

Diseño de una tubería de alta presión para un
proyecto hidroeléctrico de 20 MW

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades

Diseño de una tubería de alta presión para un
proyecto hidroeléctrico de 20 MW



Trabajo de investigación presentado por Carlos Eduardo
Colom Bickford para optar al grado de Licenciado en
Ingeniería Mecánica

Guatemala
2001

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo presentar una técnica de diseño, basada tanto en la teoría como en la práctica, para una tubería de alta presión en una hidroeléctrica. Es importante notar que el diseño de dicha estructura es de vital importancia para el funcionamiento de cualquier proyecto de este tipo. Para el diseño de la tubería se logró obtener la menor cantidad de pérdidas por fricción mediante la optimización de los diferentes diámetros. Así mismo, se redujeron los costos mediante la utilización de un programa que permitió escoger el rango de diámetros más económicos para el proyecto. A través del trabajo se detallan los diferentes pasos necesarios para el diseño, transporte, instalación y montaje de la tubería, así como datos útiles obtenidos de la experiencia de campo.

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	iv
LISTA DE TABLAS	vi
Capítulos	
I. INTRODUCCIÓN	1
II. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO	3
III. IMPORTANCIA DE LA TUBERÍA DE ALTA PRESIÓN	6
IV. PROCESO DE SELECCIÓN DE LA TUBERÍA	9
V. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LA TUBERÍA	14
VI. PÉRDIDAS EN LA TUBERÍA DE ALTA PRESIÓN	15
VII. TRANSPORTE DE LA TUBERÍA DE ALTA PRESIÓN	21
VIII. PREPARACIÓN DEL TERRENO	23
IX. PROTECCIÓN DE LA TUBERÍA CONTRA LA CORROSIÓN	27
X. INSTALACIÓN DE LA TUBERÍA DE ALTA PRESIÓN	34
XI. CONCLUSIONES	39
XII. RECOMENDACIONES	41
XIII. BIBLIOGRAFÍA	42
XIV. ANEXOS	44

LISTA DE TABLAS

Tabla	Página
1. Características generales de la tubería	7
2. Características del acero.	9
3. Características de la tubería de alta presión	10
4. Peso de las secciones	14
5. Series galvánicas	27
6. Superficie exterior de la tubería	31

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la generación de energía eléctrica es de vital importancia para el desarrollo de Guatemala. Las ciudades dependen del abastecimiento de energía para funcionar. Las industrias y comercios, sin importar su tamaño, dependen directamente de ella para poder llevar a cabo sus procesos y actividades. Gran parte de la población da por hecho que cuentan con la energía que necesitan a la hora y en la cantidad que desean, y en realidad, esta debe ser la meta del país. Pero esto no es así de fácil, ya que la creación de una central generadora de energía eléctrica requiere de una fuerte inversión. Además, su construcción y puesta en marcha necesita del trabajo de personal altamente calificado y el uso de maquinaria compleja.

La forma de generación eléctrica más común en Guatemala es por medio de plantas térmicas. La ventaja de estas plantas es que se pueden instalar en un tiempo relativamente corto y en casi cualquier lugar; además pueden utilizar una gran variedad de combustibles (diesel, búnker, carbón, bagazo, etc.). Los grandes problemas que presentan estas plantas es la contaminación al medio ambiente, ya que, como se mencionó, su funcionamiento está basado en el uso de combustibles que, durante su combustión, liberan gases tóxicos y contaminantes. Algunas de estas plantas no cuentan con los equipos necesarios para controlar las emisiones. Además, el precio de los combustibles tiende a subir cada día en un mayor porcentaje, lo cual incide en la generación de energía muy costosa y afecta directamente a la población.

Es por éstas razones que, para Guatemala, es muy importante promover la construcción y desarrollo de centrales generadoras que no contaminen el medio ambiente y que contribuyan a mejorar la capacidad de abastecimiento de energía a la población.

El ejemplo más claro de este tipo de plantas son las centrales hidroeléctricas, es decir, plantas que generan energía por medio del aprovechamiento del agua. En Guatemala se cuenta con una gran cantidad de recursos hidrológicos para desarrollar plantas de este tipo. Las hidroeléctricas se basan en el uso de un caudal de agua. Este caudal, al descender una cierta altura dentro de un conducto, mueve una turbina que, a su vez impulsa un generador eléctrico.

La conducción del agua del embalse hacia la caída y a través de ella es uno de los aspectos más importantes para el diseño de una hidroeléctrica. La forma más común de conducir el agua es a través de tuberías. El diseño de éstas se debe llevar a cabo detenidamente y considerando todos los aspectos necesarios para que la tubería resulte económica. Además, la tubería debe cumplir con todos los requisitos necesarios para alcanzar su funcionamiento óptimo. En el presente trabajo se detalla el proceso de diseño y selección de la tubería, así como los aspectos importantes que se deben tomar en cuenta durante su montaje e instalación.

Durante el diseño de la tubería de acero se siguió una serie de pasos determinados para facilitar la obtención de los diámetros y espesores óptimos. Estos valores se modificaron conforme a las características del proyecto. Al espesor de la pared de la tubería se le agregó un espesor adicional, debido a las características del agua que lleva el río; además, se protegió con recubrimientos especiales contra la corrosión. Aspectos como el mencionado anteriormente se detallarán en el presente trabajo.

II. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO

El proyecto hidroeléctrico al cual se refiere el presente trabajo se encuentra situado en San Antonio las Flores, municipio de Chinautla, departamento de Guatemala. Se localiza a sólo 20 km de la ciudad capital.

El proyecto tiene por objeto la generación de 20 Mw mediante el aprovechamiento de las aguas del Río Las Vacas. El río colecta y evacua gran parte de los drenajes de la ciudad capital, por lo que su grado de contaminación es muy alto. El proyecto ayudará, además, a eliminar gran parte de los desechos sólidos y contaminantes que fluyen por el río y que luego desembocan en el río Motagua.

El proyecto hidroeléctrico se diseñó como una planta de regulación diaria o *peaking plant*, la cual permite almacenar o embalsar grandes cantidades de agua en una presa, durante las horas de bajo consumo eléctrico, para luego utilizarlas en las horas de mayor demanda de energía eléctrica.

La presa, que se encuentra en construcción, es de tipo derivación de concreto de aproximadamente 17 metros de alto con una longitud de 130 metros; funciona por gravedad y es de tipo vertedero. La presa está asentada sobre un manto de rocas que le sirven como anclaje. La cresta del rebalse está situada en la cota 502. La presa permitirá un almacenaje dinámico de 211,000 m³. Ésta fue ubicada en el sitio más alto y más angosto de acuerdo con la topografía y se trató de utilizar los afluentes más importantes.

La presa está dividida en dos partes. La primera parte se sitúa en la ribera izquierda del río y servirá como vertedero cuando ocurran las crecientes del río. El vertedero de la presa tiene una capacidad de descarga de más de 400 m³/s y tendrá una longitud de 76 metros. La forma y el trazo de esta parte de la presa es la de un cimacio¹ de caída libre. En la parte superior, el cimacio se adapta a la trayectoria natural del agua para que cuando ésta rebalse, siga un flujo laminar o uniforme hasta llegar a los disipadores de energía. En este punto el agua pierde su velocidad al chocar contra ellos y continúa por el cauce natural del río.

¹ Forma curva que se adopta en la parte superior del vertedero o rebalse de la presa.

La segunda parte de la presa se encuentra situada en la ribera derecha. Esta parte se construyó primero, debido a que allí se halla la antecámara que da inicio al túnel de aducción². En este punto se encuentra situada una compuerta plana que corre sobre rodos. Se opera mediante un cilindro hidráulico, que la abre o la cierra para vaciar o llenar el túnel. En la margen derecha también se encuentran ubicadas dos compuertas radiales, operadas mediante dos cilindros hidráulicos cada una. La compuerta radial principal se encuentra colocada en el fondo de la presa, en la entrada de un canal de desfogue³, con dimensiones de 5 m de ancho y 4.5 m de alto. Su función es de servir de compuerta de desfogue, por donde se desvía el cauce del río, mientras se construye el resto de la margen izquierda de la presa. La compuerta radial secundaria sirve para limpieza. En la sección derecha se encuentran el desviador de basura y las rejas, que son dispositivos mecánicos utilizados para desviar y recoger la basura contenida en el río. Esto es necesario para evitar que la basura y cualquier tipo de objeto lleguen a la tubería de alta presión, y eventualmente dañen el equipo electromecánico.

En la parte superior de la presa o loza de la margen derecha se instaló un cuarto de control para operar todos estos dispositivos. Desde este punto se controlará la unidad hidráulica, el múltiple de salida (*manifold*), con las válvulas de control y una planta eléctrica de emergencia.

Debido a que la planta será de regulación diaria, no se requerirá de un desarenador⁴, ya que la presa misma actuará como tal. En la presa se encontrará situada permanentemente una draga que removerá los sedimentos acumulados en el fondo de ésta.

El túnel de aducción tiene una longitud de 4,459 metros; inicia en la presa y termina al principio de la tubería de alta presión. La ventaja del túnel es tener menos pérdidas por fricción, por ser un trazo en línea recta entre la presa y el punto de transición con la tubería de alta presión.

Debido a las características de este proyecto se utilizará tubería de acero, con diámetros de 96" a 76". La tubería se origina en una chimenea de equilibrio que se ubica

² Conducción.

³ El canal de desfogue cumple la función de liberar al agua a través de él.

⁴ Dispositivo que sirve para que la velocidad del agua se reduzca y se puedan sedimentar las partículas de arena y otros sólidos.

en la salida del túnel y va enterrada, por toda su trayectoria, hasta llegar a la casa de máquinas. La tubería va fijada con anclajes de concreto en cada cambio de dirección. Se optó por este tipo de tubería debido a que los fabricantes de tubería de fibra de vidrio no proveen los espesores necesarios para las presiones nominales necesarias.

La casa de máquinas se construirá en un área donde existe espacio amplio para la construcción y protección natural contra las crecientes del río. La montaña posterior se protegió con bermas⁵ revestidas de electromalla y concreto lanzado. El diseño de la casa de máquinas que se encuentra situada en la cota 212.50 es de tipo convencional. Albergará dos turbinas Pelton, de tres inyectores y 14,070 HP (10,492kW) de potencia cada una, así como el resto del equipo electromecánico. En el futuro se planea instalar otra unidad, con dos turbinas de la misma potencia para producir 40 Mw.

La línea de transmisión de 69,000V hacia Ciudad Quetzal tendrá una longitud de 18.5 Km. Adicionalmente se instalará una línea de 13,800V de 8,500 m de longitud, que va desde la casa de máquinas hasta la presa.

III. IMPORTANCIA DE LA TUBERÍA DE ALTA PRESIÓN

La tubería de alta presión es de suma importancia para el proyecto hidroeléctrico por múltiples razones. Su función principal es conducir el agua embalsada en la presa hasta la casa de máquinas, donde se encuentra situado el equipo electromecánico que aprovecha la caída de agua. Allí la tubería se divide en dos ramales por medio de una bifurcación; su diámetro se reduce a 42”.

