MW.

de éstos el 8 por ciento corresponde a plantas hidroeléctricas y el resto a plantas térmicas. La generación bruta anual en el sistema fue de 17,338 GWh, de los cuales el 9.6 por ciento son de origen hidroeléctrico.

A continuación se presentan los datos generales de la planta mediante los cuales se llevará a cabo la evaluación económica correspondiente.

Datos generales de la planta

Potencia y energía

Potencia instalada (PI)	54	MW
Generación media anual (GM)	154.685	GWh/año
Generación bruta en pico (GPH)	56	GWh/año
Generación bruta en base (GBH)	98.685	GWh/año
Factor de planta (FPH)	0.3270	
Factor de pérdidas en pico (FPP)	0.9889	P.U.
Factor de pérdidas en base (FPB)	0.9970	P.U.
Consumo de auxiliares (cah)	1	por ciento
Indisponibilidades (IDH)	6	por ciento

Línea de transmisión

Tensión de operación	138	kV
Area y tipo del conductor	477	MCM (ACSR)
Longitud (L)	30.0	km

Costo en millones de pesos

Obra civil (CC)	127.0
Obra electromecánica (CE)	460.0
Subestación elevadora (CS)	76.2
Línea de transmisión (CL)	33.1

Años de construcción

Obra civil y electromecánica	3
Subestación elevadora	2
Línea de transmisión	1

Flujo de inversiones durante la construcción, en porcentaje/año

Obra civil	51, 41, 8
Obra electromecánica	30, 40, 30
Subestación elevadora	42, 58
Línea de transmisión	100
Año de inicio de construcción	1982
Año de inicio de operación	1985
Tasa de interés durante la construcción (t)	12 por ciento
Tasa de amortización del capital (i)	12 por ciento
Vida útil de la obra civil	50 años
Vida útil de la obra electromecánica	30 años

Beneficios unitarios en 1985 en el Sistema Interconectado Norte

Por potencia	12,700	\$/kW
Por generación en pico	10.35	\$/kWh
Por generación en base	4.80	\$/kWh

Como se estableció anteriormente, la evaluación económica se lleva a cabo en términos de la potencia y energía entregadas por la planta al sistema eléctrico al cual se interconectará, en este caso al Sistema Norte.

Cálculo de la potencia y energía entregada a la red por la Planta Hidroeléctrica La Amistad

Potencia disponible (PDH)

$$PDH = PI \cdot FAH = 53.46 \text{ MW}$$

Potencia de pico neta (PHN)

$$PHN = PDH \cdot FPP = 52.87 \text{ MW}$$

Generación de pico neta (GPN)

$$GPN = PHN \cdot NHP \cdot FIH \cdot 10^3 = 51.54 \text{ GWh/año}$$

Potencia disponible en la base (PHB)

$$PHB = (GBH \cdot FAH)/(8.76 - GPH/PI) = 12.65 \text{ MW}$$

Potencia de base neta (PHBN)

$$PHBN = PHB \cdot FPB = 12.61 \text{ MW}$$

Generación de base neta (GBN)

$$GBN = PHBN (8,760 - NHP) \cdot FIH \cdot 10^3 = 91.55 \text{ GWh/año}$$

Generación media anual neta (GMN)

$$GMN = GPN + GBN = 143.09 \text{ GWh/año}$$

Beneficio de la Planta Hidroeléctrica La Amistad

Aplicando los beneficios unitarios por potencia y energía correspondientes al Sistema Interconectado Norte, establecidos en el cuadro de datos generales de la planta, se tiene:

Beneficio por potencia (BPH)

$$BPH = 671.45 \text{ M\$}$$

Beneficio por generación de pico (BGPH):

$$BGPH = 533.44 \text{ M\$}$$

Beneficio por generación de base (BGBH):

BGBH = 439.44 M\$

Beneficio total (BTH):

BTH = 1,644.33 M\$

Determinación del costo en valor presente a 1985:

Costo actualizado de la obra civil (CAC):

CAC = 149.73 M\$

Valor presente de la obra civil (VPC):

VPC = 150.25 M\$

Costo actualizado del equipo electromecánico (CAE):

CAE = 517.19 M\$

Valor presente del equipo electromecánico (VPE):

VPE = 535.05 M\$

Costo actualizado de la subestación elevadora (CAS):

CAS = 80.04 M\$

Valor presente de la subestación (VPS):

VPS = 82.80 M\$

Costo actualizado de la línea de transmisión (CAL):

CAL = 33.1 M\$

Valor presente de la línea (VPL)

$$\text{VPL} = 34.24 \text{ M\$}$$

Valor presente de la inversión total (VPH)

$$\text{VPH} = \text{VPC} + \text{VPE} + \text{VPS} + \text{VPL} = 802.34 \text{ M\$}$$

Cargos fijos por concepto de operación, mantenimiento e impuestos (CFH)

$$\begin{aligned} \text{CFH} &= \text{OMH} + \text{MSH} + \text{ML} + \text{IH} \\ &= 10.75 + 4.57 + 5.73 + 1.43 = 22.48 \text{ M\$/año} \end{aligned}$$

Valor presente de los cargos fijos (VPCFH)

$$\text{VPCFH} = 187.33 \text{ M\$}$$

Valor presente total (VPTH)

$$\text{VPTH} = \text{VPH} + \text{VPCFH} = 989.67 \text{ M\$}$$

Relación beneficio-costo de la P.H. La Amistad (RBCH):

$$\text{RBCH} = 1.6615$$

Como la relación beneficio-costo es mayor que la unidad, se concluye que la Planta Hidroeléctrica La Amistad es económicamente factible.

V. COMPARACION CON UNA PLANTA TERMICA EQUIVALENTE

Como alternativa de solución se compara la Planta Hidroeléctrica La Amistad con una planta térmica.

Para comparar una planta hidroeléctrica con una térmica es necesario considerar que esta última produce el mismo beneficio en el sistema eléctrico, así como tener en cuenta las condiciones de operación de la hidroeléctrica, es decir, la magnitud y forma con que ésta entrega a la red tanto la potencia como la energía. Las características de la planta térmica, que como solución alternativa se proponga, deberán ser tales que sustituyan la potencia y energía a costo mínimo.

Se propone como térmica de sustitución o equivalente, una planta termoeléctrica convencional quemando combustóleo, con una potencia instalada de 700 MW, en dos unidades de 350 MW cada uno, sin línea de transmisión por considerar que ésta se ubica en el centro de la demanda; debiéndose cumplir lo siguiente:

$$PTN = PHN \quad (25)$$

$$GTNP + GTNB = GTN = GHPN + GHBN = GMN \quad (26)$$

donde:

PTN, PHN potencia neta termoeléctrica e hidroeléctrica, respectivamente, en MW

GTNP,GTNB,GTN generación neta termoeléctrica en pico, base y total, respectivamente, en GWh/año

GHPN,GHBN,GMN generación hidroeléctrica neta de pico, de base y media anual, respectivamente, en GWh/año

A continuación se presentan las características de la planta termoeléctrica de sustitución.

Características de la planta termoeléctrica de sustitución¹

Potencia instalada, en MW (PIT)	700
Potencia por unidad, en MW	350
Vida útil, en años	30
Factor de indisponibilidad (FIT)	0.85
Factor de consumo auxiliares (FAT)	0.94
Factor de carga promedio, en vida útil (\overline{FCT})	0.7112
Factor de planta promedio, en vida útil (\overline{FPT})	0.5682
Generación bruta, en GWh/año (GBT)	3,484.20
Generación entregada a la red sin considerar línea de transmisión, en GWh/año (GNT)	3,275.15
Inversión inicial de la planta, en \$/kW (CUT)	27,000
Inversión inicial de la subestación, en \$/kW (CUS)	1,502
Cargo anual por operación y mantenimiento de la planta, en \$/kW/año (CUM)	1,000
Consumo térmico unitario a \overline{FCT} , en kcal/kWh (CTUT)	2,378
Combustible	combustóleo

