NACIONES UNIDAS

CONSEJO
ECONOMICO
Y SOCIAL

LIMITADO

ST/ECLA/CONF.7/L.2.9
10 de diciembre de 1960

ESPAÑOL
ORIGINAL: INGLES

CATALOGADO

SEMINARIO LATINOAMERICANO SOBRE ENERGIA ELECTRICA

Auspiciado por la Comisión Económica para América Latina, la Dirección de Operaciones de Asistencia Técnica y la Subdirección de Recursos y Economía de los Transportes de las Naciones Unidas, conjuntamente con el Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos

México, 31 de julio a 12 agosto 1961

LA COMBINACION DE LA CAPACIDAD GENERADORA HIDRAULICA Y TERMICA SE TRADUCE EN BENEFICIOS ECONOMICOS MAXIMOS

Por J.F. Pett

NOTA: Este texto será revisado editorialmente.

CLAVE DE LOS SIMBOLOS

(A) Central hidroeléctrica con aprovechamiento del caudal de pasada

(B) Central hidroeléctrica con almacenamiento para regulación

(C) Central hidroeléctrica con almacenamiento para reserva

(D) Reserva almacenada expresada en millones de metros cúbicos

(E) Potencia primaria del caudal de pasada

(F) Potencia primaria regulada

(G) Potencia primaria

(H) Curvas de duración de la potencia

(I) Tasa hidráulica en kW/metros cúbicos/segundo

(J-1) Período expresado en meses

(J-2) Período expresado en horas

(J-3) Período expresado en porcentaje de tiempo

(K) Carga

(K-1) Curva de carga - Diaria

(K-2) Curva de carga - Estacional

(K-3) Curva de carga - Anual

(L) Punta de carga = Carga horaria máxima del período

(M) Total de energía generada durante el período

(N) Energía no utilizable en carga

(O) Caudal procedente del almacenamiento regulador

(P) Caudal afluyente al almacenamiento regulador

(Q) Capacidad de carga

(R) Plan de desarrollo

(S) "Curvas de carga estacional

Planes alternativos de desarrollo

Central hidroeléctrica única

Curvas de duración de la potencia y curvas de carga"

(T) Proyectos con almacenamiento estacional de reserva

(U) Capacidad instalada térmica

(V) Factores de carga críticos

(V-1) Factor de carga crítico - Diario

(V-2) Factor de carga crítico - Estacional

INDICE

1. Introducción

1. Introducción

La literatura técnica abunda en estudios sobre las diversas fases de la economía de los sistemas de energía eléctrica. Sin embargo, parece existir un desconocimiento general acerca de los beneficios que se pueden obtener de la combinación adecuada de la capacidad generadora hidroeléctrica y térmica en la explotación de los sistemas de energía, ignorancia que no alcanza, naturalmente, a los ingenieros especializados.

A menudo se encuentran artículos en publicaciones profanas, que afirman dogmáticamente que resulta más barata la energía generada por centrales hidroeléctricas que por centrales térmicas. Casi siempre se analiza el tema como un problema de "hidroelectricidad versus termoelectricidad". El objetivo de este trabajo es poner de relieve que tanto la capacidad generadora hidráulica como la térmica desempeñan una determinada función dentro de un sistema de energía bien planeado.

2. Planeamiento de sistemas de aprovechamiento

El objetivo del planeamiento de sistemas de aprovechamiento, desde el punto de vista profesional, es garantizar la disponibilidad de una capacidad conveniente para conducir las cargas previstas con un costo total mínimo a largo plazo. El planeamiento deba contemplar también el empleo máximo de los recursos naturales de la zona, en la medida que las condiciones económicas lo aconsejen. Entre estos recursos naturales se incluyen por ejemplo, el potencial hidroeléctrico, los yacimientos de carbón y petróleo, el gas natural, el potencial humano y las instalaciones fabriles. Pero no debe olvidarse que el objetivo fundamental es proporcionar el servicio necesario a un costo mínimo.

3. Comparación de las magnitudes de la capacidad generadora hidráulica y térmica

En los artículos no técnicos donde se analiza la "hidroelectricidad versus la termoelectricidad", a menudo se destaca la importancia que reviste el tamaño de algunos de los proyectos hidroeléctricos planeados o de reciente construcción, y se da a entender que en países como Estados Unidos y la URSS predomina o está próxima a serlo, la capacidad generadora hidroeléctrica. Las estadísticas disponibles indican que sucede todo lo contrario.

/A fines

A fines de 1959, la capacidad instalada en los Estados Unidos era de 157 millones de kW, de los cuales 31 millones de kW, o sea, el 20 por ciento, eran producidos mediante generación hidráulica. De acuerdo con los cálculos que aparecen en Electrical World (septiembre 19, 1960), se están haciendo los estudios pertinentes para aumentar la capacidad instalada, durante el período comprendido entre 1960-65, en más o menos 75 millones de kW, de los cuales 10 millones de kW (13 por ciento) serán de generación hidráulica. La Autoridad del Valle del Tennessee (ATV) es considerada con razón un sistema hidroeléctrico extraordinario, no obstante que dos tercios de su capacidad generadora, más de 10 millones de kW, provienen de unidades térmicas.

Podría pensarse que los países menos adelantados tendrían un porcentaje superior de capacidad hidroeléctrica al de Estados Unidos. Las cifras disponibles sobre la energía en la URSS indican que en 1958 sólo alrededor del 20 por ciento de la capacidad instalada era producida por generación hidráulica. En la URSS se construyen en la actualidad, o están en vía de planeamiento proyectos hidroeléctricos de gran tamaño, pero de los 60 millones de kW suplementarios cuya instalación está planeada para 1965, sólo alrededor del 18 por ciento será producido por generación hidráulica.

No se dispone de datos globales comparativos para todos los países de América Latina, pero el American and Foreign Power System tenía en 1958 una capacidad instalada total en América Latina de 1.5 millones de kW, de los cuales el 36 por ciento era de generación hidráulica y el 64 por ciento de generación térmica.

Se observa que aunque existen muchos grandes proyectos hidroeléctricos en explotación a través del mundo, no aparece una tendencia general hacia el predominio de la capacidad generadora hidráulica. No obstante esta circunstancia, existe la tendencia en numerosas zonas de potencial hidráulico inexplotado, a olvidar o ignorar el hecho, ya comprobado en las regiones que están en una etapa superior del proceso de desarrollo, de que la combinación de la capacidad generadora hidráulica y térmica casi siempre se traduce en el máximo de beneficios económicos para la zona.

/4. Necesidad

4. Necesidad de hacer un análisis detenido de las alternativas

Las cifras anteriores no han sido expuestas con el fin de demostrar que la generación de energía térmica es mejor que la generación de energía hidráulica. En ciertas zonas que carecen completamente de recursos hidráulicos, la energía térmica es la única solución en la actualidad. Otras zonas cuentan con un potencial hidroeléctrico extraordinario, pero las fuentes abastecedoras de combustible están ubicadas a gran distancia y el transporte del mismo resulta excesivamente costoso. En estas zonas la capacidad instalada será, durante muchos años, de tipo hidráulico. Sin embargo, en la mayor parte de las regiones del mundo, y, especialmente, en la mayoría de los países de América Latina, la elección entre generación hidráulica y generación térmica no es clara. No hay una regla general que pueda aplicarse a cualquier época o lugar para establecer si la energía hidráulica es más barata que la energía térmica, o viceversa.