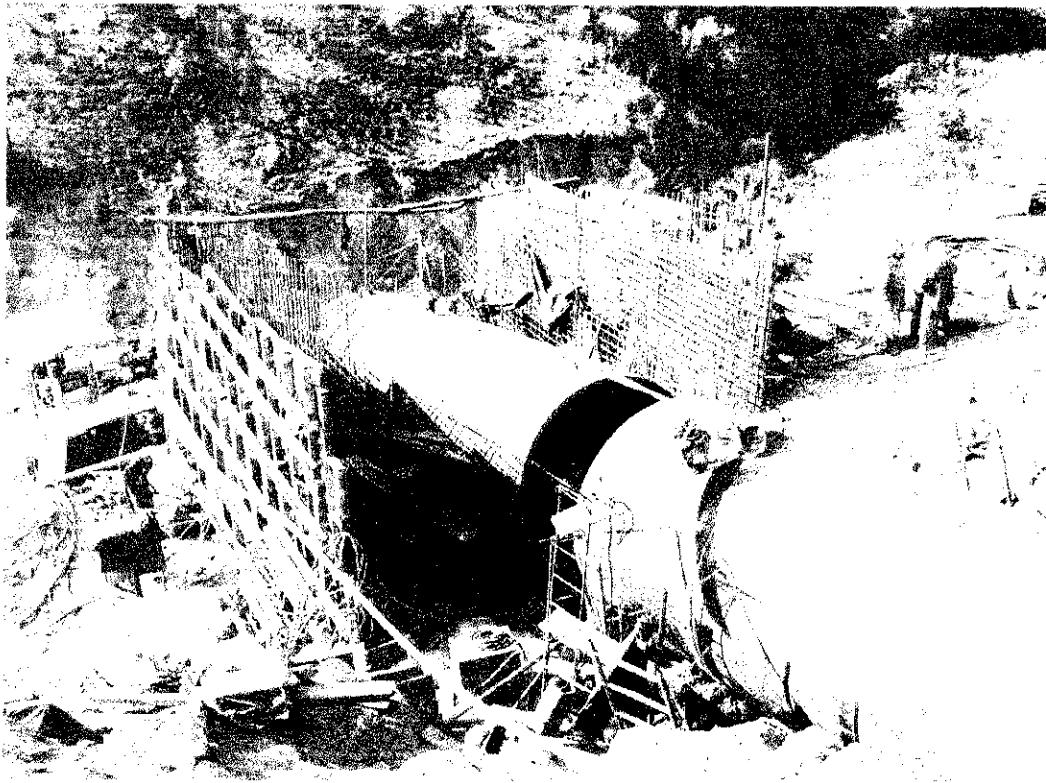


Imagen No. 1: Instalación de tubería de alta presión.

Esta división permitirá que el agua mueva las dos turbinas tipo Pelton, las cuales a su vez, accionan el generador que producirá los 20 Mw durante las horas pico. Luego que el agua se desvía en la bifurcación, se le conduce a través de unos ramales que la guían a cada uno de los tres inyectores. De los inyectores, el agua sale a presión y golpea

⁵ Cortes horizontales en el terreno que forman una especie de grada de protección en la montaña para evitar derrumbes.

los cangilones⁶ de la turbina Pelton (rodete) que se encuentra dentro de su carcasa de metal. El agua que mueve la turbina fluye por un canal de desfogue que se halla situado debajo de la carcasa, para que regrese al cauce del río y continúe su trayecto.

En el proyecto, el agua proveniente del Río Las Vacas es almacenada en la presa; luego se le conduce por un túnel de 4,459 metros de longitud, hasta conectarse con la tubería de alta presión de 96” de diámetro, a una altura aproximada de 300 metros sobre la casa de máquinas. La tubería cuenta con cuatro secciones con diámetros, espesores y longitudes diferentes.

La tubería inicia con un diámetro de 96” en una chimenea de equilibrio⁷ ubicada en la salida del túnel y llega enterrada hasta la casa de máquinas con una sección de 76” de diámetro. Esta tubería va fijada con anclajes de concreto en cada codo o cambio de dirección, para evitar movimientos longitudinales causados por el peso de la tubería y el agua. Los tramos de la tubería, empezando por la salida del túnel hasta la casa de máquinas, se calcularon y, finalmente, se optó por las siguientes características:

Tabla 1: Características generales de la tubería:

Diámetro int. (plg)	Espesor (plg)	Longitud Secciones (m)	Longitud Total (m)	Peso Secciones (Ton)
96	0.4375	6	190	4.02
90	0.5625	4.5	145	3.63
84	0.6875	4	88	3.70
76	0.9375	3.5	228	4.02

Como se mencionó anteriormente, el agua se conduce dentro de la tubería a través de la caída, hasta llegar a la casa de máquinas donde la tubería se divide en dos partes para que el agua pueda mover las dos turbinas tipo Pelton.

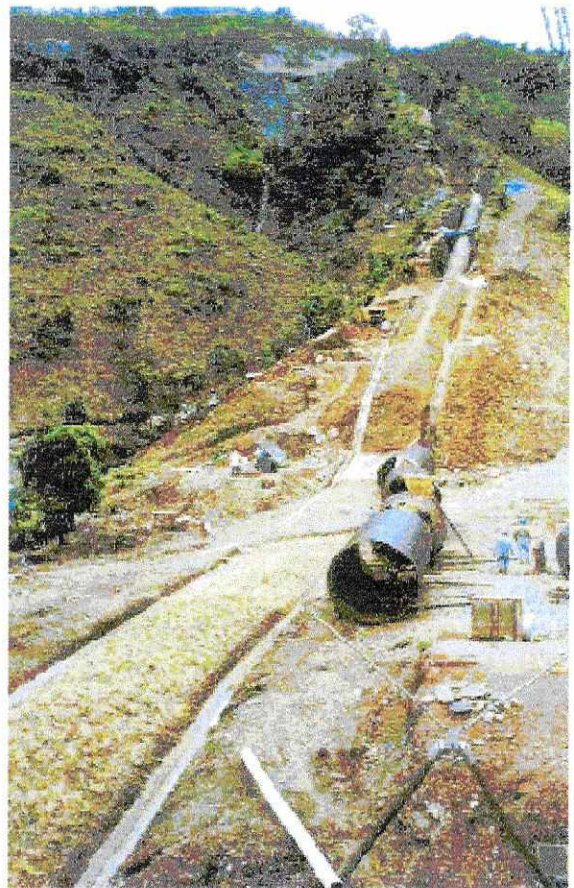
⁶ Especie de conchas sobre el eje del rodete. El agua los golpea para que se mueva la turbina.

⁷ Tanque con forma de chimenea, que se encuentra situado al final del túnel. Sirve para absorber golpes de ariete positivos, formados por el cierre súbito de las válvulas de las turbinas.

Debido a que la tubería está expuesta a la acción del medio ambiente, es necesario que sea tratada y protegida antes de su instalación. Este proceso de protección es muy importante y se detallará más adelante.

Entre las ventajas de una tubería de alta presión enterrada, se encuentran las siguientes:

- No está expuesta a golpes que la perforen o deformen.
- No sufrirá daños causados por la naturaleza, como derrumbes y deslaves.
- La vegetación volverá a crecer sobre la tubería, de manera que no interferirá con la fauna y flora (*ver imágenes Nos. 2 y 3*).
- No habrá peligro de accidentes humanos, ya que no podrá utilizarse como balneario, como en el caso de un canal abierto.



Imágenes No. 2 y 3: Siembra de grama sobre la trinchera de la tubería de alta presión.

IV. PROCESO DE SELECCIÓN DE LA TUBERÍA

Debido a las características de este proyecto se utilizará tubería de acero ASTM A 139 grado E. El proceso de selección de la tubería se tiene que llevar a cabo detenidamente, para escoger la más económica y que cumpla con los requisitos del proyecto. Para este proceso se deben considerar la presión del agua y el caudal, que, entre otros factores, determinarán las características de la tubería. Es necesario tener en cuenta el diámetro, ya que cuanto más grande sea éste, menor será la pérdida por fricción; esta característica influye directamente en la cantidad de energía anual que se podrá generar pero, por otra parte, mayor será el peso y el costo de la tubería.

Para seleccionar los diámetros, los espesores y las longitudes de tubería más aptos para el proyecto, fue necesario hacer un cálculo detallado de todos los aspectos que influyen; se presentaron varias opciones. Como ya se mencionó, el tipo de acero es ASTM A 139 grado E, con las siguientes características:

Tabla 2: Características del acero según la AWWA⁸ C200.

Punto de Cedencia Mínimo, <i>Psi</i>	Resistencia última a la Tensión, <i>Psi</i>	1/3 Resistencia a la tensión, <i>Psi</i>	2/3 Resistencia a la cedencia, <i>Psi</i>	Esfuerzo de diseño, <i>Psi</i>
52,000	66,000	22,000	34,666.67	22,000

(ref. 3)

Un esfuerzo de diseño igual al 50% del punto de cedencia mínimo es usualmente aceptado. Sin embargo, para el diseño de la tubería de alta presión en el presente proyecto hidroeléctrico, se optó por escoger entre el valor menor de 1/3 resistencia a la tensión o 2/3 resistencia a la cedencia mostrados en la tabla, siendo menor el primero. Esto se hizo con base en los criterios de diseño adoptados por la Oficina de Reclamos (Bureau of Reclamation) de los Estados Unidos. Con este valor de diseño se obtiene un factor de seguridad mayor, debido a que el 50% del punto de cedencia mínimo es 26,000 psi, advirtiendo que éste es diseño conservador.

(ref. 3)

⁸ Siglas en ingles para la American Water Works Association.

El cálculo detallado que se llevó a cabo para seleccionar los diámetros y espesores de la tubería de alta presión, así como los datos que se utilizaron, se pueden observar en el Anexo No.1. A continuación se presenta un resumen de las características finales de la tubería de alta presión:

Tabla No. 3: Características tubería de alta presión.