¹ Fuente, CFE

Precio del combustible ² , en \$/kWh (CUO)	1.6052
Cargo anual por combustible, en \$/kWh neto/año	1.7077
Inversión inicial de la subestación, en \$/kWh	1,502
Número de años de construcción:	
de la planta	5
de la subestación	3
Inversiones anuales durante la construcción, en porcentaje de la inversión inicial:	
de la planta	16, 24, 31, 22, 7
de la subestación	40, 40, 20

² Calculado considerando petróleo crudo tipo Maya con precio de exportación de 25 dólares/barril, 50 pesos/dólar y poder calorífico de 9,900 kcal/lt.

Costos en valor presente

Considerando las características de la planta termoeléctrica de sustitución, anteriormente mencionadas, así como las ecuaciones establecidas en el capítulo IV, para una tasa de interés del 12 por ciento anual, se tiene:

Costo actualizado de la inversión:

De la planta:	34,944 \$/kW instalado
De la subestación:	1,574 \$/kW instalado
Total:	36,518 \$/kW instalado

Costo en valor presente de la inversión:

	\$/kW inst.	\$/kW neto
De la planta:	36,150	38,457
De la subestación:	1,628	1,732
Total:	37,778	40,189

Costo en valor presente por operación, mantenimiento e impuestos:

	\$/kW inst.	\$/kW neto
De la planta:	8,333	8,865
De la subestación:	751	799
Impuestos:	390	415
Total:	9,474	10,079

Costo total en valor presente por concepto de inversión, operación, mantenimiento e impuestos:

\$/kW inst.	\$/kW neto
47,252	50,268

Costo en valor presente por concepto de combustible:

Instalado o bruto:	13.3770 \$/kWh generado
Entregado a la red:	14.2308 \$/kWh neto

Costo de sustitución en valor presente (VTS):

Para determinar el costo de sustitución de la potencia y energía entregada a la red, se multiplican los valores unitarios correspondientes por la potencia (PHN = 52.87 MW) generación (GMN = 143.09 GWh/año) entregada a la red por la planta hidroeléctrica La Amistad.

Por potencia:	$52.87 \cdot 50,268 \cdot 10^{-3} =$	2,657.67 millones de pesos
Por energía:	$143.09 \cdot 14.2308 =$	2,036.29 millones de pesos
Costo de sustitución (VTS):		4,693.95 millones de pesos

Beneficio:

Como quedó establecido el beneficio que produce en el Sistema Eléctrico Norte la planta térmica de sustitución o equivalente (BTT) es igual al producido por la planta hidroeléctrica (BTH), es decir:

$$BTT = BTH = 1,644.33 \text{ millones de pesos}$$

Relación beneficio-costos (RBCT):

$$RBCT = \frac{BTT}{VTS} = 0.3503$$

Como la relación beneficio-costos es menor que la unidad, se concluye que la planta térmica equivalente no es económicamente factible.

VI. CONCLUSIONES

Al comparar la Planta Hidroeléctrica La Amistad con su térmica equivalente que produce en el Sistema Eléctrico Norte iguales beneficios por potencia y energía, se concluye lo siguiente:

- La relación beneficio-costo es de 1.66 y 0.35, respectivamente de la hidroeléctrica y de la térmica, y por lo tanto solo la primera es económicamente factible.
- El costo de sustitución de la térmica es 4.74 veces mayor que el correspondiente a la hidroeléctrica.
- La construcción de la P.H. La Amistad permitirá ahorros por concepto de combustible del orden de 244 millones de pesos/año, equivalentes a 195,484 barriles de petróleo tipo Maya por año, es decir, un ingreso en divisas de 4.89 millones de dólares anuales, que en las condiciones económicas actuales el país podrá destinar a otros usos prioritarios.