5. Posibles alternativas

Cada vez que se propone el aumento de la capacidad de un sistema, es imprescindible considerar todas las alternativas razonables de generación de energía por medios térmicos o hidráulicos. Generalmente se presentan muchas alternativas posibles. Por ejemplo, podría existir la posibilidad de considerar varios emplazamientos hidráulicos. Incluso habría varias alternativas de explotación para un emplazamiento hidráulico que aparece, evidentemente, como superior. Lo mismo sucede respecto a la generación térmica, provenga ésta de centrales a vapor, de motor diesel o de combustible nuclear. Es imperativo considerar también, de acuerdo a las condiciones inmediatas y futuras de explotación, si es preferible instalar una central para la atención de la carga fundamental o para la carga máxima.

Por otro lado, no basta con determinar la prioridad de la alternativa más conveniente por la etapa inmediata. En el análisis económico del sistema debe considerarse la forma en que la elección de la alternativa influye en el desarrollo planeado a largo plazo.

Por ejemplo, si se determina que para el aumento inmediato de la capacidad generadora es necesario introducir un aprovechamiento hidráulico, el análisis debe contemplar las suficientes proyecciones futuras que faciliten

/la determinación

la determinación de la propiedad del diseño del proyecto hidroeléctrico, que aparece como el más conveniente para la etapa siguiente, en el sentido de la conservación de sus ventajas al combinarse con aumentos futuros de la capacidad, sea ésta de tipo térmico o hidráulico. Sin duda alguna, cuando la elección inmediata recae sobre una capacidad de tipo térmico, es necesario aplicar estos mismos principios y hacer el mismo análisis en los planeamientos futuros.

Un programa de sistemas de aprovechamiento consiste, por lo general, en un esquema provisorio de los aumentos sucesivos de capacidad, etapa por etapa, durante un período de 5 a 10 años, o aún mayor. El análisis económico completo debe incluir la comparación de los costos de las secuencias alternativas de los aumentos de capacidad. En otras palabras, no se trata de comparar, desde el punto de vista económico, una central o unidad con otra central o unidad alternativa, sino un programa de aumentos sucesivos de capacidad con uno o varios programas alternativos. En la mayoría de los casos, en estos programas se incluyen los mismos proyectos, dispuestos en diferente orden de instalación. El reconocimiento de las ventajas que presenta la combinación de la capacidad generadora térmica e hidráulica es importante para la consideración realista de programas comparativos de tipo alterno.

6. Factores que deben considerarse en el análisis económico

Los factores más importantes son, por su evidencia, los costos. Aquí se incluyen el costo del capital invertido en la central y el costo de su explotación y conservación, más las correspondientes instalaciones de transmisión y de subestaciones. Conviene expresar estos costos sobre una base anual. El costo comparativo anual resulta de la suma de los "cargos fijos" sobre la nueva inversión de capital necesaria para la realización del programa, además del costo anual de explotación y conservación. Si la comparación abarca varios años y aparece una diferencia notoria entre los costos, hay que determinar el "valor actual" de los programas alternativos. Se emplea esta terminología, no muy adecuada, para expresar la necesidad de actualizar el valor de los gastos calculados en una fecha determinada, recomendándose como la más conveniente la del año inicial

/de la

de la comparación, única manera de cotejar efectivamente el costo real de los programas alternativos.

Otros factores importantes son las características de la carga, incluyendo la tasa anual de crecimiento, el tipo de carga del sistema (diario, estacional o anual) y la forma de la curva de carga, es decir, sus variaciones horarias, diarias y estacionales en relación a la carga anual máxima por hora.

Es muy importante evaluar las características físicas de los aumentos alternativos de la capacidad. En los sistemas para aprovechamiento de potencia hidráulica, estas características incluyen las fluctuaciones del caudal, las posibilidades de almacenamiento de regulación diaria y de reserva, y las posibilidades alternativas del diseño de proyectos.

El método más económico y conveniente de suministrar generación térmica depende del tipo y magnitud de la carga y del costo de transporte del combustible. A continuación se indican los tipos de centrales térmicas, solas o en combinación con otras, o combinadas con centrales hidroeléctricas, que representan posibles alternativas que deben ser estudiadas con detenimiento antes de tomar una decisión final.

a) Presión-temperatura alta, con equipo generador accionado por turbina a vapor de alta eficiencia.
b) Presión-temperatura mediana, con unidades generadoras accionadas por turbinas a vapor para atender "puntas de carga".
c) Turbinas a gas, regeneradoras o de ciclo simple.
d) Motor diesel de baja velocidad, para servicio pesado.
e) Unidad generadora accionada a motor diesel, de alta velocidad, fijo o movible.

Es fácil darse cuenta de la necesidad de hacer un estudio acucioso y, frecuentemente, cansador, de todos los programas alternativos que se ofrecen como los más convenientes, antes de inclinarse por aquel que presenta mayores ventajas.

/7. Efecto

7. Efecto de la capacidad térmica adicional sobre el aprovechamiento de un recurso hidráulico

El ejemplo siguiente muestra cómo puede aprovecharse en forma más completa y económica el potencial de un emplazamiento hidráulico marginal de tamaño mediano, cuando se ha planeado en combinación con una capacidad térmica adicional. Es obvio que no se pueden lograr economías similares para todos los emplazamientos hidráulicos. Sin embargo, las ventajas económicas indicadas en este caso particular son suficientemente típicas de los resultados obtenidos en estudios similares como para sugerir que vale la pena analizar los efectos de la capacidad térmica adicional.

Las cifras sobre la capacidad y los cálculos de costo empleados en el ejemplo siguiente, fueron adaptados, con modificaciones leves, de una reciente investigación preliminar sobre un proyecto de instalación de una central hidroeléctrica de tamaño mediano, como complemento de un sistema de generación exclusivamente térmico.

Este proyecto hidroeléctrico aprovecha una altura de caída de 135 m y la altura de la presa de derivación depende del almacenamiento necesario para la regulación diaria. El río arrastra una gran cantidad de piedras y arena durante la estación de las crecidas y es probable que sea necesario construir un desarenador. Se han estudiado varias disposiciones alternativas. La que aquí se analiza es la de una central hidroeléctrica subterránea. Un conducto de aducción vertical de 2.75 m de diámetro interno unirá la bocatoma con la casa de máquinas subterránea. La descarga volverá al río a través de un túnel de escape de libre escurrimiento y de 2.8 km de largo y 4.5 m de diámetro interno. El acceso a la central se hará a través de un túnel inclinado. Los cables de energía saldrán del túnel de acceso a un patio de distribución ubicado en la cercanía de la boca del túnel. Probablemente la instalación consistirá de 4 generadores de 12 500 kW accionados por turbinas verticales Francis. La línea de transmisión recorre una distancia de 150 km hasta el centro de consumo.

Entre las otras disposiciones consideradas se contempla una central montada totalmente en la superficie y una central combinada, con parte en la superficie y subterráneo. La elección final de una de las tres centrales dependerá de los resultados de las nuevas exploraciones subterráneas

/y del

y del análisis minucioso de los costos.