Diámetro int. (plg)	76	84	90	96	
Espesor (plg)	0.9375	0.6875	0.5625	0.4375	TOTALES
Cabeza máx. (pies)	1011.42	671.07	512.45	373.66	
Cabeza máx. (m)	308.27	204.53	156.19	113.89	
Cabeza máx. (Psi)	438.49	290.94	222.17	162.00	
Longitud (m)	227.93	88.36	145.30	189.52	651.110
Pérdida (m)	0.592	0.138	0.159	0.149	1.038
Peso (lb)	569,607.96	178,977.07	258,000.38	279,186.25	1,285,771.66
Pérdida KWh (año)	679,299.93	157,917.70	182,671.14	171,556.12	1,191,444.89
Costo Tubería	\$ 284,803.98	\$ 89,488.53	\$ 129,000.19	\$ 139,593.13	\$ 642,885.83
Costo Energía Perdida	\$ 37,361.50	\$ 8,685.47	\$ 10,046.91	\$ 9,435.59	\$ 65,529.47

La tubería de 96" de diámetro va desde 82 m adentro del túnel de conducción (elevación 484) hasta la elevación 414.05. La cabeza real se cuenta desde el nivel de rebalse de la presa (elevación 502) hasta el final de cada tramo. La sección de 90" va de la elevación 414.05 hasta la elevación 370.37. El tramo de 84" es el de menor longitud y va desde la elevación 370.37 hasta la 323.89. Por último se tiene la sección de 76" de diámetro, que va desde la elevación 323.89 hasta el último codo (elevación 215.4) en la casa de máquinas.

En los resultados que se han mostrado se puede observar que la tubería tiene varios diámetros con espesores distintos, y se debe a que se optimizó el diseño mediante el cálculo de varias opciones distintas de tubería. Para iniciar el cálculo se determinó que la velocidad máxima permisible en tuberías de acero es de 3.66 m/s (12 pies/s), para la máxima generación en casa de máquinas (ref. 7). Con el caudal de diseño se determinó el diámetro

mínimo que se puede utilizar para que la velocidad máxima no sea excedida; esto se calculó mediante la siguiente fórmula (ref 17):

$$D_{min} = (4 \times Q / v \times \pi)^{1/2},$$

D_{min} = diámetro mínimo (m)

Q = caudal de diseño (m^3/s)

v = velocidad máxima permisible (m/s)

Sabiendo éste diámetro, se tiene un punto de partida y se sabe alrededor de qué valores se tiene que diseñar el último trayecto de la tubería de alta presión, es decir, en la casa de máquinas. Para tener una idea acerca de cuál es el rango de diámetros más económicos, se hace una gráfica en la que se marcan, para diferentes diámetros y longitudes iguales: los costos directos de la tubería (acero), el costo de la energía anual que se deja de producir debido a las pérdidas por fricción en la tubería y, por último, la suma de ambos costos (ver gráfica en Anexo No.2). El punto más bajo de la curva de la suma de los dos costos nos indica el diámetro más económico. Este punto nos señala el valor óptimo pero, debido a las diferentes características físicas de cada proyecto, se debe hacer un juego de opciones alrededor de estos valores para determinar cuál presenta los mayores beneficios.

La velocidad máxima dentro de una tubería también se puede calcular mediante el uso de la siguiente fórmula (ref. 17):

$$v = 48 / \rho^{0.33},$$

v = velocidad máxima del agua (pies/seg)

ρ = densidad del fluido (lb/ptc^3)

= 62.4 lb/ptc^3 para agua

La determinación del diámetro mínimo para tuberías que conducen algún fluido también se puede llevar a cabo mediante el uso de la siguiente fórmula (ref. 17):

$$D = 0.73 ((Q) / (SG))^{0.5} / \rho^{0.33},$$

D = Diámetro interno mínimo de la tubería (plg)

Q = caudal (gpm)
 SG = gravedad específica del fluido
 = 1 para el agua (adimensional)
 ρ = densidad del fluido (lb/pie³)
 = 62.4 lb/pie³ para agua.

Con los datos necesarios se procedió a realizar cálculos con varios diámetros y espesores distintos a lo largo del trayecto, tratando de llevar los valores de cabeza máxima y velocidad lo más cerca del límite de seguridad permisible, optimizando el proceso de esta forma. Debido a que se utilizaron valores conservadores en el cálculo, el diseño es seguro (ver cálculos en anexo No.1).

Para la proteger la tubería de la corrosión es preferible diseñar el espesor de ella con base en las cargas actuantes y, luego, seleccionar el método de protección adecuado (anticorrosivo, pintura, protección catódica, etc.) (ref. 3). Sin embargo, tomando en cuenta que las aguas por utilizar son negras y se encuentran muy contaminadas, se agregó un espesor de 1/16 de plg. adicional para protección contra la corrosión. Además, se llevó a cabo un proceso detenido para determinar los métodos de protección adicionales. Este aspecto se detallará posteriormente.

Como ya se mencionó, en el presente proyecto se diseñó el espesor de la tubería con base en las cargas de presión actuantes y en la cabeza máxima que cada sección pudiera resistir. Esto se llevó a cabo tomando en cuenta las propiedades del acero que se mencionaron anteriormente y, las medidas de seguridad respectivas. El caudal de diseño fue de 8.4 m³/s, con el cual se pueden generar los 20 Mw deseados, durante las cuatro horas pico (18 – 22 hrs).

Para el manejo seguro de la tubería se debe considerar un espesor de pared mínimo. Este espesor mínimo se calculó con arreglo a la siguiente fórmula:

$$t_{min} = D + 20 / 400 ,$$

t_{min} = espesor tubería (plg)

D diámetro (plg)

Para los cálculos de la cabeza máxima se utilizó un factor de seguridad de 0.85, que considera el golpe de ariete que ocurre cuando se cierra la válvula esférica ubicada antes de los inyectores de la turbina. También se incluyó otro factor de 0.95, que se basa en la soldadura entre cada sección de tubería, *joint efficiency*. Para calcular la cabeza máxima se utilizó la fórmula de "*Thin cylindrical shells under internal water pressure*" (ref.7):

$$H_{max} = (t \times 0.95 \times 0.85 \times 1/3 R.Tensión) / (2.6 \times D_{int}) ,$$

t espesor tubería (pulg.)

$1/3$ resistencia a la tensión (psi)

D_{int} diámetro interno de la sección (pies)

H_{max} – cabeza máxima (pies de agua)

0.95 – factor de seguridad por uniones soldadas

0.85 – factor de seguridad por golpe ariete

Para los cálculos de la pérdida de cabeza por fricción, el valor de la rugosidad relativa " ϵ " que se utilizó fue de 0.15 mm (4.92E-4 pies) para tuberías de acero (ref.16). Para calcular las pérdidas por fricción se utilizó la fórmula de *Darcy-Weisbach* y otros factores que se describirán en el capítulo de pérdidas por fricción.

V. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LA TUBERÍA

La tubería se compró a una empresa mexicana especializada en la fabricación de tuberías de grandes diámetros y espesores. En la fábrica toda la tubería fue radiografiada para comprobar que no existieran defectos internos, como fisuras o porosidades. El proceso de radiografiado fue presentado en un video. Dependiendo de su diámetro y de su espesor, la tubería fue cortada en la fábrica, en secciones de diferentes longitudes. Esto se llevo a cabo para poder controlar el peso durante el transporte y manejo de la tubería:

Tabla 4: Peso secciones

Diámetro int. (plg)	Longitud Secciones (m)	Peso Secciones (Ton)
96	6	4.02
90	4.5	3.63
84	4	3.70
76	3.5	4.02

Los extremos de cada sección quedaron con bisel para facilitar la soldadura en el campo al momento de unirlos.

Algunas de las más importantes características del material para el diseño fueron mencionadas en el capítulo anterior. Éstas se utilizaron para la elección de los diámetros y espesores.

La elección del acero como el material de la tubería se debe principalmente a que éste es un material que tiene una alta resistencia a la carga originada por la presión del agua; además, las tuberías de este material se pueden obtener en el mercado, en una gran variedad de diámetros y grosores.

VI. PÉRDIDAS EN LA TUBERÍA DE ALTA PRESIÓN

A. Pérdidas por entrada

En este caso, el agua tiene que fluir desde el embalse (en donde su velocidad es despreciable) hacia el túnel de conducción, donde el flujo se debe acelerar a la velocidad del conducto. La facilidad con la que se realiza esta aceleración del flujo determina la cantidad de pérdida que existirá. La pérdida de energía se asocia con la formación de una vena contracta.

Si la entrada contiene bordes bien redondeados no se forma la vena contracta, y la pérdida de energía será mínima. Las pérdidas en la energía se generan cuando la corriente de flujo se desacelera para llenar la tubería o conducto. Para una entrada bien redondeada, el coeficiente de pérdida se puede despreciar. La fórmula que hay que utilizar para este tipo de pérdida es:

$$K_e = (1/C^2 - 1).$$

El valor del coeficiente C se puede observar en la tabla indicada de la referencia 1.

El valor de la pérdida por entrada es de 0.0387 m. Este valor es aceptable, ya que es muy bajo. Esto se debe a que la entrada fue diseñada tomando en cuenta todos los aspectos que se mencionaron anteriormente y, principalmente, a que la velocidad en esta sección es muy baja.

Para observar el cálculo detallado de todas las pérdidas en la tubería se puede consultar el Anexo No.2.

B. Pérdidas por codos

En las tuberías de alta presión y de grandes diámetros, como la estudiada, es necesario fabricar los codos, ya que éstos no se encuentran comercialmente hechos. La resistencia al flujo de un codo depende de la proporción del radio r del codo con el diámetro D del conducto y el ángulo a través del cual el codo gira.

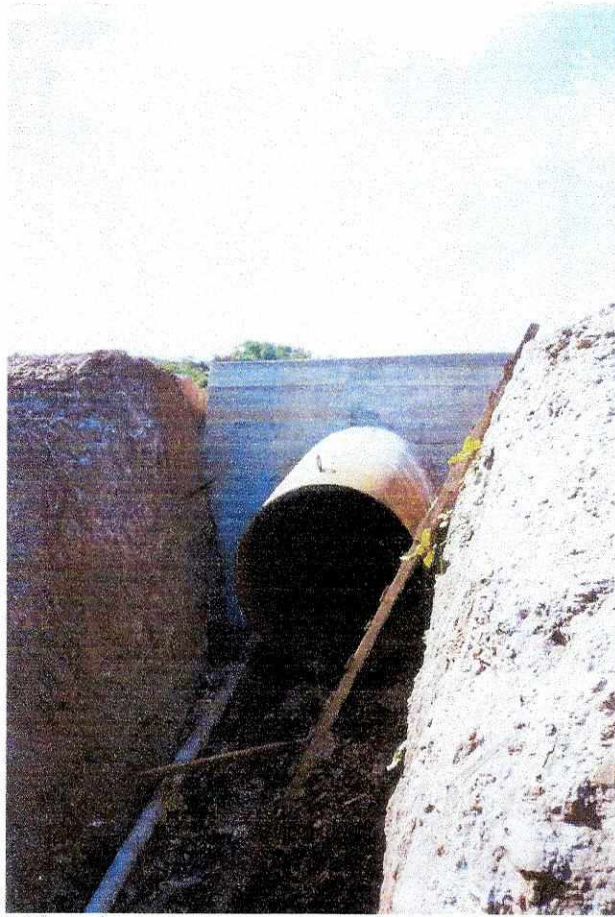


Imagen No. 4: Codo situado en la est. 364



Imagen No. 5: Codo con anclaje ubicado en la est. 519.

Los codos de la tubería de alta presión tienen un radio de 3 diámetros, es decir, $r/D = 3$, y la fórmula que se aplica es la siguiente:

$$H_b = K_{bc} x (V^2/2g)$$

Los ángulos se toman desde la salida del túnel hasta la casa de máquinas. La pérdida total en los codos es de 0.2345 m y su cálculo se puede observar en el Anexo No.2, al final del trabajo.

C. Pérdidas por contracciones en la tubería

Como la tubería se diseñó con varios diámetros, por las razones que se discutieron anteriormente, es necesario que durante su trayectoria ocurran contracciones, es decir, cambios repentinos en los diámetros. Para que la pérdida sea menor, se debe tratar que la contracción ocurra lo más gradualmente posible. Las contracciones graduales tienen como inconveniente que su costo es mayor, cuanto más graduales se hacen. Las pérdidas de energía en contracciones o en expansiones en las tuberías se deben considerar en relación con el incremento o decremento de la cabeza de velocidad. Estas pérdidas varían de acuerdo con la cantidad de cambio en el área y el largo de la transición. La pérdida de energía por una contracción se puede calcular a partir de la fórmula:

$$H_c = K_c x (V^2/2g)$$

La turbulencia que provoca la contracción y posterior dilatación ocasionan la pérdida de energía. La pérdida total se debe a las tres contracciones que se encuentran a lo largo de todo el trayecto de la tubería y es de 0.0395 m.

D. Pérdidas por longitud

Como se mencionó en la sección de selección de la tubería, para los cálculos de la pérdida de cabeza por fricción en la tubería, el valor de la rugosidad relativa “ ϵ ” que se utilizó fue de 0.15 mm o $1.5E-4$ m ($4.92E-4$ pies), este valor es para tuberías de acero (ref.16). Para calcular la pérdida de cabeza por fricción se utilizó la fórmula de *Darcy-Weisbach*:

$$h = (f \times L \times v^2) / (D \times 2g),$$

h = pérdida de cabeza por fricción (m)

donde f es el factor de fricción que se obtiene del diagrama de Moody, que es aproximado por la ecuación:

$$f = 0.25 / (\log((1/3.7(D/\epsilon)) + (5.74/N_{re}^{0.9})))^2,$$

El número de Reynolds, N_{re} es:

$$N_{re} = v \times D \times \rho / \mu,$$

v = velocidad (m/seg)

D = diámetro (m)

ϵ = rugosidad relativa (m)

ρ = densidad (kg/m³)

μ = viscosidad (Nts/m²).

L = Longitud tubería (m)

g = valor de la gravedad (m/seg²)

D = diámetro interno tubería (m)

Con estas fórmulas se realizaron los cálculos que se pueden observar en el Anexo No. 2, que dan una pérdida total de 1.038 m.

E. Pérdidas adicionales

1. Pérdidas en las rejillas y desviador de basura

Aunque las rejillas de limpieza y el desviador de basura no se encuentran directamente en el área de la tubería (están en el área de la presa), estas estructuras contribuyen a la pérdida por fricción total del sistema, por lo que hay que considerarlas. Además, es en este lugar donde se origina el flujo de agua de la presa hacia el túnel, y luego a la tubería.

La pérdida en las rejas y en el desviador se debe a que estas estructuras obstruyen el flujo natural del agua cuando se encuentran libres; o más aun, cuando tienen algún porcentaje de basura acumulado. La fórmula para la pérdida por fricción es:

$$Hr = Kr \times (V^2/2g) ,$$

donde el factor K_r se obtiene de:

$$Kr = 1.45 - (0.45R) - (R^2),$$

y en ésta última:

$$R = An / Ab,$$

Ab : área entera agujero (área bruta)

An : área neta de las rejas

La pérdida total en esta sección fue de 0.123 m y los cálculos se pueden observar en el Anexo No. 2

2. Pérdidas en el túnel

Las pérdidas por longitud en el túnel se tomaron en cuenta para poder establecer un total de ellas. La pérdida por longitud en el túnel se calculó de manera similar a la de la tubería. La forma de cálculo es similar y sólo varía la rugosidad relativa, ya que, en el caso del túnel, el material de revestimiento es concreto con un valor de “ ϵ ” de 0.6 mm. Los últimos 82.4 metros del túnel tienen una tubería de acero de 96” de diámetro, por lo que este cálculo se llevó a cabo de la misma manera que el de la tubería. Debido a que se excavó el túnel en ciertas partes con una máquina perforadora tipo “TBM”, y en otras partes de forma manual, sus secciones fueron distintas. En la parte donde se utilizó la TBM, la sección es circular; en la parte donde se perforó manualmente, la sección tiene forma de herradura. La pérdida total en el túnel es de 1.684 m.

Los cálculos para las pérdidas por fricción en el túnel, así como las fórmulas empleadas, se pueden observar en el Anexo No.3.

La pérdida total durante toda la trayectoria del agua es de 3.158 m, y ésta es la suma de las pérdidas en cada sección; es decir:

$$H_{tot} = Hl + He + Hr + Hb + Hc + Ht.$$

donde:

- H_{tot} : Pérdida total.
- Hl : Pérdida por longitud.
- He : Pérdida por entrada.
- Hr : Pérdida en rejillas.
- Hb : Pérdida en codos.
- Hc : Pérdida en contracciones.
- Ht : Pérdida en túnel.

VII. TRANSPORTE DE LA TUBERÍA DE ALTA PRESIÓN

Una gran ventaja al diseñar una tubería de diámetros distintos es que se puede transportar con mayor facilidad. Las secciones de tubería con diámetro menor se pueden colocar dentro de las secciones con mayor diámetro; a la tubería transportada por este método se le conoce como “anidada” o *nested*. Con ese método se logra un ahorro en el costo del transporte, ya que la cantidad de bultos se reduce considerablemente y se economiza tiempo, ya que el manejo de la tubería es más sencillo. Para el proyecto en estudio, la tubería de 76” de diámetro fue colocada dentro de la tubería de 90”. De esta forma fue transportada la tubería desde la fábrica ubicada en Monterrey, México, hasta el puerto de embarque. Luego, se embarcó la tubería con destino a Puerto Quetzal, Guatemala. Es importante que las secciones de la tubería sean sostenidas por medio de cuñas de madera, para que éstas no se muevan y se golpeen durante el transporte (ref. 3). Se descargó la tubería del barco y se montó en plataformas que la fueron transportando hacia el proyecto. Una vez allí, se descargó la tubería en patios destinados para su almacenamiento y tratamiento.

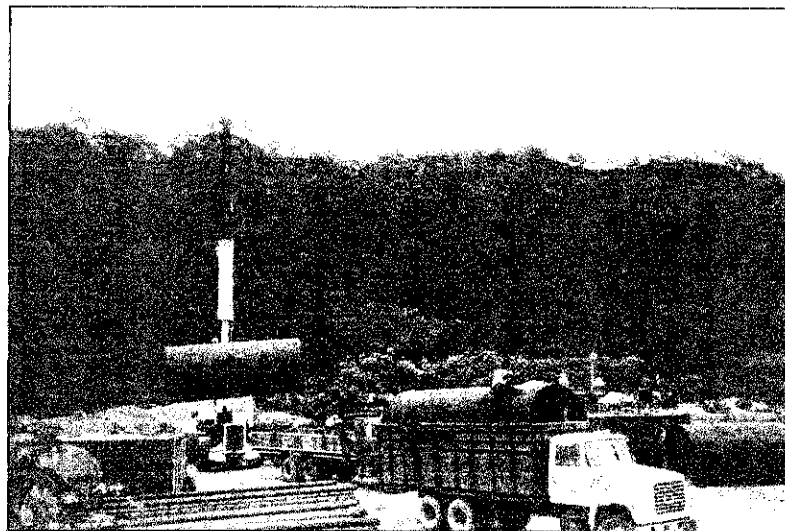


Imagen No. 6: Transporte de tubería dentro del proyecto.

Luego de separar las secciones de la tubería, se procedió a aplicarles el tratamiento adecuado que se describirá más adelante. Las secciones se limpiaron con un

chorro de arena a presión o *sandblast* y se pintaron, luego se procedió a movilizarlas en camiones hasta otro patio de almacenamiento cercano al cable grúa.

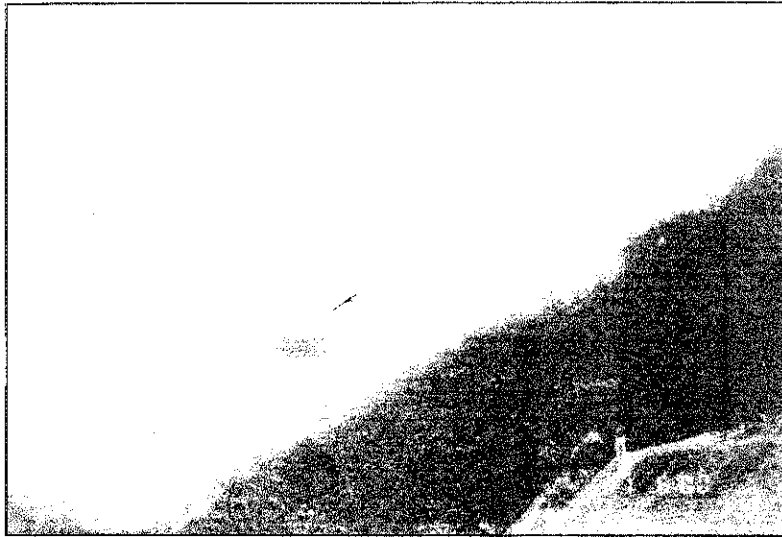


Imagen No. 7: Movilización de secciones de tubería con el cable grúa.

El cable grúa es una especie de teleférico que corre a lo largo de todo el perfil de la tubería de alta presión. Este dispositivo está compuesto por varios cables, elevados por medio de torres metálicas sujetas al terreno mediante uniones móviles o pivotantes. Estas torres están ubicadas en diferentes estacionamientos, que se muestran en el plano del perfil de la tubería. El cable grúa es operado mediante malacates o *winches* que se encuentran ubicados, junto con sus motores, en casetas de control. Los operadores pueden mover las secciones de tubería o los diferentes objetos que se cuelgan al carro o parte móvil, a lo largo de todo el perfil de la tubería. También es posible mover el carro verticalmente, para cargar y descargar objetos en cualquier lugar. De esta forma se puede movilizar la tubería con mayor facilidad y velocidad sin importar la topografía del terreno. Es de suma importancia que la tubería se sostenga con lonas especiales o *slings*, al momento de transportarla en el cable grúa, ya que, si se sujeta con cadenas o cables, se dañaría junto con su recubrimiento. También hay que tener en mente que, bajo ninguna circunstancia, la tubería de alta presión debe rodarse o arrastrarse sobre el suelo.

VIII. PREPARACIÓN DEL TERRENO

La preparación se inició con una limpieza del terreno en donde se instalaría la tubería. Luego se realizó un estudio topográfico de todo el perfil de la tubería, para iniciar los planos y así comenzar a realizar las excavaciones.