Para los fines del presente documento, se ha hecho el análisis del proyecto sin tener en cuenta las características del sistema de interconexión. En el gráfico I se representa la capacidad obtenible del proyecto propuesto, para cuatro proyectos alternativos de aprovechamiento y considerando que el proyecto funcionará independientemente de otras fuentes de abastecimiento de energía, es decir, como una nueva fuente energética para atender un nuevo consumo.

El gráfico que aparece en la esquina superior izquierda del gráfico I representa una curva de duración de la potencia para el año crítico de caudal mínimo. La energía primaria mínima crítica, que determina la capacidad de carga del proyecto, aparece indicada en el gráfico a través de cuatro planes de aprovechamiento de los proyectos, a saber:

A - Proyecto de caudal de pasada, sin almacenamiento para reserva ni para regulación.

B - Plan de almacenamiento para regulación diaria.

C - Plan de almacenamiento para reserva - Volumen utilizable de 80 millones de m^3.

D - Plan de almacenamiento para reserva - Volumen utilizable de 180 millones de m^3.

Los cuatro gráficos restantes representan las curvas de carga para períodos críticos de cada uno de los planes anteriores. En cada curva la carga horaria máxima es igual a la capacidad del proyecto, capacidad instalada que se supone igual a la capacidad de atención de la central.

Los gráficos 1-A y 1-B indican las curvas de carga diaria, con un factor de carga del 65 por ciento. Para el proyecto que aprovecha el caudal de pasada y el plan de almacenamiento de regulación diaria, la capacidad firme está determinada por el caudal disponible en el día de intensidad mínima. En el plan 1-A sin regulación, la capacidad firme equivale a la potencia mínima, que, para este proyecto, es de 6 750 kW (5.0 metros cúbicos/seg a una altura de caída de 168 m). En el plan 1-B, con regulación diaria, la capacidad firme está determinada por la energía total disponible en el día de caudal mínimo, empleado en las diversas cargas horarias de ese día. La energía primaria es algo superior a la del plan 1-A, debido a la mayor

/altura de

altura de caída que se produce a causa de la presa de mayor altura que se necesita para obtener almacenamiento de regulación necesario. La energía primaria es de 7 200 kW y la capacidad del proyecto es 7 200 ÷ 0.65 = 11 000 kW.

Ambos planes se traducen en proyectos muy pequeños, en un aprovechamiento ínfimo del recurso disponible y en un alto costo por kW de capacidad. Las cifras más importantes para los cuatro planes aparecen en el cuadro 1.

El almacenamiento estacional aumentará apreciablemente la capacidad del proyecto. La topografía del proyecto verdadero, de donde se han adaptado estos ejemplos, no favorece un gran almacenamiento en la presa de derivación. No obstante, aproximadamente 20 kms río arriba existe un emplazamiento apropiado de almacenamiento, y entre los objetivos de nuestro estudio se considera el aprovechamiento de este sitio para los fines de almacenamiento. No se toma en consideración la capacidad adicional que se puede instalar en la presa de almacenamiento, en los siguientes casos:

En el gráfico de duración de la energía del gráfico I se muestra la potencia primaria estacional regulada para dos hipótesis respecto de la cantidad de almacenamiento suministrado susceptible de utilización, 80 y 180 millones de m^3.

El gráfico 1-C representa una curva de duración de carga estacional para la hipótesis de un almacenamiento de 80 millones de m^3. La potencia primaria es de 28 800 kW y la capacidad de carga, con un factor de carga estacional de 52 por ciento, es de 55 000 kW.

El gráfico 1-D representa una curva de carga similar para el almacenamiento de 180 millones de m^3, traducido en una capacidad de 80 000 kW.

Las cifras correspondientes a la capacidad y costo de estos planes aparecen en la tabulación del cuadro 1.

Los principios ilustrados por el gráfico I son de fácil comprensión y los cuatro planes se presentan exclusivamente con el propósito de servir de base para el ejemplo siguiente, el cual se refiere a la medida en que se puede mejorar cada uno de los planes mediante la combinación del proyecto hidráulico con capacidad térmica complementaria.

Los gráficos II, III, IV, V muestran los resultados que se obtienen al combinar 50 000 kW de capacidad térmica con los recursos hidráulicos de cada uno de los planes de aprovechamiento descritos en el gráfico I.

/También se

También se indican en el cuadro 1 los costos y capacidades comparativos. La cantidad de capacidad térmica de 50 000 kW se eligió en forma arbitraria. Es evidente que la cantidad más ventajosa debería ser diferente para cada uno de los cuatro planes hidráulicos.

El gráfico II muestra el proyecto hidráulico puro que aprovecha el caudal de pasada, como aparece en el gráfico I, y también en combinación con 50 000 kW de potencia procedente de fuentes térmicas. La única ventaja que presenta para la energía hidráulica su combinación con la térmica es el empleo de una mayor cantidad de la potencia hidroeléctrica disponible para atender la mayor carga. Incluso si la capacidad hidroeléctrica instalada se limita a 6 750 kW, el costo de producción hidroeléctrica por kWh se reduce aproximadamente en un 50 por ciento. Si se duplica o triplica la capacidad instalada, no aumenta la capacidad del sistema combinado bajo condiciones mínimas de agua, pero la cantidad de energía hidráulica utilizable aumenta y disminuye aún más el costo de producción por kWh. Mediante el estudio correspondiente se determinaría el tamaño de la instalación hidroeléctrica, que se traduce en un costo mínimo de energía por kWh, producida por la combinación de generación hidroeléctrica y térmica.

En el gráfico III se compara el proyecto de almacenamiento de regulación con y sin capacidad térmica complementaria que aparece en el gráfico 1-B. Si el almacenamiento de regulación es suficiente, se puede aumentar la cantidad de capacidad hidráulica justificable de 11 000 kW sin capacidad térmica adicional a 28 000 kW con capacidad térmica adicional. El costo unitario de generación hidráulica instalado disminuye de 695 dólares por kW para 11 000 kW, a 411 dólares por kW para 28 000 kW. El costo del aumento de la capacidad hidroeléctrica en 17 000 kW es de 3 850 000 dólares, lo que representa 226 dólares por kW. La energía total disponible en el proyecto más pequeño es de 94 millones de kWh, de los cuales sólo se podrían emplear 48 millones en la atención de una carga de 11 000 kW. El proyecto de mayores dimensiones podría producir 225 millones de kWh, utilizables totalmente en carga, en combinación con producción térmica.

El costo de producción hidráulica por kWh es de 0.0192 dólares, en tanto que al combinarlo con producción térmica es sólo de 0.0063 dólares. Ahora, el costo de producción combinado es 0.0109 dólares por kWh.

/El gráfico

El gráfico IV representa el proyecto 1-C con un almacenamiento de 80 millones de metros cúbicos, con y sin capacidad térmica complementaria. En este caso, la capacidad firme hidráulica aumenta de 55 000 a 80 000 kW debido a la adición de una fuente térmica. El costo por kW de capacidad hidráulica disminuye de 429 a 377 dólares por kW. El costo de producción hidroeléctrica utilizable disminuye de 0.0119 a 0.0076 dólares por kWh, y el costo de producción de energía combinada es de 0.0100 dólares por kWh.

El gráfico V es similar al gráfico IV, excepto que el almacenamiento aumenta desde 80 a 180 millones de metros cúbicos. La capacidad hidráulica a firme aumenta de 80 000 a 107 000 kW. El costo por kW instalado disminuye de 405 a 370 dólares por kW. El costo de producción de la hidroelectricidad disminuye de 0.0112 a 0.0088 dólares por kWh, y el costo de producción conjunta de hidroelectricidad y termoelectricidad es de 0.0106 dólares por kWh.