La trinchera o zanja donde va enterrada la tubería tiene una forma de trapecoide, como se muestra en el detalle típico de excavación en los planos de la tubería. Los lados tienen una pendiente de 3 a 1, y el fondo tiene un ancho que depende del diámetro de la sección de la tubería. Por ejemplo, en el tramo con mayor longitud y menor diámetro, es decir, la sección de 76" (1.93 m), el fondo de la trinchera es de 2.46 m. Con ello se deja un espacio aproximado de 0.50 m. entre las paredes de la trinchera y la pared externa de la tubería; éste es un espacio diseñado para que se puedan realizar los trabajos de soldadura en las juntas, así como recubrimientos con pintura y chapopote, y los rellenos con material arenoso. En el fondo de la trinchera se colocó una tubería de PVC de 6" de diámetro para drenaje. A cada cierta distancia se dejaron salidas para que el agua de drenaje fluyera de la trinchera. A las paredes de la trinchera se les aplicó una capa de recubrimiento de cemento, lanzado a presión por medio de un compresor. Esto se realizó para evitar la ocurrencia de pequeños derrumbes en las paredes, durante la instalación.



Imagen No. 8: Vista aérea de la trinchera.

Se dejó una distancia de 0.50 m entre el fondo de la trinchera y la parte donde descansa la tubería, para poder soldar la parte inferior de las uniones. Luego se relleno con material arenoso y se compactó.

Se debe evitar que existan rocas y objetos con ángulos agudos que puedan dañar la tubería y su recubrimiento; además, se debe compactar de una misma forma todo el fondo para que toda la tubería descansa uniformemente. De esta manera no existirán cargas concentradas en pequeñas áreas de la tubería, que le causen alguna deformación (ref.3). También es recomendable que se deje una capa de material arenoso sin compactar, o suelto, de aproximadamente 2" de espesor, luego de la capa de material arenoso compactado para que el fondo de la tubería pueda descansar bajo su forma curva (ref. 2,3).

El material de relleno posterior debe estar libre de piedras y objetos que dañen la tubería, y debe de estar de acuerdo con los parámetros que se describirán en el próximo capítulo. Si existen piedras y objetos grandes, deben de estar separados a 6" como mínimo, de la pared de la tubería. El espesor mínimo de relleno entre la parte superior de la tubería y el exterior debe de ser de 12" para tuberías con diámetros mayores a 24" (ref. 3) sin embargo, en estos espesores no se ha considerado el paso de vehículos o si existirán cargas pesadas sobre la tubería.

En el último tramo de la tubería se realizó un movimiento de tierra para protección de la montaña. Este movimiento consistió en construir 10 bermas de protección como se muestra en las fotografías. El movimiento comenzó después de la estación 572, donde se encuentra ubicado el penúltimo anclaje o codo. Las bermas se protegieron mediante un proceso de *soil nailing* o anclajes a la pared de la montaña. Este procedimiento consiste en hacer perforaciones en la pared de la montaña y luego insertar varillas de hierro que sirven como anclajes. Toda la superficie de la montaña se cubrió con electromalla sujeta a las varillas de hierro, y luego se cubrió con una capa de concreto lanzado. Las bermas también cuentan con tubería de PVC y cunetas para drenaje. Esta protección es muy importante, ya que la casa de máquinas se encuentra ubicada justo abajo de esta sección de la montaña y tiene que estar protegida contra cualquier tipo de deslave o derrumbe.



Imagen No. 9: Bermas de protección.

Una vez que la trinchera estuvo lista, se procedió a fundir los anclajes de concreto de la tubería. Éstos se encuentran ubicados en cada cambio de dirección o codo. Los anclajes se fundieron con su respectiva sección de codo de tubería adentro.

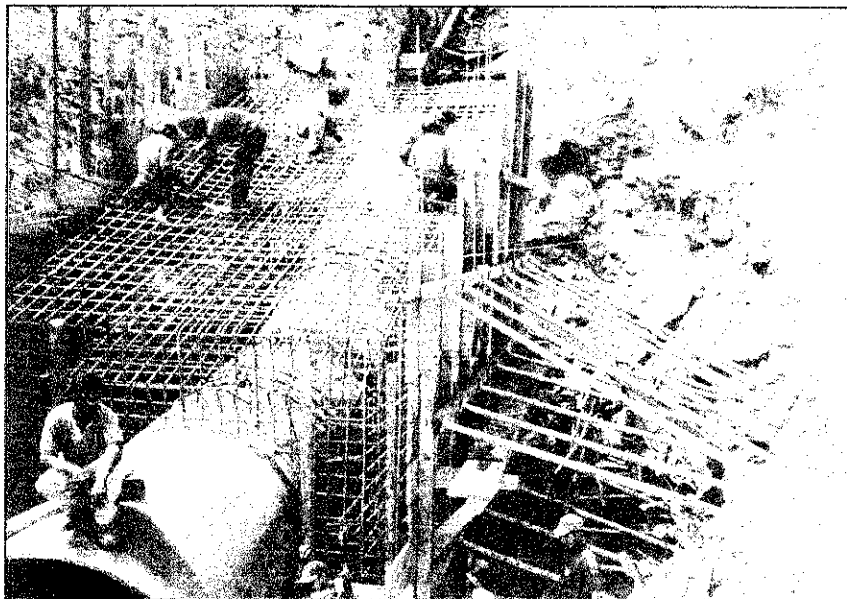


Imagen No. 10: Armado de codo para fundir anclaje.

Estas secciones de codo se fabricaron localmente, en un taller, con secciones de tubería que se les brindó. Estos anclajes son importantes para mantener fija la tubería y evitar movimientos longitudinales.

IX. PROTECCIÓN DE LA TUBERÍA CONTRA LA CORROSIÓN

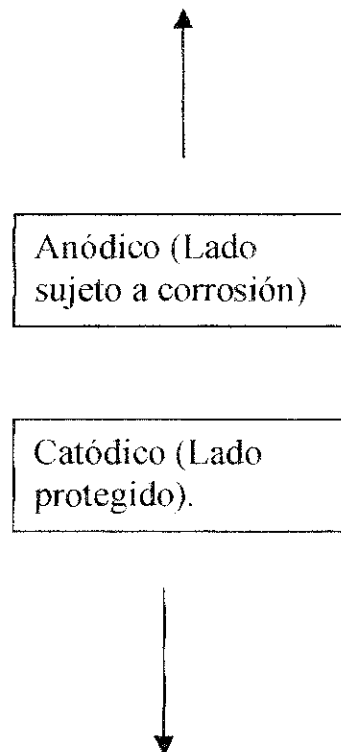
A. Protección catódica

El principio de la corrosión se basa en que todos los materiales expuestos a los elementos tienden a regresar a su estado natural o a su estado más estable en las condiciones prevalecientes.

Cualquier metal que aparezca en la tabla de series galvánicas será atacado o corroído si se le conecta en un circuito con algún otro metal que aparezca debajo de él.

Tabla No. 5: series galvánicas:

Metales
Magnesio y aleaciones de magnesio
Cinc
Aluminio
Cadmio
Hierro o acero
Hierro fundido
Cromo-hierro
Acero inoxidable
Plomo
Latón
Níquel
Bronce
Cobre
Plata
Grafito
Oro
Platino



Por ejemplo, si se conecta cinc con acero, como en el caso de la protección de la tubería, el cinc se corroerá debido a que éste es más anódico y se encuentra más arriba que el acero en la tabla de series galvánicas de los metales. En este caso, el cinc será el ánodo y el acero el cátodo. Al cinc se le llamará el ánodo de sacrificio, ya que se puede decir que éste se va destruyendo para proteger el acero.

Se puede dar el caso que en la tubería de acero existan accesorios de bronce, por lo que éstos servirían como cátodos y la tubería como ánodo de sacrificio, debido a que el acero se encuentra arriba del bronce en la tabla de series galvánicas. Sin embargo, si el área de éstos es pequeña en comparación con la de la tubería, la corrosión será lenta y poco severa (ref. 2 y 3). También es importante evitar que la tubería tenga lugares dañados como rayaduras y filos agudos, ya que éstos sirven como focos para la corrosión.

En el caso de la tubería estudiada, ya se observó que, con electrodos o metales distintos (acero y cinc), existirá una corriente que destruirá el cinc y protegerá el acero. También se puede dar el caso que, con un mismo metal, en este caso el acero de la tubería, se produzca una corriente que cause corrosión. Este fenómeno ocurre por diferencias en el ambiente o electrolito, en este caso la tierra de recubrimiento. Las características de la tierra se deben principalmente a la diferencia en la concentración de oxígeno o en la "aireación" de la tierra, que se da por la inigualdad de la compactación del material de relleno, porosidad distinta, debido a tierras de relleno diferentes y a la restricción del movimiento de la humedad y aire hacia afuera. Es importante que la resistencia al flujo de la corriente eléctrica en la tierra sea alta, como en la arena, para que la corrosión sea lenta. Una tierra con resistencia baja, es decir, que permita el flujo de corriente, como el barro o la arcilla, dará lugar a una corrosión más rápida. (ref. 2 y 3).

Existen tres métodos prácticos para la prevención de la corrosión en una tubería de alta presión enterrada:

1. La tubería puede ser aislada del medio ambiente y de las corrientes eléctricas que causen corrosión, por medio de una capa protectora de pinturas especiales.
2. Se pueden aplicar corrientes eléctricas que actúen en contra de las corrientes asociadas con la corrosión.
3. Se puede crear un ambiente inhibidor para reducir la corrosión.

Existen dos métodos para generar corriente capaz de proveer suficiente protección: el método de ánodos de sacrificio o el método de corriente DC externa. En tuberías previamente recubiertas, como la estudiada, generalmente se utiliza el primer método, en el cual se aplican pequeñas cantidades de energía en diferentes partes de la tubería, por medio de un metal (generalmente cinc o magnesio) que sirve como ánodo de sacrificio, el

cual forma una celda galvánica que crea corriente, en lugar de aplicar corriente DC a todo el tramo de tubería. Para la protección de la tubería se utilizarán placas de acero A36, que luego serán galvanizadas (recubrimiento de cinc). Las 18 placas tienen las siguientes dimensiones: 2½" x 5" x ¾". Estas placas se sueldan a la pared de la tubería, a una distancia determinada. De preferencia, las placas deberán pegarse en la parte inferior de la tubería, que es donde hay mayor humedad. De esta forma se establecerá una corriente como la que se mencionó anteriormente. La corriente fluye del ánodo de cinc hasta la tubería y, de regreso, al ánodo, con lo que se establece un circuito de corriente directa. Mientras ésta fluye, el cinc es destruido y el acero protegido.