En resumen, las posibilidades de aprovechamiento de este emplazamiento hidráulico son mucho mayores y el costo unitario de producción resulta menor, si se le explota en combinación con una capacidad térmica. Como podrá apreciarse, el proyecto que más se beneficia con esto es aquel que no consulta almacenamiento. Esto se debe a que, en cierta medida, el almacenamiento y la capacidad térmica desempeñan la misma función de estabilizar la capacidad hidráulica en períodos de escasos de agua.

	Capacidad hidráulica firme y costo por kW instalado		Costo del aumento de la capacidad de una central hidroeléctrica
Proyecto	Hidráulica	Hidráulica y térmica	dólares por kW
Pequeño almacenamiento para regulación, sin almacenamiento de reserva	11 Mw a $695	28 Mw a $411	$222
Almacenamiento para reserva			
80 000 000 c.m.	55 Mw a $429	80 Mw a $377	$264
180 000 000 c.m.	80 Mw a $405	107 Mw a $370	$266

Entre paréntesis, es necesario proceder a un nuevo análisis a fin de determinar la cantidad más económica de almacenamiento de cada uno de los proyectos anteriores. Este análisis debe basarse en cálculos más acuciosos

/del costo

del costo del embalse y debe tener en cuenta la capacidad y la energía a obtener de una central hidráulica suplementaria que utilice la altura de caída disponible en la presa de almacenamiento.

Vale la pena señalar que estos proyectos no representan proposiciones alternativas para satisfacer determinadas necesidades de capacidad, ya que la capacidad de cada proyecto es muy diferente. Se exponen con el objeto de mostrar, mediante las comparaciones que aparecen en los gráficos II, III, IV y V que cada uno de los proyectos de aprovechamiento hidráulico podría mejorar grandemente si se consulta combinarlos con aquéllos de capacidad térmica.

En un caso real, en que las alternativas que se estudian para la complementación de un sistema son "totalmente hidráulicas versus hidráulico-térmicas", las conclusiones dependen en gran medida de cinco factores, a saber:

a) La magnitud relativa del proyecto hidráulico en relación a las necesidades de carga del sistema.
b) Si el sistema existente es predominantemente hidráulico o térmico.
c) El monto del costo inicial de construcción del proyecto hidráulico en relación al costo definitivo, considerando que la instalación total se realice por etapas.
d) El costo del combustible para las centrales térmicas.
e) La magnitud del año mínimo de capacidad hidráulica firme en relación a la producción media de energía hidráulica.

Estos son los factores aritméticos principales que conducen, de una u otra manera, a la determinación que se adopte. Como se indica más adelante, hay otras consideraciones que pueden tener gran influencia sobre las conclusiones finales, aunque no todas ellas son susceptibles de un análisis matemático.

Los resultados de las comparaciones anteriores sólo tienen validez si se consideran los diversos costos - mencionados anteriormente - de construcción, cargos fijos, explotación y conservación. El monto relativo de los diversos elementos del costo variarán de acuerdo al tiempo, lugar y tipo del trabajo.

En el caso de un estudio concreto, sería conveniente determinar qué

/combinación de

combinación de energía hidráulica almacenada y de energía térmica se traduce en la estabilización más económica de la capacidad hidráulica, estableciendo, en seguida, la proporción óptima de esta energía suplementaria entre la producción basada en la energía hidráulica almacenada y en la energía térmica.

Otro ejemplo excelente de los beneficios que se obtienen de la combinación de la capacidad hidráulica y térmica es un proyecto dotado de una altura de caída de 275 metros, estudiado recientemente. Está ubicado a gran distancia de cualquier zona de grandes consumos. El pequeño curso de agua que alimenta al sistema tiene muy poco caudal durante los tres o cuatro meses de la estación seca. Probablemente una vez cada cinco años el caudal mínimo alcanza a 3.5 metros cúbicos/seg. Sólo es posible suministrar, a un elevado costo, el almacenamiento para regulación semanal que permitiría aumentar el caudal mínimo utilizable a 4.7 metros cúbicos/seg, equivalente, a una energía primaria de 10 300 kW. La naturaleza del terreno impide el almacenamiento estacional a un costo bajo. Si este proyecto se explota independientemente de otras fuentes de energía para atender un consumo con un factor de carga de 68 por ciento, tendría una capacidad de 15 200 kW.

A una distancia de transmisión de 130 km existe una zona de consumo atendida por un sistema exclusivamente térmico, cuya carga de atención en 1965 deberá alcanzar a 90 000 kW. No existen emplazamientos hidráulicos importantes ubicados a menor distancia del señalado anteriormente. Se tiene el propósito de aprovechar este sitio para atender la zona de gran consumo y aquéllas otras de consumos menores ubicadas en las cercanías del proyecto.

En combinación con la capacidad térmica actual del sistema, el proyecto hidráulico puede trabajar en la punta de carga con un factor de carga de aproximadamente 25 por ciento y una capacidad firme en el año más seco de 38 000 kW. El costo calculado, incluyendo las instalaciones para transmisión, es de 13 millones de dólares, equivalentes a 342 dólares por kW de capacidad firme. Esto se equipara a un costo calculado de 7 500 000 dólares para una central de 15 000 kW (500 dólares por kW) que es la instalación máxima que se justificaría en el presente si la central se explotara independientemente de la gran capacidad y carga térmica actuales.

Otra circunstancia de gran valor es que el abastecimiento medio de

/agua con

agua con que cuenta la central hidroeléctrica es mucho mayor que el caudal mínimo de la estación seca. La instalación proyectada de 38 000 kW contaría con agua suficiente para funcionar, al máximo de su capacidad, en forma ininterrumpida durante 6 meses en el año promedio y su factor de planta para este año sería aproximadamente del 80 por ciento. Debido al tamaño del sistema térmico al cual sería interconectado, la producción hidroeléctrica total sería utilizable en carga tan pronto como la central entrara en servicio.

Otro caso que se puede citar como ejemplo de la forma en que la capacidad térmica contribuye al empleo máximo de un recurso hidráulico, es el de la central hidroeléctrica de 36 000 kW que, primitivamente, formaba parte de un sistema totalmente hidroeléctrico con una capacidad total instalada de alrededor de 45 000 kW. Debido a la acumulación de sedimento en el estanque de almacenamiento de esta central y a la derivación de los caudales desde algunas de las otras centrales, la capacidad firme de esta planta se ha visto reducida al 53 por ciento de la capacidad instalada. Introducciones sucesivas de capacidad térmica han estabilizado su capacidad, durante la estación seca, al 100 por ciento de su capacidad instalada. La mayor capacidad de carga resultante de estos aumentos sucesivos permite ahora el empleo de un gran bloque de energía hidráulica de la estación lluviosa, que antes no se utilizaba para reemplazar la generación termoeléctrica durante dicha estación.

Otro caso digno de considerarse es el de un sistema pequeño totalmente hidráulico formado por tres centrales con posibilidades muy limitadas de almacenamiento de regulación. Las características del caudal son tales que, bajo condiciones de estiaje extremo durante varios meses del año, la capacidad segura era alrededor del 60 por ciento de la capacidad instalada. La instalación sucesiva de capacidad diesel ha hecho que resulte económica la reconstrucción de la central hidroeléctrica más pequeña (casi anticipada) cuya instalación primitiva era de 1 200 kW y una capacidad firme de más o menos 500 kW. Una vez terminada la reconstrucción, esta central tendrá una capacidad firme de 3 000 kW y la capacidad durante el estiaje será igual a la capacidad instalada total.

El desenvolvimiento de los sistemas de energía a través del mundo se

/ha ceñido,

ha ceñido, por lo general, a una modalidad similar. Al comienzo, cuando las centrales eran accionadas por fuerza hidráulica, eran pequeñas en razón del volumen también pequeño de los consumos. En lo posible se las instalaba cerca de los centros de consumo con el objeto de disminuir los costos de transmisión y, por lo general, utilizaban los mejores emplazamientos disponibles, no siendo raro el solo aprovechamiento de la parte óptima de emplazamientos potencialmente mayores. Tan pronto como se hicieron necesarias cantidades superiores de energía, la provisión de emplazamientos hidráulicos baratos cerca de los centros de consumo terminó por agotarse. Las alternativas eran emplear emplazamientos hidráulicos más caros, capaces de producir cantidades mayores de electricidad que las requeridas por el consumo, o recurrir a plantas térmicas más pequeñas. Es indudable que la última alternativa resultaba ventajosa en la mayoría de los casos en esta etapa del desarrollo, porque estabilizaba la capacidad hidráulica actual, permitía la absorción de la energía hidráulica que anteriormente era de importancia secundaria y facilitaba la conservación de los recursos financieros del sistema de energía que, con frecuencia, eran bastante limitados.

En algunos lugares, por carencia de pequeños emplazamientos hidráulicos favorables, se eliminaba la primera etapa de la modalidad mencionada. Las primitivas centrales instaladas en esas regiones eran de tipo térmico, y, a menudo, estaban aisladas y eran accionadas a motor diesel.

Los nuevos aumentos de los consumos, la ampliación de las zonas de servicio y la interconexión gradual de los sistemas contribuyeron a infundirles atractivo a emplazamientos hidráulicos que anteriormente se consideraban demasiado grandes o lejanos o exigían la inversión de cuantiosos recursos financieros. A medida que se ampliaban los sistemas, se multiplicaron las alternativas que podían considerarse para las etapas sucesivas de ampliación. Fue posible introducir mayores economías. En esta etapa, la elección entre energía hidráulica y térmica se basaba en las condiciones individuales que regían para cada caso. Con frecuencia sucedía que una compañía estuviese levantando centrales hidroeléctricas y térmicas, por considerar que esa combinación ofrecía ventajas desde el punto de vista económico.

Todavía existen muchas regiones donde las necesidades de energía no son lo suficientemente grandes como para justificar el gasto inicial que

/exige la

exige la instalación de un proyecto hidráulico importante que, en último término, será de bajo costo. En estas zonas se obtienen grandes ventajas de la instalación de una capacidad térmica provisoria, porque permite conservar el total de los recursos naturales, especialmente si la instalación térmica complementa la capacidad hidráulica existente.

8. Otros factores que deben considerarse en el planeamiento del sistema

Existen, además, varios otros factores, de los cuales la totalidad o parte debe tenerse en cuenta en cada estudio en particular, y que no han sido considerados en los ejemplos simplificados anteriores. Entre éstos se pueden citar:

a) Consultar una capacidad de reserva para interrupciones accidentales y programadas.

b) Un mercado para la energía secundaria.

c) No coincidencia de la punta de carga del sistema con la capacidad hidráulica mínima. (Diversidad de carga-caudal.)

d) La frecuencia con que se presentan los años críticos de aguas bajas.

e) El empleo de la capacidad térmica en resguardo de la posibilidad de que se presenten de vez en cuando años con un caudal inferior al empleado como base del diseño del proyecto hidráulico.

f) División de los costos entre desembolsos nacionales y extranjeros.

g) Probabilidades futuras de interconexión de sistemas de energía.

h) Programación de la explotación de las unidades térmicas a fin de que la producción total del sistema resulte más eficiente.

i) Programación del aprovechamiento del agua almacenada en los años en que el caudal es superior al caudal mínimo.

j) La disponibilidad de recursos financieros limitados.

k) Disponibilidad de divisas extranjeras para la importación de la provisión de combustible, actual y futura.

l) Los efectos de la inflación sobre las comparaciones de costos.

No pueden dejar de considerarse, al comparar la capacidad hidráulica con la capacidad hidráulica combinada con la térmica, los factores enumerados del a) al e) y los del j) y k).

/9. Conclusiones

9. Conclusiones

Se presentan situaciones en que la elección de la próxima etapa importante en la expansión de la capacidad de un sistema es evidente, o, a lo sumo, requiere comparar unas cuantas alternativas simples. Pero con mayor frecuencia, la selección exige un análisis detenido de los diversos programas alternativos, ya que en cada programa se consultan sucesivas introducciones de capacidad durante un período de 10 años o más. Varios factores deben considerarse, entre los cuales se cuentan los costos, las características de la carga, los tipos de central, el diseño y disposición interna de la planta, los problemas de explotación y conservación, y las consideraciones de orden financiero que el ingeniero no puede ignorar.

El objetivo del planeamiento de la explotación de un sistema debería ser el aprovechamiento máximo de los recursos naturales de una zona, pero sólo en el grado en que aquél encuadre dentro de la economía general. Es posible que el dinero necesario para el desarrollo de la energía tenga igual importancia para el desarrollo de otros recursos naturales. Para cualquier proyecto hidroeléctrico concreto existe una determinada capacidad instalada que se traducirá en un costo unitario mínimo por unidad producida. Como se señala en los ejemplos analizados en este documento, cuando se desarrolla un proyecto hidroeléctrico para su explotación conjunta con una central térmica complementaria, la capacidad hidroeléctrica instalada, que se traducirá en la economía total máxima, será mayor que si se planea dicho desarrollo hidráulico independientemente, y el costo por unidad de energía hidroeléctrica y por unidad de energía producida por el sistema será menor.

Aunque el análisis indique que las etapas sucesivas de introducción de capacidad en el futuro deberían ser hidráulicas, es de todas maneras conveniente determinar en qué medida el diseño del proyecto actual debería contemplar la futura materialización de las ventajas de la probable capacidad térmica suplementaria final.

La historia del desenvolvimiento de la energía a través del mundo y el desarrollo previsible de mejores fuentes de energía térmica y de una mayor eficiencia en la explotación de las centrales, sólo permiten concluir

/que en

que en la mayoría de los sistemas predominará, en última instancia, la energía térmica.

Por tanto, se recomienda primero no considerar jamás que la hidroelectricidad y la termoelectricidad son alternativas que se excluyen mutuamente, y, segundo, que la planificación del desarrollo hidráulico deberá incluir el estudio de los beneficios adicionales provenientes del proyecto hidroeléctrico debido a la instalación de capacidad térmica suplementaria.

RESUMEN

El objetivo de este documento es poner de relieve las ventajas que se pueden obtener a través de la combinación de energía térmica e hidroeléctrica en el desarrollo de un sistema energético.

Las estadísticas disponibles en países altamente desarrollados señalan que la capacidad generadora hidráulica, al igual que la térmica, desempeñan una función determinada dentro de un sistema de energía bien planeado.