El potencial eléctrico creado por la celda causa que la corriente fluya del ánodo a la tubería. Este proceso se utiliza en tierras ligeras o moderadamente corrosivas. Es importante conocer los diferentes tipos de tierra de acuerdo con su acción corrosiva en contra del acero:

Grupo 1- Ligeramente corrosivas

Buenos drenajes y buena aireación. Estas tierras se caracterizan por su color uniforme y baja cantidad de agua. Entre estas podemos encontrar:

1. Arenas o arcillas arenosas.
2. Sedimentos arcillosos ligeros.
3. Arcillas porosas o barro arcilloso.

Grupo 2- Moderadamente corrosivas

Se caracterizan por su color café- amarillento.

1. Arcillas arenosas.
2. Sedimentos arcillosos.
3. Barros arcillosos.

Grupo 3- Muy corrosivas

Tienen malos drenajes y aireación pobre. Su textura es pesada.

1. Barro normal.

Grupo 4- Inusualmente corrosivas

Tienen muy malos drenajes y aireación. Se caracterizan por su alto contenido de agua y su color azul grisáceo. Su permeabilidad es extrema.

1. Estiércol (abono).

2. Tierras pantanosas.
3. Barros.
4. Tierras orgánicas.
5. Adobe.

Con estos conocimientos se puede diseñar un ambiente adecuado alrededor de la tubería, es decir, que no favorezca la corrosión. De preferencia se debe escoger un material de relleno con tierras o arenas del grupo 1. Para determinar la resistencia de la tierra se lleva a cabo un proceso, en el cual se insertan dos barras de 8 pies de largo de cobre u otro metal dentro de la tierra, separadas a una distancia determinada. Como se mencionó anteriormente, para el relleno de la parte del fondo de la trinchera de la tubería se está utilizando una capa de arena o material arenoso compactado, que sirve como base para el tubo; luego se rellena con el mismo material hasta una altura de 25% del diámetro de la tubería, con menor nivel de compactación. El resto de la trinchera se rellena con el material que se excavó de la trinchera. A lo largo de todo el fondo de la trinchera de la tubería de alta presión, se dejó una tubería de PVC de 6" de diámetro, que sirve como drenaje, con salidas en los lugares más favorables de acuerdo con el terreno.

Además de la protección con las placas de cinc, se enterrarán 18 varillas de cobre de 8 pies (2.44 m) de largo y 5/8" de diámetro. Este número de varillas se determinó de forma que éstas quedarán separadas a una distancia aproximada de 30-40 m. Estas varillas van conectadas a la tubería por medio de un cable 1/0 de cobre. El cable de cobre va conectado a la varilla de cobre por medio de una mordaza; luego, éste se sujeta a la tubería, a una distancia aproximada de 3 m. Posteriormente se conectarán todas las varillas por medio de un cable de cobre continuo. Este sistema servirá como una red de tierras para brindar a la tubería una protección adecuada.

B. Protección con pintura

Para la protección de la tubería de alta presión con pintura se utilizó un recubrimiento industrial llamado *Tar-Guard (Coal Tar Epoxy)* de *Sherwin-Williams®*. Se trata de un

epóxico formulado especialmente para aplicaciones sobre superficies de acero, como tuberías de alta presión, compuertas de hidroeléctricas, etc.

Para cuantificar cuánto producto se necesitaba importar, se hizo un cálculo de la superficie exterior total de la tubería:

Tabla No 6: Superficie exterior de la tubería.

D (plg)	ESPESOR (plg)	D ext. (plg)	SUPERFICIE (m)	LONGITUD (m)	AREA SUPERFICIE (m ²)
96	0.4375	96.875	7.730	189	1461
90	0.5625	91.125	7.271	145	1054
84	0.6875	85.375	6.813	88	600
76	0.9375	77.875	6.214	228	1417

El área total por pintar es de 4,532 m²; pero, considerando un factor de desperdicio, se subió el área a 5,000 m². Se pidió una cantidad determinada de galones de pintura en un inicio. Este producto se obtiene en dos partes, componente A y B. El componente A trae cuatro galones en un contenedor de cinco galones, y el componente B trae un galón. Éstos se deben mezclar mecánicamente, antes de su aplicación. El disolvente es Xileno (R2K4) y se consiguió localmente.

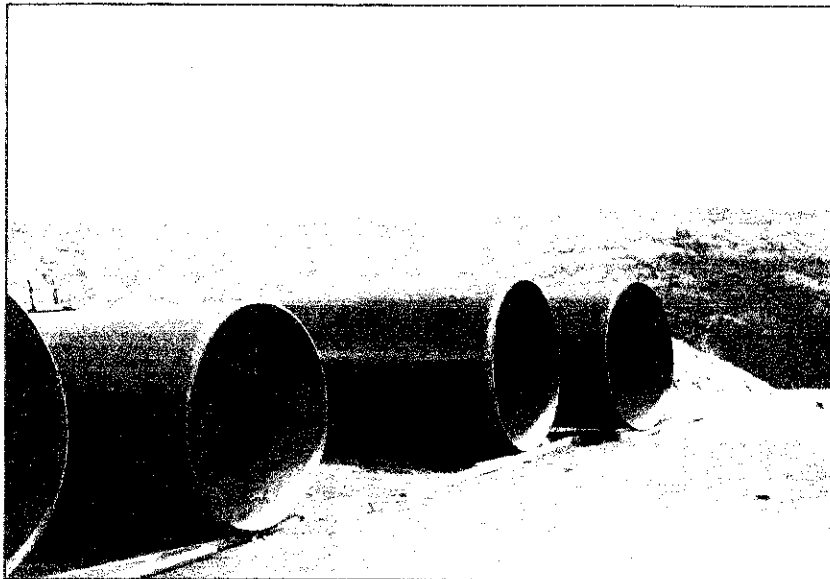


Imagen No. 11: Secciones de tubería pintadas.

Para la aplicación del *Tar-Guard* fue necesario realizar una preparación de todas las superficies metálicas por pintar. Esta preparación se hizo de acuerdo con la *Steel*

Structure Painting Council (SSPC). El tipo de preparación de la superficie de la tubería requerido fue un *sand-blast* SSPC-SP10 (metal blanco) que garantiza la adherencia del recubrimiento al sustrato. Se pudo observar, durante el proceso de *sand-blast*, que la superficie recién trabajada quedaba de color gris-blanco y libre de impurezas. Este proceso utiliza arena fina volcánica, que es depositada en un dosificador conectado a un compresor. El aire a alta presión, mezclado con las partículas de arena, corre a través de una manguera y sale por la boquilla, donde el operador lo aplica a la superficie; hay que señalar que actúa como un abrasivo muy fuerte. Es muy importante que la arena esté totalmente seca, libre de humedad. Se pudo observar que el ambiente de trabajo durante el *sand-blast* era muy severo, por lo que se protegieron los ojos y la vías respiratorias debidamente.

Inmediatamente después de que la superficie se encuentra lista, se debe aplicar el *Tar-Guard* por medio de un soplete *Airless Spray*, a una presión teórica de 3000 psi.

Entre las características más importantes del *Tar-Guard*, tenemos que se puede utilizar aceptablemente en sistemas de protección catódica como los que se mencionaron previamente⁹.

En la hoja de datos técnicos se recomienda que, en el caso de las tuberías de acero, se deje un espesor de película seca de 8 – 16 mils. Para la tubería de alta presión en el proyecto se aplicaron dos capas de 13 mils de espesor, de película húmeda, de tal forma que quedó una capa seca de 20 mils aproximadamente, es decir, con un buen factor de seguridad.

C. Protección con asfalto petrolástico

Luego que las secciones de tubería se encontraron instaladas, soldadas y radiografiadas, se procedió a aplicar una capa de asfalto petrolástico, comúnmente llamado chapopote. Este material no es chapopote normal, ya que se requiere el uso de un asfalto deshidrogenado, con alto contenido de fibra de hule. Este material servirá como una protección adicional a la tubería. Para su aplicación, el chapopote se debe calentar hasta su punto de ablandamiento (70°C a 115°C), en una caldera o en un tonel vacío (ref.15).

Debido a que la tubería se está instalando en una trinchera estrecha, se le aplicará el chapopote en la parte inferior, antes que se introduzca la sección en la trinchera. Se protegerá la banda de transporte con nylon, para que el chapopote no la dañe. Cuando se encontraron suficientes secciones pegadas y listas, se procedió a aplicar el producto en el resto de la tubería. La aplicación de este producto no es sencilla, ya que se encuentra a alta temperatura y es muy viscoso; además, la topografía es muy accidentada en la mayoría del tramo de la tubería.

⁹ Ver página No. 27.

X. INSTALACIÓN DE LA TUBERÍA DE ALTA PRESIÓN

Cuando la tubería se encuentra lista con su recubrimiento y protección, y la trinchera con todos los detalles que se mencionaron anteriormente, se procede a instalarla.

Las secciones necesarias se movilizaron por medio del cable-grúa, hasta el sitio donde iban a ser instaladas, siguiendo todas las normas de precaución para evitar accidentes y no dañar la tubería. Las secciones de tubería no se deben rodar ni arrastrar por ninguna razón; se deben colocar en la trinchera por medio de los sujetadores de lona (*slings*) en las posiciones indicadas en los planos.

Debido a que el terreno es muy accidentado, se procedió a colocar las secciones de tubería arrancando de los soportes en los cambios de dirección hacia arriba, para que éstos sirvieran de soporte y la tubería no se deslizara.

Una vez colocada la tubería dentro de la trinchera, se midió el nivel para que quedara alineada, con los ángulos adecuados indicados en los planos del perfil de la tubería. En el campo es donde se corrige la alineación por medio de gatos hidráulicos que mueven la tubería hasta su posición correcta. Cuando la tubería se halla en su lugar correcto, se procede a sujetarla por medio de puntos de soldadura, para luego aplicarle los cordones alrededor de toda la superficie en la unión.