Como se señala en este documento, es muy importante considerar en el programa de desarrollo de un sistema la pauta de las introducciones sucesivas de capacidad adicional en los planes alternativos para un período de diez años o más, a fin de hacer una comparación real desde el punto de vista económico.

Otros factores que deben tomarse en consideración al hacer un análisis económico del problema son la inversión del capital necesario, la tasa de interés, el costo de explotación y conservación de la planta generadora y de las instalaciones anexas, y, también, las características del consumo.

Es necesario, asimismo, evaluar las características físicas de las diversas alternativas, es decir, considerar en la generación de energía hidroeléctrica las distintas posibilidades de caudal y de almacenamiento para regulación y reserva, y para el caso de la energía térmica, la ubicación, capacidad y tipo de maquinaria motriz.

En este documento se expone, por otra parte, la forma de aprovechar mejor un emplazamiento hidráulico cuando se planea en combinación con capacidad térmica. Para hacerlo, se ha adaptado una investigación hidráulica realizada recientemente y que demuestra con claridad las variaciones ya mencionadas.

El gráfico I indica la capacidad obtenible de cada tipo de proyecto hidráulico que funciona independientemente, en tanto que los gráficos II, III, IV y V señalan esta misma capacidad en combinación con una capacidad térmica de 50 Mw.

Aunque no se dan las tabulaciones del costo comparativo de las diversas alternativas basadas en los gastos de año en año, se analiza el método en este documento.

/Los puntos

Los puntos mencionados se abordan con mayor amplitud en el presente documento y contienen suficientes datos de costo como para fundamentar el argumento en favor de la consideración de instalaciones generadoras térmicas en combinación con capacidad hidráulica en un programa general de explotación energética.

Cuadro 1

COMPARACION O ALTERNATIVA DE LOS EFECTOS DE COMBINAR DIFERENTES PROYECTOS HIDRAULICOS CON CAPACIDAD TERMICA. COSTO COMPARATIVO POR UNIDAD PRODUCIDA

		Unidad	Sólo hidráulica				Hidráulica y térmica			
							Capacidad térmica 50 Mw con punta de carga 40 Mw de carga ordinaria			
			Plan con aprovechamiento del caudal de pasada	Plan con almacenamiento para regulación	Planes con almacenamiento para reserva		Plan con aprovechamiento del caudal de pasada	Plan con almacenamiento para regulación	Planes con almacenamiento para reserva	
			1-A	1-B	1-C	1-D	2-A	2-B	2-C	2-D
	Proyecto									
1	Capacidad de almacenamiento para regulación	millones m^3	0	0.06	0.30	0.44	0	0.24	0.69	0.86
2	Capacidad de almacenamiento para reserva	" "	0	0	80	180.0	0	0	80	180
3	Altura de la presa	m	10	22	22	22	10	22	22	22
4	Altura media de caída	m	169	180	180	180	169	180	180	180
5	Tasa hidráulica (8 x 4)	kW/cms	1 350	1 440	1 440	1 440	1 350	1 440	1 440	1 440
6	Caudal mínimo regulado	cms	5.0	5.0	20.0	29.0	5.0	5.0	20.0	29.0
7	Potencia hidráulica primaria regulada (5 x 6)	kW	6 750	7 200	28 800	41 700	6 750	7 200	28 800	41 700
8	Factor de carga crítico para la determinación de la capacidad	%	-	65.0	52.0	52.0	-	65.0	52.0	52.0
9	Capacidad firme de punta de carga hidráulica y térmica	kW	6 750	11 000	55 000	80 000	56 750	78 000	130 000	157 000
10	Capacidad hidráulica que se requiere instalar	kW	6 750	11 000	55 000	80 000	6 750	28 000	80 000	107 000
11	Energía hidráulica disponible en el año promedio	millones kWh	59.2	94.0	376.0	488.0	59.2	225.0	488.0	555.0
12	Energía generada anualmente en el año de carga horaria máxima igual a la capacidad del sistema -									
13	Energía hidráulica aprovechable	" "	29.6	48.2	242.0	352.0	59.2	225.0	488.0	555.0
14	Energía térmica	" "	-	-	-	-	189.3	117.0	82.0	133.0
15	(con un factor de carga del 50 por ciento) Total	" "	29.6	48.2	242.0	352.0	248.5	342.0	570.0	688.0
16	**Costo calculado del proyecto y costo por kW**									
17	Central hidroeléctrica (incluída la transmisión y el almacenamiento para reserva)	1 000 dólares	6 700	7 650	23 600	32 400	6 700	11 500	30 200	39 600
18	Costo por kW instalado	dólares/kW	992	695	429	405	992	411	377	370
19	Central térmica (220 dólares por kW)	1 000 dólares	-	-	-	-	11 000	11 000	11 000	11 000
20	Total hidroeléctrico y térmico	1 000 dólares	-	-	-	-	17 700	22 500	41 200	50 600
21	Costo por kW (hidroeléctrico y térmico)	dólares/kW	-	-	-	-	312	288	317	322
22	**Costo medio anual de generación**									
23	Energía hidroeléctrica - Gastos fijos anuales (11.2%)	1 000 dólares	755	860	2 650	3 640	755	1 295	3 400	4 450
24	- Explotación y conservación	1 000 dólares	50	65	225	310	50	120	310	410
25	Total	1 000 dólares	805	925	2 875	3 950	805	1 415	3 710	4 860
26	Costo de producción por kWh	dólares/kWh	0.0272	0.0192	0.0119	0.0112	0.0136	0.0063	0.0076	0.0088
27	Energía térmica - Gastos fijos anuales (11.4%)	1 000 dólares	-	-	-	-	1 255	1 255	1 255	1 255
28	- Explotación y conservación (0.0090 dólares/kWh)	1 000 dólares	-	-	-	-	1 700	1 050	735	1 195
29	Total	1 000 dólares	-	-	-	-	2 955	2 305	1 990	2 450
30	Costo de producción por kWh	dólares/kWh	-	-	-	-	0.0156	0.0197	0.0243	0.0184
31	Costo total de generación de energía hidroeléctrica y térmica	1 000 dólares	-	-	-	-	3 760	3 720	5 700	7 310
32	Costo de producción por kWh	dólares/kWh	-	-	-	-	0.0151	0.0109	0.0100	0.0106

FIGURE I

GRAFICO I

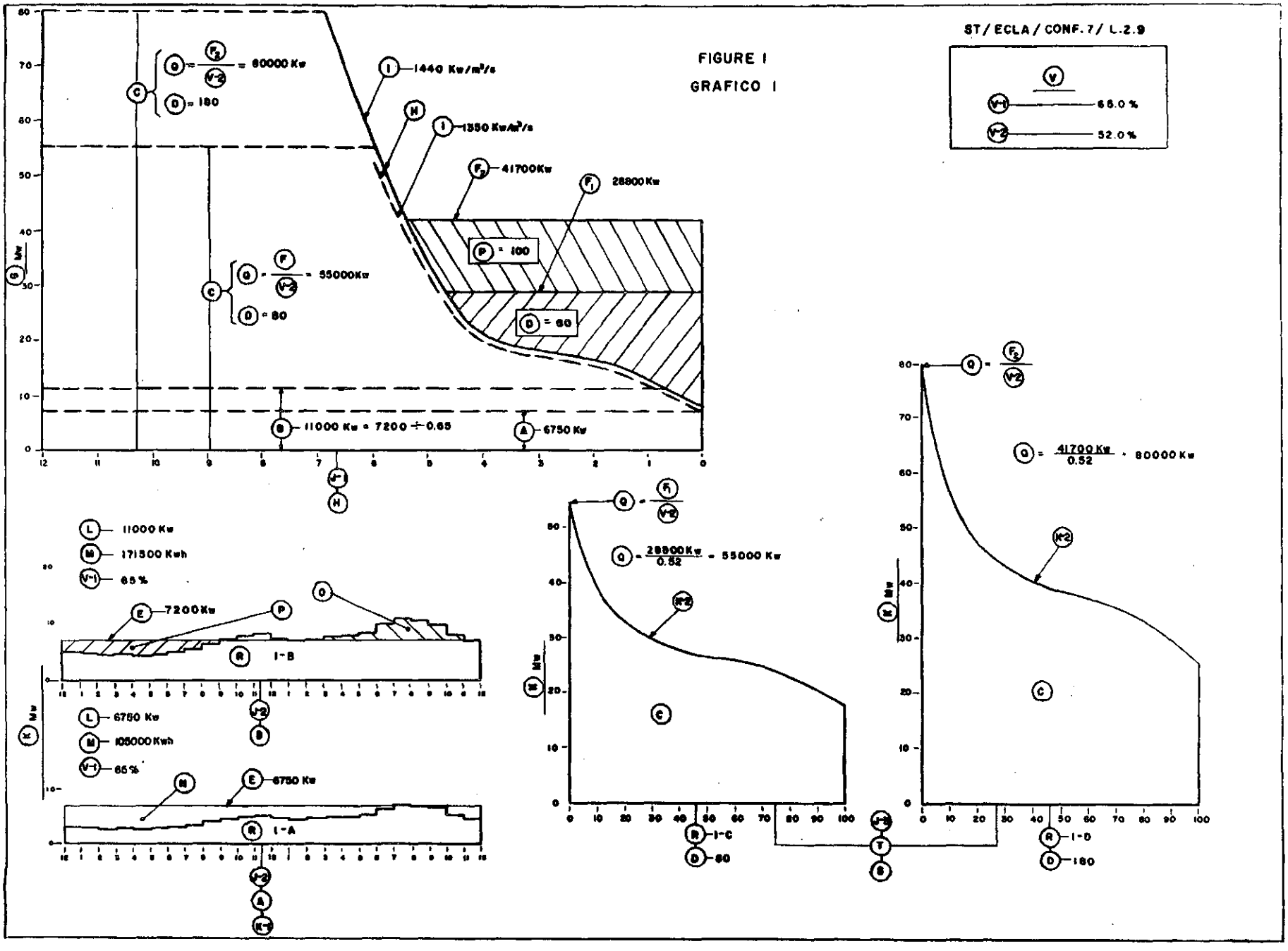

FIGURE II

GRAFICO II

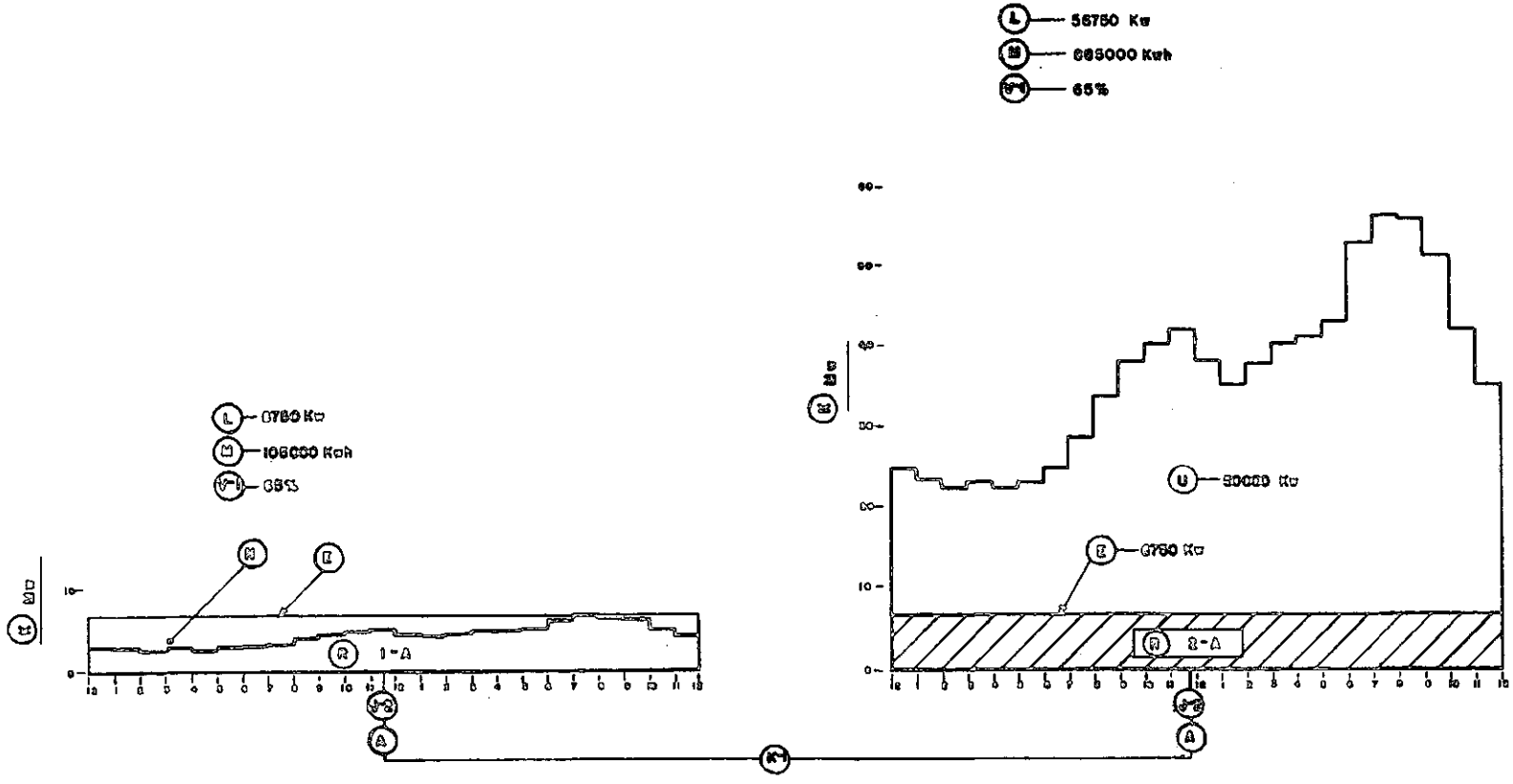

FIGURE III