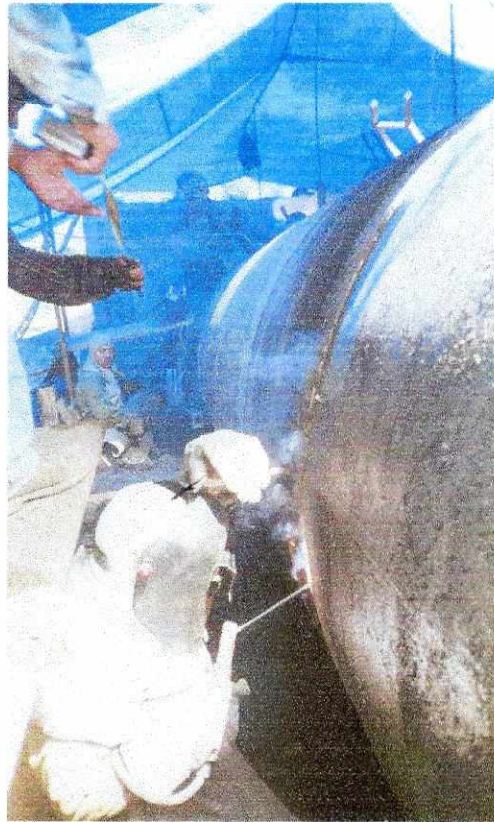


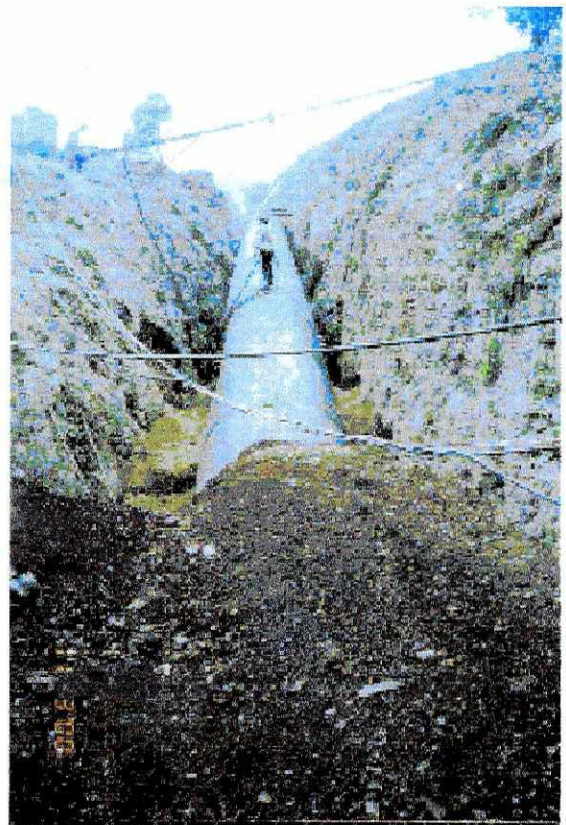
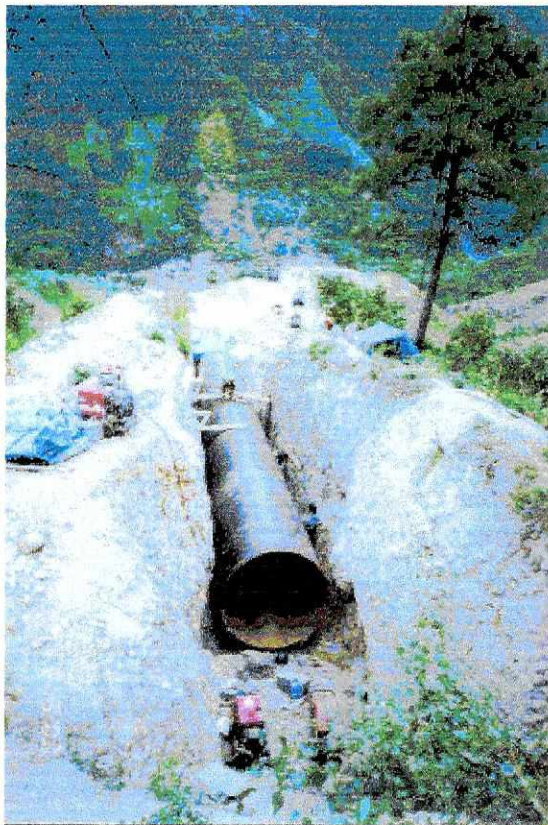
Imagen No. 12: Soldadura de tubería.

Un problema que se observó en el campo es que algunas secciones de tubería cambiaron ligeramente sus niveles luego de ser soldadas. Esto se debe a inestabilidades en el terreno (hundimientos posteriores). Aunque los niveles de error fueron pequeños, fue necesario corregirlos, ya que en el caso de una distancia larga como la de la tubería, el error se va multiplicando hasta hacerse intolerable. Un método para evitar este problema consiste en fundir soportes de concreto en el fondo de la trinchera. Estos soportes se deben fundir a distancias que se determinan con base en las características particulares del terreno. Aunque estos bloques representan un costo adicional, tienen la ventaja de asegurar que el nivel de la tubería no cambie en el futuro y previene hundimientos.

Al tener la soldadura lista, se procede a revisar su calidad por medio de una inspección radiográfica, en la cual se verifican las siguientes características del material y la soldadura:

- Falta de fusión.
- Falta de penetración.
- Inclusión o línea de escoria.
- Porosidad
- Concavidad de la raíz.
- Fisura.
- Socavado interno/externo.
- Quemada a través de la raíz.
- Desalineamiento.
- Cordón irregular.
- Penetración excesiva.

Luego de aprobar las soldaduras, se procede a aplicar chapopote en la forma que se indicó anteriormente, para luego rellenar la trinchera de la tubería.



Imágenes Nos. 12 y 13: Relleno de trincheras.

El relleno de la tubería es de suma importancia y se debe hacer en la forma indicada en el capítulo VII. La trinchera se debe rellenar en cuanto la tubería se encuentra lista, debido a que, si ésta se encuentra expuesta al los rayos solares, el acero se expande y se contrae con los cambios de temperatura. Estas expansiones y contracciones hacen que la tubería se raspe con los soportes de concreto, dañando así el recubrimiento y causando que el metal quede expuesto directamente a la acción del medio ambiente, lo cual acelera el proceso de corrosión.



Imagen No. 14: Vista aérea de la tubería, con lona de protección para los Soldadores (se observa la torre del cable-grúa).

El relleno de la tubería en la sección de las bermas se hizo con arena compactada y luego se cubrió con concreto lanzado, para darle seguimiento a las bermas. Se recomienda que este recubrimiento se moldee dándole forma de canal, para que el agua de la lluvia pueda correr sobre él sin problema.

XI. CONCLUSIONES

- Para prolongar la vida útil de la tubería se trata con un proceso de *sand-blast* y se protege con pintura y asfalto, antes de su instalación, debido a que ésta se encuentra sujeta a la acción del medio ambiente, que la puede dañar.
- El diseño de la tubería de alta presión con diferentes diámetros reduce los costos de transporte debido a que se pueden trasladar las secciones de forma anidada o *nested*. Con ello también se abrevia el tiempo de movilización de la tubería.
- Es de suma importancia realizar una tabla, con los diferentes diámetros y espesores, que muestre la cabeza que se puede alcanzar con cada sección de tubería, para que el cálculo sea ordenado y seguro.
- Para evitar focos de corrosión, se debe resguardar la tubería por medio de protección catódica, con planchas de cinc separadas a una distancia no mayor de 35 metros.
- El diseño de la tubería de alta presión es seguro, debido a que se tomaron en cuenta los valores mínimos de resistencia del acero. Además, se consideró un factor por soldadura y otro por el golpe de ariete.
- Es preferible diseñar el espesor de la tubería con base en las cargas actuantes, y luego seleccionar el método de protección adecuado para tener conocimiento de la cabeza real que el acero resiste.
- Cuando las secciones de tubería se encuentran listas en su trinchera, se deben cubrir con el relleno, para que no existan dilataciones y expansiones en el metal por los cambios de temperatura. Estas dilataciones son dañinas ya que la tubería se raspa y se daña por los movimientos.

- Debido al alto grado de seguridad que debe existir con este tipo de estructuras, se debe radiografiar cada unión soldada en todo el trayecto de la tubería.

XII. RECOMENDACIONES

- Usar los valores mínimos de resistencia del acero, para que el diseño sea lo más seguro posible.
- Realizar una gráfica de costos como la mencionada, para poder tener un rango determinado de diámetros con los cuales se puede trabajar.
- Determinar el diámetro mínimo que se puede utilizar mediante el cálculo de la velocidad máxima dentro de la tubería, para poder partir con este valor desde la casa de máquinas.
- Colocar soportes de concreto entre cada anclaje, para que la tubería guarde su nivel luego de ser instalada y evitar que en el futuro se den corrimientos.
- Sembrar grama sobre el relleno de la tubería para que el terreno se mantenga estable. Además, ésta ayuda a absorber la humedad.
- Hacer cunetas a ambos lados del relleno de la tubería, para evitar la erosión y la acumulación de agua sobre el perfil de la tubería.
- Evitar que existan piedras y objetos grandes dentro del recubrimiento de la tubería, para que no se dañe éste y eventualmente aquélla.
- Pulir todas las venas interiores circunferenciales dejadas por la soldadura de las secciones de tubería, para disminuir las pérdidas por fricción.
- Las secciones de tubería que van dentro de una estructura de concreto (anclajes, codos, etc.) no deben pintarse ni recubrirse, para que el concreto tenga mejor adherencia a la tubería.

XIII. BIBLIOGRAFÍA

Mott, Robert L. 1994. *Mecánica de Fluidos Aplicada*. 4ª ed. México, Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A. 580 págs.

Fox, Robert W; McDonald, Alan T. 1995. *Introducción a la Mecánica de Fluidos*. 4ª ed. México, McGraw-Hill Interamericana de México, S.A. de C.V. 916 págs.

Blodgett, Omer W. 1982. *Design of Welded Structures*. 12ª ed. Cleveland, The James F. Lincoln Arc Welding Foundation. Sec. 8-2.

Creager, William P, et al. 1950 *Hydroelectric Handbook*. 2ª ed. Nueva York, John Wiley & Sons, Inc. 1151 págs.

Monition, L, et al. 1984. *Micra Hydroelectric Power Stations*. Nueva York, John Wiley & Sons, Ltd. 185 págs.

Hall, David W. 1993. *Water Power 93, Proceedings of the International Conference on Hydropower* 3 vol. Nueva York, American Society of Civil Engineers. 2214 págs.

Seelye, Elwyn E. 1953. *Design*. 2ª ed. Vol 1. Nueva York, John Wiley & Sons, Ltd. 684 págs.

Creager, William, et al. 1945. *Engineering for Dams*. Nueva York, John Wiley & Sons, Ltd. 371 págs.

Torres Herrera, Francisco. 1983. *Obras Hidráulicas*. 2ª ed. México, Editorial Limusa S.A. de C.V. 294 págs.

Gallagher, Troy. 1988. *Introduction to Fluid Mechanics*. 3ª ed. Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall. 601 págs.

<Industrial and Marine Coatings> 1999. Publicación de Sherwin Williams. 4 págs.

<Datos técnicos de Asfaltos de Guatemala, S.A. Información técnica asfalto petrolástico>
2000. 34 págs.

Design Manual. 1998. Acres International Corporation. Nueva York. Sec. 3-12.

Design of Small Dams. 1987. Bureau of Reclamation. United States Department of the Interior. 3ª ed. Denver, United States Printing Office. 860 págs.

Fiberglass Pipe Design. 1996. American Water Works Association AWWA Manual M45. Denver. 159 págs.