GRAFICO III

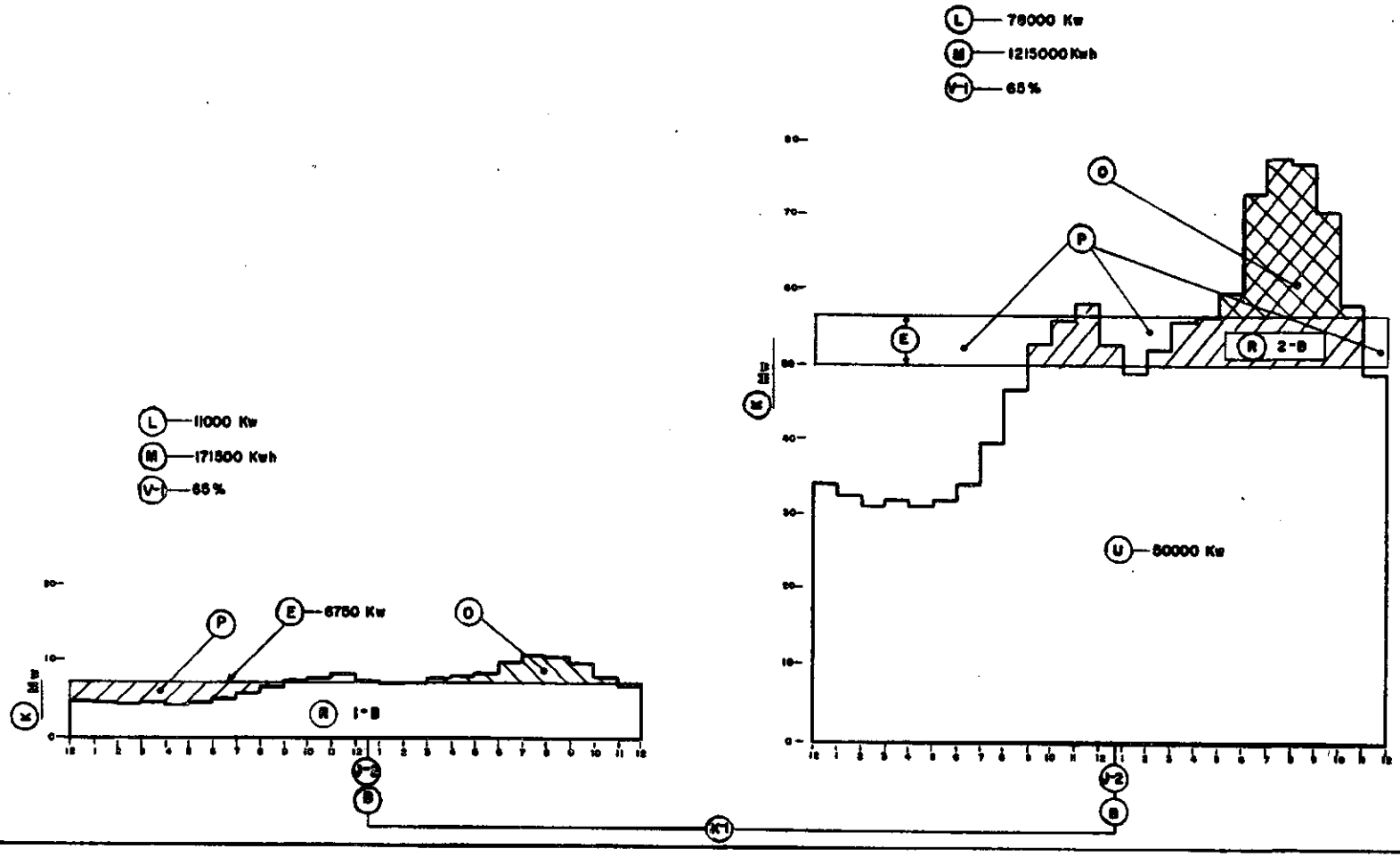

FIGURE IV

GRAFICO IV

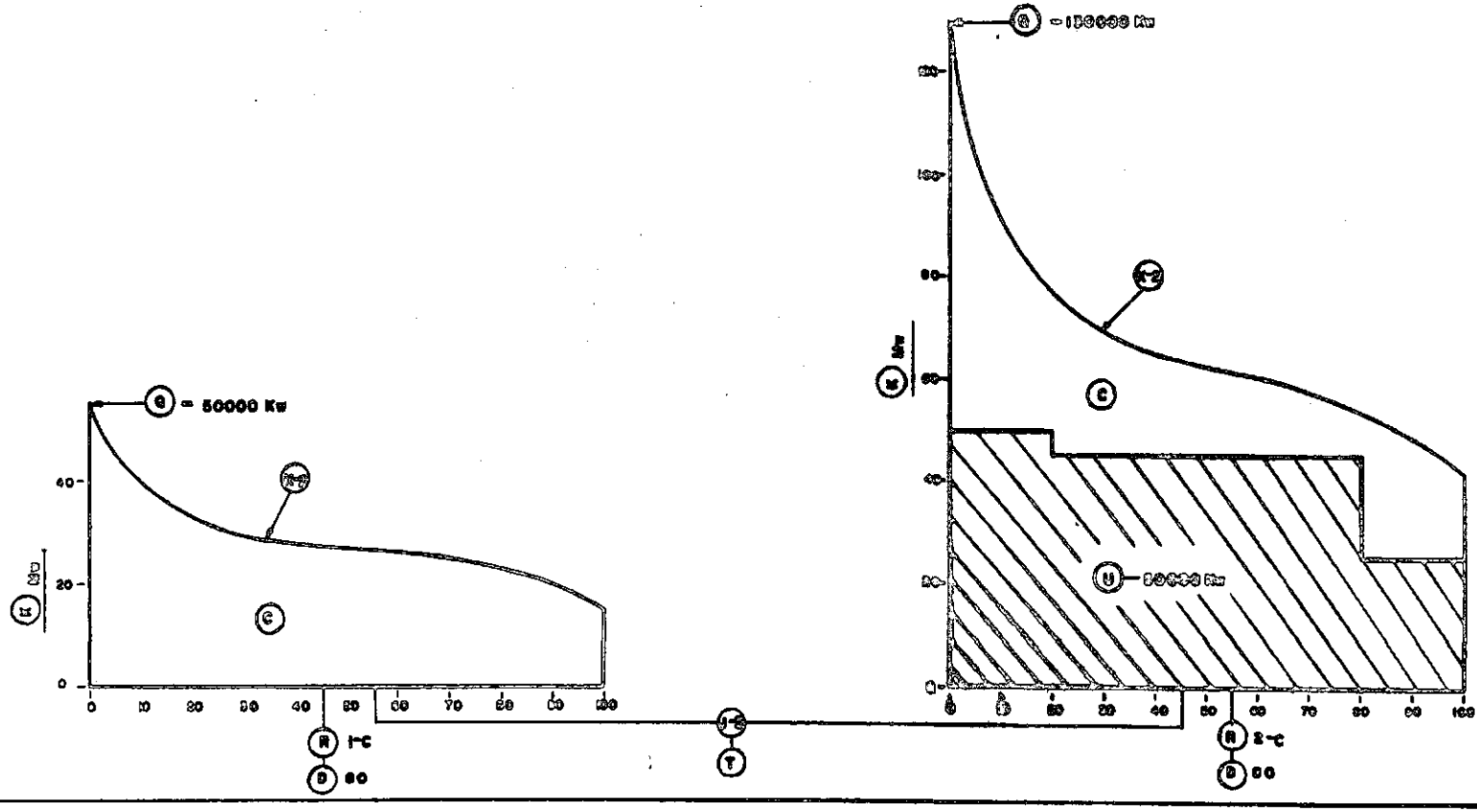

FIGURE V

GRAFICO V