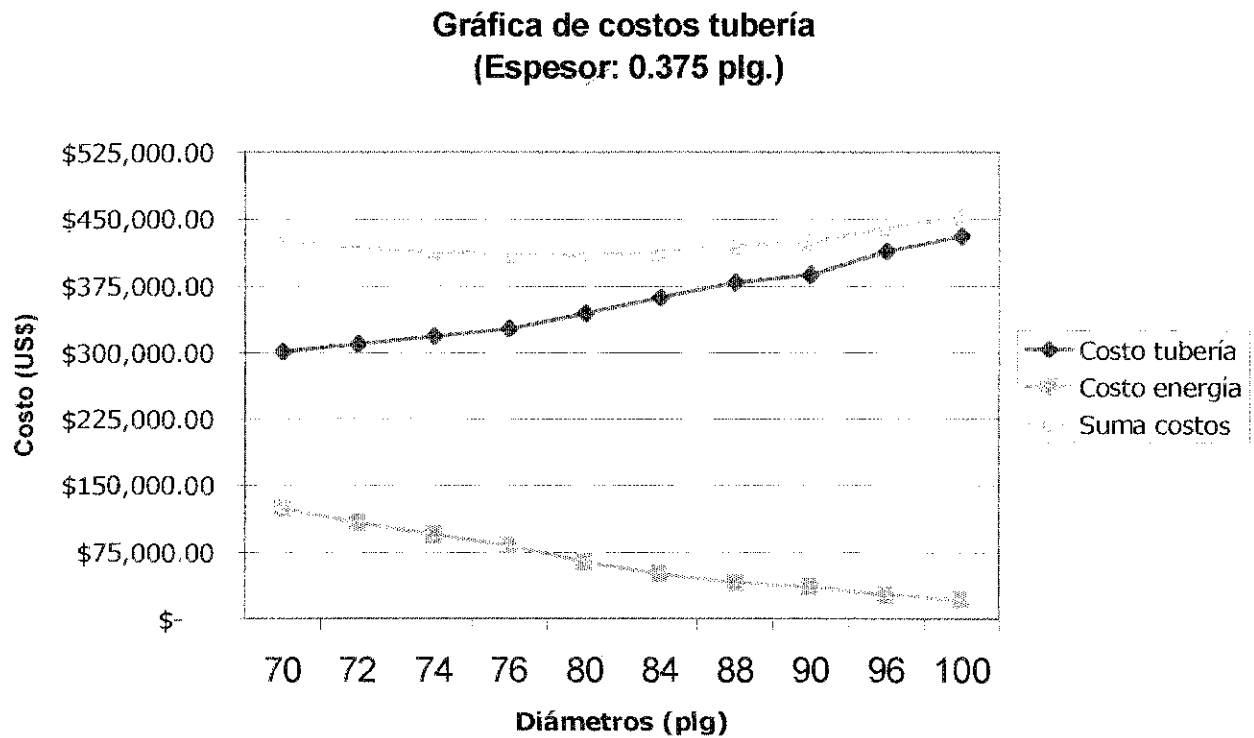
Steel Penstocks. 1993. American Society of Civil Engineers. ASCE Task Committee on Manual of Practice for Steel Penstocks. Nueva York. 432 págs.

Steel Pipe--A Guide for Design and Installation. 1989. American Water Works Association AWWA Manual M11. 3ª ed. Denver. 176 págs.

XIV. ANEXOS

Anexo No. 1

Gráfica de costos de la tubería de alta presión. Se escogió arbitrariamente un espesor de 0.375" como ejemplo. Se pueden observar los costos directos de la tubería (acero), la energía anual que se deja de producir por las pérdidas por fricción y la suma de ambos costos.



1. Cálculo de pérdidas en las rejillas de limpieza y el desviador.

Caso	AB (m ²)	V. objetos (m ³ /s)	Vt (m ³ /s)	% suciedad	Area (m ²)	R	Kc	Q (m ³ /s)	Hc (m)	V (m/s)	Vc (m/s)	Hc (m)	Vc (m/s)	Hc (m)
Desviador	11	3.658	4.572	25	6.428	0.5844	0.8456	8.4	0.0736	1.3068				0.0736
Rejas	11	3.008	3.760	25	7.240	0.6382	0.7206	8.4	0.0194	1.1602				0.0194
TOTAL														0.1230

2. Cálculo de pérdidas por fricción en la tubería (presa a túnel)

Caso	Diámetro (m)	Longitud (m)	Q (m ³ /s)	V (m/s)	C	Ke	Hc (m)	
1	96	2.4384	8.4	1.799	0.9	0.3246	0.0387	
2	96	2.4384	0.0	0.000	0.9	0.2346	0.0000	
TOTAL								0.0387

3. Pérdidas por fricción en el túnel.

Sección	Forma	Estación	Longitud (m)	Pérdida (m)
1	Herradura (con tub. de 96" int.)	0+000 - 0+082.4	82.40	0.06501
2	Circular (TBM)	0+082.4 - 0+278	195.6	0.12103
3	Herradura	0+278 - 0+421.5	143.5	0.02627
4	Circular (TBM)	0+421.5 - 2+193.0	1681.5	1.04048
5	Herradura	2+193.0 - 4+439.65	2356.65	0.43148
Total				1.68427

* Ver edulente en anexo 3A.

4. Cálculo de Pérdidas por fricción en la tubería debido a longitud.

Caso	Q (m ³ /s)	D (m)	L (m)	V (m/s)	Nve	D/L	Hf (m)
1	8.4	96	2.4384	1.799	3.814+0.52	16.256	0.01167
2	8.4	96	2.286	1.647	4.068+3.22	13.240	0.01175
3	8.4	84	2.1356	3.575	4.358+9.17	14.224	0.01181
4	8.4	76	1.9364	2.927	4.817+7.50	12.869	0.01194
TOTAL							0.0382

Constantes Tub.	túnel	tubería
Q (m ³ /s)	8.4	8.400
P (kg/m ³)	1000	densidad agua
μ (N·s/m ²)	1.15E-03	viscosidad agua
K (m)	1.59E+04	rugosidad relativa
g (m/s ²)	9.81	gravedad
Factores	1	

5. Cálculo de pérdidas por codos en la tubería

Ángulo	r/D	D (m)	A (m ²)	Q (m ³ /s)	V (m/s)	Kb	Factor	Hb (m)	est. elev.
-29.989	3	96	4.670	8.4	1.799	0.18	0.5	0.0742	7+375.692
26.799	3	96	4.670	8.4	1.799	0.18	0.37	0.0666	7+119.380
11.428	3	96	4.670	8.4	1.799	0.18	0.2	0.0059	7+167.840
-8.246	3	96	4.670	8.4	1.799	0.18	0.19	0.0056	7+223+00
-19.012	3	90	4.104	8.4	2.047	0.18	0.35	0.0134	7+347.859
26.767	3	90	4.104	8.4	2.047	0.18	0.48	0.0184	7+364.090
-20.637	3	76	2.927	8.4	2.870	0.18	0.36	0.0272	7+519.773
25.020	3	76	2.927	8.4	2.870	0.18	0.45	0.0340	7+372.210
#.REP.	3	76	2.927	8.4	2.870	0.18	0.59	0.0446	7+654.455
TOTAL									0.2345

6. Cálculo de pérdidas por contracciones en la tubería

Diámetro (mm)	V ₂ (m/s)	K _c	H _c (m)	cs	W ₂ (m/s)
1.07	2.05	0.039	0.0083	0-245.00	114.65
1.07	2.35	0.039	0.0110	0-385.00	370.37
1.11	2.87	0.048	0.0202	0-450.00	323.89
TOTAL				0.0395	

7. Resumen de pérdidas

Tipo de Pérdida	Cantidad (m)	Pérdida (m)
Rejas	8.4	0.123
Entrada	8.4	0.039
Túnel	8.4	1.684
Tubería	8.4	1.038
Codos	8.4	0.234
Contracciones	8.4	0.039
TOTAL		3.158

Anexo 3.

Cálculo de pérdidas por fricción en el Túnel

Caudal de diseño (m³/s) 8.4
 Revestimiento concreto (m) 0.28

Sección	Forma	Estación	Longitud (m)	Pérdida (m)
1	Hexágono (con cubierta de 90° inferior)	0+000 - 0+082.4	82.4	0.0650
2	Circular (FBM)	0+082.4 - 0+278	195.6	0.1210
3	Hexágono (con plano)	0+278 - 0+421.5	143.5	0.0263
4	Circular (FBM)	0+421.5 - 2+103.0	1681.5	1.0405
5	Hexágono	2+103.0 - 4+459.65	2356.65	0.4315
		Total	4459.65	1.6843

Sección 1

D (m)	D (m)	L (m)	A (m ²)	V (m/s)	V (ft/s)	Nre	D/E	f	HL (m)	Vol. Concreto (m ³)
96	2.4384	82.4	4.670	1.799	5.902	3,814,052	16.256	0.01167	0.0650	733.787

Sección 2

D (m)	D (m)	L (m)	A (m ²)	V (m/s)	V (ft/s)	Nre	D/E	f	HL (m)	Vol. Concreto (m ³)
111.417	2.670	195.6	5.599	1.500	4.922	3,483,215	4.450	0.01440	0.1210	507.573

Sección 3

L (m)	Area Tot (m ²)	WP Tot (m)	R (m)	4R	4R/e	V (m/s)	V (ft/s)	Nre	f	HL (m)	Vol. Concreto (m ³)
143.5	9.0313	10.7808	0.83772	3.3509	5.58E+03	0.9301	3.052	2.71E+06	0.01391	0.0263	651.303

Sección 4

D (m)	D (m)	L (m)	A (m ²)	V (m/s)	V (ft/s)	Nre	D/E	f	HL (m)	Vol. Concreto (m ³)
111.417	2.670	1681.5	5.599	1.500	4.922	3,483,215	4.450	0.01440	1.0405	4353.418

Sección 5

L (m)	Area Tot (m ²)	WP Tot (m)	R (m)	4R	4R/e	V (m/s)	V (ft/s)	Nre	f	HL (m)	Vol. Concreto (m ³)
2356.65	9.0313	10.7808	0.83772	3.3509	5.58E+03	0.93098657	3.052	2.71E+06	0.01391	0.43148	10696.127

Constantes

ρ (kg/m ³)	1000	Densidad agua
μ (N·s/m ²)	1.15E-03	Viscosidad agua
L (m)	1.50E-04	Rugosidad relativa acero
E (m)	6.00E-04	Rugosidad relativa concreto
g (m/s ²)	9.81	gravedad

Formulas:

Q = V x A
 $Nre = (V x D x P) / \mu$ (sección circular)
 $Nre = (V x D x P) / \mu$ (sección no circular)
 $f = 0.25 \cdot (log((1.37(D x P)) / (5.74 Nre 0.9)))^2$ (s.n.c.)
 $f = 0.25 \cdot (log((1.37(D x P)) / (5.74 Nre 0.9)))^2$ (s.n.c.)

R = AWP

HL = f / 8 (f = D) x (V² / 2g) (pérdida por longitud s.n.c.)

HL = f / 8 (L / 4R) x (V² / 2g) (pérdida por longitud s.n.c.)

